

AVALIAÇÃO DE SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS DE MÓDULOS DE UNIDADES SANITÁRIAS APLICANDO O MÉTODO AHP

Wesley Valmir Cordeiro Dalpra

Dissertação de Mestrado apresentada à
Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança
para obtenção do **Grau de Mestre em Engenharia Civil**
no âmbito da **Dupla Diplomação** com a
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – *Campus* Curitiba

Orientadores:

Professor Doutor Rui Alexandre Figueiredo de Oliveira (ESTiG – IPB)

Professor Doutor Carlos Alberto da Costa (UTFPR – *Campus* Curitiba)

Bragança
Julho de 2026

AVALIAÇÃO DE SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS DE MÓDULOS DE UNIDADES SANITÁRIAS APLICANDO O MÉTODO AHP

Wesley Valmir Cordeiro Dalpra

Dissertação para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Civil**

**Bragança
Julho de 2026**

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por me conceder forças, sabedoria e coragem ao longo desta caminhada, permitindo que eu vivenciasse oportunidades tão especiais e transformadoras.

À minha mãe, Roseli, deixo a minha mais profunda gratidão por todo o amor, apoio e incentivo incondicional. Obrigado por sempre acreditar em mim e me incentivar a correr atrás dos meus sonhos e nunca deixar de orar por mim.

À minha amiga Sarah Elizama, o deixo meu profundo agradecimento por ter compartilhado comigo uma parte importante desta jornada. Ao longo dos anos, seu apoio, incentivo e confiança foram essenciais para que eu enfrentasse os desafios da graduação e do mestrado com mais coragem e determinação. Sou grato por toda a contribuição que teve na construção desta conquista e por tudo o que representou durante esse período da minha vida.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Rui Alexandre Figueiredo de Oliveira, agradeço pela orientação, paciência e conhecimentos compartilhados. Ao meu coorientador, Prof. Dr. Carlos Alberto da Costa, agradeço o suporte as contribuições ao longo deste trabalho.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Curitiba e ao Instituto Politécnico de Bragança, em particular à Escola Superior de Tecnologia e Gestão. Agradeço a oportunidade de participar do programa de Dupla Diplomação, experiência que contribuiu significativamente para o meu crescimento acadêmico e pessoal.

À professora Helena Akemi e ao Arthur Medeiros, agradeço a amizade, apoio, ensinamentos e incentivo ao longo desta trajetória acadêmica.

Ao meu amigo Kaio Macrina, agradeço o apoio, incentivo e companheirismo durante este último ano de estudos.

Aos amigos da Dupla Diplomação, especialmente Giovani Rossa e José Lucas, agradeço a parceria, ajuda e pelos momentos compartilhados.

Aos meus amigos em Portugal, Alex Ferreira, Dayana e João Mendes, agradeço o acolhimento, amizade e apoio nos momentos em que pensei que não conseguiria continuar.

Um agradecimento especial à minha avó Ladi, pelas palavras de incentivo, carinho e por sempre acreditar em mim.

À minha família, ao meu pai e às minhas irmãs, Mari, Joseli e Hellen, agradeço o apoio, carinho e por fazerem parte desta caminhada. Também aos meus queridos amigos Sara e Juventino, partes da minha família e que foram muito importantes nessa trajetória.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste sonho e desta importante etapa da minha vida.

RESUMO

A construção modular tem-se consolidado como uma alternativa relevante aos sistemas construtivos tradicionais, especialmente em função da necessidade de maior racionalização produtiva, redução de prazos, controlo de custos e mitigação dos impactos ambientais no setor da construção civil. Nesse contexto, as unidades sanitárias modulares destacam-se pela elevada complexidade de execução e pelo potencial de industrialização, permitindo maior padronização, controlo de qualidade e eficiência produtiva.

Inserido nesse cenário, o presente trabalho aborda a aplicação da construção modular no desenvolvimento de unidades sanitárias industrializadas, pretendendo responder à seguinte questão central: quais sistemas construtivos apresentam melhor desempenho global quando avaliados sob múltiplos critérios técnicos, comerciais e ambientais. A pesquisa fundamenta-se na necessidade de métodos estruturados de apoio à decisão que auxiliem projetistas e gestores na seleção do sistema construtivo mais adequado para aplicações modulares, considerando simultaneamente diferentes dimensões de desempenho.

O objetivo geral da investigação consiste em avaliar e hierarquizar sistemas construtivos aplicáveis à produção modular off-site de unidades sanitárias por meio de uma abordagem multicritério. Como objetivos específicos, destacam-se a identificação dos principais sistemas construtivos utilizados na construção modular, a definição e fundamentação dos critérios e subcritérios de avaliação, a construção de uma base de dados qualitativa das alternativas e a aplicação de um método multicritério de apoio à decisão. Metodologicamente, a pesquisa caracteriza-se como aplicada, de abordagem quantitativa e natureza descritiva, adotando o método *Analytic Hierarchy Process* (AHP) como instrumento de análise. O problema decisório foi estruturado em níveis hierárquicos compostos por objetivo, critérios, subcritérios e alternativas construtivas, sendo realizadas comparações pareadas com base na escala fundamental proposta por Saaty. O processo incluiu a construção de bases qualitativas e quantitativas, a verificação da consistência dos julgamentos e a integração dos pesos obtidos para determinação do ranking final das alternativas analisadas.

Os resultados indicaram melhor desempenho global para os sistemas construtivos leves e industrializados, com destaque para o *Wood Frame*, seguido pelos sistemas Aço Leve (LSF) e madeira engenheirada (CLT/GLT). O desempenho superior dessas soluções esteve associado principalmente à elevada racionalização produtiva, à eficiência logística e ao melhor desempenho ambiental quando comparados aos sistemas baseados em Aço Estrutural e Betão Leve. Os resultados demonstram ainda que a aplicação do método AHP permitiu integrar critérios técnicos, comerciais e ambientais de forma estruturada e consistente, contribuindo para a comparação e hierarquização das alternativas construtivas no contexto da produção modular off-site de unidades sanitárias.

Palavras-chave: construção modular, construção industrializada, unidades sanitárias modulares, AHP, métodos multicritério, sistemas construtivos.

ABSTRACT

Modular construction has become a relevant alternative to traditional construction systems, particularly due to the increasing demand for greater production rationalization, shorter construction times, cost control, and mitigation of environmental impacts in the construction sector. In this context, modular bathroom units stand out because of their high execution complexity and industrialization potential, allowing greater standardization, quality control, and production efficiency.

Within this scenario, the present study addresses the application of modular construction in the development of industrialized bathroom units, seeking to answer the following central question: which construction systems present the best overall performance when evaluated under multiple technical, commercial, and environmental criteria. The research is justified by the need for structured decision-support methods capable of assisting designers and managers in selecting the most appropriate construction system for modular applications while simultaneously considering different performance dimensions.

The general objective of this research is to evaluate and rank construction systems applicable to the off-site modular production of bathroom units through a multicriteria approach. The specific objectives include identifying the main construction systems used in modular construction, defining and supporting the evaluation criteria and subcriteria, building a qualitative database of the alternatives, and applying a multicriteria decision-support method. Methodologically, the research is characterized as applied, quantitative, and descriptive, adopting the Analytic Hierarchy Process (AHP) as the analytical instrument. The decision problem was structured into hierarchical levels composed of objectives, criteria, subcriteria, and construction alternatives, with pairwise comparisons performed based on Saaty's fundamental scale. The process included the construction of qualitative and quantitative databases, verification of judgment consistency, and integration of the obtained weights to determine the final ranking of the analyzed alternatives.

The results indicated superior overall performance for lightweight and industrialized construction systems, especially *Wood Frame*, followed by light steel framing (LSF) and CLT/GLT systems. The superior performance of these solutions was mainly associated with higher production rationalization, logistical efficiency, and better environmental performance when compared to systems based on structural steel and lightweight concrete. The results also demonstrate that the application of the AHP method enabled the structured and consistent integration of technical, commercial, and environmental criteria, contributing to the comparison and ranking of construction alternatives in the context of off-site modular bathroom unit production.

Keywords: modular construction; industrialized construction; modular bathroom units; AHP; multicriteria methods; construction systems; sustainability.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO	iv
ABSTRACT	v
ÍNDICE	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE TABELAS	x
LISTA DE ABREVIATURAS	xi
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Contexto	1
1.2 Objetivos do Trabalho	2
1.2.1 Objetivo geral	2
1.2.2 Objetivo específico.....	2
1.3 Metodologia de Investigação.....	2
1.4 Estrutura do Trabalho	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 Construção Industrializada	4
2.1.1 Introdução à construção industrializada	4
2.1.2 Conceitos fundamentais.....	4
2.1.3 Tecnologias e sistemas industrializados	5
2.1.4 Processos produtivos	7
2.2 Construção Modular	8
2.2.1 Conceitos e definições	8
2.2.2 Evolução histórica	10
2.2.3 Tendências atuais e perspectivas futuras	12
2.2.4 Vantagens, desvantagens e condicionantes	13
2.2.5 Limitações e condicionantes arquitetónicas	15
2.2.6 Sustentabilidade e ciclo de vida.....	15
2.2.7 Tipologias modulares	17
2.2.8 Materiais e acabamentos.....	20
2.2.9 Aplicações da construção modular	22
2.3 Unidade Sanitária Modular	24
2.3.1 Definições e conceitos	24
2.3.2 Qualidade e controlo de produção	25
2.3.3 Dimensões, opções construtivas e variantes	26

2.3.4	Acabamentos	29
2.3.5	Condicionantes	30
2.3.6	Exemplo de aplicação de casas de banho modulares.....	32
2.4	Métodos de Avaliação de Sistemas Construtivos.....	33
2.4.1	Avaliação de desempenho na construção	33
2.4.2	Métodos multicritério (MCDM).....	34
2.4.3	Método AHP (<i>Analytic Hierarchy Process</i>).....	35
2.5	Critérios de Seleção das Soluções Construtivas	39
2.5.1	Critérios técnicos de seleção.....	39
2.5.2	Critérios comerciais de seleção	41
2.5.3	Critérios de impacto ambiental	42
3	METODOLOGIA DE INVESTIGAÇÃO	44
3.1	Contexto da Metodologia de Investigação	44
3.2	Estudo Comparativo de Sistemas Construtivos Utilizando a Metodologia AHP.....	46
3.2.1	Sistemas construtivos analisados.....	47
3.2.2	Seleção e fundamentação dos critérios de avaliação	47
3.2.3	Construção da base de dados qualitativa dos subcritérios	49
3.2.4	Construção da base de dados qualitativa das alternativas.....	54
3.2.5	Conversão da base de dados qualitativa para a escala de Saaty	55
3.2.6	Hierarquização dos critérios e subcritérios.....	56
3.2.7	Construção das matrizes e obtenção dos pesos.....	59
3.2.8	Procedimento de agregação e obtenção do ranking final	61
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	63
4.1	Base de Dados Qualitativa	63
4.1.1	Caracterização qualitativa dos sistemas construtivos	63
4.1.2	Base qualitativa estruturada.....	68
4.2	Conversão da Base Qualitativa para a Escala de Saaty	69
4.3	Pesos dos Grupos de Critérios.....	70
4.4	Pesos dos Subcritérios	72
4.4.1	Critérios técnicos	72
4.4.2	Critérios comerciais.....	73
4.4.3	Critérios de impacto ambiental.....	74
4.5	Integração dos Pesos e Determinação dos Pesos Globais dos Subcritérios.....	75
4.6	Relação entre as Alternativas e os Subcritérios.....	77
4.6.1	Critérios técnicos	77
4.6.2	Critérios comerciais.....	79
4.6.3	Critérios ambientais.....	81

4.7	Verificação da Consistência das Matrizes	82
4.8	Integração dos Resultados e Obtenção do Ranking Final	84
4.9	Discussão dos Resultados por Sistema Construtivo	85
4.9.1	<i>Wood Frame</i>	86
4.9.2	Aço Leve (LSF)	87
4.9.3	CLT / GLT	87
4.9.4	Aço Estrutural	88
4.9.5	Betão Leve	89
4.10	Comparação de Resultados entre os Diferentes Sistemas Construtivos	89
4.11	Síntese Crítica e Validação dos Objetivos do Estudo	90
5	CONCLUSÕES	93
5.1	Principais Conclusões	93
5.2	Limitações do Estudo	95
5.3	Futuras Linhas de Investigação	95
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97
	ANEXOS	106
	Anexo I – Planilhas de cálculo do método AHP	106
	Anexo I.1 – Cálculo dos pesos dos grupos de critérios	106
	Anexo I.2 – Cálculo dos pesos dos subcritérios técnicos	107
	Anexo I.3 – Cálculo dos pesos dos subcritérios comerciais	108
	Anexo I.4 – Cálculo dos pesos dos subcritérios ambientais	109
	Anexo I.5 – Cálculo dos pesos locais das alternativas para o subcritério transportabilidade	110
	Anexo I.6 – Cálculo dos pesos locais das alternativas para o subcritério conectividade	110
	Anexo I.7 – Cálculo dos pesos locais das alternativas para o subcritério manutenção	111
	Anexo I.8 – Cálculo dos pesos locais das alternativas para o subcritério compatibilidade construtiva	111
	Anexo I.9 – Cálculo dos pesos locais das alternativas para o subcritério custo de produção	112
	Anexo I.10 – Cálculo dos pesos locais das alternativas para o subcritério tempo de produção off-site	112
	Anexo I.11 – Cálculo dos pesos locais das alternativas para o subcritério assistência técnica	113
	Anexo I.12 – Cálculo dos pesos locais das alternativas para o subcritério consumo de energia	113
	Anexo I.13 – Cálculo dos pesos locais das alternativas para o subcritério consumo de água	114
	Anexo I.14 – Cálculo dos pesos locais das alternativas para o subcritério geração de resíduos	114
	Anexo I.15 – Cálculo dos pesos globais e ranking final das alternativas	115

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Sistema construtivo em painéis do tipo <i>Wood Frame</i>	6
Figura 2: Sistema construtivo com painéis pré-fabricados de betão.	6
Figura 3: Instalação de módulo volumétrico pré-fabricado em construção modular	7
Figura 4: Linha de produção de sistemas construtivos industrializados	8
Figura 6: Integração de componentes em unidade modular volumétrica	9
Figura 7: Compatibilização digital de módulo volumétrico em ambiente BIM	9
Figura 8: Casa Colonial Portátil para Emigrantes de Herbert Manning.....	11
Figura 9: Habitações pré-fabricadas utilizadas na reconstrução do pós-guerra	11
Figura 10: Representação digital de edifício aplicada ao conceito de Digital Twin	12
Figura 11: Instalação de módulos volumétricos em sistema construtivo industrializado	13
Figura 12: Produção industrializada de módulos volumétricos em ambiente fabril	14
Figura 13: Repetição e padronização de módulos volumétricos na construção modular.....	15
Figura 14: Reutilização de edifícios, módulos e componentes na construção modular	17
Figura 15: Construção Modular Volumétrica.....	18
Figura 16: Construção Modular em Painéis	19
Figura 17: Exemplo de fachada gerada por modelação paramétrica.....	19
Figura 18: Sistema de construção modular híbrida.	20
Figura 19: Composição construtiva de sistema leve industrializado em steel frame	21
Figura 20: Composição construtiva de sistema leve industrializado em <i>Wood Frame</i>	21
Figura 21: Ilustração da Construção do Marriott AC Hotel em Nova Iorque	22
Figura 22: Exemplo de unidade sanitária modular completamente finalizada em ambiente fabril.....	25
Figura 23: Ensaio de pressão e verificação hidráulica em módulo sanitário industrializado	26
Figura 24: Exemplo de camadas construtivas e materiais utilizados em painéis industrializados em <i>Light Steel Frame</i> (LSF).....	27
Figura 25: Exemplo de unidade sanitária modular standard	28
Figura 26: Unidade sanitária modular técnica especializada produzida em ambiente fabril	29
Figura 27: Unidade sanitária modular com acabamento premium.....	29
Figura 28: Composição construtiva e acabamentos de casa de banho modular industrializada.....	30
Figura 29: Esquema técnico de integração de sistemas em casa de banho modular	31
Figura 30: Unidades sanitárias modulares destinadas a aplicações hospitalares.....	32
Figura 31: Estruturação hierárquica método AHP	35
Figura 32: Detalhe construtivo de módulo sanitário industrializado evidenciando a integração de sistemas e camadas da envolvente.....	40
Figura 33: Instalação de módulos sanitários volumétricos em edifício de grande altura.	42
Figura 34: Produção industrializada de módulos sanitários em ambiente controlado.....	43
Figura 35: Fluxograma da metodologia de investigação.....	46
Figura 36: Ranking final dos sistemas construtivos obtido pelo método AHP	85

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dimensional de casas de banho modulares.....	27
Tabela 2 - Principais condicionantes associadas às casas de banho modulares	32
Tabela 3 - Escala fundamental do AHP	36
Tabela 4 - Valores de RI para diferentes ordens de matriz	38
Tabela 5 - Critérios técnicos aplicáveis a módulos sanitários industrializados.....	39
Tabela 6 - Critérios comerciais aplicáveis a módulos sanitários.....	41
Tabela 7 - Critérios ambientais aplicáveis a módulos sanitários.....	43
Tabela 8 - Critérios e subcritérios adotados na aplicação do método AHP	49
Tabela 9 - Limites dos descritores qualitativos para o subcritério transportabilidade	51
Tabela 10 - Limites dos descritores qualitativos para o subcritério conectividade	51
Tabela 11 - Limites dos descritores qualitativos para o subcritério manutenção	51
Tabela 12 - Limites dos descritores qualitativos para o subcritério compatibilidade.....	52
Tabela 13 - Limites dos descritores qualitativos para o subcritério custo de produção	52
Tabela 14 - Limites dos descritores qualitativos para o subcritério tempo de produção <i>off-site</i>	52
Tabela 15 - Limites dos descritores qualitativos para o subcritério assistência técnica	53
Tabela 16 - Limites dos descritores qualitativos para o subcritério consumo de energia	53
Tabela 17 - Limites dos descritores qualitativos para o subcritério consumo de água.....	54
Tabela 18 - Limites dos descritores qualitativos para o subcritério geração de resíduos.....	54
Tabela 19 - Conversão da escala qualitativa para a escala fundamental de Saaty	56
Tabela 20 - Escala adaptada de Saaty utilizada para comparação entre critérios e subcritérios	60
Tabela 21 - Caracterização do sistema construtivo Betão Leve segundo os critérios de avaliação.	64
Tabela 22 - Caracterização do sistema construtivo <i>LSF</i> segundo os critérios de avaliação.....	65
Tabela 23 - Caracterização do sistema construtivo <i>Wood Frame</i> segundo os critérios de avaliação....	66
Tabela 24 - Caracterização do sistema construtivo Aço Estrutural segundo os critérios de avaliação.	67
Tabela 25 - Caracterização do sistema construtivo madeira CLT/GLT segundo os critérios de avaliação.....	68
Tabela 26 - Base de dados qualitativa estruturada para aplicação do AHP	69
Tabela 27 - Base quantitativa estruturada para aplicação do método AHP.....	70
Tabela 28 - Matriz de comparação pareada e pesos dos grupos de critérios	71
Tabela 29 - Matriz de comparação entre os subcritérios técnicos	73
Tabela 30 - Matriz de comparação entre os subcritérios comerciais.....	74
Tabela 31 - Matriz de comparação entre os subcritérios ambientais.....	75
Tabela 32 - Pesos globais dos subcritérios considerados na análise	76
Tabela 33 - Relação dos sistemas construtivos com o subcritério transportabilidade.....	78
Tabela 34 - Relação dos sistemas construtivos com o subcritério de conectividade.....	78
Tabela 35 - Relação dos sistemas construtivos com o subcritério de manutenção	79
Tabela 36 - Relação dos sistemas construtivos com o subcritério de compatibilidade	79
Tabela 37 - Relação dos sistemas construtivos com o subcritério de custo de produção.....	80
Tabela 38 - Relação dos sistemas construtivos com o subcritério tempo <i>off-site</i>	80
Tabela 39 - Relação dos sistemas construtivos com o subcritério assistência técnica	81
Tabela 40 - Relação dos sistemas construtivos com o subcritério consumo de energia.....	81
Tabela 41 - Relação dos sistemas construtivos com o subcritério consumo de água.....	82
Tabela 42 - Relação dos sistemas construtivos com o subcritério geração de resíduos	82
Tabela 43 - Pesos globais e ranking dos sistemas construtivos.....	84
Tabela 44 - Validações e considerações sobre os objetivos definidos	91

LISTA DE ABREVIATURAS

ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
BIM	<i>Building Information Modeling</i>
CI	Índice de Consistência (<i>Consistency Index</i>)
CLT	<i>Cross-Laminated Timber</i>
CR	Razão de Consistência (<i>Consistency Ratio</i>)
DfMA	<i>Design for Manufacturing and Assembly</i>
GLT	<i>Glued-Laminated Timber</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LSF	<i>Light Steel Frame</i>
MCDM	<i>Multi-Criteria Decision Making</i>

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto

A construção civil é um dos setores que mais consome recursos naturais e gera impactos ambientais. De acordo com Jorge e Ravache (2021), o setor é responsável por elevado consumo de água, energia e matérias-primas, além de significativa geração de resíduos sólidos. O Relatório de Status Global para Edificações e Construção de 2022, publicado pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e pela GlobalABC, aponta ainda que o setor de edificações e construção responde por parcela expressiva das emissões globais de gases de efeito estufa e do consumo energético mundial.

Nesse contexto, cresce a necessidade de adoção de soluções construtivas mais eficientes, sustentáveis e industrializadas, capazes de reduzir desperdícios, racionalizar processos e melhorar o desempenho produtivo da construção civil. A industrialização da construção surge como alternativa aos métodos construtivos convencionais, tradicionalmente associados a baixos níveis de planejamento, elevada geração de resíduos, retrabalhos e menor controle de qualidade.

Segundo Gibb (1999), a construção industrializada está associada à organização, planejamento, padronização e produção em escala, tendo como principal fundamento a racionalização construtiva. Sabbatini (1989) define racionalização construtiva como o conjunto de ações destinadas à otimização dos recursos materiais, humanos, tecnológicos, energéticos e financeiros empregados no processo construtivo.

Entre as soluções industrializadas, destaca-se a construção modular, caracterizada pela fabricação prévia de módulos em ambiente controlado para posterior transporte e montagem no local da obra. Esse modelo apresenta vantagens relacionadas à redução de prazos, diminuição de desperdícios, maior precisão produtiva e melhoria do controle de qualidade (Jorge & Ravache (2022) e Savassi & Chica (2022)).

No contexto da construção modular, as casas de banhos pré-fabricadas assumem papel relevante devido à elevada complexidade de execução dessas unidades, que concentram instalações elétricas, hidrossanitárias e revestimentos em espaços reduzidos. Em sistemas convencionais, essa etapa frequentemente apresenta elevados índices de desperdício, retrabalho e incompatibilidades executivas. Nesse sentido, a industrialização de unidades sanitárias contribui para a racionalização construtiva, padronização dos processos e melhoria do controle de qualidade, permitindo a fabricação das unidades em ambiente controlado e posterior instalação na obra (Barth et al., 2009; Pini, 2010).

Apesar do crescimento da construção modular e da utilização de sistemas industrializados, observa-se que ainda existem limitações relacionadas à seleção dos sistemas construtivos mais adequados para aplicações específicas. Diferentes sistemas apresentam

desempenhos distintos em termos técnicos, ambientais e comerciais, tornando necessária a utilização de métodos de apoio à decisão capazes de integrar múltiplos critérios de avaliação.

Nesse cenário, o método *Analytic Hierarchy Process* (AHP) apresenta-se como uma ferramenta adequada para a análise multicritério de sistemas construtivos, permitindo estruturar problemas complexos, comparar alternativas e determinar prioridades de decisão de forma sistematizada.

Diante disso, o presente trabalho tem como objetivo comparar diferentes sistemas construtivos aplicáveis à produção modular *off-site* de unidades sanitárias, por meio da aplicação do método AHP, considerando critérios técnicos, comerciais e ambientais relevantes para o contexto da construção modular industrializada.

1.2 Objetivos do Trabalho

Os objetivos deste estudo dividem-se em objetivo geral e objetivos específicos.

1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo avaliar as diferentes tecnologias de produção de unidades sanitárias modulares, aplicando o método AHP.

1.2.2 Objetivo específico

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- OE1: Realizar um inventário dos diferentes métodos de produção de unidades sanitárias modulares;
- OE2: Identificar os principais critérios aplicáveis à avaliação de sistemas construtivos;
- OE3: Comparar os diferentes sistemas de produção de módulos de unidades sanitárias utilizando o método AHP.

1.3 Metodologia de Investigação

A presente pesquisa caracteriza-se como aplicada, com abordagem quantitativa e natureza descritiva, tendo como objetivo apoiar a tomada de decisão na seleção de sistemas construtivos para módulos de unidades sanitárias. O estudo fundamenta-se em revisão bibliográfica para definição dos critérios e subcritérios de avaliação, bem como na aplicação do método multicritério AHP. Foram selecionados sistemas construtivos industrializados aplicáveis à produção modular *off-site*, posteriormente avaliados por meio de comparações pareadas entre critérios e alternativas.

As matrizes de comparação foram elaboradas com base na escala fundamental proposta por Saaty (2005). Os julgamentos utilizados nas comparações pareadas foram

definidos com base na literatura revisada, permitindo a obtenção dos pesos relativos dos critérios por meio da normalização das matrizes e do cálculo do autovetor principal. Os resultados foram submetidos à verificação de consistência dos julgamentos e utilizados para a hierarquização das alternativas avaliadas.

1.4 Estrutura do Trabalho

Para o desenvolvimento deste estudo, o trabalho foi estruturado em cinco capítulos, além das referências e anexos, organizados de forma a atender aos objetivos propostos, conforme descrito a seguir:

- Capítulo 1: apresenta a introdução do trabalho, contemplando a contextualização do tema, a definição do problema de pesquisa, os objetivos e a metodologia de investigação de forma resumida;
- Capítulo 2: aborda a revisão da literatura, apresentando os principais conceitos relacionados aos sistemas construtivos industrializados, aos critérios de avaliação adotados e aos métodos de apoio à decisão multicritério, com destaque para o método AHP, incluindo a sua fundamentação teórica e justificativa de aplicação;
- Capítulo 3: descreve a metodologia de aplicação do estudo, detalhando a definição da estrutura hierárquica, a seleção dos sistemas construtivos analisados, bem como a escolha dos critérios e subcritérios considerados na avaliação;
- Capítulo 4: apresenta os resultados e discussões, incluindo as matrizes de comparação pareada, o cálculo dos pesos dos critérios e subcritérios, a verificação da consistência dos julgamentos e a obtenção do ranking final das alternativas;
- Capítulo 5: expõe as conclusões do estudo, destacando os principais resultados obtidos, as contribuições da pesquisa, as suas limitações e sugestões para trabalhos futuros;
- Referências Bibliográficas: reúne as fontes bibliográficas utilizadas no desenvolvimento do trabalho;
- Anexos: apresentam os materiais complementares desenvolvidos pelo autor para operacionalização da pesquisa, incluindo as planilhas de cálculo utilizadas na aplicação do método AHP, contemplando as matrizes de comparação, normalização dos dados, cálculo dos vetores de prioridade e verificação da consistência dos julgamentos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica que sustenta a presente investigação, abordando os principais conceitos relacionados à construção industrializada, à construção modular e aos sistemas construtivos aplicáveis à produção off-site de unidades sanitárias. Além disso, são discutidos os fundamentos dos métodos multicritério de apoio à decisão, com destaque para o método *Analytic Hierarchy Process* (AHP), utilizado na avaliação e hierarquização das alternativas construtivas analisadas.

2.1 Construção Industrializada

Inicialmente, discute-se o conceito de construção industrializada, apresentando a sua contextualização histórica, os principais conceitos fundamentais, as tecnologias e sistemas construtivos associados, bem como os processos produtivos que caracterizam a industrialização aplicada à construção civil.

2.1.1 Introdução à construção industrializada

A discussão sobre construção industrializada tem ganho relevância à medida que o setor da construção civil enfrenta pressões por maior produtividade, redução de desperdícios e melhoria do desempenho global das edificações. Embora a industrialização seja frequentemente associada à manufatura tradicional, o seu uso na construção remonta ao pós-guerra, quando vários países europeus adotaram sistemas pré-fabricados como resposta à necessidade urgente de habitação (Gibb, 1999). Nas últimas décadas, esse movimento evoluiu para abordagens mais integradas, que combinam processos *off-site*, padronização e tecnologias digitais, consolidando um novo paradigma produtivo.

No contexto atual, a industrialização tem sido compreendida não apenas como uma técnica construtiva, mas como uma mudança organizacional que envolve planejamento mais rigoroso, coordenação interdisciplinar e controle de qualidade contínuo (Lessing, 2006). Além disso, estudos apontam que sistemas industrializados tendem a apresentar menor variabilidade operacional e melhor desempenho ambiental quando comparados aos métodos tradicionais, sobretudo pela redução de resíduos e maior precisão produtiva (Blismas & Wakefield, 2009).

2.1.2 Conceitos fundamentais

Na literatura existem diferentes abordagens para o conceito de construção industrializada. Alguns autores associam a industrialização ao nível de pré-fabricação, enquanto outros a compreendem como uma transformação mais ampla dos processos produtivos da construção civil.

De acordo com o Manual da Construção Industrializada desenvolvido pela Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial e publicado em 2015, a industrialização da construção corresponde ao mais alto nível de racionalização de processos construtivos e, baseia-se na produção dos componentes em ambiente industrial, para sua posterior montagem em obra. Para

Sabbatini (1989), um processo industrializado é um processo evolutivo que visa aprimorar a produtividade e o nível de produção, e aperfeiçoar o desempenho da atividade construtiva, por meio de ações organizacionais e da incorporação de novas tecnologias, métodos de trabalho e estratégias de planejamento e controle.

Neste estudo, utiliza-se a conceituação de construção industrializada apresentada por Dietrichkeit (2021) e Lessing (2015), que é a junção de planejamento e gestão de processos, procedimentos técnicos avançados, pré-fabricação, relações duradouras, emprego de novas tecnologias, reaproveitamento de experiências, foco nas demandas do cliente e constante desenvolvimento. Esta definição evidencia que a pré-fabricação é um artifício utilizado para potencializar a industrialização da construção, mas que esta não é limitada apenas a isso, sendo composta por diferentes princípios.

Segundo Gibb (1999), a pré-fabricação pode ser entendida como a produção de componentes construtivos em ambiente industrial antes da sua instalação definitiva na obra. Também denominada construção *off-site*, essa abordagem baseia-se na fabricação antecipada de elementos ou módulos que posteriormente são transportados para o local de implantação e montados no edifício. Após o processo de fabricação, essas partes são transportadas para o estaleiro de obras, onde serão montadas. De acordo com Rodrigues (2005), ao empregar a pré-fabricação, os prazos das obras são reduzidos consideravelmente, devido à melhor gestão do cronograma e baixo grau de incerteza. Ademais, como a produção acontece em ambiente fabril, a obra tem menos interferências das condições climáticas, dos impactos ambientais e das inúmeras frentes de trabalho.

Além disso, a antecipação das decisões de projeto e produção proporciona maior previsibilidade e controle do processo construtivo. Contudo, para maximizar as vantagens do sistema, torna-se necessária uma integração eficiente entre projeto, manufatura, logística e montagem.

2.1.3 Tecnologias e sistemas industrializados

As tecnologias associadas à construção industrializada evoluíram significativamente nas últimas décadas, ampliando o leque de soluções disponíveis e tornando o processo construtivo mais previsível e eficiente. Entre as tecnologias mais difundidas estão os sistemas pré-fabricados em painéis, como painéis de betão, elementos estruturais em aço e componentes em madeira engenheirada, produzidos em ambiente fabril sob controle rigoroso de qualidade (Gibb, 1999). Na Figura 1 está ilustrado um exemplo de sistema construtivo em painéis leves do tipo *Wood Frame*.



Figura 1: Sistema construtivo em painéis do tipo *Wood Frame*.
 Fonte: Casas Alea (2023)

Já na Figura 2 é apresentado um exemplo de sistema em painéis pré-fabricados de betão, caracterizado pela elevada padronização e pelo controlo produtivo realizado em ambiente industrial.



Figura 2: Sistema construtivo com painéis pré-fabricados de betão.
 Fonte: Proaço (2023)

Paralelamente, a construção modular volumétrica tem-se destacado como uma solução de maior complexidade tecnológica, ao reunir em um único módulo tridimensional estruturas, vedações, instalações e muitas vezes acabamentos (Lessing, 2006). Essa abordagem transfere a maior parte da cadeia produtiva para o ambiente industrial, favorecendo a integração entre projeto, produção e montagem. Como consequência, os estaleiros tornam-se mais organizados e com menor geração de resíduos, enquanto os prazos de execução tendem a ser significativamente reduzidos.

Na Figura 3 é ilustrado esse conceito, evidenciando a instalação de módulos tridimensionais previamente produzidos em ambiente industrializado.



Figura 3: Instalação de módulo volumétrico pré-fabricado em construção modular

Fonte: Construcan (2024)

Além dos elementos pré-fabricados e módulos volumétricos, a industrialização contemporânea está fortemente associada à digitalização dos processos, com destaque para o uso de ferramentas de modelação e coordenação como o *Building Information Modeling* (BIM). A integração de BIM com processos *off-site* permite antecipar conflitos, otimizar o sequenciamento produtivo e planejar a montagem de forma mais precisa, fortalecendo a lógica industrial no setor da construção (Blismas & Wakefield, 2009). Em conjunto, essas tecnologias têm consolidado um cenário no qual os sistemas industrializados deixam de ser alternativas pontuais e passam a representar uma estratégia estrutural para modernizar o setor.

2.1.4 Processos produtivos

Os processos produtivos na construção industrializada distinguem-se pela maior previsibilidade e pelo elevado grau de coordenação entre as etapas de projeto, fabricação e montagem. Diferentemente do modelo tradicional, em que grande parte do trabalho é realizada no próprio estaleiro de obra, o sistema industrializado desloca atividades para ambientes controlados, nos quais é possível aplicar rotinas padronizadas e técnicas de gestão inspiradas na manufatura (Lessing, 2006).

A etapa de produção *off-site* concentra a fabricação dos componentes ou módulos, realizada em linhas de produção que permitem maior controle dimensional, rastreabilidade e repetibilidade (Gibb, 1999). O fluxo de trabalho tende a ser segmentado em operações claramente definidas, facilitando o monitoramento de desempenho e a implementação de melhorias contínuas. A logística desempenha papel central nesse modelo: o transporte dos elementos deve ser cuidadosamente coordenado, considerando limites de peso e dimensões, além das janelas de montagem estabelecidas previamente para evitar interrupções ou retrabalhos.

Na Figura 4 é ilustrada uma linha de produção industrializada aplicada à construção *off-site*, evidenciando a organização sequencial das etapas de fabricação e montagem dos componentes construtivos.

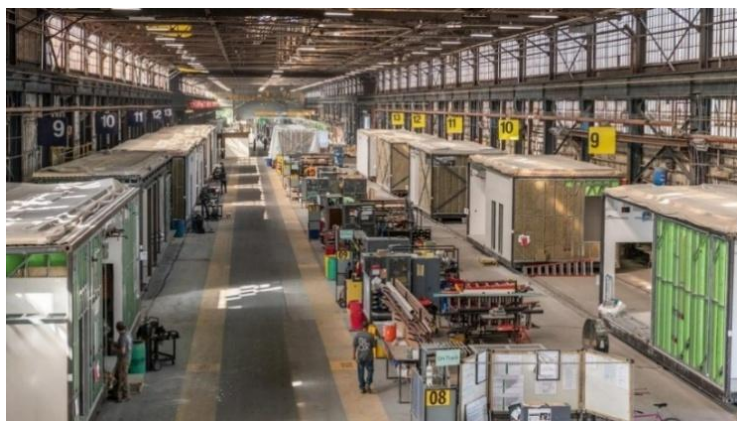


Figura 4: Linha de produção de sistemas construtivos industrializados

Fonte: Autodesk (2024)

Uma vez no estaleiro de obras, o processo assume uma lógica de montagem, caracterizada por menor intensidade de mão de obra e maior velocidade de execução. A fase *on-site* passa a funcionar como extensão da fábrica, com procedimentos que seguem protocolos padronizados para garantir alinhamento, fixação e vedação adequados (Blismas & Wakefield, 2009).

2.2 Construção Modular

A construção modular representa uma das principais vertentes contemporâneas da industrialização da construção civil, caracterizando-se pela produção parcial ou integral de módulos em ambiente controlado para posterior transporte e montagem em obra. Nesta secção, são apresentados os principais conceitos, a evolução histórica, as tipologias, as aplicações e os principais condicionantes associados à construção modular.

2.2.1 Conceitos e definições

A construção modular é um sistema construtivo industrializado baseado na produção de módulos tridimensionais em ambiente controlado, posteriormente transportados e montados no local definitivo da edificação. Esses módulos podem incorporar estrutura, vedação, instalações e acabamentos, chegando ao estaleiro com elevado grau de finalização. Para Smith (2010), a construção modular caracteriza-se pela fabricação de unidades volumétricas completas que, quando conectadas, formam edificações permanentes ou temporárias com desempenho equivalente ou superior ao das construções convencionais.

Diferentemente dos métodos tradicionais, a construção modular incorpora princípios da produção industrial, como padronização, repetibilidade e controle de qualidade, reduzindo a dependência de atividades executadas em obra. Segundo Gibb (1999), os sistemas modulares representam uma evolução da construção off-site, uma vez que transferem grande parte do processo produtivo para ambientes fabris especializados, reduzindo desperdícios, variabilidade e interferências climáticas.

Lawson, Ogden e Goodier (2014) definem a construção modular como um sistema composto por unidades volumétricas capazes de suportar cargas estruturais individualmente e em conjunto, funcionando como blocos estruturais integrados. Nesse contexto, a compatibilização entre arquitetura, estrutura e instalações assume papel fundamental, exigindo maior coordenação entre as disciplinas de projeto e incentivando o uso de ferramentas como BIM e *Design for Manufacture and Assembly* (DfMA).

Na Figura 6 é apresentada a composição construtiva de uma unidade modular volumétrica, evidenciando a integração entre estrutura, vedação, isolamento, revestimentos e componentes industrializados montados em ambiente fabril.

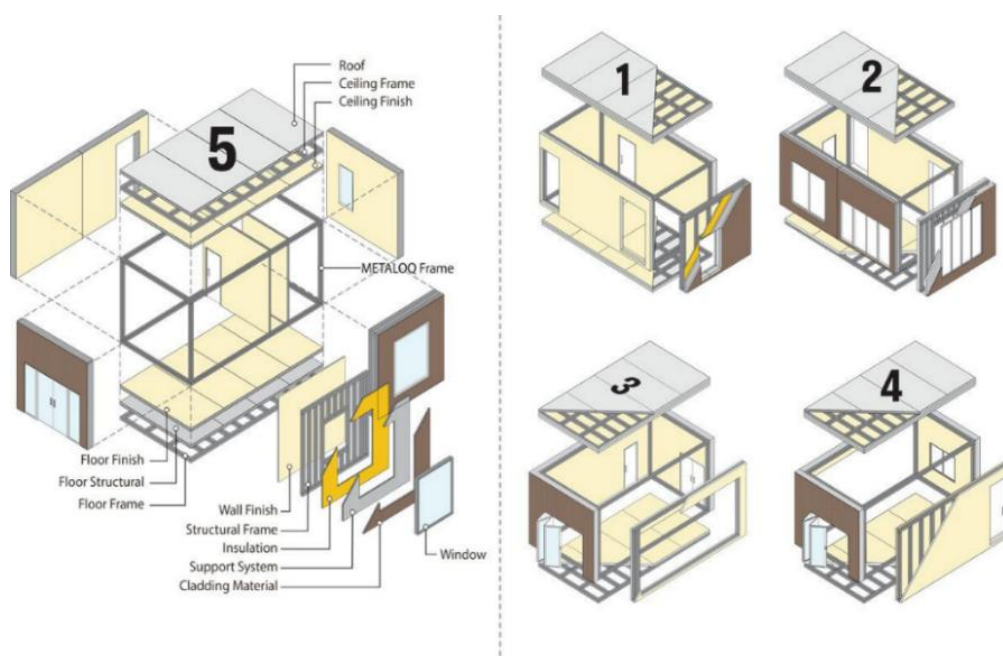


Figura 6: Integração de componentes em unidade modular volumétrica

Fonte: Modular Building Institute ([s.d.])

Na Figura 7 é ilustrado a compatibilização digital de módulos em ambiente BIM durante o processo de projeto.

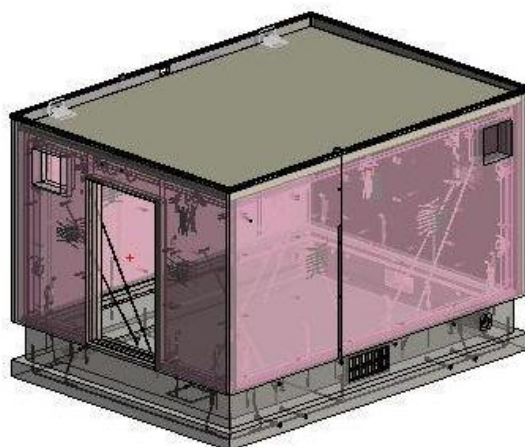


Figura 7: Compatibilização digital de módulo volumétrico em ambiente BIM

Fonte: Autodesk ([s.d.])

O conceito de DfMA constitui uma das bases da construção modular, orientando o desenvolvimento do projeto de forma integrada à fabricação e à montagem. Conforme Knaack et al. (2012), essa abordagem favorece a padronização, compatibilidade geométrica e eficiência logística, contribuindo para a redução de custos e prazos.

Do ponto de vista terminológico, Blismas e Wakefield (2009) afirmam que a construção modular pode ser classificada em duas categorias principais: modular permanente, aplicada a edificações definitivas que demandam elevado desempenho técnico; e modular temporária, concebida para usos temporários, permitindo desmontagem e posterior reutilização. Embora ambas empreguem módulos volumétricos, distinguem-se quanto aos requisitos normativos, aos níveis de durabilidade e às estratégias de conexão adotadas.

No contexto contemporâneo, a construção modular tem sido reconhecida como uma alternativa capaz de aumentar a produtividade, reduzir resíduos e melhorar a previsibilidade construtiva. Segundo Molavi e Barral (2016), a modularização contribui para a racionalização dos processos produtivos e para a redução dos impactos ambientais associados à construção civil.

2.2.2 Evolução histórica

De acordo com Jorge e Ravache (2021), o sistema construtivo modular foi criado na Europa, mas é também muito utilizado nos Estados Unidos, Japão e Áustria. No Brasil, a partir de 1980 começaram a surgir as primeiras pesquisas relacionadas à criação de novas soluções construtivas. Rosso (1980) foi um dos primeiros pesquisadores a publicar trabalhos relacionados com o tema de racionalização da construção com enfoque no desempenho das edificações.

De acordo com Fonyat (2013), durante os séculos XVII e XIX a Grã-Bretanha teve êxito em suas colônias internacionais com a utilização da pré-fabricação em suas construções. Nesse período foram produzidas em madeira e ferro estruturas de casas, igrejas e centros comerciais, para serem transportadas e montadas na Austrália, Nova Zelândia, Índia, Canadá, nos Estados Unidos e em outros domínios do império. Segundo Gibbs (2002), o registro mais antigo dessas edificações foi em 1624, quando foram enviadas casas para o vilarejo pesqueiro Cape Anne, que hoje é uma cidade em Massachusetts.

Um dos primeiros modelos de habitação modular transportável foi a Casa Colonial Portátil de Manning, casas pré-fabricadas e desmontáveis, produzidas na Inglaterra e enviadas de barco para a Áustria, para serem utilizadas pelos colonos britânicos (Lawson, Ogden & Bergin, 2014). Esta solução, ilustrada na Figura 8, foi muito utilizada para os assentamentos britânicos ao longo do século XIX.

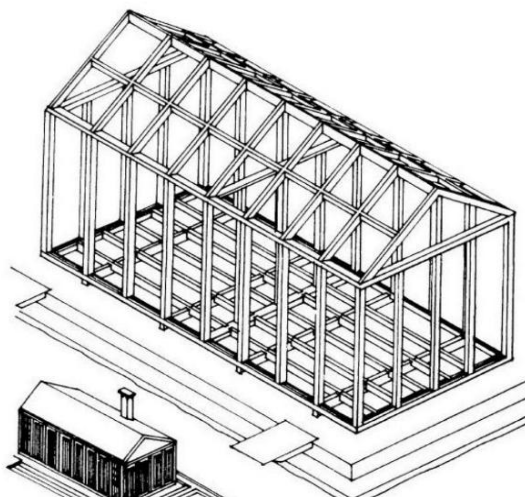


Figura 8: Casa Colonial Portátil para Emigrantes de Herbert Manning

Fonte: Quonset Hut (2012).

Entretanto, foi no período pós-Segunda Guerra Mundial que a industrialização da construção ganhou maior relevância, impulsionada pela necessidade de reconstrução urbana e pela escassez de mão de obra qualificada. Nesse contexto, diversos países passaram a investir em sistemas pré-fabricados e soluções modulares em larga escala (Gibb, 1999). Na Figura 9 é ilustrada a utilização de habitações pré-fabricadas no período pós-Segunda Guerra Mundial.



Figura 9: Habitações pré-fabricadas utilizadas na reconstrução do pós-guerra

Fonte: Starts at 60 (2020)

Entre as décadas de 1950 e 1960, os sistemas modulares foram aprimorados com a introdução de estruturas metálicas leves e painéis pré-moldados, impulsionados pelo desenvolvimento industrial e tecnológico. Países como Japão, Reino Unido e Estados Unidos investiram na habitação modular em larga escala, associando a construção aos princípios da produção em série e da manufatura industrial (Lawson et al., 2012; Kieran & Timberlake, 2004). Esse processo favoreceu a padronização, a redução de custos e o aumento do desempenho construtivo, embora a construção modular ainda enfrentasse resistência em mercados ligados à construção tradicional e à personalização arquitetônica (Smith, 2010).

A partir da década de 1990, a construção modular voltou a ganhar destaque impulsionada por demandas de sustentabilidade, eficiência energética e digitalização dos processos construtivos. Tecnologias como BIM, DfMA e automação fabril ampliaram a precisão e a integração dos sistemas modulares (Lawson, Ogden & Goodier, 2014). Segundo Pan e Sidwell (2011), esse período foi marcado pela diversificação das aplicações modulares, que passaram a ser utilizadas não apenas em habitações, mas também em escolas, hospitais, hotéis e infraestruturas. Países como Suécia e Singapura destacaram-se pela ampla adoção e regulamentação da construção modular volumétrica em políticas públicas habitacionais.

2.2.3 Tendências atuais e perspectivas futuras

Nas últimas décadas, a construção modular consolidou-se como uma das principais vertentes da industrialização da construção civil, impulsionada pela digitalização dos processos, pela necessidade de aumento da produtividade e pelas exigências contemporâneas de sustentabilidade. A integração entre projeto, fabrico e montagem, suportada por metodologias digitais como o BIM e o DfMA, tem permitido maior precisão construtiva, melhor coordenação entre disciplinas e redução significativa de desperdícios durante a produção e instalação dos módulos (Lawson, Ogden & Goodier, 2014; Pan & Sidwell, 2011). Paralelamente, tecnologias emergentes, como automação industrial, robótica, impressão 3D e sistemas inteligentes de fabricação, vêm ampliando a eficiência produtiva e reduzindo o tempo global de execução das edificações modularizadas.

Na Figura 10 é ilustrada a aplicação do conceito de Digital Twin na construção civil, permitindo a integração entre dados digitais, monitorização em tempo real e gestão do desempenho do edifício ao longo do ciclo de vida.

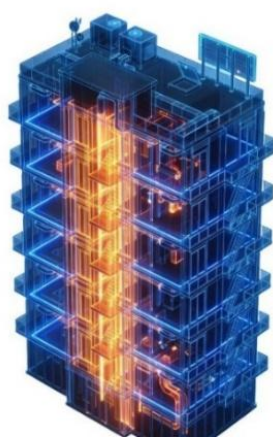


Figura 10: Representação digital de edifício aplicada ao conceito de Digital Twin

Fonte: MindInventory ([s.d.])

Sob a perspectiva do mercado, observa-se um crescimento expressivo da adoção da construção modular em diferentes segmentos, incluindo habitação multifamiliar, hotelaria, hospitais, edifícios educacionais e infraestruturas temporárias. Relatórios internacionais

apontam crescimento contínuo do setor, impulsionado pela procura por soluções construtivas mais rápidas, previsíveis e sustentáveis (KPMG, 2016; Dodge Data & Analytics, 2020).

Além dos aspetos económicos e produtivos, o futuro da construção modular encontra-se fortemente associado à intensificação da digitalização e à transformação das cadeias produtivas da construção civil. A crescente integração entre BIM, *Digital Twins*, *Internet of Things* (IoT) e sistemas automatizados de produção tende a ampliar a monitorização em tempo real, a manutenção preditiva e o desempenho operacional dos edifícios ao longo do ciclo de vida (Boje et al., 2020; Persson et al., 2022).

Na Figura 11 é apresentada a aplicação de sistemas robotizados na fabricação industrializada de estruturas modulares em madeira, evidenciando a incorporação de automação e tecnologias digitais no processo produtivo da construção modular.



Figura 11: Instalação de módulos volumétricos em sistema construtivo industrializado

Fonte: ABB Robotics (2021).

Do ponto de vista ambiental e tecnológico, a tendência é que os sistemas modulares evoluam para modelos cada vez mais adaptáveis, desmontáveis e reutilizáveis, alinhados aos princípios da circularidade dos materiais e da redução do impacto ambiental. Nesse contexto, a construção modular tende a consolidar-se não apenas como uma alternativa construtiva, mas como um novo paradigma produtivo baseado na industrialização, inovação tecnológica e sustentabilidade do ambiente construído.

2.2.4 Vantagens, desvantagens e condicionantes

Uma das principais vantagens da construção modular é a redução do tempo total de execução, devido à possibilidade de as etapas de fabricação dos módulos e de execução das fundações poderem ocorrer em simultâneo. Segundo Jaillon e Poon (2008), o prazo de obra pode ser reduzido entre 30% e 50% em comparação com os métodos tradicionais.

A produção em ambiente fabril garante melhor controle de qualidade, precisão dimensional e repetibilidade de unidades, fazendo com que o sistema proporcione maior desempenho técnico e menor acontecimento de patologias construtivas (Goodier & Gibb,

2007). Além do mais, a produção industrializada permite a otimização do uso de materiais e a redução da produção de resíduos sólidos em até 70%, contribuindo para práticas de sustentabilidade e certificações ambientais (Polidoro & Rodrigues, 2019).

Na Figura 12 é ilustrada a produção industrializada de módulos volumétricos em ambiente fabril, evidenciando a padronização dos processos, a repetibilidade construtiva e o controle produtivo característicos da construção modular.

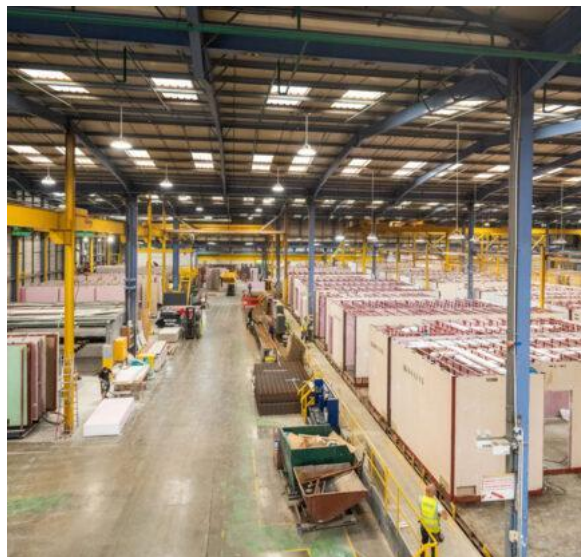


Figura 12: Produção industrializada de módulos volumétricos em ambiente fabril

Fonte: Vision Volumetric ([s.d.])

Outra vantagem desse sistema construtivo diz respeito à segurança e ergonomia dos trabalhadores, devido à maior parte dos trabalhos serem realizados em ambiente fabril, garantindo menor exposição às condições climáticas e aos riscos recorrentes em estaleiro de obras.

Entretanto, a construção modular ainda encara desvantagens e desafios que limitam a sua difusão, especialmente no contexto brasileiro. O principal deles é o elevado investimento inicial para a implantação industrial, que envolve altos custos com aquisição de maquinário, tecnologia e capacitação de pessoal. Quando o volume de produção é pequeno, esse investimento pode tornar o custo unitário do módulo pouco competitivo (Goodier & Gibb, 2007). Outro desafio relevante são as restrições logísticas, uma vez que o transporte de módulos tridimensionais depende de trajetos com dimensões compatíveis, controle de cargas e autorizações específicas, o que constitui uma condicionante importante para empreendimentos localizados em áreas urbanas densas (Jaillon & Poon, 2008).

Em relação ao valor económico, a construção modular torna-se mais competitiva em empreendimentos com alto grau de repetitividade e prazo de execução curto, como hospitais, hotéis, escolas e habitações de interesse social. A economia é potencializada quando há planejamento logístico eficiente, rotas de transporte curtas e coordenação modular bem definida (Polidoro & Rodrigues, 2019).

2.2.5 Limitações e condicionantes arquitetônicas

Apesar de a construção modular se destacar em relação à industrialização e eficiência produtiva, no campo do design e da arquitetura tem de enfrentar desafios e limitações consideráveis. Principalmente em relação à padronização e repetição de módulos, pontos necessários para a economia de escala e rapidez de produção, mas que acabam por reduzir a liberdade criativa dos arquitetos e limitar a diversidade formal dos projetos (Lawson, Ogden & Goodier, 2014). Além disso, a necessidade de compatibilização entre módulos padronizados e os sistemas estruturais da edificação impõe condicionantes geométricas e dimensionais que podem dificultar a concepção de soluções arquitetônicas mais complexas ou singulares (Smith, 2010). Na Figura 13 é evidenciado a repetição volumétrica característica da construção modular.



Figura 13: Repetição e padronização de módulos volumétricos na construção modular

Fonte: NTC Brasil (2025)

As limitações de logística e transporte dos módulos também afetam o processo de concepção arquitetônica. As dimensões das unidades são condicionadas pelas restrições de transporte rodoviário, o que impõe limites de largura, altura e peso e influencia diretamente o projeto dos módulos (Lawson, Ogden & Goodier, 2014). Assim, desde as fases iniciais do projeto, é necessário considerar os requisitos de transporte e montagem, que podem restringir determinadas soluções volumétricas ou estruturais (Smith, 2010).

Outro desafio consiste na integração dos sistemas prediais (elétrico, hidráulico e sanitário) no interior dos módulos. A resolução antecipada das interfaces entre sistemas exige elevado nível de coordenação interdisciplinar e o recurso a ferramentas digitais, como o BIM, para garantir a compatibilização dos projetos (Knaack et al., 2012). A falta dessa coordenação pode gerar retrabalhos e comprometer a eficiência do sistema modular.

2.2.6 Sustentabilidade e ciclo de vida

O conceito de sustentabilidade está relacionado ao equilíbrio entre desenvolvimento econômico, preservação ambiental e bem-estar social, visando atender às necessidades atuais sem comprometer os recursos disponíveis para as gerações futuras (Elkington, 1997). No setor da construção civil, a sustentabilidade está associada principalmente à redução dos impactos

ambientais, à eficiência no uso de recursos naturais, à racionalização dos processos produtivos e à melhoria do desempenho das edificações ao longo do ciclo de vida.

A indústria da construção é reconhecida como uma das atividades com maior consumo de matérias-primas e geração de resíduos, sendo responsável por impactos significativos relacionados ao consumo energético, emissão de gases de efeito estufa e utilização intensiva de recursos naturais (UNEP, 2020). Nesse contexto, os sistemas construtivos industrializados e modulares têm ganhado destaque por apresentarem maior controle produtivo, redução de desperdícios e melhor previsibilidade de desempenho quando comparados aos métodos construtivos convencionais.

A construção modular permite transferir grande parte das atividades para ambientes fabris controlados, favorecendo processos padronizados, maior precisão dimensional e otimização do uso de materiais. Segundo Lu e Korman (2010), a industrialização da construção contribui diretamente para a redução de resíduos sólidos, retrabalho e perdas de materiais no estaleiro de obras. Além disso, a montagem modular reduz interferências no entorno urbano, diminuindo níveis de ruído, poeira e movimentação excessiva de equipamentos durante a execução da edificação.

Outro aspecto relevante refere-se à eficiência energética e ao desempenho operacional dos edifícios modulares. A fabricação em ambiente controlado possibilita maior rigor na execução de sistemas de vedação, isolamento térmico e impermeabilização, reduzindo perdas energéticas e melhorando o conforto ambiental interno (Kibert, 2016). Paralelamente, a modularização favorece estratégias de economia circular, uma vez que componentes industrializados podem ser desmontados, reutilizados ou reciclados com maior facilidade ao final da vida útil da edificação.

Nesse contexto, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) destaca-se como uma das principais metodologias utilizadas para analisar os impactos ambientais dos sistemas construtivos. A ACV considera todas as etapas do ciclo de vida da edificação, incluindo extração de matérias-primas, produção, transporte, utilização, manutenção e disposição final dos materiais (ISO 14040, 2006). Essa abordagem permite comparar diferentes soluções construtivas sob a perspectiva ambiental, identificando oportunidades de redução de impactos e melhoria de desempenho.

A Figura 14 ilustra os princípios da economia circular aplicados à construção modular, evidenciando a possibilidade de reutilização de edifícios, módulos e componentes ao longo do ciclo de vida das edificações.

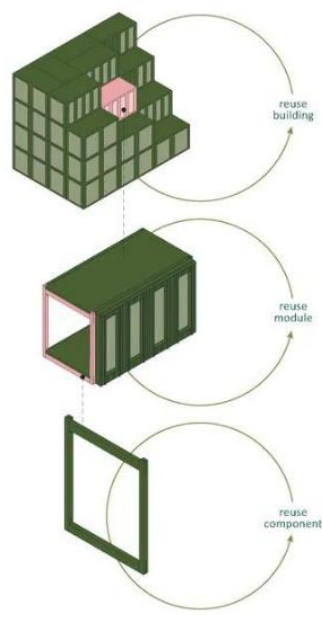


Figura 14: Reutilização de edifícios, módulos e componentes na construção modular

Fonte: Nomad Architects (s.d.)

Estudos recentes demonstram que sistemas construtivos modulares podem apresentar reduções significativas nas emissões de carbono, na geração de resíduos e no consumo energético em comparação à construção convencional, sobretudo devido à racionalização produtiva e à maior eficiência logística (Akanbi et al., 2018). Além disso, a utilização de ferramentas digitais como BIM e *Digital Twins* amplia a capacidade de monitorização e gestão do desempenho ambiental dos edifícios ao longo do ciclo de vida, contribuindo para processos construtivos mais eficientes e sustentáveis.

Dessa forma, a sustentabilidade na construção modular não se limita apenas à redução imediata de impactos ambientais, mas relaciona-se também à transformação dos processos produtivos da construção civil. A integração entre industrialização, digitalização e avaliação ambiental contribui para o desenvolvimento de edificações mais eficientes, adaptáveis e alinhadas aos princípios contemporâneos de sustentabilidade e economia circular.

2.2.7 Tipologias modulares

De acordo com a publicação *Construção Modular*, desenvolvida pelo Instituto Aço Brasil em parceria com o Centro Brasileiro da Construção em Aço (2022), a construção modular pode ser classificada em quatro principais tipologias: construção modular volumétrica (3D), construção modular em painel (2D), construção modular paramétrica e construção modular híbrida. Cada uma destas tipologias apresenta características específicas em termos de processo produtivo, nível de industrialização e aplicação. A seguir, são descritas as principais particularidades de cada uma.

2.2.7.1 Construção modular volumétrica (3D)

A construção modular volumétrica (3D) caracteriza-se pela produção de módulos tridimensionais completos, geralmente com geometria prismática, que são fabricados em ambiente industrial e posteriormente transportados para o local da obra, como demonstrado na Figura 15. Estes módulos podem integrar não apenas a estrutura, mas também acabamentos, instalações elétricas e hidrossanitárias, chegando à obra com um elevado grau de finalização.

Devido à sua natureza tridimensional e dimensões significativas, esta tipologia exige um planeamento logístico rigoroso, nomeadamente no que se refere ao transporte e à movimentação dos módulos, devendo ser respeitadas as limitações de peso, altura e comprimento impostas pelas infraestruturas viárias. Apesar destas condicionantes, apresenta como principais vantagens a elevada rapidez de execução e o controlo de qualidade em ambiente fabril.

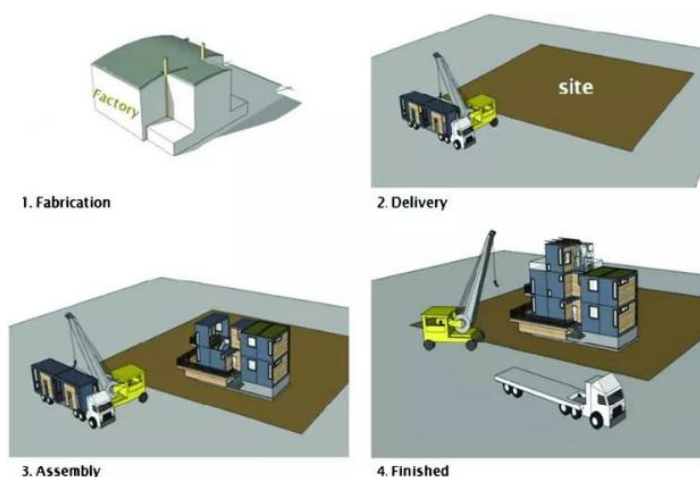


Figura 15: Construção Modular Volumétrica

Fonte: Vobi (2024)

2.2.7.2 Construção modular em painel (2D)

A construção modular em painel baseia-se na utilização de elementos bidimensionais pré-fabricados, como paredes, lajes e painéis estruturais, que são produzidos em fábrica e posteriormente montados em obra, conforme ilustrado na Figura 16. Ao contrário dos sistemas volumétricos, esta tipologia apresenta um menor nível de pré-acabamento, sendo parte significativa da montagem e finalização realizada no local.

Contudo, os painéis podem já incorporar infraestruturas técnicas, como redes elétricas e hidrossanitárias, o que contribui para a racionalização do processo construtivo. Em termos logísticos, esta solução revela-se mais eficiente, uma vez que permite o transporte de múltiplos elementos empilhados, otimizando o espaço e reduzindo custos de transporte.

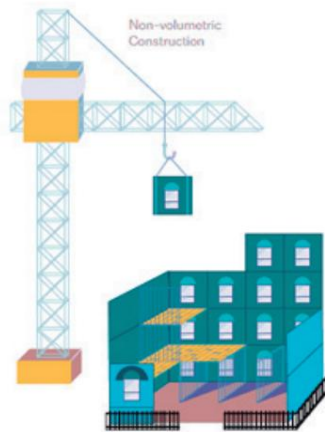


Figura 16: Construção Modular em Painéis

Fonte: Savassi e Chica (2022)

2.2.7.3 Construção modular paramétrica

A construção modular paramétrica distingue-se pela utilização de ferramentas digitais avançadas no desenvolvimento do projeto, baseadas em parâmetros e variáveis previamente definidos. Este tipo de abordagem permite a geração automatizada de soluções arquitetônicas e construtivas, adaptadas a diferentes condicionantes, como requisitos funcionais, ambientais ou estruturais.

A integração de modelos paramétricos com processos de fabrico digital possibilita um elevado grau de personalização sem comprometer a eficiência produtiva, constituindo uma tendência emergente na evolução da construção modular. Esta tipologia encontra-se frequentemente associada a metodologias como o design computacional e à utilização de software especializado para otimização de soluções.

Na Figura 17 é ilustrado um exemplo de aplicação da modelação paramétrica na conceção de fachadas, evidenciando a geração de padrões geométricos a partir de parâmetros definidos.

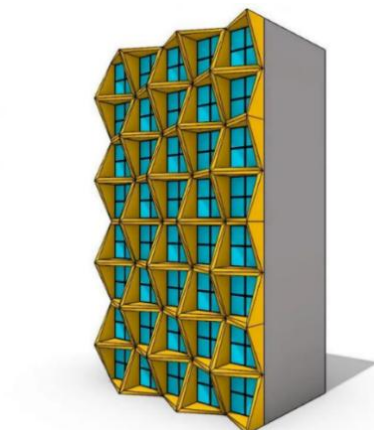


Figura 17: Exemplo de fachada gerada por modelação paramétrica

Fonte: Parametric House (2024)

2.2.7.4 Construção modular híbrida

A construção modular híbrida resulta da combinação de duas ou mais tipologias construtivas, nomeadamente sistemas volumétricos (3D) e sistemas em painel (2D), com o objetivo de tirar partido das vantagens específicas de cada abordagem. Esta solução permite uma maior flexibilidade de projeto, adaptando-se às exigências técnicas, funcionais e logísticas de cada empreendimento, conforme ilustrado na Figura 18.

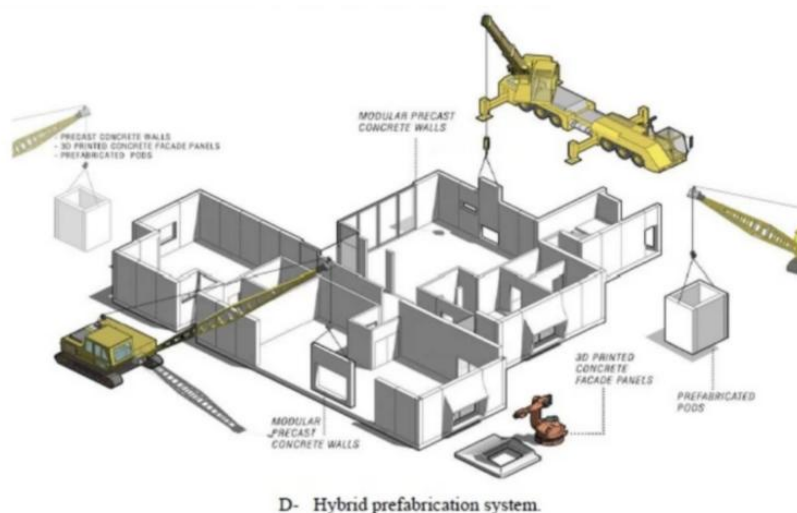


Figura 18: Sistema de construção modular híbrida.

Fonte: Mohamed Ramadan, M.AM, (2026)

2.2.8 Materiais e acabamentos

A escolha dos níveis de acabamento e a especificação dos materiais na construção modular são etapas essenciais para garantir a qualidade, a durabilidade e o desempenho estético e funcional do edifício.

Os níveis de acabamento variam conforme o tipo de projeto e o grau de industrialização adotado. Smith (2010) sugere uma classificação que vai desde módulos básicos, entregues apenas com estrutura e fechamentos, até módulos completamente acabados, disponíveis para uso imediato assim que instalados em estaleiro de obra. A definição do nível de acabamento está diretamente relacionada ao tempo disponível para a montagem, ao custo total do empreendimento e às exigências de desempenho e conforto estabelecidas pelo cliente (Knaack et al., 2012). Além disso, quanto maior o nível de acabamento entregue no estaleiro de obras, menor a dependência de mão de obra local e menor a exposição dos materiais a intempéries, reduzindo a possibilidade de patologias e retrabalhos (Mota, 2019).

Os materiais empregados em módulos sanitários industrializados variam conforme o sistema construtivo adotado, os requisitos de desempenho e o nível de industrialização pretendido. Em sistemas leves, é comum a utilização de perfis metálicos galvanizados, placas cimentícias, painéis de gesso acartonado resistentes à humidade e membranas impermeabilizantes, materiais que favorecem a redução do peso próprio e facilitam o transporte

e a montagem dos módulos (Knaack, Chung-Klatte & Hasselbach, 2012). Já em soluções mais robustas, podem ser empregues elementos em Betão Leve pré-fabricado ou painéis estruturais compostos, visando maior desempenho acústico, resistência mecânica e durabilidade (Lawson, Ogden & Bergin, 2014).

Além das características estruturais, a seleção dos materiais influencia diretamente o desempenho térmico, acústico e a manutenção dos módulos ao longo do ciclo de vida. Segundo Gibb (2007), a utilização de sistemas industrializados permite maior controle de qualidade na aplicação de revestimentos, impermeabilizações e juntas técnicas, reduzindo patologias associadas à execução em obra.

Na Figura 19 está ilustrado um exemplo de composição construtiva de sistema leve industrializado em *steel frame*, evidenciando a organização multicamada dos elementos de vedação e isolamento utilizados em soluções modulares.

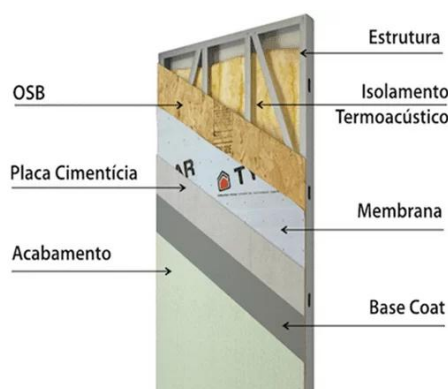


Figura 19: Composição construtiva de sistema leve industrializado em steel frame

Fonte: Núcleo do Conhecimento (2021)

De forma semelhante, os sistemas em *Wood Frame* também utilizam composições multicamada voltadas ao desempenho térmico, acústico e à racionalização construtiva, conforme ilustrado na Figura 20.

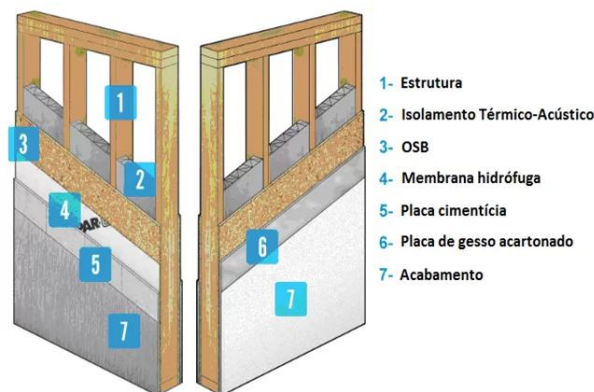


Figura 20: Composição construtiva de sistema leve industrializado em Wood Frame

Fonte: Núcleo do Conhecimento (2021)

Assim, os níveis de acabamento e os materiais escolhidos na construção modular não apenas definem a aparência final e a funcionalidade do edifício, mas também influenciam no grau de industrialização e de eficiência do sistema construtivo.

2.2.9 Aplicações da construção modular

A construção modular vem-se consolidando como uma solução eficiente e flexível em diversos contextos, atendendo desde demandas residenciais até empreendimentos institucionais e comerciais de grande porte. Um dos campos mais consolidados é o setor habitacional, especialmente em projetos de habitação temporária ou de rápida implantação, como alojamentos para trabalhadores e abrigos emergenciais. Para Smith (2010), a modularidade oferece vantagens em projetos que exigem velocidade construtiva e alto controle de qualidade, sendo amplamente utilizada em programas habitacionais em países como o Reino Unido, Japão e Suécia, onde políticas públicas incentivam a industrialização da construção.

A construção modular tem se destacado nos setores de educação e de saúde, devido a possibilidade de ampliação e relocação de unidades conforme a variação de demanda. Lawson, Ogden e Goodier (2014) destacam que hospitais modulares e escolas pré-fabricadas permitem não apenas a expansão rápida de infraestrutura, mas também reduzem a interferência nas atividades cotidianas durante a execução da obra.

No ramo comercial e corporativo, a construção modular é empregada em edifícios de escritórios, hotéis e empreendimentos de uso misto, visando a padronização e a reprodutibilidade de módulos. Segundo Knaack, Chung-Klatte e Hasselbach (2012), o sistema modular permite a execução de edifícios complexos com elevado grau de personalização e desempenho técnico, atrelando estética arquitetônica e eficiência produtiva. Hotéis de rede internacional, como o Marriott AC Hotel em Nova Iorque, ilustrado na Figura 21, construído majoritariamente com módulos tridimensionais pré-acabados, revelam o potencial do sistema em empreendimentos de grande escala.



Figura 21: Ilustração da Construção do Marriott AC Hotel em Nova Iorque
Fonte: Bloomberg (2019)

Portanto, a construção modular mostra-se como um paradigma inovador, flexível e tecnicamente viável para múltiplas tipologias e contextos construtivos.

2.2.10 Distinção entre construção pré-fabricada, modular e industrializada

A construção modular distingue-se por ser pré-fabricada, mas apenas essa característica não é suficiente para a definir, pois toda a construção modular é pré-fabricada, mas nem toda a construção pré-fabricada é modular. A construção modular é definida como um sistema constituído de elementos separados, pré-fabricados em um ambiente fabril com alto grau de controle, que podem ser acoplados dando forma ao edifício. Esta característica permite, futuramente, acrescentar ou retirar módulos do edifício sem comprometer a estrutura do restante sistema (Savassi & Chica, 2022).

A construção pré-fabricada é caracterizada pela produção de seus elementos, componentes ou sistemas construtivos fora do estaleiro de obras. Refere-se a um conceito que envolve desde elementos simples, como vigas, lajes e painéis, até módulos tridimensionais completos. O principal objetivo é o aumento da produtividade, a redução do desperdício em obras e a garantia da qualidade e controle do processo construtivo (Rojas-Herrera et al., 2025). Para Zohourian (2025), o deslocamento de etapas críticas para ambientes fabris controlados, faz com que a pré-fabricação seja uma decisão fundamental para a transição do setor da construção para soluções mais sustentáveis e eficientes.

A construção modular, é caracterizada pela produção de módulos tridimensionais, podendo ser totalmente equipados e finalizados em fábrica, para posteriormente ser montados no estaleiro de obras formando o edifício final. É considerada uma ramificação específica da construção pré-fabricada. Esses módulos podem sair da linha de produção equipados com instalações elétricas, hidrossanitárias, revestimentos e mobiliário, conferindo um alto grau de industrialização e rapidez de execução das obras (Lim et al., 2022; Zohourian et al., 2025). Entretanto, como evidencia Ehwi et al. (2021), para esse sistema construtivo ter sucesso, deve estar munido de um planejamento logístico e projetual altamente integrado, compreendendo desde o transporte até a montagem e o gerenciamento entre os diferentes agentes envolvidos.

Já a construção industrializada refere-se a um conceito mais vasto e estratégico, não se limitando ao tipo de componente produzido, mas à transformação organizacional, tecnológica e processual da indústria da construção. Segundo Kauppinen, Annunen e Haapasalo (2024), a industrialização compreende o emprego de princípios de produção em série, padronização, digitalização, como por exemplo a utilização do BIM, e gestão da cadeia de suprimentos, aproximando a construção civil dos processos comuns da manufatura. Portanto, enquanto a pré-fabricação e a construção modular se concentram na materialização de elementos construtivos fora do estaleiro de obras, a construção industrializada busca a reestruturação de todo o sistema produtivo, visando maior eficiência, rastreabilidade e sustentabilidade (Rojas-Herrera et al., 2025).

2.3 Unidade Sanitária Modular

As unidades sanitárias modulares representam uma das aplicações mais consolidadas da construção modular, destacando-se pela elevada repetibilidade funcional, pela integração de sistemas técnicos e pelo elevado potencial de industrialização. Nesta secção, são abordados os principais conceitos, características construtivas, condicionantes técnicas e exemplos de aplicação associados às casas de banho modulares produzidas em ambiente industrializado.

2.3.1 Definições e conceitos

As unidades sanitárias modulares, frequentemente denominadas na literatura internacional como *Bathroom Pods* ou *Prefabricated Bathroom Units (PBUs)*, consistem em módulos tridimensionais produzidos industrialmente e entregues ao estaleiro de obras com elevado nível de pré-fabricação. Estes sistemas integram estrutura, instalações hidráulicas e elétricas, impermeabilização, revestimentos e equipamentos sanitários, permitindo que o conjunto seja instalado no edifício por meio de conexões rápidas às redes principais (Luu et al., 2020).

A crescente utilização destes módulos está associada à elevada repetibilidade funcional dos espaços sanitários, sobretudo em edifícios hoteleiros, hospitalares e residenciais multifamiliares. Segundo Kamali e Hewage (2016), a industrialização das instalações sanitárias permite ganhos significativos em produtividade, controlo de qualidade e redução de desperdícios quando comparada aos métodos tradicionais executados integralmente em obra.

A produção industrializada permite ainda maior precisão dimensional e melhor coordenação entre especialidades, reduzindo incompatibilidades entre sistemas hidráulicos, elétricos e estruturais (Mostafavi et al., 2021). Além disso, o ambiente fabril favorece condições controladas de montagem, reduzindo interferências climáticas e aumentando a previsibilidade do desempenho final do módulo.

Na Figura 22 é apresentada uma unidade sanitária modular completamente finalizada em ambiente industrial, evidenciando o elevado nível de pré-fabricação e integração entre estrutura, instalações e acabamentos.



Figura 22: Exemplo de unidade sanitária modular completamente finalizada em ambiente fabril

Fonte: BATHSYSTEM ([s.d.])

Em termos conceituais, uma casa de banho modular difere de elementos pré-fabricados parciais pelos seguintes atributos fundamentais:

- Volumetria completa e não apenas painéis ou kits de componentes;
- Pré-montagem integral dos sistemas hidráulicos, elétricos e de ventilação;
- Testagem funcional em fábrica, reduzindo retrabalhos;
- Instalação rápida no local, com integração reduzida a simples ligações às redes principais do edifício.

Assim, as casas de banho modulares representam não apenas um componente pré-fabricado, mas um sistema construtivo autónomo, essencial para a otimização temporal e qualitativa de empreendimentos que requerem alta repetitividade e precisão técnica. A sua adoção crescente demonstra a consolidação da construção modular como estratégia para enfrentar desafios contemporâneos do setor, como produtividade, padronização e sustentabilidade.

2.3.2 Qualidade e controlo de produção

A garantia da qualidade e o controlo da produção são fundamentais na fabricação de casas de banho modulares, devido à elevada integração entre sistemas estruturais, instalações hidráulicas, componentes elétricos e acabamentos. Diferentemente da construção tradicional, a produção em ambiente industrial permite maior rastreabilidade, padronização e previsibilidade do desempenho final dos módulos (Goodier & Gibb, 2007; Lawson, Ogden & Goodier, 2014). Os processos produtivos são organizados em etapas sequenciais, incluindo montagem estrutural, instalação técnica, impermeabilização e acabamentos.

A industrialização da construção incorpora princípios da *Lean Construction* e da manufatura avançada, visando reduzir desperdícios, otimizar fluxos de trabalho e aumentar a eficiência produtiva (Koskela, 2000). Entre os principais princípios aplicados destacam-se a padronização das operações, a melhoria contínua (*Kaizen*), a redução de atividades sem valor

agregado e a estabilidade do fluxo produtivo. Além disso, sistemas de gestão da qualidade, como ISO 9001, *Six Sigma* e *Total Quality Management* (TQM), contribuem para o monitoramento e controle sistemático das diferentes etapas de fabricação.

Outro aspecto relevante refere-se à realização de ensaios técnicos ainda em fábrica, incluindo testes de estanqueidade, funcionamento das redes hidráulicas e elétricas, verificações dimensionais e inspeções de acabamentos (Pan, Gibb & Dainty, 2007). Esses procedimentos reduzem retrabalhos e intervenções corretivas posteriores, aumentando a confiabilidade, durabilidade e desempenho funcional dos módulos.

Na Figura 23 é ilustrado um ensaio de pressão realizado durante a fabricação de módulos sanitários, procedimento utilizado para verificar a estanqueidade e o correto funcionamento das instalações hidráulicas antes da expedição dos módulos.



Figura 23: Ensaio de pressão e verificação hidráulica em módulo sanitário industrializado

Fonte: Howick Ltd. (2024)

De forma geral, o controle de qualidade representa uma das principais vantagens associadas à construção modular. A combinação entre produção industrializada, monitoramento sistemático e integração entre projeto, engenharia e fabricação contribui para a redução de defeitos, maior conformidade técnica e melhoria da eficiência global do processo construtivo.

2.3.3 Dimensões, opções construtivas e variantes

As casas de banho modulares apresentam diferentes configurações dimensionais e construtivas, variando conforme a tipologia do empreendimento e os requisitos funcionais do projeto. Segundo Smith e Quale (2017), a racionalização dimensional constitui um dos principais fatores para otimização logística e produtiva dos módulos industrializados.

Do ponto de vista dimensional, a indústria tende a operar com envelopes modulares padronizados, muitas vezes baseados em grades de coordenação compatíveis com múltiplos de 300 mm ou 600 mm, o que facilita a integração com sistemas estruturais e com elementos de

fachadas e revestimento (Gibb & Isack, 2003). De modo geral, os módulos podem ser classificados em compactos, intermediários e ampliados, variando de acordo com o uso pretendido e o nível de exigência funcional, conforme apresentado na Tabela 1.

Categoria	Dimensões aproximadas	Aplicação
Compacta	2,0 × 1,5 m	Hotéis económicos
Intermediária	2,2 × 1,8 m	Habitação multifamiliar
Ampliada	3,0 × 2,5 m	Hospitais e hotelaria premium

Fonte: Adaptado de Smith e Quale (2017).

Para além das imposições funcionais, como ergonomia, acessibilidade, posicionamento de louças e zonas húmidas, as limitações logísticas de transporte, de circulação em obra e de içamento são condicionantes fundamentais na definição da dimensão final do módulo, conforme apontam Blismas e Wakefield (2009).

Em termos construtivos, verifica-se uma diversidade crescente de opções estruturais e de materiais, permitindo que o módulo seja ajustado à exigência de desempenho, custo e durabilidade. As soluções mais recorrentes baseiam-se em estruturas metálicas leves (*lightweight steel frame*), estruturas em perfis de madeira (*Wood Frame*) ou em perfis conformados a frio, devido ao equilíbrio entre resistência, peso reduzido e facilidade de tecido industrial (Kamar et al., 2011). Estas estruturas são complementadas por painéis internos resistentes à humidade, membranas de impermeabilização e sistemas de pavimento pré-selados em fábrica, o que aumenta o controle de qualidade e reduz patologias em obra.

Na Figura 24 é ilustrado um exemplo esquemático de parede em *Light Steel Frame* (LSF), evidenciando as camadas construtivas e os materiais normalmente empregados em sistemas modularizados.

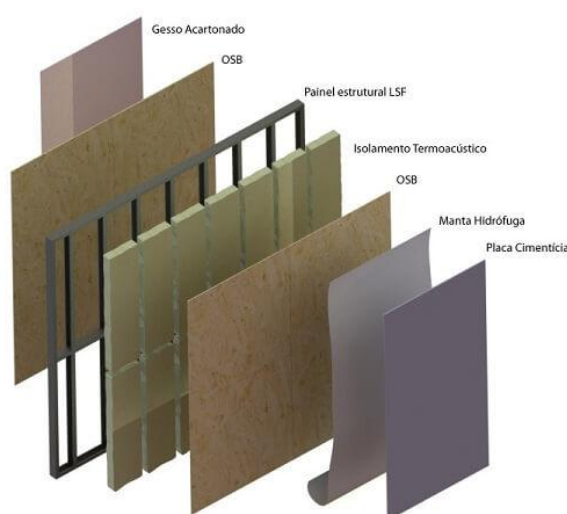


Figura 24: Exemplo de camadas construtivas e materiais utilizados em painéis industrializados em *Light Steel Frame* (LSF)

Fonte: Design sem Neura (2019)

Em aplicações que exigem maior desempenho acústico, resistência mecânica e proteção ao fogo, como hospitais, hotéis de alto padrão e edifícios institucionais, são frequentemente adotadas soluções híbridas compostas por bases em betão pré-fabricado associadas a estruturas metálicas leves, ou ainda módulos integralmente executados em betão armado pré-fabricado (Smith, 2010; Kamali & Hewage, 2017). Segundo Kamali e Hewage (2017), a escolha do sistema construtivo modular está diretamente relacionada às exigências de desempenho, às limitações logísticas de transporte e içamento e aos requisitos regulamentares de cada tipologia de edifício.

As variantes de casas de banho modulares apresentam significativa diversidade tipológica, refletindo tanto as necessidades funcionais do edifício quanto o grau de personalização exigido pelo mercado. Entre as variantes mais recorrentes destacam-se:

- **Unidades standard:** destinadas principalmente a hotéis, residências estudantis e habitação multifamiliar, caracterizadas pela elevada repetibilidade e racionalização produtiva, ilustrado na Figura 25;



Figura 25: Exemplo de unidade sanitária modular standard

Fonte: CMC Módulos ([s.d.])

- **Unidades acessíveis:** desenvolvidas em conformidade com requisitos de acessibilidade universal, incorporando barras de apoio, áreas de manobra ampliadas e dispositivos adaptados;
- **Unidades técnicas especializadas:** aplicadas em hospitais, clínicas e laboratórios, integrando superfícies antibacterianas, sistemas de ventilação reforçada e requisitos rigorosos de higienização, ilustrado na Figura 26;



Figura 26: Unidade sanitária modular técnica especializada produzida em ambiente fabril

Fonte: Harris (2025)

- **Unidades premium:** voltadas a empreendimentos de padrão elevado com maior nível de customização de revestimentos, mobiliário e equipamentos sanitários, conforme demonstrado na Figura 27.



Figura 27: Unidade sanitária modular com acabamento premium

Fonte: Porcelanosa Offsite ([s.d.])

Apesar da diversidade de variantes, observa-se que a maior parte da customização ocorre nos acabamentos, revestimentos, acessórios e equipamentos, enquanto a estrutura principal e a geometria básica permanecem padronizadas. Segundo Smith (2010), essa estratégia permite equilibrar flexibilidade arquitetônica e eficiência industrial, possibilitando ganhos de escala sem comprometer a personalização requerida pelo utilizador final. Dessa forma, as variantes de casas de banho modulares demonstram a capacidade da construção industrializada em adaptar soluções padronizadas a diferentes exigências funcionais, técnicas e mercadológicas.

2.3.4 Acabamentos

Os acabamentos representam um dos elementos mais relevantes na percepção de qualidade, durabilidade e desempenho das casas de banho modulares. A execução em ambiente

fabril permite maior precisão na aplicação de revestimentos, impermeabilizações e instalação de acessórios, reduzindo patologias associadas à humidade e falhas de execução (Lawson, Ogden & Goodier, 2014).

Os materiais mais utilizados incluem revestimentos cerâmicos, grés porcelânico, laminados de alta pressão (HPL), placas cimentícias e superfícies sólidas pré-fabricadas. Estes sistemas apresentam elevada resistência à humidade e boa compatibilidade com processos industrializados de montagem e manutenção (Kamali & Hewage, 2017).

Os módulos sanitários utilizam sistemas construtivos multicamadas, compostos por elementos estruturais, isolamento termoacústico, placas cimentícias, membranas impermeabilizantes e revestimentos de acabamento. Segundo Lawson, Ogden e Goodier (2018), a produção em ambiente controlado permite maior rigor na execução dos componentes construtivos, reduzindo variabilidades de execução e contribuindo para o aumento da qualidade e durabilidade do sistema.

Na Figura 28 é apresentada uma vista explodida de uma unidade sanitária modular, evidenciando a integração entre estrutura, revestimentos, instalações e componentes de acabamento previamente montados em fábrica.

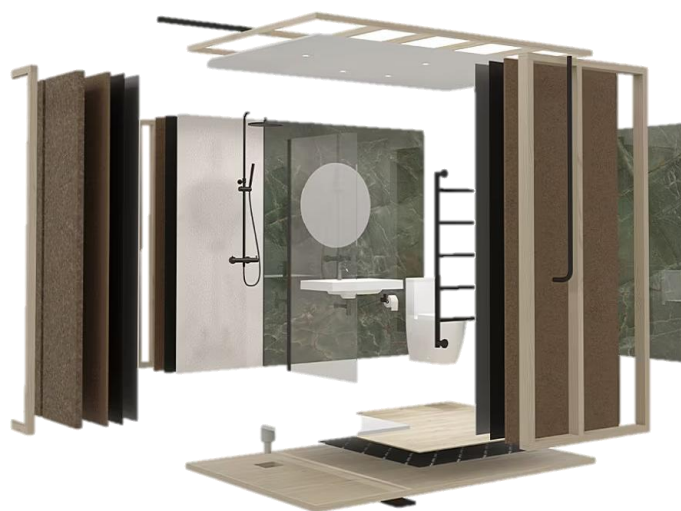


Figura 28: Composição construtiva e acabamentos de casa de banho modular industrializada

Fonte: Porcelanosa Offsite ([s.d.])

Paralelamente, os módulos sanitários recebem em fábrica equipamentos e acessórios como louças, metais, espelhos, sistemas de ventilação e componentes hidráulicos, permitindo a realização prévia de testes de funcionamento e estanqueidade.

2.3.5 Condicionantes

A implementação de casas de banho modulares envolve condicionantes técnicas, logísticas e regulamentares que influenciam diretamente a integração dos módulos ao edifício e o desempenho final da solução. Segundo Lu e Korman (2010), a elevada concentração de

instalações hidráulicas, elétricas e de ventilação em um volume reduzido exige elevado nível de coordenação entre projeto, fabricação e montagem.

Uma das principais condicionantes refere-se à compatibilização dimensional entre o módulo e a estrutura principal do edifício. Tolerâncias de fabricação, alinhamento das interfaces e posicionamento das ligações técnicas devem ser previamente coordenados para evitar problemas de instalação, estanqueidade e funcionamento das infraestruturas prediais (Jaillon & Poon, 2014).

Na Figura 29 é ilustrado um esquema construtivo de uma unidade sanitária modular, evidenciando a integração entre estrutura, instalações hidráulicas, ventilação, revestimentos e componentes técnicos que condicionam a coordenação e a compatibilização do módulo com a edificação.

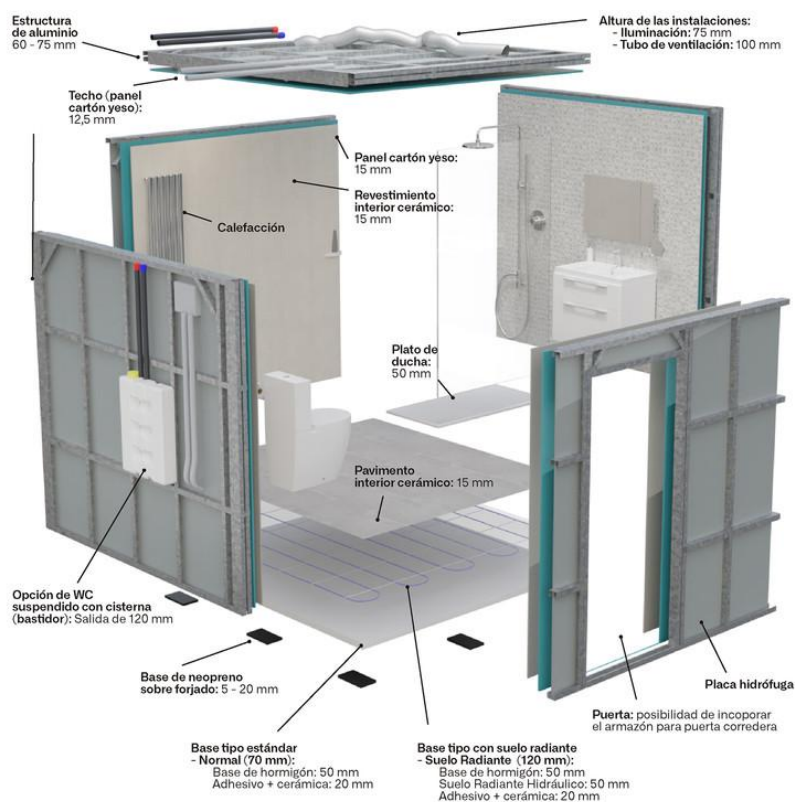


Figura 29: Esquema técnico de integração de sistemas em casa de banho modular

Fonte: ARCHDAILY BRASIL (2021)

Outro aspeto relevante envolve as condicionantes logísticas associadas ao transporte e à instalação dos módulos. Dimensões máximas de transporte, capacidade de içamento, acessibilidade ao estaleiro e áreas de armazenamento podem limitar o tamanho e o peso das unidades modulares, especialmente em áreas urbanas densas (Rahman, 2014).

No campo do desempenho técnico, as casas de banho modulares devem atender a exigências relacionadas ao isolamento acústico, impermeabilização, resistência ao fogo,

acessibilidade, ventilação e segurança elétrica. Segundo Mao et al. (2015), falhas nas interfaces entre módulos e estrutura podem comprometer a estanqueidade e o desempenho acústico do sistema, tornando essenciais soluções adequadas de vedação e desacoplamento. Além disso, a padronização industrial deve ser conciliada com certo nível de flexibilidade arquitetônica, permitindo adaptações de layout, acabamentos e equipamentos sem comprometer a eficiência produtiva (Yuan et al., 2018).

A Tabela 2 apresenta uma síntese das principais condicionantes associadas às casas de banho modulares industrializadas.

Categoria	Condicionantes principais
Coordenação dimensional	Compatibilização com estrutura, vãos, tolerâncias e interfaces
Instalações prediais	Integração hidráulica, elétrica, ventilação e acessos técnicos
Transporte e logística	Limites de transporte, içamento e armazenamento em obra
Desempenho técnico	Requisitos acústicos, térmicos, impermeabilização e resistência ao fogo
Regulamentação	Normas de acessibilidade, segurança e desempenho
Flexibilidade arquitetônica	Limites entre padronização industrial e personalização

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

2.3.6 Exemplo de aplicação de casas de banho modulares

As unidades sanitárias modulares têm sido amplamente aplicadas em diferentes tipologias de edifícios, sobretudo em contextos que exigem elevada repetitividade funcional, rigor técnico e redução de prazos de execução.

No setor hoteleiro, estas unidades são frequentemente utilizadas em empreendimentos com elevado número de quartos, onde a padronização das instalações sanitárias constitui uma vantagem significativa. De forma semelhante, no setor da saúde, a aplicação de unidades sanitárias modulares em hospitais e unidades de internamento tem demonstrado benefícios ao nível da qualidade construtiva e do cumprimento de exigentes requisitos de higiene e funcionalidade, conforme ilustrado na Figura 30 (Arif & Egbu, 2010).



Figura 30: Unidades sanitárias modulares destinadas a aplicações hospitalares.

Fonte: Harris (2025)

No contexto da habitação multifamiliar, as unidades sanitárias modulares têm ganho relevância por reduzirem interferências em obra e melhorarem a coordenação entre especialidades. A integração prévia dos sistemas hidráulicos e elétricos em fábrica aumenta a precisão construtiva e contribui para ganhos de eficiência e redução de custos (Steinhardt & Manley, 2016), sendo uma solução amplamente aplicada em habitação social e residências estudantis devido à rapidez de execução.

Para além das aplicações permanentes, estas soluções são também amplamente utilizadas em construções temporárias, como instalações de emergência, alojamentos provisórios e infraestruturas para eventos. Nestes casos, destacam-se pela facilidade de transporte, rapidez de instalação e possibilidade de reutilização, características que contribuem para uma abordagem mais sustentável e alinhada com os princípios da economia circular (Rakhshan et al., 2020).

Deste modo, a diversidade de aplicações das unidades sanitárias modulares evidencia a sua versatilidade e reforça o seu papel como elemento estratégico na industrialização da construção, contribuindo para a melhoria da eficiência, qualidade e sustentabilidade dos projetos.

2.4 Métodos de Avaliação de Sistemas Construtivos

A avaliação de sistemas construtivos tem-se tornado um elemento central no processo de tomada de decisão na construção civil, sobretudo em contextos que envolvem soluções industrializadas e modulares. A crescente complexidade dos projetos, associada à necessidade de considerar simultaneamente critérios técnicos, económicos e ambientais, exige abordagens estruturadas que permitam comparar alternativas de forma integrada e fundamentada.

Tradicionalmente, a seleção de sistemas construtivos baseava-se predominantemente em critérios isolados, como o custo inicial ou o prazo de execução. Contudo, esta abordagem revela-se limitada, uma vez que desconsidera aspetos relevantes como desempenho ao longo do ciclo de vida, manutenção, impacto ambiental e qualidade do produto final. Nesse sentido, a literatura recente aponta para a necessidade de métodos que permitam incorporar múltiplos critérios no processo de decisão, promovendo uma análise mais abrangente e consistente (Pons & Wadel, 2011; Kylili & Fokaides, 2015).

2.4.1 Avaliação de desempenho na construção

A avaliação de desempenho na construção consiste na análise sistemática do comportamento de sistemas construtivos face a um conjunto de requisitos previamente definidos, incluindo desempenho estrutural, funcional, térmico, acústico e durabilidade. Este tipo de abordagem permite verificar a adequação das soluções construtivas às exigências normativas e às necessidades dos utilizadores, constituindo uma ferramenta fundamental para a melhoria da qualidade na construção.

De acordo com Foliente (2000), a avaliação de desempenho surge como alternativa às especificações prescritivas, permitindo maior flexibilidade na adoção de soluções inovadoras. No contexto atual, esta abordagem assume particular relevância na construção modular, onde a integração entre sistemas e a precisão construtiva exigem elevados níveis de controle e verificação.

Além da verificação técnica e normativa, a avaliação de desempenho tem sido progressivamente utilizada como instrumento de apoio à decisão na comparação entre sistemas construtivos. Nesse contexto, diferentes critérios de desempenho podem ser analisados de forma integrada, considerando aspectos técnicos, económicos, ambientais e operacionais. Segundo Foliente (2000) e Gibson (2003), *frameworks* contemporâneos de avaliação baseados em desempenho permitem estruturar análises multidimensionais, contribuindo para decisões mais consistentes em projetos complexos.

No contexto da construção modular industrializada, a utilização de métodos de avaliação multicritério torna-se particularmente relevante devido à necessidade de comparar diferentes tecnologias construtivas sob múltiplas perspetivas de desempenho. Dessa forma, a avaliação de desempenho ultrapassa a simples verificação normativa, assumindo papel estratégico no processo de seleção e hierarquização de sistemas construtivos.

2.4.2 Métodos multicritério (MCDM)

Os métodos multicritério de tomada de decisão são reconhecidos como ferramentas eficazes para a resolução de problemas que envolvem critérios conflitantes e múltiplas alternativas. Estes métodos permitem estruturar problemas complexos, nos quais dificilmente uma única solução se destaca em todos os critérios simultaneamente, possibilitando a identificação de alternativas que apresentam diferentes níveis de compromisso entre os objetivos considerados.

Os problemas abordados pelos métodos MCDM caracterizam-se pela presença de múltiplos critérios de avaliação, frequentemente expressos em diferentes unidades e envolvendo componentes quantitativas e qualitativas. Nesse contexto, a decisão passa a depender não apenas dos dados disponíveis, mas também do julgamento de valor dos decisores (Belton & Stewart, 2002).

A literatura classifica os métodos multicritério em três grandes grupos: métodos ordinais, métodos de sobre classificação e métodos de agregação aditiva. Os métodos ordinais, como Borda e Condorcet, baseiam-se na ordenação das preferências dos decisores. Já os métodos de sobre classificação, como ELECTRE e PROMETHEE, utilizam relações de dominância entre alternativas. Por sua vez, os métodos de agregação aditiva, como AHP, MACBETH e TOPSIS, permitem calcular uma pontuação global para cada alternativa com base na ponderação dos critérios (Figueira, Greco & Ehrgott, 2005).

A aplicação de métodos multicritério na construção civil tem sido amplamente difundida em estudos relacionados à seleção de materiais, avaliação de sustentabilidade e

escolha de sistemas construtivos, permitindo uma abordagem mais transparente e estruturada do processo decisório (Kabir, Sadiq & Tesfamariam, 2014).

2.4.3 Método AHP (*Analytic Hierarchy Process*)

O Método AHP desenvolvido por Thomas Saaty na década de 1970, consolidou-se como um dos métodos multicritério mais difundidos para apoiar decisões complexas que envolvem variáveis de natureza qualitativa e quantitativa. A sua popularidade decorre da estrutura hierárquica simples, da racionalidade na comparação pareada e da possibilidade de incorporar o julgamento de especialistas ou dados técnicos sempre que disponível (Saaty & Vargas, 2012). No campo da construção civil, o AHP tem sido utilizado para selecionar tecnologias, avaliar desempenho de sistemas construtivos e priorizar alternativas de projeto, especialmente quando as informações são heterogêneas ou incompletas (Vincke, 1992; Mota & Almeida, 2018).

O método parte da decomposição do problema decisório em níveis hierárquicos: objetivo geral, critérios, subcritérios e alternativas. Essa organização visa facilitar o entendimento do problema e tornar explícitas as relações entre os elementos avaliados, como ilustrado na Figura 31. Em seguida, são realizadas comparações pareadas, nas quais cada critério é confrontado com os demais segundo a escala fundamental proposta por Saaty, que varia de 1 (igual importância) a 9 (importância extrema). O julgador indica o quanto um elemento é mais relevante do que outro, e tais relações formam uma matriz quadrada de prioridades. A partir dessa matriz, obtém-se o autovetor principal, que representa os pesos relativos dos critérios dentro do problema analisado (Saaty & Vargas, 2012).

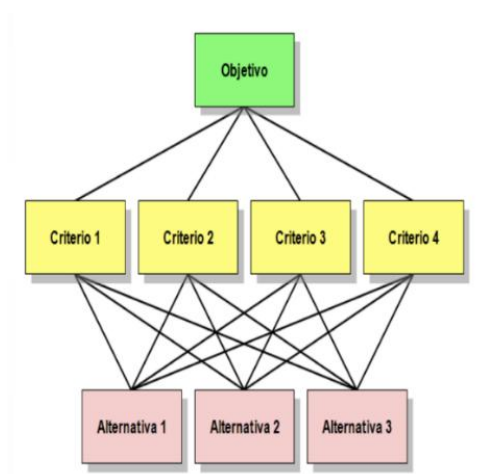


Figura 31: Estruturação hierárquica método AHP

Fonte: Adaptado de Saaty (1980)

Uma etapa central do AHP é a verificação de consistência. Como os julgamentos humanos estão sujeitos a imprecisões, o método calcula o Índice de Consistência (CI) e o Coeficiente de Consistência (CR). Um CR inferior a 0,10 indica que os julgamentos são coerentes e aceites; valores superiores sugerem que as comparações devem ser revistas (Saaty, 1980). Essa verificação garante maior robustez metodológica e reduz o risco de decisões

enviesadas, aspecto frequentemente destacado na literatura de métodos multicritério (Gomes, Gomes & Almeida, 2006).

2.4.3.1 Estruturação do problema decisório

Após a definição da estrutura hierárquica, a etapa seguinte do método AHP consiste na realização de comparações par a par entre os elementos de um mesmo nível, sempre em relação a um critério do nível superior. Essas comparações permitem quantificar a importância relativa entre os elementos, constituindo a base para o cálculo dos pesos no modelo.

Para operacionalizar esse processo, Saaty (1980) propôs uma escala fundamental de julgamentos, que associa valores numéricos à intensidade de preferência entre dois elementos. Essa escala varia de 1 a 9, sendo amplamente utilizada em aplicações do AHP por sua simplicidade e capacidade de representar julgamentos qualitativos de forma consistente.

O valor 1 indica que os elementos comparados possuem igual importância, enquanto valores maiores indicam graus crescentes de preferência de um elemento sobre o outro. Valores intermédios (2, 4, 6 e 8) podem ser utilizados quando se deseja representar situações de compromisso entre os níveis principais da escala.

A Tabela 3 apresenta a escala fundamental proposta por Saaty, incluindo sua correspondência verbal e a interpretação associada a cada nível de julgamento.

Tabela 3 - Escala fundamental do AHP

Escala numérica	Escala verbal	Explicação
1	Mesma importância	As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo
3	Importância pequena de uma sobre a outra	A experiência e o julgamento favorecem levemente uma atividade em relação à outra
5	Importância grande ou essencial	A experiência e o julgamento favorecem fortemente uma atividade em relação à outra
7	Importância muito grande ou demonstrada	Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação à outra; sua dominância é demonstrada na prática
9	Importância absoluta	A evidência favorece uma atividade em relação à outra com o mais alto grau de certeza
2, 4, 6, 8	Valores intermédios	Utilizados quando se procura uma condição de compromisso entre duas definições

Fonte: Saaty (1980).

A utilização dessa escala permite transformar julgamentos subjetivos em valores numéricos, possibilitando a construção das matrizes de comparação pareada e o posterior cálculo dos vetores de prioridade. Além disso, a padronização dos julgamentos contribui para a consistência do modelo, facilitando a verificação da coerência lógica das comparações realizadas.

2.4.3.2 Construção das matrizes de comparação pareada

A partir da conversão das avaliações qualitativas, são construídas matrizes de comparação pareada para cada critério de avaliação. Cada matriz A , de ordem $n \times n$, expressa a

importância relativa de uma alternativa em relação às demais, sendo definida com a utilização da Equação 1.

$$A = \begin{pmatrix} 1 & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a & \cdots & 1 \\ \frac{1}{a_{n1}} & \cdots & 1 \end{pmatrix} \quad \text{Eq. 1}$$

Em que:

$a_{ij} > 0$ – Positiva;

$a_{ij} = 1$ e $a_{ji} = 1$;

$a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}$ - Recíproca;

$a_{jk} = a_{ij} \cdot a_{jk}$ – Consistência.

A matriz de comparação é construída para todos os critérios e alternativas existentes, comparando estas entre si relativamente a um critério. O número de colunas e linhas da matriz é igual, obtendo assim em todos os casos obrigatoriamente matrizes quadradas (n x n).

De acordo com Saaty (1980), o método AHP envolve três etapas principais: normalização das matrizes de julgamento, cálculo das prioridades médias locais e determinação das prioridades globais. A normalização é realizada pela divisão dos elementos da matriz pelo somatório de cada coluna; em seguida, calculam-se as prioridades locais por meio da média das linhas normalizadas. Por fim, obtém-se o vetor de prioridades globais, que representa a importância relativa de cada alternativa em relação ao objetivo principal da análise.

2.4.3.3 Determinação dos pesos relativos

Os pesos relativos dos elementos são obtidos a partir do cálculo do vetor próprio principal da matriz de comparação pareada, associado ao maior autovalor da matriz. Utilizando a Equação 2.

$$A \cdot w = \lambda_{\max} \cdot w \quad \text{Eq. 2}$$

Onde:

w - representa o vetor de prioridades;

$\lambda_{\max}$ - corresponde ao maior autovalor da matriz;

Os valores obtidos são normalizados de forma que a soma dos pesos seja igual a 1, de acordo com a Equação 3.

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad \text{Eq. 3}$$

Esse procedimento permite quantificar a importância relativa dos critérios ou o desempenho das alternativas dentro do modelo.

2.4.3.4 Verificação da consistência dos julgamentos

A coerência lógica das comparações realizadas é avaliada por meio do Índice de Consistência (CI), calculado a partir do maior autovalor da matriz, conforme a Equação 4.

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad \text{Eq. 4}$$

Em que, n corresponde ao número de critérios avaliados e $\lambda_{\max}$ o maior autovalor de cada matriz de comparação pareada (Número principal de Eigen).

A partir do CI, determina-se a Razão de Consistência (CR), dada pela Equação 5.

$$CR = \frac{CI}{RI} < 0,10 \quad \text{Eq. 5}$$

Onde RI corresponde ao Índice Aleatório, definido por Saaty em função da ordem da matriz. Conforme os valores de RI para diferentes ordens de matriz apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Valores de RI para diferentes ordens de matriz

Ordem da matriz (n)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Fonte: Saaty (2005).

Valores de $CR < 0,10$ são geralmente considerados aceitáveis, indicando que os julgamentos apresentam consistência adequada (Saaty, 1980).

2.4.3.5 Agregação das prioridades

Após a obtenção dos pesos relativos, os resultados são agregados para determinar o desempenho global das alternativas. Esse processo pode ser realizado por meio de uma combinação linear ponderada, conforme a Equação 6.

$$W_j = \sum_{i=1}^n w_i \cdot w_{ij} \quad \text{Eq. 6}$$

Em que:

W_j - Representa o desempenho global da alternativa j ;

w_i - Corresponde ao peso do critério i ;

w_{ij} - Representa o desempenho da alternativa j no critério i .

2.5 Critérios de Seleção das Soluções Construtivas

A seleção de sistemas construtivos industrializados envolve a consideração simultânea de diferentes fatores técnicos, económicos e ambientais. Nesta secção, são apresentados os principais critérios utilizados na literatura para avaliação e comparação de soluções construtivas aplicáveis à construção modular.

2.5.1 Critérios técnicos de seleção

A literatura sobre construção modular identifica um conjunto amplo de critérios técnicos que podem ser considerados na avaliação de sistemas industrializados. Estes critérios abrangem aspetos relacionados com desempenho, execução, integração e operação ao longo do ciclo de vida (Pan, Gibb & Dainty, 2008; Rahman, 2014).

A Tabela 5 apresenta uma síntese dos principais critérios técnicos identificados na literatura, servindo de base para a seleção dos critérios utilizados no modelo de avaliação desenvolvido no Capítulo 3.

Tabela 5 - Critérios técnicos aplicáveis a módulos sanitários industrializados

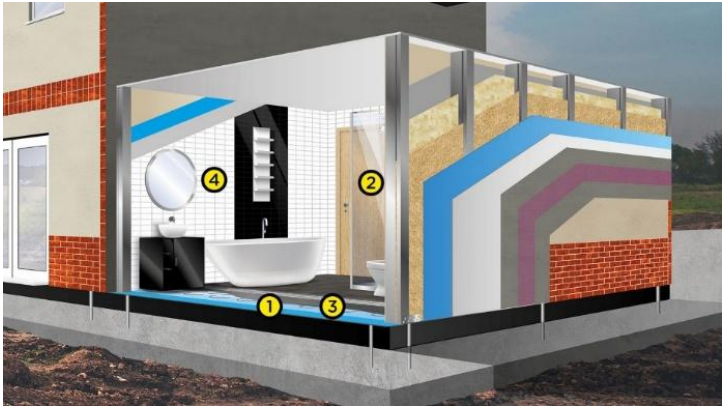
Critério	Descrição	Principais fatores	Exemplos de aplicação	Referências
Transportabilidade	Capacidade de deslocamento do módulo entre fábrica e obra	Dimensões, peso, logística, vibração	Transporte modular com limitação de peso e dimensões para circulação rodoviária	Gibb (1999) e Lawson et al. (2014)
Conectividade	Eficiência das interfaces entre módulo e edifício	Ligações técnicas, precisão, compatibilização	Ligações rápidas entre instalações hidráulicas e elétricas do módulo	Lawson et al. (2014) e Smith (2010)
Manutenção	Facilidade de acesso e intervenção ao longo do ciclo de vida	Acessibilidade, padronização, durabilidade	Acesso facilitado às instalações técnicas por shafts ou painéis removíveis	Agopyan et al. (2002); Rakhshan et al. (2020)
Compatibilidade construtiva	Integração com diferentes sistemas estruturais	Interfaces, tolerâncias, coordenação modular	Integração do módulo com diferentes sistemas estruturais do edifício	Steinhardt e Manley (2016)
Desempenho estrutural	Capacidade de resistir a cargas durante transporte e uso	Rigidez, estabilidade, resistência	Resistência do módulo durante transporte, içamento e utilização	Lawson et al. (2014)
Desempenho térmico	Eficiência no isolamento térmico	Materiais, envolvente, pontes térmicas	Utilização de isolamento térmico industrializado nas paredes do módulo	Kamali e Hewage (2016)
Desempenho acústico	Capacidade de isolamento sonoro	Materiais, juntas, interfaces	Aplicação de materiais isolantes para redução da transmissão sonora	Smith (2010)

Critério	Descrição	Principais fatores	Exemplos de aplicação	Referências
Estanqueidade	Resistência à passagem de água e ar	Vedação, juntas, execução	Ensaio de impermeabilização e vedação das juntas modulares	Gibb (1999)
Durabilidade	Vida útil dos materiais e sistemas	Resistência, desgaste, manutenção	Utilização de materiais resistentes à humidade e desgaste contínuo	Agopyan et al. (2002)
Precisão dimensional	Nível de tolerância e exatidão de fabricação	Controle fabril, repetibilidade	Fabricação automatizada com tolerâncias reduzidas	Lawson et al. (2014)
Tempo de montagem	Rapidez de instalação em obra	Conectividade, logística, coordenação	Instalação rápida do módulo no estaleiro através de içamento	Bertram et al. (2019)
Flexibilidade de projeto	Capacidade de adaptação a diferentes layouts	Modularidade, parametrização	Adaptação de layouts e acabamentos conforme o empreendimento	Steinhardt e Manley (2016)

Fonte: O autor (2026).

A integração dos módulos sanitários industrializados com a edificação envolve diversos critérios técnicos, destacando-se a conectividade, a compatibilidade construtiva e o desempenho dos sistemas. Como ilustrado na Figura 32, a articulação entre os diferentes elementos construtivos, incluindo estrutura, revestimentos e camadas de isolamento; exige elevado nível de coordenação, de forma a garantir a continuidade das interfaces e o adequado desempenho do conjunto (Kamali & Hewage, 2017; Lu & Yuan, 2013).

Figura 32: Detalhe construtivo de módulo sanitário industrializado evidenciando a integração de sistemas e camadas da envolvente.



Fonte: Weber (2024)

Embora diversos critérios possam ser considerados, neste trabalho foram selecionados apenas aqueles mais relevantes para o contexto em análise, conforme apresentado no Capítulo 3.

2.5.2 Critérios comerciais de seleção

A avaliação de sistemas construtivos industrializados, sob a perspectiva comercial, envolve um conjunto de variáveis que ultrapassam a análise isolada de custos, incorporando fatores como produtividade, prazos de execução, risco e capacidade produtiva. A literatura evidencia que estes aspetos são determinantes para a viabilidade económica das soluções modulares, sobretudo em contextos de produção em série e elevada repetitividade (Blismas et al., 2006; Lessing, Stehn & Ekholm, 2015). A Tabela 6 apresenta uma síntese dos principais critérios comerciais identificados na literatura.

Tabela 6 - Critérios comerciais aplicáveis a módulos sanitários

Critério	Descrição	Principais fatores	Exemplos de aplicação	Referências
Custo de produção	Custos diretos e indiretos associados à produção do módulo	Materiais, mão de obra, logística	Redução de desperdícios e retrabalho em ambiente fabril	Ashworth (2013); Gould e Joyce (2014)
Custo do ciclo de vida	Custos ao longo da vida útil do sistema	Manutenção, operação, substituição	Menor necessidade de manutenção ao longo da vida útil	Kamali e Hewage (2016)
Tempo de produção <i>off-site</i>	Tempo necessário para fabricação do módulo	Padronização, repetitividade	Produção simultânea de múltiplos módulos em linha fabril.	Gibb (1999); Lawson et al. (2014)
Prazo global do projeto	Tempo total de execução da obra	Produção paralela, montagem rápida	Redução do cronograma devido à produção paralela e montagem rápida	Bertram et al. (2019); Wef (2018)
Produtividade	Eficiência do processo construtivo	Industrialização, repetição, controlo	Produção padronizada com elevada repetibilidade	Bertram et al. (2019)
Escalabilidade	Capacidade de produção em larga escala	Produção seriada, capacidade industrial	Ampliação da capacidade produtiva para múltiplos empreendimentos	MBI (2024)
Risco de execução	Probabilidade de falhas ou atrasos	Complexidade, dependência logística	Redução de falhas decorrentes de interferências climáticas	Smith (2010)
Assistência técnica (montagem e pós-obra)	Suporte técnico durante instalação e garantia	Especialização, rastreabilidade	Suporte especializado para instalação e manutenção dos módulos	Gibb (1999); Lawson et al. (2014)
Disponibilidade de fornecedores	Existência de cadeia de fornecimento	Mercado local, logística	Existência de cadeia produtiva e logística especializada	Wef (2018)
Flexibilidade comercial	Capacidade de adaptação a diferentes projetos	Customização, modularidade	Possibilidade de customização conforme exigências do cliente	Steinhardt e Manley (2016)

Fonte: O autor (2026).

Como ilustrado na Figura 33, o uso de guias permite uma montagem rápida e precisa, exigindo coordenação técnica para minimizar riscos de execução (Goodier & Gibb, 2007).



Figura 33: Instalação de módulos sanitários volumétricos em edifício de grande altura.

Fonte: Construction Management (2021)

Diante desse conjunto amplo de variáveis, procedeu-se à seleção dos critérios mais pertinentes ao objetivo deste estudo, os quais serão posteriormente integrados no modelo de avaliação descrito no Capítulo 3.

2.5.3 Critérios de impacto ambiental

Os critérios ambientais associados à construção modular abrangem o consumo de recursos naturais, a geração de resíduos e os impactos ao longo do ciclo de vida do sistema. A Tabela 7 sintetiza os principais critérios ambientais identificados na literatura.

Tabela 7 - Critérios ambientais aplicáveis a módulos sanitários

Critério	Descrição	Principais fatores	Exemplos de aplicação	Referências
Consumo de energia	Energia utilizada na produção e operação	Automação, eficiência fabril	Uso de linhas automatizadas e redução de retrabalho em fábrica	Gibb (1999); Smith (2010)
Consumo de água	Uso de água nos processos produtivos	Reutilização, controlo fabril	Reutilização de água em processos de corte e limpeza industrial	Gibb (1999); Lawson et al. (2014)
Geração de resíduos	Volume de resíduos gerados	Padronização, eficiência produtiva	Produção com cortes padronizados e menor desperdício de materiais	Formoso et al. (2002); CIB (2010)
Emissões de CO ₂	Impacto em termos de gases de efeito estufa	Transporte, materiais, produção	Redução de transporte de materiais e menor tempo de obra no estaleiro	Wef (2018); Rakhshan et al. (2020)
Uso de materiais sustentáveis	Emprego de materiais de baixo impacto	Recicláveis, reutilizáveis	Emprego de madeira engenheirada e materiais recicláveis	Kamali e Hewage (2016)
Reutilização e desmontagem	Capacidade de reaproveitamento dos módulos	Modularidade, desmontabilidade	Módulos desmontáveis e reaproveitamento de componentes.	Adams et al. (2017)
Impacto no estaleiro	Interferência ambiental local	Ruído, poeira, resíduos	Redução de ruído, poeira e geração de resíduos durante a montagem.	Gibb (1999)
Eficiência no uso de recursos	Otimização de materiais e insumos	<i>Lean construction</i> , industrialização	Padronização produtiva e otimização do consumo de materiais.	Krajewski et al. (2016)

Fonte: O autor (2026).

A produção em ambiente fabril permite maior controlo e eficiência no consumo de energia, devido à padronização dos processos e à utilização de equipamentos especializados, como ilustrado na Figura 34 (Dixit et al., 2012).



Figura 34: Produção industrializada de módulos sanitários em ambiente controlado.

Fonte: ArchDaily (2021)

Tendo em conta a multiplicidade de indicadores possíveis, foram selecionados, para o presente trabalho, os critérios que melhor se adequam ao contexto de análise, sendo a sua aplicação detalhada no modelo de avaliação apresentado no Capítulo 3

3 METODOLOGIA DE INVESTIGAÇÃO

Este capítulo apresenta os procedimentos metodológicos adotados nesta investigação, contemplando a definição dos sistemas construtivos analisados, a seleção dos critérios de avaliação e a estruturação da base de dados qualitativa utilizada na pesquisa. Também são descritas as etapas de organização do modelo multicritério e os procedimentos utilizados para operacionalização da análise comparativa entre as soluções construtivas aplicáveis à produção modular de unidades sanitárias.

3.1 Contexto da Metodologia de Investigação

A presente pesquisa caracteriza-se como um estudo de natureza aplicada, com abordagem qualitativa e quantitativa, desenvolvido com o objetivo de avaliar comparativamente sistemas construtivos industrializados por meio de um método estruturado de apoio multicritério à decisão. Segundo Gil (2017), a pesquisa aplicada tem como finalidade a geração de conhecimentos voltados à solução de problemas concretos, característica que se alinha ao propósito deste trabalho, centrado na seleção e comparação de sistemas construtivos em contextos reais de tomada de decisão na indústria da construção civil.

Quanto à abordagem metodológica, adota-se um método misto, no qual aspectos qualitativos e quantitativos são complementares. A dimensão qualitativa manifesta-se na seleção e fundamentação dos critérios de avaliação, na interpretação do desempenho relativo dos sistemas construtivos e na contextualização dos resultados à luz da literatura técnica e científica. A dimensão quantitativa, por sua vez, está associada à aplicação do método AHP, que permite converter julgamentos qualitativos em valores numéricos por meio de comparações pareadas, possibilitando a hierarquização das alternativas com base em procedimentos matemáticos formais (Saaty, 2005).

Do ponto de vista dos objetivos, a pesquisa apresenta caráter descritivo e analítico. É descritiva ao organizar e sistematizar informações provenientes da literatura sobre o desempenho técnico, comercial e ambiental de diferentes sistemas construtivos, e analítica ao aplicar um modelo multicritério capaz de comparar alternativas e avaliar a influência relativa dos critérios no resultado final (Lakatos & Marconi, 2017).

No que se refere aos procedimentos técnicos, o estudo configura-se como uma pesquisa bibliográfica associada a um estudo metodológico aplicado, uma vez que a base de dados utilizada foi construída a partir de fontes secundárias, incluindo artigos científicos, livros técnicos, dissertações e normas relacionadas à construção industrializada e à avaliação de sistemas construtivos. De acordo com Prodanov e Freitas (2013), a pesquisa bibliográfica é adequada quando se pretende fundamentar análises e proposições metodológicas a partir de material já publicado e validado cientificamente.

Conforme discutido no Capítulo 2, diversos métodos de apoio multicritério à decisão poderiam ser empregados para a comparação de sistemas construtivos, tais como ELECTRE, PROMETHEE e TOPSIS. Esses métodos diferenciam-se quanto à lógica de agregação dos

critérios, à forma de tratamento das preferências e ao tipo de informação exigida do decisor (Triantaphyllou, 2000). A escolha do método AHP fundamenta-se, contudo, em um conjunto de características que o tornam particularmente adequado ao escopo desta pesquisa.

O AHP destaca-se por sua capacidade de estruturar problemas complexos de forma hierárquica, permitindo decompor o processo decisório em níveis bem definidos: objetivo, critérios e alternativas, o que favorece a clareza, a transparência e a rastreabilidade do modelo de decisão (Saaty, 2005). Além disso, o método possibilita a integração de julgamentos qualitativos e quantitativos, aspecto relevante em estudos sobre sistemas construtivos, em que muitas informações são predominantemente descritivas e dificilmente mensuráveis de forma direta.

No presente estudo, a estrutura hierárquica do método foi organizada com base em três grupos principais de fatores de avaliação: técnicos, comerciais e ambientais. Esses grupos contemplam aspetos relacionados ao desempenho construtivo dos sistemas, à viabilidade económica e produtiva, bem como aos impactos associados ao consumo de recursos e à geração de resíduos.

A partir desses grupos, foram definidos subcritérios específicos para permitir uma análise comparativa mais detalhada entre os sistemas construtivos selecionados. Ressalta-se que a definição desses fatores de avaliação será apresentada e fundamentada de forma detalhada nas secções seguintes deste capítulo.

Outro fator determinante para a escolha do AHP refere-se à possibilidade de verificação da consistência lógica dos julgamentos, por meio do cálculo do autovalor máximo ($\lambda_{\max}$), do índice de consistência (CI) e da razão de consistência (CR). Diferentemente de outros métodos multicritério, essa funcionalidade permite avaliar a coerência interna das comparações realizadas, conferindo maior rigor metodológico e confiabilidade aos resultados obtidos (Ishizaka & Labib, 2011). Essa característica é particularmente relevante em estudos académicos, em que a validação e a transparência do processo decisório são requisitos fundamentais.

Vale salientar que o AHP apresenta ampla aplicação em estudos da área da construção civil, especialmente na avaliação comparativa de sistemas construtivos, na seleção de tecnologias construtivas e na análise de alternativas sob múltiplos critérios, conforme evidenciado por diversos autores (Pan et al., 2008; Jauslin & Adey, 2020). Essa recorrência na literatura reforça a adequação do método ao objeto de estudo desta dissertação.

Na Figura 35 são apresentadas de forma esquemática as etapas metodológicas adotadas nesta pesquisa.

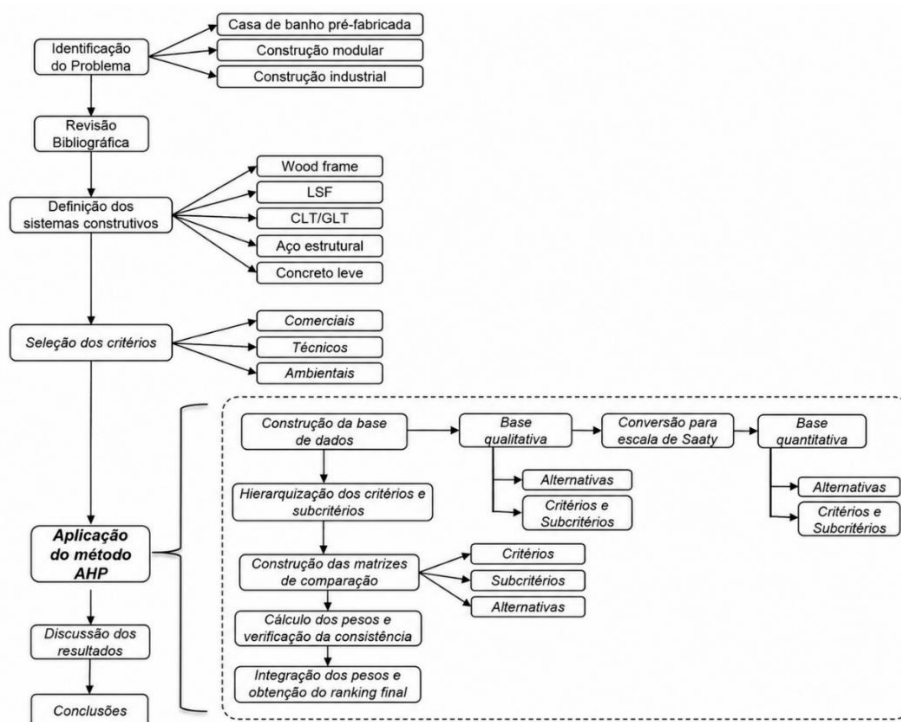


Figura 35: Fluxograma da metodologia de investigação

Fonte: O autor.

A aplicação do método AHP neste trabalho foi realizada com o apoio de planilhas eletrónicas desenvolvidas para garantir a rastreabilidade dos cálculos e a transparência metodológica. As planilhas utilizadas contemplam a normalização das matrizes, o cálculo dos vetores de pesos relativos, a verificação da consistência dos julgamentos e a integração final dos resultados. Dessa forma, assegura-se maior reprodutibilidade da metodologia e flexibilidade para análise de diferentes cenários decisórios. As planilhas completas encontram-se apresentadas no Anexo I.

Por fim, destaca-se que a presente pesquisa não tem como objetivo estabelecer uma hierarquia universal de sistemas construtivos, uma vez que os resultados obtidos estão diretamente associados aos critérios, subcritérios e prioridades adotados no modelo decisório desenvolvido. Nesse sentido, o estudo busca demonstrar a aplicabilidade do método AHP como ferramenta de apoio à decisão na avaliação comparativa de soluções construtivas para unidades sanitárias modulares, evidenciando sua capacidade de adaptação a diferentes contextos e prioridades do setor da construção civil.

3.2 Estudo Comparativo de Sistemas Construtivos Utilizando a Metodologia AHP

Nesta etapa da investigação, foi estruturado o modelo multicritério utilizado para comparação dos sistemas construtivos analisados. O desenvolvimento do modelo contemplou a definição das alternativas avaliadas, a seleção dos critérios e subcritérios de análise, a

construção da base de dados qualitativa e a organização dos procedimentos necessários para aplicação do método AHP.

Nos tópicos seguintes são apresentados os sistemas construtivos considerados na pesquisa, os critérios adotados na avaliação comparativa e os procedimentos metodológicos utilizados para estruturação do modelo decisório.

3.2.1 Sistemas construtivos analisados

A seleção dos sistemas construtivos analisados neste estudo foi realizada a partir de uma revisão da literatura especializada sobre construção industrializada e sistemas construtivos contemporâneos. Conforme discutido no Capítulo 2, a literatura apresenta uma ampla diversidade de soluções construtivas, que variam em grau de industrialização, desempenho técnico, impacto ambiental e viabilidade econômica. No entanto, a inclusão de um número excessivo de alternativas em um modelo multicritério pode comprometer a clareza da análise e dificultar a interpretação dos resultados.

Dessa forma, optou-se por selecionar um conjunto delimitado e representativo de sistemas construtivos, com o objetivo de demonstrar a aplicação do método AHP no contexto da comparação de alternativas construtivas. Os sistemas escolhidos para a análise, *Wood Frame*, Aço Leve (LSF), madeira engenheirada CLT/GLT, Aço Estrutural e Betão Leve, apresentam elevada recorrência na literatura acadêmica, relevância prática no setor da construção civil e características suficientemente distintas para permitir uma análise comparativa consistente sob os critérios técnicos, comerciais e ambientais definidos neste estudo.

Ressalta-se que a seleção dos sistemas construtivos analisados não deve ser interpretada como definitiva ou exaustiva, mas como uma aplicação do método em um cenário de decisão delimitado e fundamentado na literatura. Em contextos reais, o conjunto de alternativas pode variar conforme as condições de mercado, características técnicas e requisitos específicos de cada projeto. Nesse sentido, o modelo proposto apresenta flexibilidade para adaptação a diferentes cenários decisórios, permitindo a substituição ou ampliação das alternativas analisadas sem prejuízo da coerência metodológica, característica amplamente associada ao método AHP (Saaty, 2005; Pan et al., 2008).

3.2.2 Seleção e fundamentação dos critérios de avaliação

A literatura especializada sobre avaliação de sistemas construtivos industrializados apresenta uma ampla variedade de critérios passíveis de utilização em modelos multicritério, abrangendo aspectos técnicos, econômicos, ambientais, funcionais e sociais. Conforme discutido no Capítulo 2, diferentes autores enfatizam conjuntos distintos de critérios, de acordo com o objetivo da análise e o contexto de aplicação.

No contexto da construção modular e dos sistemas *off-site*, a seleção de critérios assume papel particularmente relevante, uma vez que o desempenho das soluções construtivas depende

não apenas de aspetos estruturais ou funcionais, mas também de fatores relacionados à logística, integração entre sistemas, produtividade, custos e sustentabilidade. Estudos recentes destacam que a eficiência dos sistemas industrializados está diretamente associada à capacidade de compatibilizar desempenho técnico, racionalização produtiva e redução de impactos ambientais (Kamali & Hewage, 2016; Li, Shen & Xue, 2014).

Entretanto, a utilização de um número excessivo de critérios pode comprometer a clareza do modelo decisório, aumentar a complexidade das comparações pareadas e dificultar a interpretação dos resultados. Conforme recomendado por Saaty (2005), modelos multicritério devem buscar equilíbrio entre abrangência analítica e operacionalização prática, evitando estruturas excessivamente complexas que possam comprometer a consistência dos julgamentos. Nesse sentido, a limitação e organização criteriosa dos critérios adotados também encontra respaldo em estudos sobre métodos multicritério aplicados à construção civil (Jato-Espino et al., 2014).

A seleção final dos critérios resultou da consolidação dos principais fatores identificados na revisão bibliográfica apresentada no Capítulo 2, sendo priorizados aqueles com maior recorrência na literatura sobre construção modular e maior potencial de influência no desempenho global das unidades sanitárias modulares. Embora a literatura apresente outros critérios potencialmente relevantes, como aspetos sociais, normativos e arquitetónicos, optou-se por delimitar o modelo aos critérios considerados mais diretamente relacionados ao desempenho técnico, viabilidade produtiva e impacto ambiental dos sistemas construtivos analisados.

A escolha dos critérios e subcritérios baseou-se nos seguintes princípios:

- Recorrência na literatura sobre construção industrializada;
- Relevância para a comparação de sistemas construtivos;
- Aplicabilidade em contextos reais de tomada de decisão;
- Equilíbrio entre abrangência analítica e simplicidade metodológica.

Os critérios selecionados foram organizados em três grupos: técnicos, comerciais e de impacto ambiental. Os critérios técnicos foram definidos com o objetivo de representar aspetos relacionados à viabilidade de aplicação dos módulos, incluindo facilidade de transporte, integração com sistemas construtivos, conectividade entre elementos e condições de manutenção ao longo do ciclo de vida. Tais fatores assumem elevada importância em sistemas modulares volumétricos, nos quais a logística, a montagem e a compatibilização entre subsistemas influenciam diretamente o desempenho global da solução construtiva (Kamali & Hewage, 2016; Lawson, Ogden & Goodier, 2014).

Os critérios comerciais foram incorporados devido à forte influência que custos, prazos de produção e suporte técnico exercem na adoção de sistemas industrializados. A literatura sobre construção *off-site* destaca que a competitividade económica e a previsibilidade produtiva constituem fatores determinantes na seleção de tecnologias construtivas industrializadas,

sobretudo em empreendimentos que exigem racionalização produtiva e redução de prazos de execução (Li, Shen & Xue, 2014; Pan et al., 2008).

Por fim, os critérios de impacto ambiental foram incluídos considerando a crescente relevância da sustentabilidade na construção civil e a necessidade de incorporar indicadores ambientais em processos de tomada de decisão. A consideração de aspetos relacionados ao consumo de energia, consumo de água e geração de resíduos permite ampliar a análise comparativa para além dos fatores exclusivamente técnicos e económicos, alinhando o modelo de decisão aos princípios contemporâneos de construção sustentável e avaliação do ciclo de vida (Ding, 2008; Ortiz, Castells & Sonnemann, 2009).

Os critérios e subcritérios adotados na aplicação do método AHP são apresentados no Tabela 8.

Tabela 8 - Critérios e subcritérios adotados na aplicação do método AHP

Grupo de critérios	Subcritérios
Técnicos	Transportabilidade
	Conectividade
	Manutenção
	Compatibilidade com diferentes sistemas construtivos
Comerciais	Custo de produção
	Tempo de produção <i>off-site</i>
	Assistência técnica na montagem e em garantia
Impacto ambiental	Consumo de energia
	Consumo de água
	Geração de resíduos

Fonte: elaboração própria, com base na literatura (ver Capítulo 2).

Dessa forma, os critérios seleccionados procuram representar, de maneira equilibrada, os principais fatores que influenciam a avaliação comparativa de sistemas construtivos aplicados à produção de unidades sanitárias modulares, permitindo a operacionalização do método AHP de forma coerente com os objetivos da presente pesquisa.

3.2.3 Construção da base de dados qualitativa dos subcritérios

Com o objetivo de reduzir a subjetividade inerente às avaliações qualitativas e garantir coerência na classificação dos sistemas construtivos, foram definidos descritores qualitativos associados a limites conceituais específicos para cada subcritério de avaliação.

Os descritores qualitativos apresentados nas tabelas seguintes não foram extraídos diretamente da literatura de forma literal, mas elaborados a partir da interpretação técnica das características e desempenhos descritos pelos autores consultados. Assim, as referências bibliográficas serviram como base para o estabelecimento de limites conceituais que permitissem enquadrar os sistemas construtivos em classes qualitativas padronizadas (“Muito boa”, “Boa”, “Moderada” e “Baixa”).

Essa adaptação teve como objetivo transformar informações predominantemente descritivas em uma estrutura comparável e coerente com os requisitos do método AHP, preservando a fundamentação teórica e garantindo rastreabilidade ao processo de classificação adotado.

3.2.3.1 Procedimento de enquadramento qualitativo

O enquadramento qualitativo dos sistemas construtivos foi realizado por meio da comparação entre as características técnicas identificadas na literatura especializada e os limites conceituais previamente definidos para cada descritor qualitativo.

Dessa forma, os sistemas não foram classificados de maneira arbitrária, mas enquadrados conforme o grau de aderência predominante às condições estabelecidas para cada categoria qualitativa.

Por exemplo, sistemas descritos na literatura como leves, facilmente transportáveis e compatíveis com logística convencional foram enquadrados na categoria “Muito boa” no subcritério transportabilidade. Da mesma forma, sistemas associados a elevado consumo energético incorporado foram classificados em categorias inferiores no subcritério consumo de energia.

Nos casos em que a literatura apresentava características intermediárias ou parcialmente divergentes, adotou-se interpretação técnica conservadora, priorizando o enquadramento que apresentasse maior coerência com o comportamento predominante do sistema construtivo.

Ressalta-se que o objetivo desse procedimento não foi estabelecer valores absolutos de desempenho, mas construir uma base qualitativa padronizada e metodologicamente coerente para posterior aplicação do método AHP.

3.2.3.2 Descritores qualitativos dos critérios técnicos

Os critérios técnicos foram desdobrados em subcritérios relacionados ao desempenho operacional, à integração modular e à viabilidade construtiva dos sistemas analisados. Para cada subcritério, foram definidos descritores qualitativos destinados a orientar o enquadramento das alternativas na base de dados qualitativa estruturada.

3.2.3.2.1 Subcritério transportabilidade

O subcritério transportabilidade refere-se à facilidade de deslocamento dos módulos entre fábrica e obra, considerando aspectos como peso, dimensões e restrições logísticas. Para orientar a classificação qualitativa dos sistemas construtivos, foram definidos limites conceituais para os descritores associados ao subcritério transportabilidade, apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Limites dos descritores qualitativos para o subcritério transportabilidade

Classificação	Enquadramento
Muito boa	Sistema leve, módulos facilmente transportáveis por meios convencionais.
Boa	Peso moderado, transporte com poucas restrições.
Moderada	Peso elevado, exige planejamento logístico específico.
Baixa	Muito pesado/volumoso, fortes restrições logísticas.

Fonte: Adaptado de Lawson, Ogden e Goodier (2018) e Knaack et al. (2018)

3.2.3.2.2 Subcritério conectividade

O subcritério conectividade está relacionado à eficiência das interfaces entre módulos, instalações e sistemas construtivos, influenciando diretamente a montagem e integração dos sistemas industrializados. Os limites dos descritores qualitativos adotados para o subcritério conectividade são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Limites dos descritores qualitativos para o subcritério conectividade

Classificação	Enquadramento
Muito boa	Conexões padronizadas, secas e desmontáveis.
Boa	Conexões padronizadas com alguma complexidade.
Moderada	Conexões parcialmente customizadas.
Baixa	Conexões rígidas ou irreversíveis.

Fonte: Adaptado de Lawson, Ogden e Goodier (2014) e Goodier e Gibb (2007).

3.2.3.2.3 Manutenção

O subcritério manutenção refere-se à facilidade de acesso e intervenção nos sistemas ao longo do ciclo de vida da edificação, considerando aspectos de desmontagem e acessibilidade técnica. Para assegurar uma classificação consistente, foram definidos limites qualitativos para o subcritério manutenção, conforme apresentado na Tabela 11

Tabela 11 - Limites dos descritores qualitativos para o subcritério manutenção

Classificação	Enquadramento
Muito boa	Acesso total aos sistemas sem intervenções destrutivas.
Boa	Manutenção com desmontagens localizadas.
Moderada	Intervenções extensas necessárias.
Baixa	Manutenção difícil com demolições.

Fonte: Adaptado de Smith (2010) e Knaack et al. (2018)

3.2.3.2.4 Subcritério compatibilidade com tipos de construção

O subcritério compatibilidade refere-se à capacidade de integração dos módulos com diferentes sistemas construtivos e soluções estruturais. Os limites dos descritores qualitativos associados ao subcritério compatibilidade são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Limites dos descritores qualitativos para o subcritério compatibilidade

Classificação	Enquadramento
Muito boa	Alta compatibilidade com sistemas modulares e industriais.
Boa	Compatível com a maioria dos sistemas construtivos.
Moderada	Compatibilidade limitada.
Baixa	Baixa adaptabilidade a outros sistemas.

Fonte: Adaptado de Knaack et al. (2018) e Goodier e Gibb (2007)

3.2.3.3 Descritores qualitativos dos critérios comerciais

Para cada subcritério comercial, foram definidos descritores qualitativos destinados a orientar o enquadramento das alternativas na base de dados qualitativa.

3.2.3.3.1 Subcritério custo de produção

O subcritério custo de produção considera os custos associados à fabricação industrial dos módulos e componentes construtivos. Para orientar a avaliação qualitativa, os limites dos descritores adotados para o subcritério custo de produção são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 - Limites dos descritores qualitativos para o subcritério custo de produção

Classificação	Enquadramento
Muito boa	Custos baixos e previsíveis em produção seriada.
Boa	Custos moderados e controláveis.
Moderada	Custos elevados ou variáveis.
Baixa	Custos elevados e imprevisíveis.

Fonte: Adaptado de Goodier e Gibb (2007) e Smith (2010)

3.2.3.3.2 Subcritério tempo de produção *off-site*

O subcritério tempo de produção *off-site* está relacionado à rapidez e eficiência do processo de fabricação industrial dos módulos construtivos. Os limites conceituais dos descritores qualitativos definidos para o subcritério tempo de produção *off-site* são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 - Limites dos descritores qualitativos para o subcritério tempo de produção *off-site*

Classificação	Enquadramento
Muito boa	Produção rápida e altamente industrializada.
Boa	Produção eficiente com etapas industriais.
Moderada	Produção parcialmente industrializada.
Baixa	Produção lenta e pouco industrializada.

Fonte: Adaptado de Lawson, Ogden e Goodier (2018)

3.2.3.3.3 Subcritério assistência técnica

O subcritério assistência técnica refere-se à disponibilidade de suporte técnico durante as etapas de montagem, instalação e pós-obra dos sistemas industrializados. Os limites dos descritores qualitativos associados ao subcritério assistência técnica são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Limites dos descritores qualitativos para o subcritério assistência técnica

Classificação	Enquadramento
Muito boa	Ampla rede técnica e suporte consolidado.
Boa	Disponibilidade técnica adequada.
Moderada	Suporte técnico limitado.
Baixa	Assistência técnica escassa.

Fonte: Adaptado de SCI (2020) e Lawson, Ogden e Goodier (2018).

3.2.3.4 Descritores qualitativos dos critérios ambientais

Os critérios ambientais utilizados neste estudo referem-se predominantemente aos impactos associados ao processo produtivo dos sistemas construtivos e aos materiais empregados, considerando aspetos relacionados ao consumo de recursos e à geração de resíduos ao longo da fabricação industrial dos componentes e módulos.

Dessa forma, os subcritérios consumo de energia e consumo de água não se referem ao desempenho operacional da edificação em uso, mas sim aos recursos demandados durante os processos de fabricação, transformação, montagem industrial e preparação dos sistemas construtivos analisados.

A definição desses critérios baseou-se em indicadores amplamente utilizados em estudos de avaliação ambiental e análise do ciclo de vida aplicados à construção civil (ISO 14040, 2020; Zhang et al., 2020).

3.2.3.4.1 Subcritério consumo de energia

O subcritério consumo de energia refere-se à demanda energética associada à produção dos materiais, fabricação dos módulos e execução dos sistemas construtivos. Os limites qualitativos definidos para esse subcritério são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 - Limites dos descritores qualitativos para o subcritério consumo de energia

Classificação	Enquadramento
Muito boa	Baixo consumo energético incorporado.
Boa	Consumo energético moderado.
Moderada	Consumo elevado parcialmente mitigado.
Baixa	Consumo energético muito elevado.

Fonte: Adaptado de ISO 14040 (2020) e Zhang et al. (2020)

3.2.3.4.2 Subcritério consumo de água

O subcritério consumo de água considera a utilização de recursos hídricos ao longo das etapas de produção e execução dos sistemas construtivos modulares. Os limites qualitativos definidos para esse subcritério são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 - Limites dos descritores qualitativos para o subcritério consumo de água

Classificação	Enquadramento
Muito boa	Processos secos com uso mínimo de água.
Boa	Uso moderado de água.
Moderada	Uso elevado de água.
Baixa	Uso muito elevado de água.

Fonte: Adaptado de ISO 14040 (2020) e Zhang et al. (2020)

3.2.3.4.3 Subcritério geração de resíduos

O subcritério geração de resíduos refere-se à quantidade de resíduos produzidos durante os processos de fabricação, transporte e montagem dos sistemas construtivos, bem como à possibilidade de controle e redução dessas perdas. Os limites qualitativos definidos para esse subcritério são apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 - Limites dos descritores qualitativos para o subcritério geração de resíduos

Classificação	Enquadramento
Muito boa	Baixa geração de resíduos e elevada capacidade de controle, reaproveitamento ou reciclagem durante a produção e montagem.
Boa	Geração moderada de resíduos com controle adequado das perdas.
Moderada	Geração significativa de resíduos e controle parcial das perdas.
Baixa	Alta geração de resíduos e baixa capacidade de controle ou reaproveitamento.

Fonte: Adaptado de Zhang et al. (2020) e Goodier e Gibb (2007)

A definição prévia dos limites dos descritores qualitativos constituiu a base para a classificação dos sistemas construtivos analisados, assegurando consistência semântica entre os critérios adotados e a avaliação qualitativa atribuída a cada sistema. Esses limites serviram como referência direta para a construção da base de dados qualitativa, apresentada na seção seguinte.

3.2.4 Construção da base de dados qualitativa das alternativas

A construção da base de dados constituiu uma etapa fundamental para a aplicação do método AHP, uma vez que a qualidade e a coerência dos resultados obtidos estão diretamente relacionadas à forma como as informações iniciais são organizadas e interpretadas. Considerando as limitações de tempo e de acesso a dados primários, optou-se pela utilização de dados secundários obtidos por meio da revisão da literatura científica, de relatórios técnicos e de documentação especializada relacionada a sistemas construtivos industrializados aplicados à construção modular.

Para garantir rastreabilidade metodológica e transparência no processo de classificação, cada sistema construtivo foi analisado individualmente em relação aos subcritérios definidos

anteriormente. O enquadramento qualitativo foi realizado a partir da comparação entre as características técnicas descritas na literatura e os limites conceituais estabelecidos para cada descritor qualitativo.

As classificações qualitativas atribuídas aos sistemas construtivos não foram definidas arbitrariamente, mas estabelecidas a partir da comparação entre as características descritas na literatura especializada e os limites conceituais previamente definidos para cada descritor qualitativo. Dessa forma, as referências bibliográficas utilizadas serviram como base técnica para justificar o enquadramento relativo dos sistemas nas diferentes categorias qualitativas adotadas na pesquisa.

Como exemplo de aplicação do procedimento metodológico adotado, El Debs (2017) destaca que sistemas em Betão Leve apresentam boa durabilidade e reduzida necessidade de intervenção ao longo do ciclo de vida. Considerando os limites conceituais previamente definidos para o subcritério manutenção, especialmente o descritor associado à manutenção com intervenções localizadas e baixa frequência de reparos, o sistema foi enquadrado na categoria “Boa”.

O mesmo procedimento de comparação entre características identificadas na literatura e os descritores qualitativos definidos para cada subcritério foi aplicado aos demais sistemas construtivos analisados. As tabelas de enquadramento qualitativo das alternativas, bem como as classificações atribuídas aos sistemas construtivos, são apresentadas no Capítulo 4.

A partir da estruturação dessa base qualitativa, os julgamentos comparativos foram posteriormente convertidos para valores numéricos segundo a escala fundamental proposta por Saaty, permitindo a construção das matrizes de comparação pareada e a operacionalização do método AHP, conforme apresentado na seção seguinte.

3.2.5 Conversão da base de dados qualitativa para a escala de Saaty

A aplicação do método AHP pressupõe a realização de comparações relativas entre alternativas, o que exige a representação numérica da intensidade de preferência associada a cada julgamento. No presente estudo, considerando que a base de dados foi construída predominantemente a partir de informações qualitativas provenientes da literatura técnica e científica, tornou-se necessária a conversão dessas avaliações para uma escala numérica compatível com o método.

Para esse fim, adotou-se uma versão simplificada da escala fundamental proposta por Saaty (2005), adequada ao carácter exploratório da pesquisa e à utilização predominante de dados secundários. A utilização de uma escala reduzida teve como objetivo minimizar subjetividades excessivas associadas a julgamentos muito detalhados, preservando simultaneamente a lógica ordinal de preferência entre as alternativas.

A escala adotada estabelece uma correspondência direta entre níveis qualitativos de desempenho e valores numéricos, conforme apresentado na Tabela 19.

Tabela 19 - Conversão da escala qualitativa para a escala fundamental de Saaty

Avaliação qualitativa	Valor numérico (Saaty)
Muito boa	7
Boa	3
Moderada	1
Baixa	1/3

Fonte: Adaptado de Saaty (2005).

A conversão adotada não representa a criação arbitrária de valores numéricos, mas a formalização quantitativa de classificações qualitativas previamente fundamentadas na literatura e organizadas na base qualitativa estruturada. Assim, sistemas enquadrados pela literatura de referência em categorias qualitativas superiores receberam valores numéricos proporcionalmente mais elevados, preservando a lógica ordinal de preferência estabelecida no método AHP.

A partir dessa conversão, foi estruturada a base quantitativa utilizada posteriormente na construção das matrizes de comparação pareada. As tabelas de conversão quantitativa das alternativas analisadas são apresentadas no Capítulo 4.

Ressalta-se que os valores numéricos obtidos nessa etapa não correspondem ainda às matrizes de comparação pareada do método AHP, mas constituem a base inicial utilizada para construção das relações comparativas entre critérios, subcritérios e alternativas.

3.2.6 Hierarquização dos critérios e subcritérios

Após a definição dos critérios, dos descritores qualitativos e da construção da base de dados, procedeu-se à hierarquização dos critérios e subcritérios, etapa fundamental para a aplicação do método AHP. Essa hierarquização tem por objetivo explicitar a importância relativa dos critérios no processo decisório, permitindo que o modelo reflita prioridades típicas observadas em contextos reais de seleção de sistemas construtivos.

A literatura sobre construção industrializada e métodos de apoio multicritério à decisão indica que a priorização dos critérios varia conforme o contexto organizacional, os objetivos do projeto e as restrições envolvidas (Saaty, 2005; Triantaphyllou, 2000). No entanto, diversos estudos apontam tendências recorrentes quanto à importância relativa de determinados fatores, especialmente em decisões relacionadas à adoção de sistemas construtivos industrializados.

No presente estudo, a hierarquização dos critérios foi realizada com base exclusiva na literatura, sem a realização de consulta direta a especialistas, de modo a construir um cenário de decisão representativo e metodologicamente consistente. Essa abordagem é comum em estudos acadêmicos cujo objetivo principal é demonstrar a aplicação e a robustez do método, e não prescrever uma hierarquia universal de critérios (Ishizaka & Labib, 2011).

3.2.6.1 Hierarquia entre os grupos de critérios

A hierarquização entre os grupos de critérios técnicos, comerciais e ambientais foi definida com base na relevância atribuída pela literatura especializada aos fatores que

influenciam a adoção de sistemas construtivos industrializados. Estudos relacionados à construção modular e aos métodos *off-site* indicam que aspectos económicos e produtivos exercem influência significativa no processo decisório, sobretudo em função da necessidade de redução de custos, prazos de execução e riscos operacionais (Pan et al., 2008; Lawson, Ogden & Goodier, 2014; Kamali & Hewage, 2016).

Nesse contexto, os critérios comerciais foram considerados prioritários no modelo de decisão adotado, por estarem diretamente associados à viabilidade económica e produtiva dos sistemas construtivos analisados. O custo de produção, o tempo de execução *off-site* e a disponibilidade de assistência técnica foram tratados como fatores estratégicos para a implementação prática das soluções industrializadas.

Em seguida, foram posicionados os critérios ambientais, considerando o crescimento da relevância da sustentabilidade no setor da construção civil e a crescente incorporação de indicadores ambientais nos processos de avaliação tecnológica. Estudos recentes destacam que impactos associados ao consumo de energia, uso de recursos naturais e geração de resíduos passaram a desempenhar papel central na avaliação de sistemas construtivos industrializados e pré-fabricados (John, Silva & Agopyan, 2016; Ding, 2008; Kibert, 2016).

Os critérios técnicos, embora fundamentais para garantir desempenho, compatibilidade construtiva e viabilidade operacional, foram tratados com peso relativamente moderado em relação aos demais grupos, considerando que muitos desses requisitos representam condições mínimas esperadas para aplicação dos sistemas industrializados contemporâneos (Gibb, 2001; Smith, 2010; Jaillon & Poon, 2010).

Ressalta-se que a hierarquia adotada neste estudo não deve ser interpretada como universal ou definitiva, mas como uma estrutura de priorização coerente com os objetivos exploratórios da pesquisa, com o contexto da construção modular de unidades sanitárias e com as evidências identificadas na literatura técnica e científica utilizada como base metodológica.

3.2.6.2 Hierarquia dos subcritérios

A hierarquização dos subcritérios foi realizada considerando a importância relativa de cada fator dentro do respetivo grupo de critérios, com base nas evidências identificadas na literatura especializada sobre construção industrializada, modularização e avaliação de desempenho construtivo. Para evitar distorções excessivas entre os julgamentos, adotou-se uma estrutura de priorização moderada, conforme recomendado por Saaty (2005).

No grupo dos critérios comerciais, estabeleceu-se a seguinte ordem de prioridade:

1. Custo de produção;
2. Tempo de produção *off-site*;
3. Assistência técnica.

Essa hierarquia foi definida considerando que os custos de produção representam um dos principais fatores limitantes para adoção de sistemas industrializados, influenciando

diretamente a viabilidade económica dos empreendimentos (Pan et al., 2008; Jaoul; Thomas, 2019). Em seguida, o tempo de produção *off-site* foi priorizado devido à relevância da redução de prazos como uma das principais vantagens associadas à construção modular e industrializada, especialmente em empreendimentos de repetição e produção seriada (Lawson, Ogden & Goodier, 2014; Lessing et al., 2015). A assistência técnica, embora relevante para a operação e manutenção dos sistemas ao longo do ciclo de vida, foi considerada um fator de menor influência relativa no processo inicial de tomada de decisão quando comparada aos impactos diretos de custo e prazo (Gibb, 2001).

No grupo dos critérios ambientais, a ordem de importância adotada foi:

1. Consumo de energia;
2. Geração de resíduos;
3. Consumo de água.

A priorização do consumo de energia fundamenta-se na elevada relevância da energia incorporada e operacional nas análises contemporâneas de sustentabilidade da construção civil, especialmente em estudos de ciclo de vida e emissões associadas aos materiais construtivos (John, Silva & Agopyan, 2016; ISO 14040, 2020). A geração de resíduos foi considerada o segundo fator de maior relevância devido aos impactos ambientais relacionados ao desperdício de materiais, transporte e destinação final de resíduos da construção civil (Zhang et al., 2020; Goodier & Gibb, 2007). O consumo de água, embora reconhecido como um aspecto ambiental relevante, apresentou menor influência relativa na comparação entre os sistemas estudados, principalmente em razão da predominância dos impactos energéticos e materiais apontados pela literatura sobre industrialização da construção (Kibert, 2016).

No grupo dos critérios técnicos, os subcritérios foram organizados da seguinte forma:

1. Compatibilidade construtiva;
2. Transportabilidade;
3. Conectividade;
4. Manutenção.

A compatibilidade construtiva foi considerada prioritária devido à sua influência direta sobre a integração entre componentes, racionalização produtiva e viabilidade de industrialização dos sistemas construtivos (Smith, 2010; Knaack et al., 2018). A transportabilidade foi posicionada em seguida por representar um fator crítico para logística, limitações dimensionais, montagem e deslocamento modular, aspectos frequentemente destacados como condicionantes da construção *off-site* (Lawson, Ogden & Goodier, 2014). Já os critérios de conectividade e manutenção foram considerados fatores associados ao desempenho operacional e à durabilidade dos sistemas ao longo do ciclo de vida, porém com menor influência relativa sobre a viabilidade inicial de implantação quando comparados aos aspectos de compatibilidade e logística (El Debs, 2017; Gibb, 2001).

Ressalta-se que a hierarquia adotada neste estudo não deve ser interpretada como fixa ou universal, mas como uma estrutura decisória específica para os objetivos da presente pesquisa, construída a partir da interpretação técnica da literatura consultada e das características dos sistemas construtivos analisados.

3.2.7 Construção das matrizes e obtenção dos pesos

Após a definição da estrutura hierárquica do problema, da classificação qualitativa dos sistemas construtivos e da conversão dos descritores qualitativos para a escala numérica adaptada de Saaty, procedeu-se à construção das matrizes de comparação pareada necessárias para a aplicação do método AHP.

As matrizes foram elaboradas para os diferentes níveis da hierarquia decisória, contemplando:

- A comparação entre os grupos de critérios;
- A comparação entre os subcritérios pertencentes a cada grupo;
- A comparação entre as alternativas em relação a cada subcritério.

Ressalta-se que os julgamentos utilizados na construção das matrizes não foram definidos de forma arbitrária ou exclusivamente subjetiva. As relações de importância adotadas resultaram da interpretação sistemática da literatura técnica e científica apresentada no Capítulo 2, considerando a recorrência e a relevância atribuídas pelos autores aos diferentes fatores de decisão associados à construção modular e industrializada.

Da mesma forma, as comparações entre alternativas não foram realizadas diretamente por julgamento subjetivo do autor. Os valores das matrizes foram obtidos matematicamente a partir das razões entre os pesos numéricos previamente atribuídos aos descritores qualitativos de cada sistema construtivo.

Nesse sentido, critérios frequentemente apontados na literatura como determinantes para viabilidade econômica, racionalização produtiva, desempenho técnico ou sustentabilidade receberam maior prioridade relativa nas comparações pareadas. De modo semelhante, a classificação qualitativa atribuída às alternativas foi estabelecida a partir da comparação entre as características descritas nas referências bibliográficas e os limites conceituais previamente definidos para cada descritor qualitativo.

Assim, a aplicação do método AHP constituiu uma formalização quantitativa de julgamentos previamente fundamentados na literatura, permitindo transformar avaliações qualitativas em uma estrutura comparável e operacional.

Para as comparações entre critérios e subcritérios, utilizou-se uma adaptação simplificada da escala fundamental proposta por Saaty (2005), apresentada na Tabela 20. A simplificação da escala teve como objetivo reduzir subjetividades excessivas nos julgamentos e manter coerência com o caráter exploratório da pesquisa e com a utilização predominante de dados secundários provenientes da literatura.

Tabela 20 - Escala adaptada de Saaty utilizada para comparação entre critérios e subcritérios

Intensidade de importância	Interpretação
1	Igual importância
3	Importância moderada
5	Forte importância
1/3	Importância moderadamente inferior
1/5	Importância fortemente inferior

Fonte: Adaptado de Saaty (2005).

Em todas as matrizes construídas, os elementos diagonais assumem valor unitário, uma vez que cada critério comparado consigo mesmo possui igual importância. As relações inversas foram representadas pelos respectivos valores recíprocos, conforme preconizado pelo método AHP.

A partir das matrizes construídas, realizou-se a normalização dos valores e o cálculo dos vetores de prioridade, correspondentes aos pesos relativos de cada elemento avaliado.

3.2.7.1 Matriz de comparação entre critérios e subcritérios

As matrizes de comparação entre os grupos de critérios e entre os subcritérios foram construídas a partir da hierarquia previamente definida no item 3.2.6, considerando as relações de preferência estabelecidas com base na literatura especializada sobre construção modular e sistemas construtivos industrializados.

Ressalta-se que essa hierarquia não deve ser interpretada como universal ou definitiva, mas como um cenário decisório específico construído a partir das prioridades identificadas na literatura utilizada como base metodológica da pesquisa.

Os julgamentos qualitativos associados às relações de importância relativa entre critérios e subcritérios foram convertidos para valores numéricos utilizando a escala adaptada de Saaty apresentada no item 3.2.5. Dessa forma, relações classificadas como de importância moderada ou forte receberam valores numéricos compatíveis com a intensidade de preferência identificada na literatura técnica e científica utilizada como referência metodológica.

Conforme estabelecido pelo método AHP, as relações inversas foram representadas pelos respectivos valores recíprocos, assegurando coerência matemática às matrizes de comparação pareada. A partir dessas relações, foram construídas as matrizes correspondentes aos grupos de critérios técnicos, comerciais e ambientais, bem como às comparações entre os subcritérios pertencentes a cada grupo hierárquico.

Após a construção das matrizes de comparação, procedeu-se à normalização dos valores e ao cálculo dos vetores de prioridade, correspondentes aos pesos relativos obtidos para cada critério e subcritério no modelo hierárquico desenvolvido.

As matrizes elaboradas, os pesos relativos obtidos e as verificações de consistência associadas aos julgamentos são apresentadas e discutidas no Capítulo 4.

3.2.7.2 Matriz de comparação entre as alternativas

Por fim, foram estruturadas matrizes de comparação entre os sistemas construtivos analisados em relação a cada subcritério considerado no modelo multicritério.

Essas comparações foram realizadas com base nos descritores qualitativos previamente atribuídos aos sistemas construtivos e organizados na base de dados qualitativa apresentada no item 3.2.4. Para possibilitar a aplicação do método AHP, os descritores qualitativos foram previamente convertidos para valores numéricos utilizando a escala adaptada de Saaty apresentada no item 3.2.5.

A partir desses valores numéricos, as matrizes de comparação entre alternativas foram construídas por meio das razões matemáticas entre os pesos atribuídos aos sistemas construtivos em cada subcritério avaliado. Dessa forma, sistemas enquadrados em categorias qualitativas equivalentes receberam relações unitárias nas comparações pareadas, indicando desempenho relativo semelhante.

As relações de preferência entre alternativas foram, portanto, obtidas matematicamente a partir da proporcionalidade entre os pesos associados aos descritores qualitativos, preservando a lógica ordinal estabelecida na estrutura metodológica da pesquisa. As relações inversas foram representadas pelos respectivos valores recíprocos, conforme preconizado pelo método AHP.

Após a construção das matrizes de comparação pareada, realizou-se a normalização dos valores e o cálculo dos vetores de prioridade correspondentes aos pesos locais das alternativas em cada subcritério analisado.

Com o objetivo de evitar repetições excessivas no capítulo metodológico, as tabelas de enquadramento qualitativo das alternativas, as matrizes de comparação pareada e os pesos obtidos são apresentados e discutidos no Capítulo 4.

3.2.8 Procedimento de agregação e obtenção do ranking final

A etapa final da aplicação do método AHP consiste na agregação dos resultados parciais para obtenção do desempenho global de cada alternativa.

O procedimento adotado baseia-se na lógica clássica do método AHP, na qual o desempenho final de cada sistema construtivo é obtido por meio da integração dos pesos globais dos critérios com os pesos locais das alternativas em cada critério. Essa integração é realizada por meio de uma soma ponderada, na qual cada peso local é multiplicado pelo peso global do critério correspondente.

Matematicamente, o índice de desempenho global de cada sistema construtivo é dado pela Equação 7.

$$W_s = \sum_{k=1}^m (w_k \cdot w_{s,k}) \quad \text{Eq. 7}$$

Em que:

W_s representa o desempenho global do sistema construtivo s;
 w_k corresponde ao peso global do critério k;
 $w_{s,k}$ representa o peso local do sistema s em relação ao critério k;
m corresponde ao número total de critérios considerados.

O resultado dessa agregação permite estabelecer um ranking comparativo entre as alternativas analisadas. Ressalta-se que todos os cálculos foram operacionalizados com apoio de planilhas eletrônicas, de modo a garantir rastreabilidade integral das etapas, desde as matrizes de comparação até o índice final de desempenho.

Os valores numéricos obtidos a partir desse procedimento, bem como exemplos detalhados de cálculo, são apresentados e discutidos no Capítulo 4.

As planilhas completas utilizadas na operacionalização do método AHP são apresentadas no Anexo I.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados obtidos com a aplicação do método AHP na comparação dos sistemas construtivos analisados. Conforme estabelecido no Capítulo 3, a estrutura hierárquica do modelo decisório foi organizada em grupos de critérios, subcritérios e alternativas, sendo os julgamentos construídos a partir da conversão da base qualitativa em comparações pareadas.

Os resultados apresentados refletem diretamente as prioridades metodológicas previamente definidas, permitindo analisar como os diferentes critérios influenciaram o desempenho global dos sistemas construtivos avaliados.

Inicialmente, apresentam-se os resultados referentes à construção da base qualitativa e quantitativa utilizada na aplicação do método. Em seguida, são apresentadas as matrizes de comparação entre critérios, subcritérios e alternativas, bem como os pesos relativos obtidos em cada etapa do processo decisório. Por fim, discutem-se a integração dos pesos, o ranking final das alternativas e a convergência dos resultados obtidos com os objetivos da pesquisa e com a literatura especializada.

4.1 Base de Dados Qualitativa

Conforme descrito no Capítulo 3, o enquadramento qualitativo das alternativas foi realizado a partir da comparação entre as características identificadas na literatura especializada e os descritores qualitativos previamente definidos para cada subcritério de avaliação.

As tabelas apresentadas nesta seção sintetizam a caracterização qualitativa dos sistemas construtivos analisados, servindo como base para a posterior conversão dos julgamentos em valores numéricos compatíveis com o método AHP.

4.1.1 Caracterização qualitativa dos sistemas construtivos

As classificações qualitativas atribuídas aos sistemas construtivos não foram definidas arbitrariamente, mas estabelecidas a partir da comparação entre as características descritas na literatura especializada e os limites conceituais previamente definidos para cada descritor qualitativo, conforme procedimento apresentado na Seção 3.2.4. Dessa forma, as referências bibliográficas utilizadas serviram como base técnica para justificar o enquadramento dos sistemas nas categorias “Muito boa”, “Boa”, “Moderada” e “Baixa”.

Como exemplo de aplicação do procedimento metodológico adotado, El Debs (2017) destaca que sistemas em Betão Leve apresentam boa durabilidade e reduzida necessidade de intervenção ao longo do ciclo de vida. Considerando os limites conceituais previamente definidos para o subcritério manutenção, especialmente o descritor associado à manutenção com intervenções localizadas e baixa frequência de reparos, o sistema foi enquadrado na categoria “Boa”.

Procedimento semelhante foi adotado para os demais sistemas construtivos analisados, considerando sempre a relação entre as características identificadas na literatura especializada e os descritores qualitativos previamente estabelecidos.

A classificação atribuída ao sistema Betão Leve baseou-se principalmente em características relacionadas à durabilidade, resistência estrutural e maior massa estrutural dos elementos pré-fabricados, conforme discutido por El Debs (2017) e Lawson, Ogden e Goodier (2014). O enquadramento qualitativo resultante é apresentado na Tabela 21.

Tabela 21 - Caracterização do sistema construtivo Betão Leve segundo os critérios de avaliação.

Critério	Enquadramento técnico resumido	Classificação	Referência
Transportabilidade	Peso ainda significativo, mesmo com agregados leves.	Boa	El Debs, 2017
Conectividade	Conexões moldadas e pré-definidas.	Boa	El Debs, 2017
Manutenção	Boa durabilidade e baixa frequência de intervenção.	Boa	El Debs, 2017
Compatibilidade	Compatível com sistemas pré-moldados.	Muito boa	Goodier e Gibb, 2007
Custo de produção	Custo intermediário.	Moderada	El Debs, 2017
Tempo <i>off-site</i>	Produção industrial razoável.	Boa	Lawson, Ogden e Goodier, 2018
Assistência técnica	Mercado consolidado.	Boa	El Debs, 2017
Consumo de energia	Consumo energético elevado.	Moderada	ISO 14040, 2020
Consumo de água	Uso significativo de água.	Moderada	ISO 14040, 2020
Geração de resíduos	Resíduos relevantes.	Moderada	Zhang et al., 2020

Fonte: O autor.

O enquadramento qualitativo do sistema Aço Leve (LSF) fundamentou-se nas características técnicas e produtivas identificadas na literatura especializada. Lawson, Ogden e Goodier (2014) destacam que a utilização de perfis leves e painéis industrializados favorece a transportabilidade dos módulos, justificando o enquadramento “Muito boa” atribuído a esse subcritério. Davies et al. (2018) apontam que as conexões aparafusadas padronizadas contribuem para elevada conectividade entre componentes, enquanto Goodier e Gibb (2007) ressaltam a elevada compatibilidade do sistema com soluções modulares industrializadas. Além disso, Lawson, Ogden e Goodier (2018) destacam a rapidez da produção em ambiente fabril, característica associada ao enquadramento superior no subcritério tempo de produção *off-site*. O resultado do enquadramento qualitativo do sistema é apresentado na Tabela 22.

Tabela 22 - Caracterização do sistema construtivo LSF segundo os critérios de avaliação.

Critério	Enquadramento técnico resumido	Classificação	Referência
Transportabilidade	Perfis leves e painéis industrializados facilitam o transporte.	Muito boa	Lawson, Ogden e Goodier (2014)
Conectividade	Conexões aparafusadas padronizadas.	Muito boa	Davies et al., 2018
Manutenção	Boa acessibilidade aos sistemas prediais.	Boa	Lawson, Ogden e Goodier (2014)
Compatibilidade	Alta compatibilidade com construção modular.	Muito boa	Goodier e Gibb, 2007
Custo de produção	Custo intermediário dependente do aço.	Boa	Davies et al., 2018
Tempo <i>off-site</i>	Produção rápida em ambiente fabril.	Muito boa	Lawson, Ogden e Goodier, 2018
Assistência técnica	Cadeia produtiva consolidada.	Muito boa	SCI, 2020
Consumo de energia	Energia incorporada moderada.	Moderada	ISO 14040, 2020
Consumo de água	Baixo uso de água.	Boa	Zhang et al., 2020
Geração de resíduos	Resíduos reduzidos e recicláveis.	Boa	Goodier e Gibb, 2007

Fonte: O autor.

A classificação atribuída ao sistema *Wood Frame* baseou-se principalmente nas características relacionadas à leveza estrutural, elevado grau de pré-fabricação e reduzido impacto ambiental identificadas na literatura especializada. Smith (2010) e Knaack et al. (2018) destacam que os painéis leves e modularizados favorecem a transportabilidade dos componentes, justificando o enquadramento “Muito boa” para esse subcritério. Lawson, Ogden e Goodier (2018) ressaltam o elevado nível de industrialização e pré-fabricação do sistema, associado ao enquadramento superior no subcritério tempo de produção *off-site*. Além disso, Brandner et al. (2016) e Zhang et al. (2020) apontam o baixo consumo energético incorporado, os processos predominantemente secos e a reduzida geração de resíduos, justificando os enquadramentos ambientais superiores atribuídos ao sistema. O resultado do enquadramento qualitativo é apresentado na Tabela 23.

Tabela 23 - Caracterização do sistema construtivo *Wood Frame* segundo os critérios de avaliação.

Critério	Enquadramento técnico resumido	Classificação	Referência
Transportabilidade	Sistema leve, com painéis e módulos de baixo peso próprio, facilitando transporte e logística.	Muito boa	Smith, 2010 e Knaack et al., 2018
Conectividade	Emprego de conexões padronizadas compatíveis com montagem modular.	Boa	Lawson, Ogden e Goodier, 2018
Manutenção	Acesso às camadas internas possível mediante desmontagens localizadas.	Moderada	Smith, 2010
Compatibilidade	Compatível com edificações leves, modulares e industrializadas.	Boa	Knaack et al., 2018
Custo de produção	Custos competitivos em produção seriada e industrializada.	Boa	Goodier e Gibb, 2007
Tempo <i>off-site</i>	Alto grau de pré-fabricação em ambiente controlado.	Muito boa	Lawson, Ogden e Goodier, 2018
Assistência técnica	Sistema difundido em mercados consolidados.	Boa	Knaack et al., 2018
Consumo de energia	Baixo consumo energético incorporado.	Muito boa	Brandner et al., 2016
Consumo de água	Processos predominantemente secos.	Muito boa	ISO 14040, 2020
Geração de resíduos	Baixa geração de resíduos em ambiente industrial.	Muito boa	Zhang et al., 2020

Fonte: O autor.

O enquadramento qualitativo do sistema construtivo em Aço Estrutural fundamentou-se principalmente nas características relacionadas à elevada capacidade estrutural, eficiência das conexões industrializadas e maior impacto energético associado à produção do aço. Davies et al. (2018) destacam que os elementos metálicos apresentam maior peso relativo e custo elevado de material, justificando os enquadramentos “Moderada” nos subcritérios transportabilidade e custo de produção. Em contrapartida, o mesmo autor ressalta a eficiência das conexões industriais, associada ao enquadramento “Muito boa” em conectividade. Goodier e Gibb (2007) apontam elevada compatibilidade estrutural e elevada reciclabilidade do aço, enquanto a ISO 14040 (2020) destaca a alta energia incorporada do material, justificando o enquadramento “Baixa” para consumo de energia. O resultado do enquadramento qualitativo do sistema é apresentado na Tabela 24.

Tabela 24 - Caracterização do sistema construtivo Aço Estrutural segundo os critérios de avaliação.

Critério	Enquadramento técnico resumido	Classificação	Referência
Transportabilidade	Elementos metálicos mais pesados.	Moderada	Davies et al., 2018
Conectividade	Conexões industriais eficientes.	Muito boa	Davies et al., 2018
Manutenção	Necessita proteção anticorrosiva.	Boa	Lawson, Ogden e Goodier, 2014
Compatibilidade	Alta compatibilidade estrutural.	Muito boa	Goodier e Gibb, 2007
Custo de produção	Custo elevado do material.	Moderada	Davies et al., 2018
Tempo <i>off-site</i>	Boa industrialização.	Boa	Lawson, Ogden e Goodier, 2018
Assistência técnica	Ampla disponibilidade técnica.	Muito boa	SCI, 2020
Consumo de energia	Alta energia incorporada.	Baixa	ISO 14040, 2020
Consumo de água	Baixo uso de água.	Moderada	Zhang et al., 2020
Geração de resíduos	Alta reciclabilidade, porém geração intensa.	Moderada	Goodier e Gibb, 2007

Fonte: O autor.

A classificação atribuída ao sistema construtivo em madeira CLT/GLT baseou-se principalmente nas características relacionadas ao elevado grau de industrialização, baixo impacto ambiental e elevada precisão produtiva descritas na literatura especializada. Brandner et al. (2016) destacam que os painéis estruturais industrializados apresentam boa transportabilidade e elevada precisão de montagem, justificando o enquadramento “Muito boa” para transportabilidade. Lawson, Ogden e Goodier (2018) ressaltam o elevado grau de pré-fabricação do sistema, associado ao enquadramento superior no subcritério tempo de produção off-site. Além disso, Goodier e Gibb, 2007, ISO 14040 (2020) e Zhang et al. (2020) apontam o reduzido impacto ambiental do sistema, caracterizado por baixo consumo energético incorporado, processos secos e reduzida geração de resíduos, justificando os enquadramentos ambientais superiores atribuídos ao sistema. O resultado do enquadramento qualitativo do sistema é apresentado na Tabela 25.

Tabela 25 - Caracterização do sistema construtivo madeira CLT/GLT segundo os critérios de avaliação.

Critério	Enquadramento técnico resumido	Classificação	Referência
Transportabilidade	Painéis estruturais exigem logística especializada.	Muito boa	Brandner et al., 2016
Conectividade	Conexões metálicas especializadas.	Boa	Brandner et al., 2016
Manutenção	Acesso interno mais restrito.	Moderada	Knaack et al., 2018
Compatibilidade	Compatível com sistemas industrializados.	Boa	Knaack et al., 2018
Custo de produção	Custos elevados de material.	Moderada	Brandner et al., 2016
Tempo <i>off-site</i>	Alto grau de pré-fabricação.	Muito boa	Lawson, Ogden e Goodier, 2018
Assistência técnica	Mercado em consolidação.	Boa	Lawson, Ogden e Goodier, 2014
Consumo de energia	Baixo impacto energético.	Muito boa	Brandner et al., 2016
Consumo de água	Processos secos.	Muito boa	ISO 14040, 2020
Geração de resíduos	Baixa geração.	Muito boa	Zhang et al., 2020

Fonte: O autor.

4.1.2 Base qualitativa estruturada

A partir da caracterização detalhada de cada sistema construtivo apresentada nas tabelas anteriores, procedeu-se à organização dessas informações em uma base de dados qualitativa estruturada. Nessa base, os sistemas construtivos foram dispostos em colunas e os critérios de avaliação em linhas, sendo atribuídos a cada combinação sistema–critério os descritores qualitativos previamente definidos.

Os enquadramentos qualitativos apresentados anteriormente permitiram consolidar uma estrutura comparativa única entre os sistemas construtivos analisados, organizando de forma padronizada os julgamentos atribuídos a cada subcritério de avaliação.

O resultado desse processo é apresentado na Tabela 26, que corresponde à base de dados qualitativa estruturada para aplicação do AHP.

Tabela 26 - Base de dados qualitativa estruturada para aplicação do AHP

Crítérios / Sistemas	Betão Leve	Aço Leve (LSF)	Wood Frame	Aço Estrutural	CLT / GLT
Transportabilidade	Boa	Muito boa	Muito boa	Moderada	Muito boa
Conectividade	Boa	Muito boa	Boa	Muito boa	Boa
Manutenção	Boa	Boa	Moderada	Boa	Moderada
Compatibilidade construtiva	Muito boa	Muito boa	Boa	Muito boa	Boa
Custo de produção	Moderada	Boa	Boa	Moderada	Moderada
Tempo de produção <i>off-site</i>	Boa	Muito boa	Muito boa	Boa	Muito boa
Assistência técnica	Boa	Muito boa	Boa	Muito boa	Boa
Consumo de energia	Moderada	Moderada	Muito boa	Baixa	Muito boa
Consumo de água	Moderada	Boa	Muito boa	Moderada	Muito boa
Geração de resíduos	Moderada	Boa	Muito boa	Moderada	Muito boa

Fonte: O autor.

A partir dessa base qualitativa estruturada, os julgamentos foram então convertidos para valores numéricos segundo a escala fundamental proposta por Saaty, conforme apresentado na secção seguinte, permitindo a construção das matrizes de comparação pareada e a aplicação do método AHP.

4.2 Conversão da Base Qualitativa para a Escala de Saaty

Utilizando a escala de conversão apresentada na Tabela 19 (Secção 3.2.5), os descritores qualitativos atribuídos aos subcritérios para cada sistema construtivo foram convertidos em valores numéricos compatíveis com a aplicação do método AHP. Dessa forma, sistemas enquadrados na categoria “Muito boa” receberam valor numérico 7, sistemas classificados como “Boa” receberam valor 3, sistemas “Moderada” receberam valor 1 e sistemas “Baixa” receberam valor 1/3.

Após a definição da correspondência entre descritores qualitativos e valores numéricos, procedeu-se à construção da base quantitativa estruturada, apresentada na Tabela 27.

Tabela 27 - Base quantitativa estruturada para aplicação do método AHP

Critérios / Sistemas	Betão Leve	Aço Leve (LSF)	Wood Frame	Aço Estrutural	CLT / GLT
Transportabilidade	3	7	7	1	7
Conectividade	3	7	3	7	3
Manutenção	3	3	1	3	1
Compatibilidade construtiva	7	7	3	7	3
Custo de produção	1	3	3	1	1
Tempo de produção <i>off-site</i>	3	7	7	3	7
Assistência técnica	3	7	3	7	3
Consumo de energia	1	1	7	0,33	7
Consumo de água	1	3	7	1	7
Geração de resíduos	1	3	7	1	7

Fonte: O autor.

Ressalta-se que os valores apresentados na Tabela 27 não correspondem ainda às matrizes de comparação pareada do método AHP. Esses valores representam apenas a formalização numérica inicial dos enquadramentos qualitativos atribuídos a cada sistema construtivo.

As matrizes de comparação entre alternativas foram posteriormente obtidas a partir das razões matemáticas entre esses valores numéricos, conforme apresentado nas próximas secções.

4.3 Pesos dos Grupos de Critérios

As relações de preferência entre os grupos de critérios foram estabelecidas a partir da recorrência identificada na literatura especializada sobre construção modular e sistemas construtivos industrializados, de acordo com a hierarquia discutida na Secção 3.2.6.

Nesse contexto, os critérios comerciais receberam prioridade superior em relação aos critérios técnicos e ambientais, considerando que fatores relacionados a custo de produção, produtividade e prazo de execução são frequentemente apontados como condicionantes centrais para adoção de sistemas construtivos industrializados e processos off-site (Pan et al., 2008; Lawson, Ogden & Goodier, 2014; Jauslin & Adey, 2020).

De forma complementar, os critérios ambientais também receberam prioridade superior aos critérios técnicos, refletindo a crescente relevância atribuída aos indicadores de sustentabilidade, energia incorporada e desempenho ambiental nas análises contemporâneas da construção civil (John, Silva & Agopyan, 2010; Ding, 2014; ISO 14040, 2020).

A partir dessas relações de preferência identificadas na literatura, os julgamentos qualitativos foram convertidos para valores numéricos utilizando a escala adaptada de Saaty apresentada na Secção 3.2.5. Assim, a relação “Comerciais/Técnicos” foi enquadrada na categoria de forte importância, correspondendo ao valor numérico 5. Já as relações “Ambientais/Técnicos” e “Comerciais/Ambientais” foram classificadas como moderadamente mais importantes, recebendo valor 3 na escala adotada.

As relações inversas receberam os respectivos valores recíprocos, conforme estabelecido pelo método AHP. Dessa forma, as relações Técnicos/Comerciais, Técnicos/Ambientais e Ambientais/Comerciais receberam, respectivamente, os valores 1/5, 1/3 e 1/3.

A matriz de comparação pareada construída para os grupos de critérios é apresentada na Tabela 28.

Tabela 28 - Matriz de comparação pareada e pesos dos grupos de critérios

	Técnicos	Comerciais	Ambientais	Peso relativo
Técnicos	1,0000	0,2000	0,3333	0,1062
Comerciais	5,0000	1,0000	3,0000	0,6333
Ambientais	3,0000	0,3333	1,0000	0,2605

Fonte: O autor.

Após a construção da matriz, realizou-se a normalização dos valores por coluna e o cálculo do vetor de prioridades correspondente aos pesos relativos de cada grupo de critérios. Inicialmente, cada elemento da matriz foi dividido pela soma dos valores da respectiva coluna, obtendo-se a matriz normalizada. Em seguida, calculou-se a média aritmética dos valores de cada linha, resultando nos pesos apresentados na última coluna da Tabela 28. Os pesos obtidos representam a importância relativa de cada grupo de critérios no modelo hierárquico adotado.

Observa-se a predominância dos critérios comerciais, seguidos pelos critérios ambientais e, por fim, pelos critérios técnicos. Essa hierarquização evidencia a elevada influência dos fatores econômicos, produtivos e logísticos no processo decisório relacionado à adoção de sistemas construtivos industrializados.

A elevada relevância atribuída aos critérios comerciais converge com os resultados apresentados por Pan et al. (2008), Lawson, Ogden e Goodier (2014) e Jauslin e Adey (2020), que identificam custo, racionalização produtiva e redução de prazo como os principais motivadores da industrialização da construção.

Os critérios ambientais apresentaram peso intermediário, refletindo a crescente incorporação de indicadores de sustentabilidade nos processos de tomada de decisão da construção civil. Esse comportamento também é observado em estudos relacionados à análise do ciclo de vida e à energia incorporada dos sistemas construtivos (John, Silva & Agopyan, 2010; Ding, 2014).

Por sua vez, os critérios técnicos apresentaram menor peso relativo dentro da estrutura hierárquica adotada. Contudo, isso não representa baixa relevância técnica dos sistemas analisados, mas sim a predominância dos fatores econômicos, produtivos e ambientais no modelo decisório desenvolvido para esta pesquisa.

A verificação da consistência dos julgamentos resultou em valor de razão de consistência (CR) inferior a 0,10, indicando coerência aceitável, conforme recomendação de Saaty (2005).

Os cálculos completos da matriz de comparação pareada, do processo de normalização e da determinação dos pesos relativos dos grupos de critérios são apresentados no Anexo I.1.

4.4 Pesos dos Subcritérios

Seguindo o mesmo procedimento metodológico descrito anteriormente, foram construídas as matrizes de comparação entre os subcritérios pertencentes a cada grupo de critérios. Os julgamentos utilizados nessas matrizes foram definidos com base na hierarquia previamente estabelecida no item 3.2.6, fundamentada nas evidências identificadas na literatura especializada.

4.4.1 Critérios técnicos

Os valores atribuídos na matriz de comparação entre os subcritérios técnicos foram definidos com base na relevância relativa identificada na literatura especializada sobre construção modular e sistemas construtivos industrializados.

A compatibilidade construtiva recebeu prioridade superior em relação aos demais subcritérios técnicos por estar diretamente associada à integração modular, coordenação dimensional, padronização construtiva e viabilidade de montagem industrializada, aspectos frequentemente apontados como fundamentais para sistemas construtivos off-site (Smith, 2010; Knaack et al., 2018; Lawson, Ogden & Goodier, 2014).

Nesse contexto, a compatibilidade construtiva foi considerada moderadamente mais relevante que a transportabilidade, recebendo valor 3 na escala adaptada de Saaty para a relação “Compatibilidade/Transportabilidade”. A relação inversa “Transportabilidade/Compatibilidade” recebeu o respectivo valor recíproco ($1/3 = 0,333$). Embora a literatura destaque a elevada influência da transportabilidade na viabilidade logística e no deslocamento dos módulos entre fábrica e obra, seu impacto foi considerado relativamente subordinado à integração global do sistema modular (Lawson, Ogden & Goodier, 2014).

Já os subcritérios manutenção e conectividade foram tratados como fatores complementares de desempenho técnico, recebendo pesos equivalentes. Tal decisão decorre do entendimento de que ambos influenciam principalmente a operação, adaptabilidade e manutenção dos sistemas construtivos, sem exercer impacto estrutural tão determinante quanto os aspectos relacionados à compatibilidade construtiva e à logística modular (Davies et al., 2018; Lawson, Ogden & Goodier, 2014).

Dessa forma, a compatibilidade construtiva foi considerada fortemente mais relevante que manutenção e conectividade, recebendo valor 5 nas relações “Compatibilidade/Manutenção” e “Compatibilidade/Conectividade”, enquanto as relações inversas receberam os respectivos valores recíprocos ($1/5 = 0,200$).

De maneira semelhante, a transportabilidade foi considerada moderadamente mais relevante que manutenção e conectividade, resultando na atribuição do valor 3 para essas

comparações, ao passo que manutenção e conectividade foram consideradas de importância equivalente, recebendo valor 1 na matriz de comparação pareada.

A matriz correspondente aos subcritérios técnicos é apresentada na Tabela 29.

Tabela 29 - Matriz de comparação entre os subcritérios técnicos

Técnicos	Compatibilidade	Transportabilidade	Manutenção	Conectividade	Peso
Compatibilidade	1,000	3,000	5,000	5,000	0,5549
Transportabilidade	0,333	1,000	3,000	3,000	0,2516
Manutenção	0,200	0,333	1,000	1,000	0,0967
Conectividade	0,200	0,333	1,000	1,000	0,0967
Soma					1,0000

Fonte: O autor.

Os resultados obtidos evidenciam a predominância da compatibilidade construtiva no desempenho técnico dos sistemas industrializados analisados. Esse resultado converge com Knaack et al. (2018), que destacam a coordenação modular, a compatibilidade dimensional e a integração entre componentes como fatores centrais para eficiência da pré-fabricação e racionalização construtiva.

A transportabilidade apresentou o segundo maior peso relativo, indicando a relevância das condicionantes logísticas para a viabilidade operacional de sistemas modulares off-site. Conforme discutido por Lawson, Ogden e Goodier (2014), limitações relacionadas ao transporte e à montagem influenciam diretamente custos, planejamento executivo e flexibilidade de implantação.

Já os subcritérios manutenção e conectividade apresentaram menores pesos relativos, sendo interpretados como critérios complementares de desempenho técnico. Embora relevantes para operação e adaptabilidade dos sistemas, sua influência foi considerada secundária em relação aos fatores associados à integração modular e à racionalização produtiva.

As matrizes de comparação pareada, os cálculos de normalização e a obtenção dos pesos dos subcritérios técnicos são apresentados detalhadamente no Anexo I.2.

4.4.2 Critérios comerciais

Os julgamentos empregados na matriz de comparação entre os subcritérios comerciais foram definidos com base na relevância atribuída pela literatura especializada aos fatores económicos e produtivos associados à industrialização da construção.

O custo de produção apresentou maior relevância relativa em comparação aos demais subcritérios comerciais, sendo representado pelos valores 3 e 5 na escala adaptada de Saaty. Essa priorização reflete a forte influência dos custos na viabilidade económica e competitividade dos sistemas construtivos industrializados (Pan et al., 2008; Gibb, 2001).

O tempo de produção off-site recebeu prioridade intermediária em relação ao custo de produção, sendo representado por valor 3 na escala de Saaty. Essa relação fundamenta-se na

relevância atribuída pela literatura à redução de prazos, ao aumento da produtividade e à racionalização construtiva proporcionados pela pré-fabricação industrial (Lawson, Ogden & Goodier, 2014; Jauslin & Adey, 2020).

Já a assistência técnica foi tratada como fator complementar, recebendo menor prioridade relativa por estar associada principalmente à maturidade da cadeia produtiva, à disponibilidade de fornecedores especializados e suporte pós-implantação, aspectos considerados secundários em relação aos fatores diretamente vinculados à viabilidade econômica e produtiva dos sistemas construtivos industrializados (SCI, 2020).

A Tabela 30 apresenta a matriz de comparação entre os subcritérios comerciais.

Tabela 30 - Matriz de comparação entre os subcritérios comerciais

Comerciais	Custo	Tempo	Assistência	Peso
Custo	1,0000	3,0000	5,0000	0,6333
Tempo	0,3333	1,0000	3,0000	0,2605
Assistência	0,2000	0,3333	1,0000	0,1062
Soma				1,0000

Fonte: O autor.

Os resultados evidenciam a predominância do custo de produção como principal fator comercial associado à adoção de sistemas construtivos industrializados. Esse resultado converge com Pan et al. (2008), que identificam os fatores econômicos como condicionantes centrais da decisão de adoção de métodos construtivos industrializados.

O tempo de produção *off-site* apresentou o segundo maior peso relativo, indicando a relevância atribuída à redução de prazos e à racionalização produtiva em ambientes industrializados. Lawson, Ogden e Goodier (2014) destacam que a redução do tempo construtivo constitui uma das principais vantagens competitivas dos sistemas modulares.

A assistência técnica apresentou menor peso relativo dentro do grupo comercial, sendo interpretada como critério complementar associado ao suporte operacional e à consolidação da cadeia produtiva dos sistemas industrializados.

Os cálculos completos utilizados para a determinação dos pesos dos subcritérios comerciais encontram-se no Anexo I.3.

4.4.3 Critérios de impacto ambiental

Os julgamentos empregados na matriz dos subcritérios ambientais foram definidos com base nos indicadores ambientais mais recorrentes em estudos de avaliação do ciclo de vida aplicados à construção civil.

O consumo de energia recebeu maior prioridade relativa em relação ao consumo de água e à geração de resíduos, sendo representado por valores 3 e 5 na escala de Saaty. Essa priorização fundamenta-se na elevada relevância da energia incorporada nos impactos

ambientais associados à fabricação, transporte e industrialização dos componentes construtivos (John, Silva & Agopyan, 2010; Ding, 2014).

O consumo de água recebeu prioridade intermediária em relação à geração de resíduos devido à crescente preocupação com eficiência hídrica nos processos industriais e produtivos da construção civil. Contudo, sua influência foi considerada inferior ao impacto associado ao consumo energético global dos sistemas analisados.

A geração de resíduos foi tratada como critério complementar, embora relevante para sustentabilidade e racionalização produtiva, especialmente em processos industrializados com maior controle fabril e padronização construtiva (Zhang et al., 2020).

A matriz de comparação entre os subcritérios ambientais é apresentada na Tabela 31.

Tabela 31 - Matriz de comparação entre os subcritérios ambientais

Ambientais	Energia	Resíduos	Água	Peso
Energia	1,0000	3,0000	5,0000	0,6333
Resíduos	0,3333	1,0000	3,0000	0,2605
Água	0,2000	0,3333	1,0000	0,1062
Soma				1,0000

Fonte: O autor.

Os resultados demonstram predominância do consumo de energia entre os critérios ambientais analisados. Esse comportamento está alinhado às abordagens contemporâneas de avaliação ambiental da construção civil, nas quais a energia incorporada representa um dos principais indicadores de impacto ambiental ao longo do ciclo de vida dos sistemas construtivos (John, Silva & e Agopyan, 2010; Ding, 2014; ISO 14040, 2020).

A geração de resíduos foi considerada o segundo fator de maior relevância entre os critérios ambientais, devido aos impactos associados ao desperdício de materiais e à gestão dos resíduos da construção civil. O consumo de água, embora reconhecido como um indicador ambiental importante, apresentou menor influência relativa na comparação entre os sistemas analisados, sobretudo quando comparado aos impactos associados ao consumo energético.

Já a geração de resíduos apresentou menor peso relativo, embora permaneça associada às vantagens de racionalização e controle produtivo frequentemente atribuídas aos sistemas industrializados, especialmente em ambientes fabris com maior padronização e redução de perdas (Zhang et al., 2020; Goodier & Gibb, 2007).

As matrizes de comparação pareada e os respectivos cálculos para os subcritérios ambientais são apresentados no Anexo I.4.

4.5 Integração dos Pesos e Determinação dos Pesos Globais dos Subcritérios

Após a obtenção dos pesos locais dos subcritérios em cada grupo de critérios, procedeu-se à etapa de integração dos resultados, com o objetivo de determinar a importância global de cada subcritério no modelo de decisão.

Essa etapa consistiu na combinação dos pesos locais dos subcritérios com os pesos globais dos respectivos grupos de critérios, previamente determinados nas secções anteriores. Essa integração foi realizada por meio da multiplicação entre os pesos locais dos subcritérios e os pesos globais dos respectivos grupos de critérios.

Os pesos obtidos nas matrizes de comparação dos grupos de critérios e dos subcritérios possuem significados distintos dentro da estrutura hierárquica do método AHP. Os pesos dos grupos de critérios representam a importância relativa dos níveis superiores da hierarquia decisória, enquanto os pesos dos subcritérios representam apenas a importância relativa de cada elemento dentro do respetivo grupo.

Dessa forma, os pesos dos subcritérios não podem ser comparados diretamente entre grupos distintos. Para permitir essa comparação e identificar a contribuição efetiva de cada subcritério para o resultado final, foi necessário calcular os respetivos pesos globais.

Os pesos globais foram obtidos pela multiplicação entre o peso do grupo de critérios e o peso local do respetivo subcritério. Assim, um subcritério pertencente a um grupo com maior prioridade global tende a exercer maior influência no resultado final, mesmo quando apresenta peso local semelhante ao de subcritérios pertencentes a grupos menos relevantes.

A Tabela 32 apresenta os pesos globais consolidados dos subcritérios considerados na análise.

Tabela 32 - Pesos globais dos subcritérios considerados na análise

Grupo	Peso do Grupo	Subcritérios	Peso Local	Peso Global
Técnicos	0,1062	Transportabilidade	0,2516	0,0267
		Conectividade	0,0967	0,0103
		Manutenção	0,0967	0,0103
		Compatibilidade	0,5549	0,0589
Comerciais	0,6333	Custo de produção	0,6333	0,4011
		Tempo de produção <i>off-site</i>	0,2605	0,1650
		Assistência técnica	0,1062	0,0672
Ambientais	0,2605	Consumo de energia	0,6333	0,1650
		Consumo de água	0,2605	0,0277
		Geração de resíduos	0,1062	0,0679
Soma	1,0000		1,0000	1,0000

Fonte: O autor.

Observa-se que os maiores pesos globais foram atribuídos aos subcritérios custo de produção (0,4011), tempo de produção *off-site* (0,1650) e consumo de energia (0,1650). Esse resultado evidencia que a estrutura hierárquica adotada atribuiu maior relevância aos aspetos económicos, produtivos e ambientais associados à industrialização da construção. Em contrapartida, embora relevantes para a caracterização das alternativas, os subcritérios técnicos apresentaram menor contribuição relativa para o resultado global devido ao menor peso atribuído ao respetivo grupo de critérios.

Tal resultado decorre da elevada importância atribuída ao grupo de critérios comerciais durante o processo de comparação pareada, o que aumentou a influência dos subcritérios pertencentes a esse grupo na estrutura hierárquica do modelo.

Importa salientar que os pesos globais diferem dos pesos locais apresentados nas matrizes dos subcritérios. Enquanto os pesos locais expressam a importância relativa de cada subcritério apenas dentro do seu respetivo grupo, os pesos globais incorporam simultaneamente a importância do grupo de critérios e do subcritério, permitindo a comparação direta entre todos os elementos da hierarquia.

Essa etapa é fundamental para a aplicação do método AHP, uma vez que os pesos globais dos subcritérios são posteriormente utilizados na agregação dos resultados das alternativas, permitindo a obtenção do ranking final dos sistemas construtivos.

4.6 Relação entre as Alternativas e os Subcritérios

Nesta secção são apresentadas as matrizes de comparação pareada entre os sistemas construtivos em relação a cada subcritério definido no modelo decisório. Essas matrizes têm como objetivo determinar o desempenho relativo das alternativas, resultando nos pesos locais utilizados na etapa de agregação global.

As matrizes de comparação foram elaboradas a partir da base de dados qualitativa estruturada na Secção 4.2, utilizando o procedimento de conversão qualitativa para valores numéricos da escala adaptada de Saaty. As relações de preferência entre os sistemas construtivos foram obtidas a partir das razões entre os valores atribuídos às classificações qualitativas.

4.6.1 Critérios técnicos

Os valores apresentados na matriz refletem as relações de preferência derivadas da base qualitativa estruturada na Tabela 26. Como exemplo, os sistemas Aço Leve (LSF), *Wood Frame* e CLT/GLT foram classificados como “Muito boa” para o subcritério transportabilidade, enquanto o Betão Leve foi classificado como “Boa”. Considerando a conversão qualitativa adotada no modelo, a relação entre “Muito boa” e “Boa” corresponde a $7/3$, resultando em 2,33.

De forma análoga, o sistema Aço Estrutural, classificado como “Moderada”, foi comparado aos sistemas classificados como “Muito boa”, originando relações equivalentes a $1/7$, representadas pelo valor aproximado de 0,14. O mesmo procedimento metodológico foi aplicado às demais matrizes de comparação entre alternativas.

A Tabela 33 apresenta a matriz de comparação pareada entre os sistemas construtivos em relação ao subcritério de transportabilidade, bem como os respectivos pesos locais obtidos por meio da aplicação do método AHP.

Tabela 33 - Relação dos sistemas construtivos com o subcritério transportabilidade

Transportabilidade	Betão Leve	Aço Leve (LSF)	Wood Frame	Aço Estrutural	CLT / GLT	Peso local
Betão Leve	1,00	0,43	0,43	3,00	0,43	0,12
Aço Leve (LSF)	2,33	1,00	1,00	7,00	1,00	0,28
Wood Frame	2,33	1,00	1,00	7,00	1,00	0,28
Aço Estrutural	0,33	0,14	0,14	1,00	0,14	0,04
CLT / GLT	2,33	1,00	1,00	7,00	1,00	0,28
Soma						1,00

Fonte: O autor.

Os resultados indicam melhor desempenho para sistemas baseados em elementos mais leves e modulares, o que está associado à redução de custos logísticos e maior eficiência no transporte, conforme apontado por Gibb (2001) e Lawson, Ogden e Goodier (2014).

Os cálculos dos pesos locais das alternativas para o subcritério transportabilidade encontram-se no Anexo I.5.

A Tabela 34 apresenta a matriz de comparação pareada entre os sistemas construtivos em relação ao subcritério de conectividade, bem como os respectivos pesos locais obtidos por meio da aplicação do método AHP

Tabela 34 - Relação dos sistemas construtivos com o subcritério de conectividade

Conectividade	Betão Leve	Aço Leve (LSF)	Wood Frame	Aço Estrutural	CLT / GLT	Peso local
Betão Leve	1,00	0,43	1,00	0,43	1,00	0,13
Aço Leve (LSF)	2,33	1,00	2,33	1,00	2,33	0,30
Wood Frame	1,00	0,43	1,00	0,43	1,00	0,13
Aço Estrutural	2,33	1,00	2,33	1,00	2,33	0,30
CLT / GLT	1,00	0,43	1,00	0,43	1,00	0,13
Soma						1,00

Fonte: O autor.

Observa-se melhor desempenho nos sistemas que apresentam maior padronização e precisão dimensional, fatores que contribuem para maior eficiência na montagem e redução de inconsistências em obra (Smith, 2010; Lawson, Ogden & Goodier, 2014).

Os cálculos dos pesos locais das alternativas para o subcritério conectividade encontram-se no Anexo I.6.

A Tabela 35 apresenta a matriz de comparação pareada dos sistemas construtivos em relação ao subcritério manutenção, bem como os pesos locais resultantes da aplicação do método AHP.

Tabela 35 - Relação dos sistemas construtivos com o subcritério de manutenção

Manutenção	Betão Leve	Aço Leve (LSF)	Wood Frame	Aço Estrutural	CLT / GLT	Peso local (w)
Betão Leve	1,00	1,00	3,00	1,00	3,00	0,27
Aço Leve (LSF)	1,00	1,00	3,00	1,00	3,00	0,27
Wood Frame	0,33	0,33	1,00	0,33	1,00	0,09
Aço Estrutural	1,00	1,00	3,00	1,00	3,00	0,27
CLT / GLT	0,33	0,33	1,00	0,33	1,00	0,09
Soma						1,00

Fonte: O autor.

Os resultados evidenciam que soluções com maior modularidade e acessibilidade tendem a apresentar melhor desempenho, favorecendo a substituição de componentes e a realização de intervenções de forma mais eficiente (Pan et al., 2008; Smith, 2010).

Os cálculos dos pesos locais das alternativas para o subcritério manutenção encontram-se no Anexo I.7.

A Tabela 36 apresenta a matriz de comparação pareada dos sistemas construtivos em relação ao subcritério compatibilidade, bem como os pesos locais resultantes da aplicação do método AHP.

Tabela 36 - Relação dos sistemas construtivos com o subcritério de compatibilidade

Compatibilidade	Betão Leve	Aço Leve (LSF)	Wood Frame	Aço Estrutural	CLT / GLT	Peso local (w)
Betão Leve	1,00	1,00	2,33	1,00	2,33	0,26
Aço Leve (LSF)	1,00	1,00	2,33	1,00	2,33	0,26
Wood Frame	0,43	0,43	1,00	0,43	1,00	0,11
Aço Estrutural	1,00	1,00	2,33	1,00	2,33	0,26
CLT / GLT	0,43	0,43	1,00	0,43	1,00	0,11
Soma						1,00

Fonte: O autor.

Os resultados indicam vantagem para sistemas com maior flexibilidade de aplicação, especialmente em contextos que demandam soluções híbridas ou integração com diferentes tecnologias (Lawson, Ogden & Goodier, 2014).

Os cálculos dos pesos locais das alternativas para o subcritério compatibilidade construtiva encontram-se no Anexo I.8.

4.6.2 Critérios comerciais

A Tabela 37 apresenta a matriz de comparação pareada dos sistemas construtivos em relação ao subcritério custo de produção, bem como os pesos locais resultantes da aplicação do método AHP.

Tabela 37 - Relação dos sistemas construtivos com o subcritério de custo de produção

Custo de produção	Betão Leve	Aço Leve (LSF)	Wood Frame	Aço Estrutural	CLT / GLT	Peso local (w)
Betão Leve	1,00	0,33	0,33	1,00	1,00	0,11
Aço Leve (LSF)	3,00	1,00	1,00	3,00	3,00	0,33
Wood Frame	3,00	1,00	1,00	3,00	3,00	0,33
Aço Estrutural	1,00	0,33	0,33	1,00	1,00	0,11
CLT / GLT	1,00	0,33	0,33	1,00	1,00	0,11
Soma						1,00

Fonte: O autor.

Os resultados refletem a influência direta da eficiência produtiva e do consumo de recursos no custo final, corroborando a literatura que destaca o custo como fator determinante na escolha de sistemas construtivos (Pan et al., 2008; Gibb, 2001).

Os cálculos dos pesos locais das alternativas para o subcritério custo de produção encontram-se no Anexo I.9.

A Tabela 38 apresenta a matriz de comparação pareada dos sistemas construtivos em relação ao subcritério tempo *off-site*, bem como os pesos locais resultantes da aplicação do método AHP.

Tabela 38 - Relação dos sistemas construtivos com o subcritério tempo *off-site*

Tempo <i>off-site</i>	Betão Leve	Aço Leve (LSF)	Wood Frame	Aço Estrutural	CLT / GLT	Peso local (w)
Betão Leve	1,00	0,43	0,43	1,00	0,43	0,11
Aço Leve (LSF)	2,33	1,00	1,00	2,33	1,00	0,26
Wood Frame	2,33	1,00	1,00	2,33	1,00	0,26
Aço Estrutural	1,00	0,43	0,43	1,00	0,43	0,11
CLT / GLT	2,33	1,00	1,00	2,33	1,00	0,26
Soma						1,00

Fonte: O autor.

Os resultados evidenciam diferenças associadas ao nível de padronização e à complexidade dos processos produtivos, sendo que soluções mais racionalizadas tendem a apresentar maior eficiência temporal (Lawson, Ogden & Goodier, 2014; Pan et al., 2008).

Os cálculos dos pesos locais das alternativas para o subcritério tempo de produção *off-site* encontram-se no Anexo I.10.

A Tabela 39 apresenta a matriz de comparação pareada dos sistemas construtivos em relação ao subcritério assistência técnica, bem como os pesos locais resultantes da aplicação do método AHP.

Tabela 39 - Relação dos sistemas construtivos com o subcritério assistência técnica

Assistência técnica	Betão Leve	Aço Leve (LSF)	<i>Wood Frame</i>	Aço Estrutural	CLT / GLT	Peso local (w)
Betão Leve	1,00	0,43	1,00	0,43	1,00	0,13
Aço Leve (LSF)	2,33	1,00	2,33	1,00	2,33	0,30
<i>Wood Frame</i>	1,00	0,43	1,00	0,43	1,00	0,13
Aço Estrutural	2,33	1,00	2,33	1,00	2,33	0,30
CLT / GLT	1,00	0,43	1,00	0,43	1,00	0,13
Soma						1,00

Fonte: O autor.

Os resultados refletem o grau de maturidade e difusão das tecnologias no mercado, sendo que sistemas mais consolidados tendem a apresentar maior estrutura de suporte e assistência (Gibb, 2001; Smith, 2010).

Os cálculos dos pesos locais das alternativas para o subcritério assistência técnica encontram-se no Anexo I.11.

4.6.3 Critérios ambientais

A Tabela 40 apresenta a matriz de comparação pareada dos sistemas construtivos em relação ao subcritério consumo de energia, bem como os pesos locais resultantes da aplicação do método AHP.

Tabela 40 - Relação dos sistemas construtivos com o subcritério consumo de energia

Consumo de energia	Betão Leve	Aço Leve (LSF)	<i>Wood Frame</i>	Aço Estrutural	CLT / GLT	Peso local (w)
Betão Leve	1,00	1,00	0,14	3,00	0,14	0,06
Aço Leve (LSF)	1,00	1,00	0,14	3,00	0,14	0,06
<i>Wood Frame</i>	7,00	7,00	1,00	21,00	1,00	0,43
Aço Estrutural	0,33	0,33	0,05	1,00	0,05	0,02
CLT / GLT	7,00	7,00	1,00	21,00	1,00	0,43
Soma						1,00

Fonte: O autor.

Os resultados indicam diferenças relevantes associadas à intensidade energética dos materiais e processos produtivos, conforme amplamente discutido na literatura sobre sustentabilidade na construção civil (John, Silva e Agopyan, 2016).

Os cálculos dos pesos locais das alternativas para o subcritério consumo de energia encontram-se no Anexo I.12.

A Tabela 41 apresenta a matriz de comparação pareada dos sistemas construtivos em relação ao subcritério consumo de água, bem como os pesos locais resultantes da aplicação do método AHP.

Tabela 41 - Relação dos sistemas construtivos com o subcritério consumo de água

Consumo de água	Betão Leve	Aço Leve (LSF)	Wood Frame	Aço Estrutural	CLT / GLT	Peso local (w)
Betão Leve	1,00	0,33	0,14	1,00	0,14	0,05
Aço Leve (LSF)	3,00	1,00	0,43	3,00	0,43	0,16
Wood Frame	7,00	2,33	1,00	7,00	1,00	0,37
Aço Estrutural	1,00	0,33	0,14	1,00	0,14	0,05
CLT / GLT	7,00	2,33	1,00	7,00	1,00	0,37
Soma						1,00

Fonte: O autor.

Os resultados evidenciam diferenças associadas à dependência de processos úmidos, sendo que sistemas com menor utilização de água apresentam melhor desempenho sob a ótica da sustentabilidade (John, Silva e Agopyan, 2016).

Os cálculos dos pesos locais das alternativas para o subcritério consumo de água encontram-se no Anexo I.13.

A Tabela 42 apresenta a matriz de comparação pareada dos sistemas construtivos em relação ao subcritério geração de resíduos, bem como os pesos locais resultantes da aplicação do método AHP.

Tabela 42 - Relação dos sistemas construtivos com o subcritério geração de resíduos

Geração de resíduos	Betão Leve	Aço Leve (LSF)	Wood Frame	Aço Estrutural	CLT / GLT	Peso local (w)
Betão Leve	1,00	0,33	0,14	1,00	0,14	0,05
Aço Leve (LSF)	3,00	1,00	0,43	3,00	0,43	0,16
Wood Frame	7,00	2,33	1,00	7,00	1,00	0,37
Aço Estrutural	1,00	0,33	0,14	1,00	0,14	0,05
CLT / GLT	7,00	2,33	1,00	7,00	1,00	0,37
Soma						1,00

Fonte: O autor.

Os resultados demonstram variações relacionadas ao nível de controle produtivo e à eficiência dos processos, corroborando estudos que apontam a redução de desperdícios como um dos principais benefícios da racionalização construtiva (Koskela, 1992; Gibb, 2001).

Os cálculos dos pesos locais das alternativas para o subcritério geração de resíduos encontram-se no Anexo I.14.

4.7 Verificação da Consistência das Matrizes

A consistência dos julgamentos foi verificada em cada matriz por meio do cálculo do autovalor máximo ($\lambda_{\max}$), do índice de consistência (CI) e da razão de consistência (CR), conforme proposto por Saaty (2005).

Como exemplo, apresenta-se o cálculo da consistência para a matriz de comparação dos grupos de critérios.

A matriz de comparação é dada por:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0,2 & 0,3333 \\ 5 & 1 & 3 \\ 3 & 0,3333 & 1 \end{pmatrix}$$

O vetor de pesos (prioridades) obtido a partir da normalização da matriz é:

$$w = \begin{pmatrix} 0,1062 \\ 0,6333 \\ 0,2605 \end{pmatrix}$$

- (1) Cálculo da soma ponderada: Realiza-se a multiplicação da matriz A pelo vetor de pesos w :

$$A \times w = \begin{pmatrix} 1 & 0,2 & 0,3333 \\ 5 & 1 & 3 \\ 3 & 0,3333 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0,1062 \\ 0,6333 \\ 0,2605 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,3197 \\ 1,9456 \\ 0,7901 \end{pmatrix}$$

- (2) Cálculo do vetor de consistência: Divide-se cada elemento do vetor resultante pelo respetivo peso:

$$\begin{pmatrix} 0,3197 \div 0,1062 \\ 1,9456 \div 0,6333 \\ 0,7901 \div 0,2605 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3,009 \\ 3,073 \\ 3,034 \end{pmatrix}$$

- (3) Cálculo do autovalor máximo (λ_{max}): O valor de λ_{max} é obtido pela média dos valores do vetor de consistência:

$$\lambda_{max} = \frac{3,009 + 3,073 + 3,034}{3} = 3,0112$$

- (4) Índice de consistência (CI): Considerando $n = 3$:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} = \frac{3,0112 - 3}{3 - 1} = 0,0056$$

- (5) Índice Razão de consistência (CR): Adotando $RI = 0,58$ (para $n = 3$):

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0,0056}{0,58} = 0,0097$$

O valor obtido para a razão de consistência foi $CR = 0,0097$, sendo inferior ao limite de 0,10 estabelecido por Saaty (2005).

Dessa forma, conclui-se que os julgamentos realizados na matriz de comparação dos grupos de critérios são consistentes e confiáveis, validando a utilização dos pesos obtidos para as etapas subsequentes da análise.

Os resultados indicaram valores de razão de consistência inferiores a 0,10 para todas as matrizes analisadas, atendendo aos critérios de aceitabilidade estabelecidos na literatura. Isso demonstra que os julgamentos realizados são consistentes e confiáveis.

A verificação da consistência foi realizada para todas as matrizes de comparação pareada desenvolvidas neste estudo. Os valores de $\lambda_{\max}$, CI e CR correspondentes a cada matriz encontram-se apresentados nos respectivos anexos de cálculo (Anexos I.1 a I.14), permitindo a validação da coerência dos julgamentos efetuados em todas as etapas da aplicação do método AHP.

4.8 Integração dos Resultados e Obtenção do Ranking Final

Após a definição dos pesos globais dos critérios e subcritérios, procedeu-se à integração dos resultados obtidos nas matrizes de comparação das alternativas, com o objetivo de determinar o desempenho global de cada sistema construtivo analisado.

Essa etapa consistiu na agregação ponderada dos pesos locais das alternativas em cada subcritério com os respectivos pesos globais previamente determinados no modelo hierárquico. Dessa forma, cada sistema construtivo passou a possuir um índice global de prioridade, representativo do desempenho consolidado frente ao conjunto de critérios considerados na pesquisa.

Para cada sistema construtivo, foi calculado o peso global a partir da combinação dos pesos locais com os pesos dos critérios, conforme a metodologia descrita no Capítulo 3.

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 43.

Tabela 43 - Pesos globais e ranking dos sistemas construtivos

Sistema construtivo	Peso global	Ranking
<i>Wood Frame</i>	0,3074	1º
Aço Leve (LSF)	0,2508	2º
CLT / GLT	0,2183	3º
Aço Estrutural	0,1140	4º
Betão Leve	0,1094	5º
Soma	1,0000	

Fonte: O autor.

A integração dos resultados permitiu consolidar simultaneamente aspectos técnicos, comerciais e ambientais, assegurando que o ranking final refletisse a estrutura de prioridades previamente estabelecida na metodologia.

Na Figura 36 é apresentado o ranking final dos sistemas construtivos analisados, evidenciando o desempenho relativo de cada alternativa a partir dos pesos globais obtidos pela aplicação do método AHP.

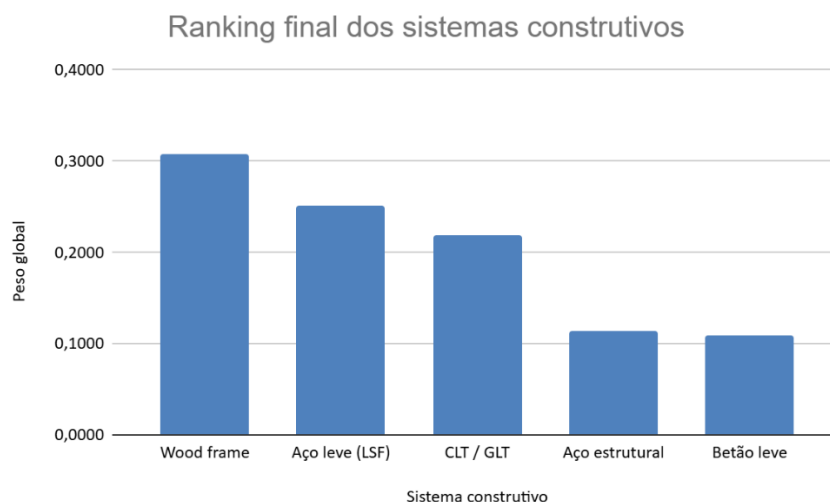


Figura 36: Ranking final dos sistemas construtivos obtido pelo método AHP

Fonte: O autor

Os resultados indicam que o sistema *Wood Frame* apresentou o maior peso global (0,3074), configurando-se como a alternativa mais bem avaliada no conjunto de critérios adotados. Em seguida, destacam-se os sistemas Aço Leve (LSF) e CLT/GLT, com pesos próximos entre si, evidenciando desempenhos globais semelhantes. Os sistemas Aço Estrutural e Betão Leve obtiveram os menores pesos globais, ocupando as últimas posições do ranking.

Observa-se que os sistemas construtivos associados a maiores níveis de industrialização, modularidade e racionalização produtiva apresentaram melhor desempenho global, resultado coerente com os objetivos definidos na pesquisa e com os critérios priorizados ao longo da estrutura hierárquica do modelo AHP.

A consistência analítica entre os pesos atribuídos aos critérios, os enquadramentos qualitativos fundamentados na literatura e os resultados quantitativos obtidos evidencia coerência metodológica entre as diferentes etapas do estudo.

O processo de agregação dos pesos, o cálculo dos pesos globais dos subcritérios e a determinação do ranking final das alternativas são apresentados detalhadamente no Anexo I.15.

4.9 Discussão dos Resultados por Sistema Construtivo

Os resultados obtidos evidenciam uma tendência consistente de favorecimento dos sistemas construtivos leves, industrializados e baseados em processos off-site, especialmente aqueles associados a maior racionalização produtiva, menor consumo de recursos e elevada padronização construtiva.

Observa-se convergência entre os resultados obtidos pelo método AHP e a literatura especializada sobre construção modular, que frequentemente associa sistemas industrializados

leves a ganhos de produtividade, redução de desperdícios, maior eficiência logística e menor impacto ambiental (Lawson, Ogden & Goodier, 2014; Pan et al., 2008; Knaack et al., 2018).

A predominância dos critérios comerciais e ambientais na estrutura hierárquica influenciou diretamente o posicionamento final das alternativas, favorecendo sistemas com maior eficiência produtiva e melhor desempenho ambiental. Nesse contexto, sistemas baseados em madeira industrializada, como *Wood Frame* e CLT/GLT, destacaram-se principalmente em função do reduzido consumo energético incorporado, menor geração de resíduos e maior compatibilidade com processos construtivos secos e industrializados.

Por outro lado, sistemas associados a materiais de maior intensidade energética, como o Aço Estrutural e o Betão Leve, apresentaram desempenho global inferior, especialmente nos critérios ambientais e logísticos. Esse comportamento converge com estudos de avaliação ambiental da construção civil, que apontam o elevado impacto energético e produtivo desses materiais ao longo do ciclo de vida (John, Silva & Agopyan, 2016; ISO 14040, 2020).

Além disso, os resultados demonstram que a estrutura de pesos adotada no modelo AHP exerceu influência significativa sobre o ranking final das alternativas. Dessa forma, diferentes contextos decisórios ou alterações nas prioridades atribuídas aos critérios poderiam produzir hierarquizações distintas, sem comprometer a coerência metodológica do modelo desenvolvido.

A seguir, discute-se individualmente o desempenho de cada sistema construtivo avaliado, relacionando os resultados obtidos com as características técnicas, comerciais e ambientais identificadas na literatura especializada.

4.9.1 *Wood Frame*

O sistema construtivo *Wood Frame* apresentou o maior peso global entre as alternativas analisadas, evidenciando o melhor desempenho relativo no conjunto de critérios considerados. Esse resultado pode ser explicado, sobretudo, pelas características inerentes ao sistema, como leveza, elevado grau de industrialização e eficiência logística, aspectos amplamente destacados na literatura sobre construção modular e *off-site* (Knaack et al., 2018; Lawson, Ogden & Goodier, 2018).

Diversos autores apontam que sistemas leves em madeira apresentam vantagens significativas em termos de transportabilidade, rapidez de produção *off-site* e redução de impactos ambientais quando comparados a sistemas tradicionais baseados em betão ou aço (Brandner et al., 2016; Goodier & Gibb, 2007). O bom desempenho do *Wood Frame* nos critérios ambientais, como consumo de energia, consumo de água e geração de resíduos, converge com estudos que reconhecem a madeira como um material com menor energia incorporada e menor dependência de processos úmidos em obra (ISO 14040, 2020; Zhang et al., 2020).

Além disso, o elevado desempenho do sistema nos critérios comerciais e ambientais mostrou-se particularmente relevante no modelo AHP, considerando que esses grupos receberam os maiores pesos globais na estrutura hierárquica adotada. Dessa forma, observa-se

compatibilidade entre a priorização metodológica estabelecida no Capítulo 3, os enquadramentos qualitativos definidos a partir da literatura e os resultados quantitativos obtidos no ranking final.

Entretanto, ressalta-se que esse resultado está diretamente condicionado à estrutura de pesos atribuída aos critérios comerciais e ambientais no modelo AHP adotado. Em cenários nos quais critérios técnicos estruturais ou durabilidade recebessem maior peso relativo, o posicionamento final das alternativas poderia apresentar alterações.

Assim, o posicionamento do *Wood Frame* no topo do ranking confirma sua adequação às demandas contemporâneas da construção modular, caracterizadas pela busca por eficiência produtiva e sustentabilidade ambiental.

4.9.2 Aço Leve (LSF)

O sistema LSF ocupou a segunda posição no ranking, com peso global muito próximo ao do *Wood Frame*, indicando desempenho igualmente elevado. A literatura destaca que o LSF se caracteriza pela elevada padronização dos componentes, precisão dimensional e facilidade de montagem, o que se reflete nos bons resultados obtidos nos critérios de conectividade, compatibilidade construtiva e tempo de produção *off-site* (Lawson, Ogden & Goodier, 2018; Knaack et al., 2018).

O bom desempenho do sistema também está associado à elevada racionalização produtiva e à eficiência logística proporcionadas pela leveza dos componentes metálicos, fatores que influenciaram positivamente sua avaliação nos critérios comerciais, os quais receberam maior peso relativo no modelo decisório.

Entretanto, autores como Goodier e Gibb (2007) ressaltam que, apesar das vantagens produtivas, o LSF apresenta maior consumo de energia incorporada em função da produção do aço, o que influencia negativamente seu desempenho ambiental quando comparado a sistemas construtivos em madeira. Esse fator contribui para explicar sua posição ligeiramente inferior ao *Wood Frame* no ranking final, ainda que a elevada reciclabilidade do aço represente um aspecto mitigador relevante (SCI, 2020).

Observa-se, portanto, que o desempenho global do LSF resultou de um equilíbrio entre elevada eficiência produtiva e limitações associadas aos impactos ambientais da produção do aço, demonstrando alinhamento entre os pesos atribuídos aos critérios ambientais e os resultados quantitativos obtidos pelo método AHP.

4.9.3 CLT / GLT

O sistema construtivo CLT/GLT posicionou-se na terceira colocação, apresentando desempenho expressivo, especialmente nos critérios ambientais e no tempo de produção *off-site*. A literatura recente sobre madeira engenheirada aponta que o CLT combina elevado grau

de pré-fabricação, precisão construtiva e redução significativa de resíduos, características compatíveis com os resultados obtidos neste estudo (Brandner et al., 2016; Knaack et al., 2018).

O sistema apresentou desempenho particularmente positivo nos subcritérios relacionados à sustentabilidade ambiental, refletindo as vantagens frequentemente atribuídas aos sistemas construtivos baseados em madeira engenheirada no contexto da construção modular contemporânea.

Por outro lado, estudos indicam que o custo de produção e a logística associada ao transporte e montagem de painéis de grande dimensão ainda representam desafios para a ampla difusão do sistema, particularmente em aplicações modulares de menor escala (Lawson, Ogden & Goodier, 2018). Esses fatores ajudam a explicar o desempenho global ligeiramente inferior ao dos sistemas *Wood Frame* e LSF, apesar do elevado potencial técnico e ambiental do CLT/GLT.

Considerando que os critérios comerciais receberam maior peso relativo no modelo hierárquico, as limitações relacionadas ao custo e à logística exerceram influência direta sobre o posicionamento final do sistema no ranking global.

4.9.4 Aço Estrutural

O sistema em Aço Estrutural apresentou desempenho intermediário, ocupando a quarta posição no ranking. Esse resultado reflete um equilíbrio entre vantagens técnicas e limitações ambientais. A literatura reconhece que o Aço Estrutural oferece elevada conectividade, flexibilidade de projeto e ampla disponibilidade de assistência técnica, características associadas à maturidade e consolidação desse sistema na construção civil (SCI, 2020; Goodier & Gibb, 2007).

O sistema apresentou desempenho satisfatório em critérios relacionados à conectividade e à compatibilidade construtiva, beneficiando-se da ampla difusão tecnológica e da consolidação das soluções metálicas industrializadas no setor da construção civil.

Entretanto, diversos estudos apontam que a produção do aço é intensiva em energia, impactando negativamente o desempenho ambiental do sistema, sobretudo nos critérios de consumo de energia e geração de emissões associadas ao processo produtivo (ISO 14040, 2020; Zhang et al., 2020). Embora a reciclabilidade do material represente uma vantagem relevante, esse aspecto não foi suficiente para compensar integralmente os impactos associados às etapas produtivas, justificando sua colocação inferior em relação aos sistemas construtivos mais leves.

Além disso, considerando a predominância dos critérios comerciais e ambientais na estrutura de pesos do modelo AHP, os impactos associados à produção do aço e à logística dos componentes influenciaram diretamente o desempenho global do sistema no ranking final.

4.9.5 Betão Leve

O sistema de Betão Leve apresentou o menor peso global entre os sistemas analisados. Apesar de suas vantagens relacionadas à durabilidade, robustez e resistência mecânica, amplamente reconhecidas na literatura, o betão é associado a elevados impactos ambientais, especialmente no que se refere ao consumo de energia e de água, bem como à geração de resíduos (John, Silva & Agopyan, 2016; ISO 14040, 2020).

Mesmo com a utilização de agregados leves, o sistema manteve limitações em termos de transportabilidade, tempo de produção *off-site* e eficiência logística quando comparado aos sistemas construtivos altamente industrializados. Esses fatores influenciaram negativamente seu desempenho nos critérios comerciais e ambientais, que apresentaram maior peso relativo na estrutura hierárquica do modelo decisório.

Considerando que os critérios comerciais e ambientais exerceram maior influência sobre o ranking global das alternativas, as limitações do Betão Leve relacionadas ao consumo de recursos, à logística e à produtividade contribuíram diretamente para seu posicionamento final.

Dessa forma, o desempenho obtido evidencia menor aderência do sistema às exigências contemporâneas da construção modular industrializada, especialmente em contextos que priorizam racionalização produtiva, rapidez executiva e sustentabilidade ambiental (Goodier & Gibb, 2007).

4.10 Comparação de Resultados entre os Diferentes Sistemas Construtivos

Os resultados obtidos evidenciam tendência consistente de favorecimento dos sistemas construtivos leves, industrializados e baseados em processos *off-site*, especialmente aqueles associados à maior racionalização produtiva, menor consumo de recursos e elevada padronização construtiva.

Os sistemas *Wood Frame*, Aço Leve (LSF) e CLT/GLT apresentaram desempenhos globais superiores e pesos finais relativamente próximos, indicando elevada competitividade técnica entre essas soluções construtivas. Em comum, esses sistemas apresentam menor massa estrutural, maior compatibilidade com processos de pré-fabricação e melhor desempenho logístico, fatores frequentemente associados à eficiência da construção modular industrializada.

Por outro lado, os sistemas Betão Leve e Aço Estrutural apresentaram limitações relacionadas principalmente à transportabilidade, ao consumo de energia incorporada e aos custos produtivos, o que influenciou negativamente seus desempenhos globais no modelo multicritério desenvolvido.

Os resultados mostram-se coerentes com estudos sobre industrialização da construção que apontam sistemas leves e modularizados como alternativas mais adequadas às exigências contemporâneas de produtividade, sustentabilidade e racionalização construtiva (Pan et al.,

2008; Lawson, Ogden & Goodier, 2014; Smith, 2010). Da mesma forma, os resultados relacionados ao desempenho ambiental convergem com pesquisas que destacam a relevância da energia incorporada e da redução de resíduos nos processos construtivos industrializados (Ding, 2014; Brandner et al., 2016; ISO 14040, 2020).

No contexto específico da produção modular de unidades sanitárias, os resultados reforçam a importância da compatibilização entre sistemas construtivos, instalações prediais e logística de montagem, considerando que módulos sanitários apresentam elevada concentração de componentes hidráulicos, elétricos e de acabamento. Nesse sentido, sistemas com maior padronização dimensional, facilidade de transporte e integração modular tendem a apresentar vantagens operacionais relevantes para aplicações *off-site*.

4.11 Síntese Crítica e Validação dos Objetivos do Estudo

Os resultados obtidos evidenciam que, considerando os critérios selecionados e a hierarquia de pesos previamente estabelecida no modelo AHP, os sistemas construtivos leves e industrializados apresentaram desempenho global superior no contexto analisado.

Observa-se convergência entre:

- i. A priorização dos critérios comerciais e ambientais na estrutura hierárquica;
- ii. Os pesos globais obtidos para os subcritérios;
- iii. O melhor desempenho dos sistemas leves e industrializados no ranking final; e
- iv. As evidências recorrentes identificadas na literatura especializada.

Essa convergência reforça a coerência interna do modelo decisório desenvolvido e sustenta a validade metodológica da aplicação do método AHP no contexto da avaliação de sistemas construtivos modulares

A análise dos resultados obtidos e o cruzamento com a literatura especializada permitiram validar os objetivos específicos definidos para a pesquisa. A Tabela 44 apresenta uma síntese das principais contribuições do estudo, relacionando os objetivos estabelecidos, os resultados alcançados e as considerações utilizadas para sua validação.

Tabela 44 - Validações e considerações sobre os objetivos definidos

Objetivo Específico	Principais resultados obtidos	Considerações para a validação e cruzamento com ref. bibliográficas
OE1: Realizar um inventário dos diferentes métodos de produção de unidades sanitárias modulares	Foram identificados e caracterizados os sistemas Betão Leve, Aço Leve (LSF), <i>Wood Frame</i> , Aço Estrutural e CLT/GLT, considerando critérios técnicos, comerciais e ambientais.	A seleção dos sistemas analisados contempla soluções amplamente discutidas na literatura sobre industrialização e construção modular, conforme Smith (2010), Lawson, Ogden e Goodier (2014) e Knaack et al. (2018).
OE2: Identificar os principais critérios aplicáveis à avaliação de sistemas construtivos	Os critérios foram organizados em grupos técnicos, comerciais e ambientais, com predominância dos critérios comerciais no modelo AHP.	Os resultados convergem com estudos que apontam custo, prazo, produtividade e racionalização construtiva como fatores centrais na adoção de sistemas industrializados (Pan et al., 2008; Gibb, 2001; Lawson, Ogden e Goodier, 2014). A relevância dos critérios ambientais também se alinha às discussões contemporâneas sobre sustentabilidade e energia incorporada (ISO 14040, 2020; Ding, 2014).
OE3: Comparar os diferentes sistemas de produção de módulos de unidades sanitárias utilizando o Processo Analítico Hierárquico (AHP)	Os sistemas <i>Wood Frame</i> , Aço Leve (LSF) e CLT/GLT apresentaram os melhores desempenhos globais, enquanto o Aço Estrutural apresentou desempenho inferior em critérios relacionados à transportabilidade e consumo de energia.	Os resultados confirmam tendências identificadas na literatura quanto ao favorecimento de sistemas leves, industrializados e com maior racionalização produtiva, especialmente em processos off-site (Smith, 2010; Brandner et al., 2016; Lawson, Ogden & Goodier, 2014).

Fonte: O autor.

A análise dos resultados obtidos e o cruzamento com a literatura especializada permitiram validar os objetivos específicos definidos para a pesquisa. O objetivo principal deste trabalho consistiu em comparar sistemas construtivos aplicáveis a módulos sanitários por meio da aplicação do método AHP. Os resultados obtidos permitem afirmar que esse objetivo foi plenamente atingido, uma vez que o método possibilitou estruturar, comparar e hierarquizar de forma consistente os sistemas construtivos analisados, considerando simultaneamente múltiplos critérios de decisão.

A hipótese de que sistemas construtivos leves e industrializados apresentariam desempenho global superior foi confirmada pelos pesos globais e pelo ranking final das alternativas avaliadas, uma vez que os sistemas *Wood Frame*, LSF e CLT/GLT ocuparam as primeiras posições. Esse desempenho esteve associado, principalmente, à elevada racionalização produtiva, à redução de impactos logísticos, ao menor consumo de recursos e à maior compatibilidade com processos industrializados *off-site*.

Além disso, o alinhamento entre os resultados obtidos e as evidências identificadas na literatura especializada reforça a validade da metodologia adotada e a relevância científica da análise desenvolvida. Os resultados mostraram-se coerentes com estudos que destacam a importância da industrialização, da pré-fabricação e da modularização como estratégias

associadas ao aumento da produtividade, redução de desperdícios e melhoria do desempenho global dos sistemas construtivos (Smith, 2010; Lawson, Ogden & Goodier, 2014; Brandner et al., 2016).

Ressalta-se, contudo, que os resultados obtidos estão diretamente associados à estrutura hierárquica, aos critérios selecionados e aos pesos atribuídos no modelo AHP desenvolvido para esta pesquisa. Dessa forma, diferentes contextos de aplicação ou alterações nas prioridades decisórias podem conduzir a resultados distintos, sem invalidar a consistência metodológica do modelo proposto.

5 CONCLUSÕES

5.1 Principais Conclusões

O presente trabalho teve como objetivo avaliar diferentes sistemas construtivos aplicáveis à produção modular off-site de unidades sanitárias por meio da aplicação do método Analytic Hierarchy Process (AHP), utilizando uma estrutura multicritério composta por critérios técnicos, comerciais e ambientais.

A estrutura hierárquica desenvolvida permitiu integrar fatores relacionados à logística, racionalização produtiva, custos, desempenho ambiental e compatibilidade construtiva em um modelo sistemático de apoio à decisão. A aplicação do método possibilitou converter julgamentos qualitativos identificados na literatura especializada em relações quantitativas de prioridade por meio da escala adaptada de Saaty, permitindo comparar os sistemas construtivos analisados de forma estruturada e coerente.

Os resultados obtidos demonstraram predominância dos critérios comerciais no processo decisório, evidenciando a forte influência de fatores relacionados a custo de produção, produtividade e prazo de execução na adoção de sistemas construtivos industrializados. Tal comportamento converge com estudos sobre industrialização da construção que apontam a racionalização produtiva, a previsibilidade econômica e a redução de prazo como fatores centrais para adoção de sistemas off-site e modularizados (Pan et al., 2008; Gibb, 2001; Lawson, Ogden & Goodier, 2014).

Entre os subcritérios técnicos, destacaram-se compatibilidade construtiva e transportabilidade, reforçando a relevância da integração modular, da coordenação dimensional e da viabilidade logística na industrialização da construção. Esses resultados mostram-se coerentes com as discussões apresentadas por Smith (2010), Knaack et al. (2018) e Lawson, Ogden & Goodier (2014), que identificam a padronização construtiva e a integração entre componentes como fatores determinantes para eficiência dos sistemas industrializados.

Nos critérios ambientais, o consumo de energia apresentou maior relevância relativa em comparação ao consumo de água e à geração de resíduos, refletindo a crescente importância atribuída à energia incorporada nas análises contemporâneas de sustentabilidade da construção civil. Esse comportamento converge com estudos de avaliação ambiental e análise do ciclo de vida que apontam a energia incorporada como um dos principais indicadores de impacto ambiental dos sistemas construtivos industrializados (John, Silva & Agopyan, 2010; Ding, 2014; ISO 14040, 2020).

Os resultados globais indicaram melhor desempenho relativo dos sistemas *Wood Frame*, Aço Leve (LSF) e CLT/GLT, sistemas caracterizados por elevada industrialização, menor massa estrutural, maior racionalização produtiva e melhor desempenho ambiental. Esses resultados confirmam tendências identificadas na literatura especializada sobre construção modular e industrializada, que apontam sistemas leves e pré-fabricados como alternativas mais

compatíveis com estratégias contemporâneas de eficiência produtiva, flexibilidade construtiva e sustentabilidade (Lawson, Ogden & Goodier, 2014; Smith, 2010; Brandner et al., 2016).

O sistema Betão Leve apresentou desempenho intermediário, destacando-se pela compatibilidade construtiva e robustez estrutural, porém com limitações relacionadas à transportabilidade e à energia incorporada. Já o sistema Aço Estrutural apresentou menor desempenho global relativo, principalmente devido aos impactos associados ao elevado consumo energético incorporado, à maior massa estrutural e aos custos produtivos mais elevados.

No que se refere aos objetivos específicos definidos para a pesquisa, considera-se que:

- A revisão bibliográfica permitiu identificar os principais critérios técnicos, comerciais e ambientais associados à avaliação de sistemas construtivos industrializados aplicáveis à construção modular;
- Foi possível estruturar uma base de dados qualitativa fundamentada na literatura especializada para caracterização comparativa dos sistemas construtivos analisados;
- O método AHP mostrou-se adequado para conversão de julgamentos qualitativos em relações quantitativas de prioridade, permitindo estruturar o processo decisório de forma sistemática;
- A aplicação do modelo possibilitou comparar diferentes sistemas construtivos sob múltiplos critérios de avaliação;
- Os resultados obtidos permitiram identificar tendências de desempenho coerentes com estudos contemporâneos sobre industrialização, modularização e sustentabilidade na construção civil.

Como principal contribuição do trabalho, destaca-se a proposição de uma estrutura metodológica multicritério aplicável à avaliação comparativa de sistemas construtivos industrializados voltados à construção modular, integrando critérios técnicos, comerciais e ambientais em um único modelo hierárquico de decisão. Além disso, o estudo contribui para sistematização de fatores frequentemente tratados de forma fragmentada na literatura sobre industrialização da construção, oferecendo uma abordagem estruturada e transparente de apoio à decisão.

A disponibilização das planilhas de cálculo no Anexo I contribui para a transparência metodológica e para a reprodutibilidade do modelo proposto.

De forma geral, conclui-se que a aplicação do método AHP mostrou-se adequada para estruturar e hierarquizar critérios aplicáveis à avaliação de sistemas construtivos industrializados no contexto da construção modular. Os resultados obtidos reforçam o potencial dos sistemas leves, modularizados e industrializados como alternativas alinhadas às demandas contemporâneas de racionalização produtiva, eficiência logística e sustentabilidade construtiva, contribuindo para maior transparência e consistência nos processos de tomada de decisão associados à construção modular *off-site*.

5.2 Limitações do Estudo

A presente investigação foi desenvolvida com base em uma abordagem teórica e exploratória, fundamentada predominantemente em dados qualitativos obtidos na literatura especializada. Embora a metodologia adotada tenha permitido estruturar de forma coerente a comparação entre diferentes soluções construtivas aplicáveis à produção modular de unidades sanitárias, os resultados obtidos não devem ser interpretados como absolutos ou universalmente aplicáveis.

Uma das principais limitações do estudo refere-se à ausência de validação empírica em contexto real de produção modular. A aplicação do modelo não contemplou dados operacionais provenientes de fabricantes, construtoras ou empreendimentos executados, o que limita a verificação prática dos desempenhos atribuídos aos sistemas construtivos analisados.

Além disso, os julgamentos utilizados nas comparações pareadas foram fundamentados predominantemente em evidências bibliográficas, sem participação direta de especialistas do setor no processo de atribuição dos pesos. Embora conduzida de forma metodologicamente coerente, a incorporação de profissionais com experiência prática poderia ampliar a robustez e a representatividade do modelo decisório.

Outra limitação está relacionada à própria complexidade das unidades sanitárias modulares, que envolvem elevada integração entre sistemas hidráulicos, elétricos, estruturais e de acabamento. Dessa forma, determinados aspectos operacionais, como desempenho em uso, manutenção pós-ocupação, estanqueidade e comportamento em diferentes contextos construtivos, não foram aprofundados na presente pesquisa.

5.3 Futuras Linhas de Investigação

Como recomendações para futuras linhas de investigação, sugere-se a aplicação do modelo multicritério em estudos de caso reais envolvendo empreendimentos modulares executados em diferentes contextos construtivos e geográficos.

Recomenda-se também a validação dos pesos atribuídos aos critérios e subcritérios por meio da participação de especialistas do setor, permitindo comparar percepções técnicas, produtivas e ambientais provenientes da prática profissional.

Além disso, futuros estudos podem incorporar novos critérios relacionados ao desempenho operacional das edificações, custos ao longo do ciclo de vida, conforto ambiental e manutenção pós-ocupação, ampliando a abrangência do modelo decisório.

Sugere-se ainda a integração do método AHP com ferramentas BIM, análise do ciclo de vida (ACV) e outros métodos multicritério, como TOPSIS, PROMETHEE e abordagens Fuzzy, visando ampliar a capacidade analítica e a robustez das avaliações comparativas.

Por fim, recomenda-se ampliar a análise para outros sistemas construtivos industrializados e realizar análises de sensibilidade, avaliando a influência das variações dos pesos atribuídos aos critérios sobre o ranking final das alternativas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABB Robotics. (2021). Sicheres und nachhaltiges Bauen: ABB Robotics treibt Automatisierung in der Bauindustrie voran. <https://new.abb.com/news/de/detail/78389/sicheres-und-nachhaltiges-bauen-abb-robotics-treibt-automatisierung-in-der-bauindustrie-voran>
- Adams, K. T., Osman, H., Thorpe, T., & Thomas, D. (2017). Circular economy in construction: Current awareness, challenges and enablers. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Waste and Resource Management*, 170(1), 15–24.
- Agopyan, V., John, V. M., & Silva, V. G. (2002). Alternativas para a redução do desperdício de materiais nos estaleiros de obras. PCC-USP.
- Akanbi, L. A., Oyedele, L. O., Delgado, J. M. D., Bilal, M., Akinade, O. O., Ajayi, A. O., & Owolabi, H. A. (2018). Reusability analytics tool for end-of-life assessment of building materials in a circular economy. *World Journal of Science, Technology and Sustainable Development*, 15(1), 40–55.
- ArchDaily Brasil. (2021). Banheiros modulares: Como adaptar espaços pré-fabricados a um projeto de arquitetura. <https://www.archdaily.com.br/br/954319/banheiros-modulares-como-adaptar-espacos-pre-fabricados-a-um-projeto-de-arquitetura>
- Arif, M., & Egbu, C. (2010). Making a case for offsite construction in China. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 17(6), 536–548.
- Ashworth, A. (2013). *Cost studies of buildings* (6th ed.). Routledge.
- Autodesk. Incorrect placement of structural connections families in IFC model exported from Revit 2024.2. 2024. Disponível em: <https://www.autodesk.com/support/technical/article/caas/sfdcarticles/sfdcarticles/Incorrect-Placement-of-Structural-Connections-Families-in-IFC-model-exported-from-Revit-2024-2.html>. Acesso em: 8 maio 2026.
- Barth, F., Vasconcelos, A. C., Bunn, J., & Becsi, P. (2009). Desenvolvimento de banheiro pré-fabricado voltado para construções emergenciais. In 2º Encontro Nacional de Pesquisa-Projeto-Produção em Betão Pré-Moldado. São Carlos, SP.
- Bathsystem. Modular Bathroom Pods. [S.l.], [s.d.]. Disponível em: <https://www.bathsystem.com/en/>. Acesso em: 7 maio 2026.
- Belton, V., & Stewart, T. J. (2002). *Multiple criteria decision analysis: An integrated approach*. Kluwer Academic Publishers.
- Bertram, N., Fuchs, S., Mischke, J., Palter, R., & Strube, G. (2019). *Modular construction: From projects to products*. McKinsey Global Institute.
- Blismas, N., & Wakefield, R. (2009). Drivers, constraints and the future of offsite manufacture in Australia. *Construction Innovation*, 9(1), 72–83.

Blismas, N., Pendlebury, M., Gibb, A., & Pasquire, C. (2006). Constraints to the use of off-site production on construction projects. *Architectural Engineering and Design Management*.

Boje, C., Guerriero, A., Kubicki, S., & Rezgui, Y. (2020). Towards a semantic construction digital twin: Directions for future research. *Automation in Construction*, 114, 103179.

Bloomberg. (2019, 1 de maio). Hotel modular mais alto do mundo vai nascer em Manhattan. *Jornal de Negócios*. <https://www.jornaldenegocios.pt/empresas/imobiliario/detalhe/hotel-modular-mais-alto-do-mundo-vai-nascer-em-manhattan>

Brandner, R., Flatscher, G., Ringhofer, A., Schickhofer, G., & Thiel, A. (2016). Cross laminated timber (CLT): Overview and development. *European Journal of Wood and Wood Products*, 74(3), 331–351. <https://doi.org/10.1007/s00107-015-0999-5>

Casas Alea. (2023). Sistema construtivo *Wood Frame*: O que é e como funciona. <https://www.casasalea.com/blog/metodo-construtivo/sistema-wood-frame/>

CIB. (2010). Sustainable construction. CIB.

CMC Módulos. (s.d.). Banheiro pronto. Recuperado em 09 de maio de 2026, de <https://cmcmódulos.com.br/solucao-construtiva/banheiro-pronto/>

Construcan. (2024). Construção modular: rapidez e eficiência [Imagem]. Construcan. <https://www.construcan.com.br/construcao-modular-rapidez-e-eficiencia>

Construction Management. (2021). 15 tips for specifying bathroom pods. <http://constructionmanagement.co.uk/15-tips-for-specifying-bathroom-pods/>

Davies, A., MacAulay, S., DeBarro, T., & Thurston, M. (2018). Making innovation happen in a megaproject: London's Crossrail suburban railway system. *Project Management Journal*, 49(6), 25–37.

Design sem Neura. (2019). Steel frame. <https://designsemneura.wordpress.com/2019/05/29/steel-frame/>

Dietrichkeit, K. (2021). Industrialização da construção: análise de sistemas construtivos conforme nível de pré-fabricação.

Ding, G. K. C. (2008). Sustainable construction — The role of environmental assessment tools. *Journal of Environmental Management*, 86(3), 451–464.

Ding, G. K. C. (2014). Life cycle assessment (LCA) of sustainable building materials: An overview. *Eco-efficient Construction and Building Materials*, 38–62. <https://doi.org/10.1016/B978-1-84569-481-8.50003-7>

Dixit, M. K., Fernández-Solís, J. L., Lavy, S., & Culp, C. H. (2012). Identification of parameters for embodied energy measurement: A literature review. *Energy and Buildings*, 42(8), 1238–1247.

Elkington, J. (1997). Cannibals with forks: The triple bottom line of 21st century business. Capstone.

Ehwi, R. J., Oti-Sarpong, K., Shojaei, R., & Burgess, G. (2021). Offsite manufacturing research: A systematic review of methodologies used. *Construction Management and Economics*, 39(11), 915–932.

El Debs, M. K. (2017). *Betão pré-moldado: fundamentos e aplicações* (2nd ed.). Oficina de Textos.

Figueira, J., Greco, S., & Ehrgott, M. (Eds.). (2005). *Multiple criteria decision analysis: State of the art surveys*. Springer.

Foliente, G. (2000). Developments in performance-based building codes and standards. *Forest Products Journal*.

Fonyat, K. A. (2013). *Construção modular: Uma análise do sistema construtivo e suas aplicações na construção civil* [Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Tecnológica Federal do Paraná].

Formoso, C. T., Isatto, E. L., & Hirota, E. H. (2002). Method for waste control in the building industry. *Proceedings of the IGLC*.

Gibb, A. G. F. (1999). *Off-site fabrication: Prefabrication, pre-assembly and modularisation*. Whittles Publishing.

Gibb, A. G. F. (2001). Standardization and pre-assembly: Distinguishing myth from reality using case study research. *Construction Management and Economics*, 19(3), 307–315. <https://doi.org/10.1080/01446190010020435>

Gibb, A. G. F., & Isack, F. (2003). Re-engineering through pre-assembly: Client expectations and drivers. *Building Research & Information*, 31(2), 146–160. <https://doi.org/10.1080/09613210302000>

Gibson, E. J. (2003). Working with the performance approach in building. CIB.

Gil, A. C. (2017). *Como elaborar projetos de pesquisa* (6. ed.). Atlas.

Gomes, L. F. A. M., Gomes, C. F. S., & Almeida, A. T. (2006). *Tomada de decisão gerencial: Enfoque multicritério*. Atlas.

Goodier, C. I., & Gibb, A. G. F. (2007). Future opportunities for offsite in the UK. *Construction Management and Economics*, 25(6), 585–595. <https://doi.org/10.1080/01446190601071821>

Gould, F. E., & Joyce, N. E. (2014). *Construction project management* (4th ed.). Pearson.

Harris, J. (2025). Bathroom pod system used in UPMC Presbyterian building. <https://www.bizjournals.com/pittsburgh/news/2025/05/02/bathroom-pod-upmc-presbyterian-building.html>

Howick Ltd. (2024). Bathroom pods. <https://www.howickltd.com/applications/modular-construction/bathroom-pods>

International Organization for Standardization. (2020). *ISO 14040: Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework*. ISO.

Ishizaka, A., & Labib, A. (2011). Review of the main developments in the analytic hierarchy process. *Expert Systems with Applications*, 38(11), 14336–14345. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.04.143>

Jaillon, L., & Poon, C. S. (2008). Sustainable construction aspects of using prefabrication in dense urban environment: A Hong Kong case study. *Construction Management and Economics*, 26(9), 953–966.

Jaillon, L., & Poon, C. S. (2010). Design issues of using prefabrication in Hong Kong building construction. *Construction Management and Economics*, 28(10), 1025–1042. <https://doi.org/10.1080/01446193.2010.499589>

Jaillon, L., & Poon, C. S. (2014). Life cycle design and prefabrication in buildings: A review and case studies in Hong Kong. *Automation in Construction*, 39, 195–202.

Jato-Espino, D., Castillo-Lopez, E., Rodriguez-Hernandez, J., & Canteras-Jordana, J. (2014). A review of application of multi-criteria decision making methods in construction. *Automation in Construction*, 45, 151–162.

Jauslin, D., & Adey, B. T. (2020). Decision support for selecting modular construction methods. *Automation in Construction*, 119.

John, V. M., Silva, V. G., & Agopyan, V. (2010). Agenda 21: Uma proposta de discussão para o construbusiness brasileiro. PCC-USP.

John, V. M., Silva, V. G., & Agopyan, V. (2016). Sustentabilidade na construção civil. Oficina de Textos.

Jorge, L. P., & Ravache, R. L. (2021). Construção modular pré-fabricada: O futuro da arquitetura no Brasil. *Connection Line - Revista Eletrônica do Univag*, 24. <https://doi.org/10.18312/connectionline.v0i24.1633>

Kabir, G., Sadiq, R., & Tesfamariam, S. (2014). A review of multicriteria decision-making methods for infrastructure management. *Structure and Infrastructure Engineering*, 10(9), 1176–1210.

Kamali, M., & Hewage, K. (2016). Life cycle performance of modular buildings: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 1171–1183. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.031>

Kamali, M., & Hewage, K. (2017). Development of performance criteria for sustainability evaluation of modular versus conventional construction methods. *Journal of Cleaner Production*, 142, 3592–3606. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.108>

Kamar, K. A. M., Hamid, Z. A., Azman, M. N. A., & Aziz, T. A. (2011). Industrialized Building System (IBS): Revisiting issues of definition and classification. *International Journal of Emerging Sciences*, 1(2), 120–132.

Kauppinen, L., Annunen, P., & Haapasalo, H. (2024). Systematic literature review of themes and definitions of industrialized construction. *University of Oulu Working Papers in Industrial Engineering and Management*.

- Kieran, S., & Timberlake, J. (2004). *Refabricating architecture: How manufacturing methodologies are poised to transform building construction*. McGraw-Hill.
- Kibert, C. J. (2016). *Sustainable construction: Green building design and delivery* (4th ed.). John Wiley & Sons.
- Knaack, U., Chung-Klatte, S., & Hasselbach, R. (2012). *Prefabricated systems: Principles of construction*. Birkhäuser.
- Knaack, U., Chung-Klatte, S., & Hasselbach, R. (2018). *Prefabricated systems: Principles of construction* (2nd ed.). Birkhäuser.
- Koskela, L. (1992). *Application of the new production philosophy to construction*. Technical Report No. 72. Stanford University.
- Koskela, L. (2000). *An exploration towards a production theory and its application to construction*. VTT Technical Research Centre of Finland.
- KPMG. (2016). *Smart construction: How offsite manufacturing can transform our industry*. KPMG International.
- Kylili, A., & Fokaides, P. A. (2015). Policy trends for the sustainability assessment of construction materials. *Journal of Cleaner Production*.
- Krajewski, L. J., Malhotra, M. K., & Ritzman, L. P. (2016). *Operations management: Processes and supply chains* (11th ed.). Pearson.
- Lakatos, E. M., & Marconi, M. A. (2017). *Fundamentos de metodologia científica* (8. ed.). Atlas.
- Lawson, R. M., Ogden, R. G., & Bergin, R. (2012). Application of modular construction in high-rise buildings. *Journal of Architectural Engineering*, 18(2), 148–154. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AE.1943-5568.0000057](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000057)
- Lawson, R. M., Ogden, R. G., & Goodier, C. I. (2014). *Design in modular construction*. CRC Press.
- Lawson, R. M., Ogden, R. G., & Goodier, C. I. (2018). *Design in modular construction* (2nd ed.). CRC Press.
- Lessing, J., Stehn, L., & Ekholm, A. (2015). Industrialized house-building – Conceptual orientation and strategic perspectives. *Construction Innovation*, 15(3), 378–399. <https://doi.org/10.1108/CI-05-2014-0023>
- Lessing, Jerker. *Industrialised house-building: Development and conceptual orientation of the field*. 2006. Tese (Doutorado) – Lund University, Sweden.
- Li, Z., Shen, G. Q., & Xue, X. (2014). Critical review of the research on the management of prefabricated construction. *Habitat International*, 43, 240–249.
- Lim, Y. W., et al. (2022). Planning and coordination of modular construction projects: A systematic review. *Automation in Construction*, 140, 104417.

Lu, N., & Korman, T. (2010). Implementation of building information modeling in modular construction: Benefits and challenges. In Construction Research Congress (pp. 1136–1145).

Lu, W., & Yuan, H. (2011). A framework for understanding waste management studies in construction. *Waste Management*, 31(6), 1252–1260.

Lu, W., & Yuan, H. (2013). Investigating waste reduction potential in the upstream processes of offsite construction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.

Luu, V. T., Kim, S. Y., Cao, H. L., & Park, M. W. (2020). Integrated prefabricated bathroom units and their impact on construction productivity and quality performance. *Journal of Building Engineering*, 32, 101476. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101476>

Mao, C., et al. (2015). Comparative study of greenhouse gas emissions between off-site prefabrication and conventional construction methods. *Energy and Buildings*, 66, 165–176.

Modular Building Institute (MBI). (2024). Annual modular construction industry report 2024.

MODULAR BUILDING INSTITUTE. Eisa Lee: the bilingual architect. [s.d.]. Disponível em: <https://www.modular.org/2025/06/28/eisa-lee-the-bilingual-architect/>. Acesso em: 8 maio 2026.

Mohamed Ramadan, M.AM. Uma metodologia para a escolha do sistema de pré-fabricação na construção de escolas egípcias. *J. Eng. Appl. Sci.* 73 , 51 (2026). <https://doi.org/10.1186/s44147-026-00911-0>

Molavi, J., & Barral, D. (2016). A construction modularization framework for improved productivity. *Procedia Engineering*.

Mostafavi, E., Akbarnezhad, A., Chileshe, N., & Li, H. (2021). Evaluating the sustainability of modular construction: A systematic review. *Journal of Cleaner Production*, 315, 128093.

Mota, C. M. M., & Almeida, A. T. (2018). Aplicação de métodos multicritério na seleção de tecnologias na construção civil. *Revista Produção Online*, 18(3), 1020–1044.

Mota, M. F. (2019). Construção modular: industrialização e inovação tecnológica na arquitetura contemporânea. Universidade de São Paulo.

Nomad Architects. (s.d.). *3Cycle: Reuse building, reuse module, reuse component* [Ilustração]. <https://nomadarchitects.lv/3cycle>

NTC BRASIL. Construção modular: eficiência e industrialização na construção civil. 2025. Disponível em: <https://www.ntcbrasil.com.br/blog/construcao-modular-eficiencia/>. Acesso em: 8 maio 2026.

Núcleo do Conhecimento. (2021). Sistema construtivo em steel frame. <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/steel-frame>

Ortiz, O., Castells, F., & Sonnemann, G. (2009). Sustainability in the construction industry: A review of recent developments based on LCA. *Construction and Building Materials*, 23(1), 28–39.

Pan, W., & Sidwell, R. (2011). Demystifying the cost barriers to offsite construction in the UK. *Construction Management and Economics*, 29(11), 1081–1099.

Pan, W., Gibb, A. G. F., & Dainty, A. R. J. (2007). Perspectives of UK housebuilders on the use of offsite modern methods of construction. *Construction Management and Economics*, 25(2), 183–194. <https://doi.org/10.1080/01446190600827058>

Pan, W., Gibb, A. G. F., & Dainty, A. R. J. (2008). Leading UK housebuilders' utilization of offsite construction methods. *Building Research & Information*, 36(1), 56–67. <https://doi.org/10.1080/09613210701204013>.

Parametric House. (2024). Parametric facade scripts. <https://parametrichouse.com/parametric/facade-scripts/>

Pasquire, C., Gibb, A., & Blismas, N. (2015). Offsite manufacturing and the construction industry. *Constructing Excellence Report*.

Persson, J., Olofsson, T., & Westerlund, M. (2022). Digital twins in the built environment: Opportunities for modular and industrialized construction. *Journal of Building Engineering*, 52, 104518.

PINI. (2010). Banheiros pré-fabricados. *Revista Técnica*, 159.

Polidoro, C. R., & Rodrigues, M. S. (2019). Construção modular e industrializada: avanços tecnológicos e sustentabilidade. *Revista Tecnológica*, 28(2), 45–58.

Pons, O., & Wadel, G. (2011). Environmental impacts of prefabricated school buildings. *Habitat International*, 35(3), 553–563. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2011.01.005>

Porcelanosa Offsite. (n.d.). Porcelanosa Offsite. <https://www.porcelanosa.com/pt/porcelanosa-offsite/>

Prodanov, C. C., & Freitas, E. C. (2013). Metodologia do trabalho científico: Métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico (2. ed.). Feevale.

Quonset Hut. (2012, December). The Manning Portable Colonial Cottage. <https://quonset-hut.blogspot.com/2012/12/the-manning-portable-colonial-cottage.html>

Rakhshan, K., et al. (2020). Evaluating sustainability in prefabricated construction. *Sustainability*.

Rahman, M. M. (2014). Barriers of implementing modern methods of construction. *Journal of Management in Engineering*, 30(1), 69–77.

Rodrigues, M. B. (2005). Diretrizes para integração dos requisitos de construtibilidade ao processo de desenvolvimento de produtos de obras repetitivas (Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul).

Rojas-Herrera, C., et al. (2025). Industrialized construction: A systematic review of its benefits and guidelines for the development of new constructive solutions applied in sustainable projects. *Applied Sciences*, 15(3), 1123–1145.

- Rosso, T. (1980). Teoria e prática da racionalização da construção. FAU-USP.
- Saaty, T. L. The analytic hierarchy process. New York: McGraw-Hill, 1980.
- Saaty, Thomas L.; Vargas, Luis G. Models, methods, concepts and applications of the analytic hierarchy process. 2. ed. New York: Springer, 2012.
- Saaty, T. L. (2005). Theory and applications of the analytic network process: Decision making with benefits, opportunities, costs, and risks. RWS Publications.
- Sabbatini, F. H. (1989). Desenvolvimento de métodos, processos e sistemas construtivos: Formulação e aplicação de uma metodologia [Tese de doutoramento, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo].
- Savassi, F., & Chica, C. P. (2022). Construção modular. Instituto Aço Brasil; Centro Brasileiro da Construção em Aço.
- Smith, R. E., & Quale, J. D. (Eds.). (2017). Offsite Architecture: Constructing the Future. Routledge.
- Smith, R. E. (2010). Prefab architecture: A guide to modular design and construction. John Wiley & Sons.
- Starts At 60. Nostalgia: prefabricated housing after World War II. 2020. Disponível em: <https://startsat60.com/media/opinion/bloggers/nostalgia-prefabricated-housing-post-world-war-ii>. Acesso em: 8 maio 2026.
- Steel Construction Institute. (2020). Modular construction using light steel framing: Design guide. SCI.
- Steinhardt, D., & Manley, K. (2016). Adoption of prefabrication in housing: An Australian perspective. Construction Innovation, 16(2), 205–222.
- Triantaphyllou, E. (2000). Multi-criteria decision making methods: A comparative study. Springer.
- Vincke, P. (1992). Multicriteria decision-aid. John Wiley & Sons.
- Vision Volumetric. (s.d.). News & insights: Volumetric modular construction. <https://visionvolumetric.co.uk/news-insights/>
- Vobi. (2024). As vantagens da construção off-site. <https://www.vobi.com.br/blog/as-vantagens-da-construcao-off-site>
- Weber. (2024). Modern methods of construction (MMC). <https://www.uk.weber/mmc>
- World Economic Forum. (2018). Shaping the future of construction: Future scenarios and implications for the industry. World Economic Forum.
- Yuan, Z., Sun, C., & Wang, Y. (2018). Design for manufacture and assembly-oriented parametric design of prefabricated buildings. Automation in Construction, 88, 13–22.

Zhang, X., et al. (2020). Environmental benefits of prefabricated construction in China. *Journal of Cleaner Production*, 245, 118–130.

Zohourian, M., et al. (2025). Modular construction: A comprehensive review. *Buildings*, 15(4), 923–945.

ANEXOS

Anexo I – Planilhas de cálculo do método AHP

Anexo I.1 – Cálculo dos pesos dos grupos de critérios

	Técnicos	Comerciais	Ambientais	Peso Grupo
Técnicos	1,0000	0,2000	0,3333	0,1062
Comerciais	5,0000	1,0000	3,0000	0,6333
Ambientais	3,0000	0,3333	1,0000	0,2605
Soma colunas	9,0000	1,5333	4,3333	
Matriz Normalizada				
	Técnicos	Comerciais	Ambientais	
Técnicos	0,1111	0,1304	0,0769	
Comerciais	0,5556	0,6522	0,6923	
Ambientais	0,3333	0,2174	0,2308	
Pesos				
	Técnicos	Comerciais	Ambientais	
Peso Grupo	0,1062	0,6333	0,2605	
Soma Ponderada	0,3197	1,9456	0,7901	
λ_{max}	3,0112			
CI	0,0056			
RI	0,5800	para n=3		
CR	0,0097			

Anexo I.2 – Cálculo dos pesos dos subcritérios técnicos

Técnicos	Compatibilidade	Transportabilidade	Manutenção	Conectividade	Peso
Compatibilidade	1,0000	3,0000	5,0000	5,0000	0,5549
Transportabilidade	0,3333	1,0000	3,0000	3,0000	0,2516
Manutenção	0,2000	0,3333	1,0000	1,0000	0,0967
Conectividade	0,2000	0,3333	1,0000	1,0000	0,0967
Soma colunas	1,7333	4,6667	10,0000	10,0000	1,0000
Matriz Normalizada					
	Compatibilidade	Transportabilidade	Manutenção	Conectividade	
Compatibilidade	0,57692	0,64286	0,50000	0,50000	
Transportabilidade	0,19231	0,21429	0,30000	0,30000	
Manutenção	0,11538	0,07143	0,10000	0,10000	
Conectividade	0,11538	0,07143	0,10000	0,10000	
Pesos Locais					
	Compatibilidade	Transportabilidade	Manutenção	Conectividade	
Peso	0,5549	0,2516	0,0967	0,0967	
Soma Ponderada	2,2769	1,0168	0,3883	0,3883	
λ_{max}	4,1030				
CI	0,0343				
RI	0,9000	para n=4			
CR	0,0381				
Peso Grupo	0,1062				
Pesos Globais					
	Compatibilidade	Transportabilidade	Manutenção	Conectividade	
Peso	0,0589	0,0267	0,0103	0,0103	

Anexo I.3 – Cálculo dos pesos dos subcritérios comerciais

Comerciais	Custo	Tempo	Assistência	Peso
Custo	1,0000	3,0000	5,0000	0,6333
Tempo	0,3333	1,0000	3,0000	0,2605
Assistência	0,2000	0,3333	1,0000	0,1062
Soma colunas	1,5333	4,3333	9,0000	1,0000
Matriz Normalizada				
	Custo	Tempo	Assistência	
Custo	0,6522	0,6923	0,5556	
Tempo	0,2174	0,2308	0,3333	
Assistência	0,1304	0,0769	0,1111	
Pesos Locais				
	Custo	Tempo	Assistência	
Peso	0,6333	0,2605	0,1062	
Soma Ponderada	1,9456	0,7901	0,3197	
λ_{max}	3,0720			
CI	0,0360			
RI	0,5800	para n=3		
CR	0,0620			
Peso Grupo	0,6333			
Pesos Globais				
	Custo	Tempo	Assistência	
Peso	0,4011	0,1650	0,0672	

Anexo I.4 – Cálculo dos pesos dos subcritérios ambientais

Ambientais	Energia	Resíduos	Água	Peso
Energia	1,0000	3,0000	5,0000	0,6333
Resíduos	0,3333	1,0000	3,0000	0,2605
Água	0,2000	0,3333	1,0000	0,1062
Soma colunas	1,5333	4,3333	9,0000	1,0000
Matriz Normalizada				
	Energia	Resíduos	Água	
Energia	0,6522	0,6923	0,5556	
Resíduos	0,2174	0,2308	0,3333	
Água	0,1304	0,0769	0,1111	
Pesos Locais				
	Energia	Resíduos	Água	
Peso	0,6333	0,2605	0,1062	
Soma Ponderada	1,9456	0,7901	0,3197	
λ_{max}	3,0720			
CI	0,0360			
RI	0,5800	para n=3		
CR	0,0620			
Peso Grupo	0,2605			
Pesos Globais				
	Energia	Resíduos	Água	
Peso	0,1650	0,0679	0,0277	

Anexo I.5 – Cálculo dos pesos locais das alternativas para o subcritério transportabilidade

Transportabilidade	Betão Leve	Aço Leve (LSF)	<i>Wood Frame</i>	Aço Estrutural	CLT / GLT	Peso local	Soma ponderada
Betão Leve	1,0000	0,4286	0,4286	3,0000	0,4286	0,1200	0,6000
Aço Leve (LSF)	2,3333	1,0000	1,0000	7,0000	1,0000	0,2800	1,4000
<i>Wood Frame</i>	2,3333	1,0000	1,0000	7,0000	1,0000	0,2800	1,4000
Aço Estrutural	0,3333	0,1429	0,1429	1,0000	0,1429	0,0400	0,2000
CLT / GLT	2,3333	1,0000	1,0000	7,0000	1,0000	0,2800	1,4000
Soma colunas	8,3333	3,5714	3,5714	25,0000	3,5714	1,0000	
Matriz normalizada							
Betão Leve	0,1200	0,1200	0,1200	0,1200	0,1200	λ_{max}	5,0000
Aço Leve (LSF)	0,2800	0,2800	0,2800	0,2800	0,2800	CI	0,0000
<i>Wood Frame</i>	0,2800	0,2800	0,2800	0,2800	0,2800	CR	0,0000
Aço Estrutural	0,0400	0,0400	0,0400	0,0400	0,0400		
CLT / GLT	0,2800	0,2800	0,2800	0,2800	0,2800		

Anexo I.6 – Cálculo dos pesos locais das alternativas para o subcritério conectividade

Conectividade	Betão Leve	Aço Leve (LSF)	<i>Wood Frame</i>	Aço Estrutural	CLT / GLT	Peso local	Soma ponderada
Betão Leve	1,0000	0,4286	1,0000	0,4286	1,0000	0,1304	0,6522
Aço Leve (LSF)	2,3333	1,0000	2,3333	1,0000	2,3333	0,3043	1,5217
<i>Wood Frame</i>	1,0000	0,4286	1,0000	0,4286	1,0000	0,1304	0,6522
Aço Estrutural	2,3333	1,0000	2,3333	1,0000	2,3333	0,3043	1,5217
CLT / GLT	1,0000	0,4286	1,0000	0,4286	1,0000	0,1304	0,6522
Soma colunas	7,6667	3,2857	7,6667	3,2857	7,6667	1,0000	
Matriz normalizada							
Betão Leve	0,1304	0,1304	0,1304	0,1304	0,1304	λ_{max}	5,0000
Aço Leve (LSF)	0,3043	0,3043	0,3043	0,3043	0,3043	CI	0,0000
<i>Wood Frame</i>	0,1304	0,1304	0,1304	0,1304	0,1304	CR	0,0000
Aço Estrutural	0,3043	0,3043	0,3043	0,3043	0,3043		
CLT / GLT	0,1304	0,1304	0,1304	0,1304	0,1304		

Anexo I.7 – Cálculo dos pesos locais das alternativas para o subcritério manutenção

Manutenção	Betão Leve	Aço Leve (LSF)	<i>Wood Frame</i>	Aço Estrutural	CLT / GLT	Peso local	Soma ponderada
Betão Leve	1,0000	1,0000	3,0000	1,0000	3,0000	0,2727	1,3636
Aço Leve (LSF)	1,0000	1,0000	3,0000	1,0000	3,0000	0,2727	1,3636
<i>Wood Frame</i>	0,3333	0,3333	1,0000	0,3333	1,0000	0,0909	0,4545
Aço Estrutural	1,0000	1,0000	3,0000	1,0000	3,0000	0,2727	1,3636
CLT / GLT	0,3333	0,3333	1,0000	0,3333	1,0000	0,0909	0,4545
Soma colunas	3,6667	3,6667	11,0000	3,6667	11,0000	1,0000	
Matriz normalizada							
Betão Leve	0,2727	0,2727	0,2727	0,2727	0,2727	$\lambda_{\max}$	5,0000
Aço Leve (LSF)	0,2727	0,2727	0,2727	0,2727	0,2727	CI	0,0000
<i>Wood Frame</i>	0,0909	0,0909	0,0909	0,0909	0,0909	CR	0,0000
Aço Estrutural	0,2727	0,2727	0,2727	0,2727	0,2727		
CLT / GLT	0,0909	0,0909	0,0909	0,0909	0,0909		

Anexo I.8 – Cálculo dos pesos locais das alternativas para o subcritério compatibilidade construtiva

Compatibilidade	Betão Leve	Aço Leve (LSF)	<i>Wood Frame</i>	Aço Estrutural	CLT / GLT	Peso local	Soma ponderada
Betão Leve	1,0000	1,0000	2,3333	1,0000	2,3333	0,2593	1,2963
Aço Leve (LSF)	1,0000	1,0000	2,3333	1,0000	2,3333	0,2593	1,2963
<i>Wood Frame</i>	0,4286	0,4286	1,0000	0,4286	1,0000	0,1111	0,5556
Aço Estrutural	1,0000	1,0000	2,3333	1,0000	2,3333	0,2593	1,2963
CLT / GLT	0,4286	0,4286	1,0000	0,4286	1,0000	0,1111	0,5556
Soma colunas	3,8571	3,8571	9,0000	3,8571	9,0000	1,0000	
Matriz normalizada							
Betão Leve	0,2593	0,2593	0,2593	0,2593	0,2593	$\lambda_{\max}$	5,0000
Aço Leve (LSF)	0,2593	0,2593	0,2593	0,2593	0,2593	CI	0,0000
<i>Wood Frame</i>	0,1111	0,1111	0,1111	0,1111	0,1111	CR	0,0000
Aço Estrutural	0,2593	0,2593	0,2593	0,2593	0,2593		
CLT / GLT	0,1111	0,1111	0,1111	0,1111	0,1111		

Anexo I.9 – Cálculo dos pesos locais das alternativas para o subcritério custo de produção

Custo de produção	Betão Leve	Aço Leve (LSF)	<i>Wood Frame</i>	Aço Estrutural	CLT / GLT	Peso local	Soma ponderada
Betão Leve	1,0000	0,3333	0,3333	1,0000	1,0000	0,1111	0,5556
Aço Leve (LSF)	3,0000	1,0000	1,0000	3,0000	3,0000	0,3333	1,6667
<i>Wood Frame</i>	3,0000	1,0000	1,0000	3,0000	3,0000	0,3333	1,6667
Aço Estrutural	1,0000	0,3333	0,3333	1,0000	1,0000	0,1111	0,5556
CLT / GLT	1,0000	0,3333	0,3333	1,0000	1,0000	0,1111	0,5556
Soma colunas	9,0000	3,0000	3,0000	9,0000	9,0000	1,0000	
Matriz normalizada							
Betão Leve	0,1111	0,1111	0,1111	0,1111	0,1111	$\lambda_{\max}$	5,0000
Aço Leve (LSF)	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	CI	0,0000
<i>Wood Frame</i>	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	CR	0,0000
Aço Estrutural	0,1111	0,1111	0,1111	0,1111	0,1111		
CLT / GLT	0,1111	0,1111	0,1111	0,1111	0,1111		

Anexo I.10 – Cálculo dos pesos locais das alternativas para o subcritério tempo de produção off-site

Tempo off-site	Betão Leve	Aço Leve (LSF)	<i>Wood Frame</i>	Aço Estrutural	CLT / GLT	Peso local	Soma ponderada
Betão Leve	1,0000	0,4286	0,4286	1,0000	0,4286	0,1111	0,5556
Aço Leve (LSF)	2,3333	1,0000	1,0000	2,3333	1,0000	0,2593	1,2963
<i>Wood Frame</i>	2,3333	1,0000	1,0000	2,3333	1,0000	0,2593	1,2963
Aço Estrutural	1,0000	0,4286	0,4286	1,0000	0,4286	0,1111	0,5556
CLT / GLT	2,3333	1,0000	1,0000	2,3333	1,0000	0,2593	1,2963
Soma colunas	9,0000	3,8571	3,8571	9,0000	3,8571	1,0000	
Matriz normalizada							
Betão Leve	0,1111	0,1111	0,1111	0,1111	0,1111	$\lambda_{\max}$	5,0000
Aço Leve (LSF)	0,2593	0,2593	0,2593	0,2593	0,2593	CI	0,0000
<i>Wood Frame</i>	0,2593	0,2593	0,2593	0,2593	0,2593	CR	0,0000
Aço Estrutural	0,1111	0,1111	0,1111	0,1111	0,1111		
CLT / GLT	0,2593	0,2593	0,2593	0,2593	0,2593		

Anexo I.11 – Cálculo dos pesos locais das alternativas para o subcritério assistência técnica

Assistência técnica	Betão Leve	Aço Leve (LSF)	Wood Frame	Aço Estrutural	CLT / GLT	Peso local	Soma ponderada
Betão Leve	1,0000	0,4286	1,0000	0,4286	1,0000	0,1304	0,6522
Aço Leve (LSF)	2,3333	1,0000	2,3333	1,0000	2,3333	0,3043	1,5217
Wood Frame	1,0000	0,4286	1,0000	0,4286	1,0000	0,1304	0,6522
Aço Estrutural	2,3333	1,0000	2,3333	1,0000	2,3333	0,3043	1,5217
CLT / GLT	1,0000	0,4286	1,0000	0,4286	1,0000	0,1304	0,6522
Soma colunas	7,6667	3,2857	7,6667	3,2857	7,6667	1,0000	
Matriz normalizada							
Betão Leve	0,1304	0,1304	0,1304	0,1304	0,1304	$\lambda_{\max}$	5,0000
Aço Leve (LSF)	0,3043	0,3043	0,3043	0,3043	0,3043	CI	0,0000
Wood Frame	0,1304	0,1304	0,1304	0,1304	0,1304	CR	0,0000
Aço Estrutural	0,3043	0,3043	0,3043	0,3043	0,3043		
CLT / GLT	0,1304	0,1304	0,1304	0,1304	0,1304		

Anexo I.12 – Cálculo dos pesos locais das alternativas para o subcritério consumo de energia

Consumo de energia	Betão Leve	Aço Leve (LSF)	Wood Frame	Aço Estrutural	CLT / GLT	Peso local	Soma ponderada
Betão Leve	1,0000	1,0000	0,1429	3,0000	0,1429	0,0612	0,3061
Aço Leve (LSF)	1,0000	1,0000	0,1429	3,0000	0,1429	0,0612	0,3061
Wood Frame	7,0000	7,0000	1,0000	21,0000	1,0000	0,4286	2,1429
Aço Estrutural	0,3333	0,3333	0,0476	1,0000	0,0476	0,0204	0,1020
CLT / GLT	7,0000	7,0000	1,0000	21,0000	1,0000	0,4286	2,1429
Soma colunas	16,3333	16,3333	2,3333	49,0000	2,3333	1,0000	
Matriz normalizada							
Betão Leve	0,0612	0,0612	0,0612	0,0612	0,0612	$\lambda_{\max}$	5,0000
Aço Leve (LSF)	0,0612	0,0612	0,0612	0,0612	0,0612	CI	0,0000
Wood Frame	0,4286	0,4286	0,4286	0,4286	0,4286	CR	0,0000
Aço Estrutural	0,0204	0,0204	0,0204	0,0204	0,0204		
CLT / GLT	0,4286	0,4286	0,4286	0,4286	0,4286		

Anexo I.13 – Cálculo dos pesos locais das alternativas para o subcritério consumo de água

Consumo de água	Betão Leve	Aço Leve (LSF)	<i>Wood Frame</i>	Aço Estrutural	CLT / GLT	Peso local	Soma ponderada
Betão Leve	1,00	0,33	0,14	1,00	0,14	0,05	0,26
Aço Leve (LSF)	3,00	1,00	0,43	3,00	0,43	0,16	0,79
<i>Wood Frame</i>	7,00	2,33	1,00	7,00	1,00	0,37	1,84
Aço Estrutural	1,00	0,33	0,14	1,00	0,14	0,05	0,26
CLT / GLT	7,00	2,33	1,00	7,00	1,00	0,37	1,84
Soma colunas	19,00	6,33	2,71	19,00	2,71	1,00	
Matriz normalizada							
Betão Leve	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	$\lambda_{\max}$	5,00
Aço Leve (LSF)	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	CI	0,00
<i>Wood Frame</i>	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	CR	0,00
Aço Estrutural	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05		
CLT / GLT	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37		

Anexo I.14 – Cálculo dos pesos locais das alternativas para o subcritério geração de resíduos

Geração de resíduos	Betão Leve	Aço Leve (LSF)	<i>Wood Frame</i>	Aço Estrutural	CLT / GLT	Peso local	Soma ponderada
Betão Leve	1,0000	0,3333	0,1429	1,0000	0,1429	0,0526	0,2632
Aço Leve (LSF)	3,0000	1,0000	0,4286	3,0000	0,4286	0,1579	0,7895
<i>Wood Frame</i>	7,0000	2,3333	1,0000	7,0000	1,0000	0,3684	1,8421
Aço Estrutural	1,0000	0,3333	0,1429	1,0000	0,1429	0,0526	0,2632
CLT / GLT	7,0000	2,3333	1,0000	7,0000	1,0000	0,3684	1,8421
Soma colunas	19,0000	6,3333	2,7143	19,0000	2,7143	1,0000	
Matriz normalizada							
Betão Leve	0,0526	0,0526	0,0526	0,0526	0,0526	$\lambda_{\max}$	5,0000
Aço Leve (LSF)	0,1579	0,1579	0,1579	0,1579	0,1579	CI	0,0000
<i>Wood Frame</i>	0,3684	0,3684	0,3684	0,3684	0,3684	CR	0,0000
Aço Estrutural	0,0526	0,0526	0,0526	0,0526	0,0526		
CLT / GLT	0,3684	0,3684	0,3684	0,3684	0,3684		

Anexo I.15 – Cálculo dos pesos globais e ranking final das alternativas

Sistemas	Transportabilidade	Conectividade	Manutenção	Compatibilidade	Custo	Tempo	Assistência	Energia	Agua	Resíduos
Concreto leve	0,1200	0,1304	0,2727	0,2593	0,1111	0,1111	0,1304	0,0612	0,0526	0,0526
Aço leve (LSF)	0,2800	0,3043	0,2727	0,2593	0,3333	0,2593	0,3043	0,0612	0,1579	0,1579
Wood frame	0,2800	0,1304	0,0909	0,1111	0,3333	0,2593	0,1304	0,4286	0,3684	0,3684
Aço estrutural	0,0400	0,3043	0,2727	0,2593	0,1111	0,1111	0,3043	0,0204	0,0526	0,0526
CLT / GLT	0,2800	0,1304	0,0909	0,1111	0,1111	0,2593	0,1304	0,4286	0,3684	0,3684
Critério	Transportabilidade	Conectividade	Manutenção	Compatibilidade	Custo	Tempo	Assistência	Energia	Agua	Resíduos
Peso	0,0267	0,0103	0,0103	0,0589	0,4011	0,1650	0,0672	0,1650	0,0277	0,0679
Sistema	Peso Global			Sistema	Peso Global					
Concreto leve	0,1094			Wood frame	0,3074					
Aço leve (LSF)	0,2508			Aço leve (LSF)	0,2508					
Wood frame	0,3074			CLT / GLT	0,2183					
Aço estrutural	0,1140			Aço estrutural	0,1140					
CLT / GLT	0,2183			Concreto leve	0,1094					
Soma	1,0000									