

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL ARQUITETURA E URBANISMO

ENZO DA ROCHA PAES ALVES BARRETO

**ASPECTOS LOGÍSTICOS ENVOLVIDOS NA ADOÇÃO DE
SISTEMAS CONSTRUTIVOS INDUSTRIALIZADOS**

CAMPINAS

2024

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO

ENZO DA ROCHA PAES ALVES BARRETO

**ASPECTOS LOGÍSTICOS ENVOLVIDOS NA ADOÇÃO DE
SISTEMAS CONSTRUTIVOS INDUSTRIALIZADOS**

Trabalho Final de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de **Bacharel em Engenharia Civil** à Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas.

Orientador: Prof. Dr. Flávio Augusto Picchi

CAMPINAS

2024

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Elizângela Aparecida dos Santos Souza - CRB 8/8098

B275a Barreto, Enzo da Rocha Paes Alves, 1999-
Aspectos logísticos envolvidos na adoção de sistemas construtivos industrializados / Enzo da Rocha Paes Alves Barreto. – Campinas, SP : [s.n.], 2024.

Orientador: Flávio Augusto Picchi.
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Sistemas construtivos. 2. Construção industrializada. 3. Logística. 4. Construção modular. 5. Indústria da construção civil. I. Picchi, Flávio Augusto, 1957-. II. Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Informações complementares

Título em outro idioma: Logistical aspects associated with the adoption of industrialized building systems

Palavras-chave em inglês:

Building systems

Industrialized construction

Logistics

Modular construction

Construction industry

Titulação: Bacharel em Engenharia Civil

Banca examinadora:

Flávio Augusto Picchi [Orientador]

Elisa Atália Daniel Muianga

Lívia de Faria Lopes

Data de entrega do trabalho definitivo: 21-11-2024

Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)

ODS: 9. Inovação e infraestrutura

ODS: 11. Cidades e comunidades sustentáveis

ASPECTOS LOGÍSTICOS ENVOLVIDOS NA ADOÇÃO DE SISTEMAS CONSTRUTIVOS INDUSTRIALIZADOS

ENZO DA ROCHA PAES ALVES BARRETO

BANCA EXAMINADORA

.....
Prof. Dr. Flávio Augusto Picchi

Orientador

.....
Profa. Dra. Elisa Atália Daniel Muianga

.....
MEng. Lívia de Faria Lopes

Aprovado em: 21 de novembro de 2024

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho à minha mãe, Ana Cristina, e ao meu pai, José, que sempre se esforçam para me proporcionar uma educação de qualidade e me deram todo o suporte necessário para que eu pudesse chegar até aqui hoje.

Também dedico este trabalho aos meus avôs, José (in memoriam) e Rui (in memoriam), ambos engenheiros civis e que me inspiraram a seguir esta carreira.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, por todo carinho, amor, educação e valores que me deram ao longo da minha vida, sempre se fazendo presentes, mesmo quando estive do outro lado do mundo.

À minha querida irmã, Isabella, que esteve ao meu lado em todos os momentos, desde antes mesmo nascermos.

Aos meus familiares, pelo apoio constante durante toda a minha vida e formação, por quem tenho profundo carinho e gratidão.

Aos amigos que fiz ao longo dessa trajetória — desde o ensino fundamental, médio, a faculdade e o intercâmbio —, por me ajudarem a enfrentar desafios e me proporcionarem momentos inesquecíveis de leveza e descontração.

À Universidade Estadual de Campinas e a École Centrale Lyon, assim como os seus corpos docentes e de funcionários, que me proporcionaram uma formação acadêmica de excelência.

Em especial, ao professor Picchi por suas orientações, paciência, incentivos no desenvolvimento deste projeto.

A todos vocês, meu muito obrigado, pois sem cada um de vocês nada disso seria possível!

RESUMO

A crescente adoção de sistemas construtivos industrializados nas últimas décadas tem sido motivada pelos benefícios notáveis em termos de produtividade e sustentabilidade que esses sistemas proporcionam. No entanto, essa transição não é isenta de desafios complexos, os quais demandam uma abordagem diferenciada em relação à construção convencional, incluindo aspectos como projeto, treinamento, gestão de fornecedores e, notadamente, logística, sendo este último um ponto crítico que carece de estudos na literatura. Diante desse cenário, o objetivo deste trabalho consiste em analisar quais são aspectos logísticos associados à adoção de sistemas construtivos industrializados, visando compreender suas implicações, principais desafios e diretrizes para uma implementação eficaz de tais sistemas. A metodologia adotada consistiu em uma revisão sistemática detalhada da literatura, abordando os diversos aspectos mencionados. Em uma amostra de 37 artigos selecionados, foram avaliados 11 aspectos logísticos relevantes para a adoção desses sistemas, seguidos de uma análise detalhada de cada um deles para identificar tendências e lacunas. Os resultados indicam que a adoção de sistemas construtivos industrializados exige uma gestão logística estratégica, que incorpora ferramentas como BIM, Digital Twin, IoT, IA, métodos de otimização estocástica e práticas de Lean Management, como o Just-in-Time, entre outras. Essas soluções visam otimizar processos, reduzir custos e promover a sustentabilidade no setor da construção. Dessa forma, o estudo oferece percepções valiosas sobre as práticas atuais, os obstáculos enfrentados e as estratégias bem-sucedidas, contribuindo para uma compreensão mais ampla e uma orientação futura na adoção de sistemas construtivos industrializados.

Palavras-chave: Sistemas construtivos industrializados. Logística. Construção modular. Construção pré-fabricada. Construção off-site.

ABSTRACT

The increase in the adoption of industrialized construction systems in recent decades has been driven by its notable benefits in terms of productivity and sustainability. However, this transition is not without its complex challenges, which require a distinct approach in relation to conventional construction, including aspects such as project development, training, supplier management and, notably, logistics, which is a critical point that lacks studies in the literature. In this context, the aim of this study is to analyze the logistical aspects associated with the adoption of industrialized building systems, with the aim of understanding their implications, the main challenges and proposing guidelines for effective implementation of those systems. The methodology adopted consisted of a detailed systematic literature review, addressing the various aspects mentioned. In a sample of 37 selected articles, 11 relevant logistical aspects for the adoption of these systems were identified and analyzed in depth to highlight trends and gaps. The results indicate that the adoption of industrialized construction systems requires strategic logistics management, incorporating tools such as BIM, Digital Twin, IoT, AI, stochastic optimization methods, and Lean Management practices like, Just-in-Time, etc. These solutions aim to optimize processes, reduce costs, and promote sustainability in the construction sector. Thus, the study provides valuable insights into current practices, encountered challenges, and successful strategies, contributing to a broader understanding and future guidance in adopting industrialized construction systems.

Palavras-chave: Industrialized building systems. Logistics. Modular construction. Prefabricated construction. Off-site construction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Palheta dos sistemas construtivos industrializados	18
Figura 2.2: Cadeia de suprimentos	22
Figura 3.1: Fluxograma das etapas de pesquisa	31
Figura 4.1: Número de artigos selecionados ao final de cada etapa de busca	33
Figura 4.2: Número de artigos publicados por ano	34
Figura 4.3: Número de artigos publicados por País dos autores	35
Figura 4.4: Distribuição geográfica das origens dos autores	35
Figura 4.5: Número de artigos publicados por veículo de publicação.....	36
Figura 4.6: Número de Artigos publicados por Autor	37
Figura 4.7: Gráfico da distribuição dos artigos por aspecto logístico analisado	43

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1: Classificação dos tipos de sistemas construtivos industrializados	19
Quadro 3.1: Etapas de busca RSL	30
Quadro 4.1: Aspectos estudados por artigo na RSL.....	40
Quadro 4.2: Exemplo de distribuição de elementos.....	45
Quadro 4.3: Resumo da Análise da RSL	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1: Matriz de correlação entre os aspectos do exemplo do Quadro 4.2	46
Tabela 4.2: Matriz de Correlação entre os aspectos estudados na RSL.....	47

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. Justificativa	13
1.2. Objetivos	14
1.2.1. Objetivo Geral	14
1.2.2. Objetivos Específicos	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1. Sistemas Construtivos Industrializados	15
2.2. Logística	20
2.3. Logística na Construção	22
2.3.1. Cadeia de logística na construção civil	22
2.3.2. Cadeia de logística no canteiro: logística interna	24
2.3.3. Principais desafios e oportunidades de melhorias da logística na construção	26
3. METODOLOGIA	28
3.1. Estratégia de Pesquisa	28
3.2. Revisão Sistemática da Literatura	29
3.3. Etapas de Pesquisa	31
4. RSL: Aspectos logísticos na construção industrializada	32
4.1. Resultados da Busca	32
4.2. Análise Bibliométrica	33
4.2.1. Ano de publicação.....	34
4.2.2. Publicações por País de origem dos autores	34
4.2.3. Publicações por Veículo de Publicação	36
4.2.4. Publicações por autor.....	36
4.3. Análise da RSL: Estudo dos aspectos logísticos nos artigos selecionados	38
4.3.1. Identificação dos aspectos estudados por artigo	40
4.3.2. Análise geral dos resultados obtidos pela RSL	43
4.3.2.1. Número de Artigos por aspecto	43

4.3.2.2. Correlação entre os aspectos.....	44
4.3.3. Análise por aspecto.....	49
4.3.3.1. Manuseio dos Módulos (Log1)	49
4.3.3.2. Transporte Flexível (Log2).....	51
4.3.3.3. Atrasos Logísticos (Log3).....	54
4.3.3.4. Rota de Transporte Otimizada (Log4)	57
4.3.3.5. Controle de Inventário (Log5).....	59
4.3.3.6. Custo Logístico (Log6).....	62
4.3.3.7. Tempo de Ciclo (Log7)	65
4.3.3.8. Localização e Proximidade das Instalações Logísticas (Log8).	68
4.3.3.9. Regulamentações de Transporte (Log9)	70
4.3.3.10. Padronização das Atividades Logísticas (Log10)	71
4.3.3.11. Transporte Verde (Log11)	74
4.3.4. Resumo sobre a análise da RSL.....	77
5. CONCLUSÃO	82
REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	84

1. INTRODUÇÃO

A industrialização da construção no Brasil teve início nos anos 1960, com a utilização de sistemas de pré-fabricação e o desenvolvimento de equipamentos para montagem desses elementos na construção de edificações. Esses avanços exigiram uma mão de obra cada vez mais especializada e uma gestão aprimorada dos processos, aumentando a importância do planejamento e das inovações tecnológicas para alcançar maior produtividade e qualidade na execução dos serviços (PIMENTA, 2022).

Contudo, a construção civil no Brasil ainda enfrenta desafios relacionados à produtividade e à qualificação da mão de obra, uma vez que predominam processos artesanais e excessivamente manuais, impactando a eficiência e os prazos dos projetos. Recentemente, no entanto, diversas iniciativas têm sido adotadas para reverter esse cenário, com a industrialização dos processos construtivos. Este processo inclui a utilização de materiais pré-fabricados e métodos ágeis de montagem como o pré-moldado de concreto, o steel frame e modulações, que reduzem a geração de resíduos e melhoram a eficiência do canteiro de obras (SANTANA; HASHIZUME; OLIVIERI, 2024).

Os sistemas construtivos industrializados apresentam diversas vantagens, como a redução dos prazos de construção, diminuição da necessidade de mão de obra no canteiro, aumento da qualidade do produto final, e maior eficiência no uso de recursos. Entretanto, a adoção desses sistemas também exige planejamento antecipado, maior capacidade de carga nos canteiros, e pode resultar em custos iniciais mais elevados (SANTANA; HASHIZUME; OLIVIERI, 2024).

Programas habitacionais como o PMCMV e o Programa Casa Verde Amarela têm impulsionado a adoção de sistemas construtivos industrializados pelas construtoras brasileiras, buscando construir habitações de baixo custo, rápida execução e alto desempenho (CRUZ et al., 2016 apud PIMENTA, 2022). A literatura indica que esses sistemas contribuem para uma menor variabilidade nos processos, maior previsibilidade do fluxo de trabalho e menor incerteza logística, resultando em maior produtividade e menor variação nos prazos de execução (CRUZ; SANTOS; MENDES, 2018 apud PIMENTA, 2022).

Apesar das vantagens, a implementação de sistemas industrializados enfrenta barreiras significativas, como a falta de conhecimento tecnológico, limitações na cadeia produtiva, questões culturais e a ausência de modelos de negócio viáveis. Além disso, a logística e o transporte dos componentes pré-fabricados até os canteiros de obra podem ser desafiadores, exigindo um planejamento detalhado e uma logística eficiente (OLIVEIRA, 2019).

A logística desempenha um papel crucial na eficiência da construção de maneira geral. Estudos indicam que a indústria da construção está atrasada em termos de práticas logísticas, com custos logísticos representando uma parcela significativa dos custos totais. Em muitas cadeias de suprimentos de materiais de construção, os custos logísticos ultrapassam 10% do preço de compra, podendo chegar a mais de 60% em alguns casos. Melhorias na eficiência logística podem reduzir significativamente os custos totais, destacando a importância de uma gestão logística eficaz (SUNDQUIST; GADDE; HULTHÉN, 2018).

Para alcançar os benefícios da construção industrializada, é essencial considerar o uso de elementos pré-fabricados desde o início do projeto, contratando profissionais capacitados e planejando cuidadosamente desde a fabricação dos componentes até sua montagem no canteiro (BLISMAS; PASQUIRE; GIBB, 2006 apud OLIVEIRA, 2019). A Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI, 2015 apud OLIVEIRA, 2019) enfatiza a necessidade de uma organização diferenciada do processo de produção, com integração e antecipação das decisões, além de um planejamento e monitoramento detalhados.

Além disso a literatura aponta que existe uma lacuna quanto a compreensão de quais decisões logísticas e construtivas, na adoção de sistemas construtivos industrializados, podem impactar indicadores chave de desempenho (KPIs), como duração de projeto, custo, desperdício de material e emissão de gases poluentes (HUSSEIN et al., 2022).

1.1. Justificativa

Diante do exposto acima, nota-se que é crucial aprofundar o entendimento dos aspectos logísticos envolvidos na adoção de sistemas construtivos industrializados, uma vez que a eficiência logística é fundamental para maximizar os benefícios desses

sistemas, melhorar a previsibilidade do fluxo de trabalho, reduzir custos e superar os desafios existentes.

1.2. Objetivos

Para a definição dos objetivos desse trabalho e com o intuito de responder a lacuna identificada elaborou-se a seguinte questão de pesquisa: “Quais são os fatores logísticos que interferem no uso de um sistema construtivo industrializado?”

1.2.1. Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho consiste, portanto, em analisar quais são aspectos logísticos associados à adoção de sistemas construtivos industrializados, visando compreender suas implicações, principais desafios e diretrizes para uma implementação eficaz.

1.2.2. Objetivos Específicos

De forma a atingir os objetivos gerais foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- i. Identificar na literatura os principais fatores logísticos que interferem na adoção de sistemas logísticos industrializados.
- ii. Identificar quais são os principais conceitos logísticos que podem ser aplicados para favorecer a adoção de tais sistemas.
- iii. Identificar quais são as ferramentas que podem ser aplicadas para otimização de tais aspectos.
- iv. Entender como os diferentes aspectos logísticos se relacionam nesse contexto.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Sistemas Construtivos Industrializados

A utilização de Sistemas Construtivos Industrializados é uma das maneiras de acelerar a construção de habitações acessíveis, frequentemente associada à construção sustentável, pois esses sistemas construtivos tem como característica considerar o impacto ambiental de um edifício ao longo de toda a sua vida útil, otimizando sua viabilidade econômica e o conforto e segurança de seus ocupantes (SAGGAFF, 2017).

Contudo, para compreender de fato os sistemas construtivos industrializados, é essencial primeiro entender o que são sistemas construtivos. Um sistema construtivo é definido como um conjunto de elementos interconectados que se juntam para permitir o desempenho designado de um edifício. Em um sentido mais amplo, pode incluir diversos procedimentos gerenciais e tecnológicos para a produção e instalação desses elementos (KAMAR et al., 2011).

Agora, os sistemas construtivos industrializados possuem diversas definições na literatura. De maneira geral, eles são definidos como um método de construção onde os componentes são fabricados em uma fábrica, seja no local da obra ou fora dele, e montados na estrutura com mínimo trabalho adicional no local. Eles representam a integração total de subsistemas e componentes utilizando técnicas industrializadas de produção, transporte e montagem, resultando em um processo de construção altamente eficiente, planejado e controlado (SAGGAFF, 2017).

Então, um sistema construtivo pode ser descrito como um conjunto de componentes e regras coordenadas, onde todos os detalhes são planejados antes do início da construção. Esses componentes padronizados são projetados para serem reutilizados de diversas maneiras em muitos edifícios, permitindo tanto uma produção em grande escala quanto a possibilidade de diversidade e personalização. Em um sistema de construção industrializado, os detalhes já são testados e não precisam ser reinventados para cada novo projeto, ao contrário do que acontece com a abordagem tradicional (RICHARD, 2017).

Vários termos são usados para descrever a construção industrializada e a pré-fabricação, incluindo Pré-montagem (pre-assembly), Pré-fabricação (prefabrication),

Método Moderno de Construção (Modern Method of Construction), Fabricação Off-site (Offsite Manufacturing), Produção Off-site (Offsite Production) e Construção Off-site (Offsite Construction). O termo sistema construtivo industrializado é frequentemente usado de forma intercambiável com outros termos como construção fora do canteiro (Offsite Construction), pré-fabricação (prefabrication), fabricação fora do canteiro (Offsite Manufacturing), edificação industrializada e construção industrializada (KAMAR et al., 2011).

Um outro conceito relacionado é a modularização e a construção modular. A modularização e a industrialização na construção têm sido exploradas, adotando-se alguns dos termos supracitados, o que causa uma certa confusão. De modo geral, a modularização refere-se à arquitetura de produto modular, que designa funções específicas a componentes físicos, abrangendo várias estratégias para utilizar subcomponentes e elementos volumétricos e não volumétricos na construção de edifícios customizados em massa. Este conceito não se limita à arquitetura dos produtos, mas também envolve os processos organizacionais para seu design e produção (PELTOKORPI et al., 2018).

Diante disso será adotado para esse trabalho a definição fornecida pela Aliança Construção Modular para sistemas construtivos industrializados, como sendo um sistema “produzido predominantemente em ambiente industrial e composto por um conjunto de componentes produzidos industrialmente, integrados por regras coordenadas na qual os mesmos detalhes são aplicáveis a uma variedade de edificações em diferentes locais, conferindo ganho de escala e simplificação na produção de seus componentes, transferidos para canteiro de obras para processos de montagem” (BARKOKEBAS et al., 2022).

Pode-se classificar os sistemas de produção em quatro categorias principais, conforme o grau de padronização do produto e produção off-site (PELTOKORPI et al., 2018):

- Edifícios Modulares: Unidades volumétricas pré-montadas que, sozinhas ou conectadas umas às outras, formam o edifício real (por exemplo, casas, blocos de prisão, motéis), representando o maior grau de produção fora do local e padronização.

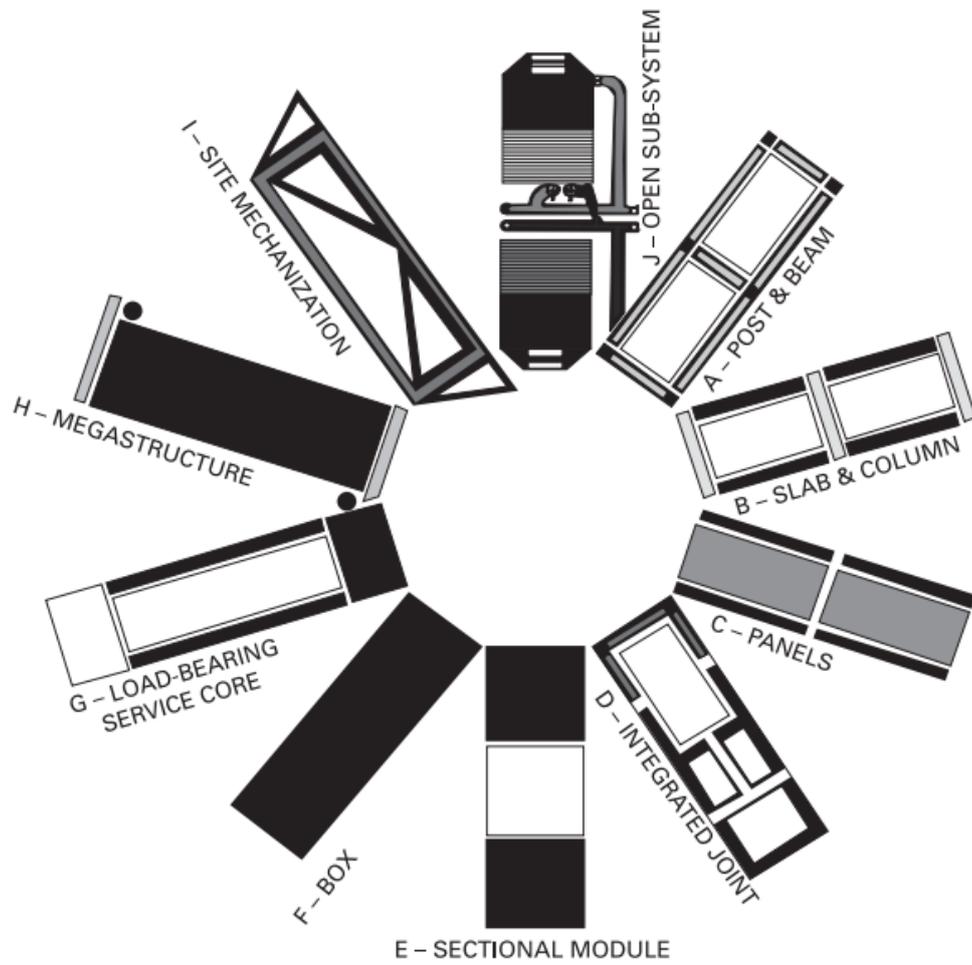
- Pré-montagem Volumétrica: Volumes de partes específicas do edifício produzidos fora do canteiro de obra e montados no local dentro de uma estrutura independente (por exemplo, sistemas sanitários, módulos de banheiro).
- Pré-montagem Não Volumétrica: Unidades pré-montadas que não criam espaço utilizável (por exemplo, geradores de calor, estruturas, painéis de parede).
- Fabricação de Componentes e Submontagem: Abordagem tradicional na construção, utilizando materiais brutos e componentes, como tijolos e argamassa, indicando alto grau de customização e o menor grau de produção fora do local.

Sob outro viés, pode-se classificar os sistemas construtivos industrializados em outras quatro categorias, compostas por 10 tipos de sistemas construtivos (RICHARD, 2017):

- **Kit de peças com trabalho intensivo no canteiro:** o canteiro se torna a linha de montagem final, incluindo: poste e viga ("A"), laje e coluna ("B"), painéis ("C"), junta integrada ("D")
- **Módulo 3D fabricado na fábrica:** o edifício é composto de módulos 3D completamente acabados na fábrica, incluindo: módulo seccional ("E"), caixa ("F");
- **Híbrido:** compartilhamento ideal do trabalho entre a fábrica e o local da obra, incluindo: núcleo de serviço de suporte de carga ("G"), megaestrutura ("H"), mecanização do local ("I");
- **Subsistema aberto:** como alguns sistemas não fornecem todos os subsistemas, a gama de subsistemas complementares e compatíveis pode ser considerada como um décimo tipo ("J").

A **Figura 2.1** e o **Quadro 2.1** a seguir fornecem uma descrição e detalhe sobre essa classificação proposta por Richard (2017):

Figura 2.1: Palheta dos sistemas construtivos industrializados



Fonte: Richard (2017).

Quadro 2.1: Classificação dos tipos de sistemas construtivos industrializados

I - Componentes do Kit Intensivo no Local	Descrição	Subdivisões
 <p>A - Pilares e Vigas</p>	Estrutura que exige preenchimento horizontal e vertical.	Segmentos, Postes contínuos, Vigas contínuas.
 <p>B - Lajes e Colunas</p>	Simplificação por meio da introdução de um único elemento horizontal.	Laje sólida, Laje nervurada, Laje com vigas.
 <p>C - Painéis</p>	Componentes planos portantes que distribuem cargas e oferecem isolamento acústico.	Leves, Concreto reforçado ou protendido.
 <p>D - Junta Integrada</p>	Componente monolítico para simplificar conexões ao deslocar juntas fora de pontos geométricos.	Ponto a ponto, Esqueleto, Plano.
II - Módulos 3D Fabricados em Fábrica	Descrição	Subdivisões
 <p>E - Módulo Seccional</p>	Módulos pequenos e fáceis de transportar, mas incompletos, exigem complementação no local.	Por adição, Tabuleiro, Por compactação.
 <p>F - Caixa</p>	Unidade autônoma completamente fabricada na planta.	Enquadrada, Painelizada, Monolítica.
III - Híbrido	Descrição	Subdivisões
 <p>G - Núcleo de Serviço Portante</p>	Área “de serviço” fabricada com capacidade estrutural para suportar lajes e painéis envolventes.	Ponto a ponto, Linear.
 <p>H - Megestrutura</p>	Estrutura para empilhar módulos e atingir alturas elevadas.	Um a quatro andares.
 <p>I - Mecanização no Local</p>	Leva a fábrica ao local de construção, como em formas móveis, fábrica móvel, e permanentes.	Fábrica in situ, Deslizantes.

Fonte: Adaptado de Richard (2017).

2.2. Logística

A logística, como campo de estudo e prática, tem evoluído significativamente ao longo das décadas, adaptando-se às mudanças nas demandas econômicas, tecnológicas e sociais. Sua definição tem sido objeto de análise por diversos estudiosos e organizações, resultando em uma variedade de interpretações e enfoques.

De acordo com Bussinger (2008 apud ALVES; SANTOS, 2013), a logística tem suas raízes nas operações militares antigas, onde era essencial para o planejamento e execução das guerras, que devido a suas longas durações e distância aos centros populacionais, exigiam um deslocamento de grandes volumes de recursos. Diante disso, Bussinger (2008 apud ALVES; SANTOS, 2013) definiu logística como sendo responsável por tratar do “planejamento, organização, controle e realização de outras tarefas associadas à armazenagem, transporte e distribuição de bens e serviços.”

A definição fornecida por Ballou (1993) expande este conceito ao contexto empresarial, descrevendo a logística como o processo de planejamento, implementação e controle do fluxo e armazenagem eficiente e eficaz de bens, serviços e informações relacionadas desde o ponto de origem até o ponto de consumo, com o objetivo de atender aos requisitos dos clientes. Esta definição destaca a logística como uma função estratégica que visa otimizar os processos internos e externos das organizações de forma integrada.

Lambert et al. (1998 apud CRUZ, 2002) discutem a evolução terminológica da logística, que já foi conhecida por vários nomes, tais como distribuição física, engenharia de distribuição, distribuição logística, gerenciamento de materiais, entre outros. Embora estas terminologias variassem, todas se referiam ao fluxo de entrega de bens do ponto de origem ao ponto de consumo, aplicadas a diferentes contextos.

Mais recentemente, com o intuito de padronizar a definição do conceito de logística, o Council of Supply Chain Management Professionals (CSCMP, 2013) definiu logística como o processo de planejar, implementar e controlar procedimentos para o transporte e armazenamento eficiente e eficaz de bens, incluindo serviços e informações relacionadas, desde o ponto de origem até o ponto de consumo, com o

objetivo de atender aos requisitos do cliente. Esta definição abrange movimentos de entrada, saída, internos e externos.

Por outro lado, a gestão da logística, também definida pelo CSCMP (2013), é a parte da gestão da cadeia de suprimentos que planeja, implementa e controla o fluxo e armazenamento eficiente e eficaz de bens, serviços e informações relacionadas, entre o ponto de origem e o ponto de consumo, para atender aos requisitos dos clientes. As atividades de gestão da logística incluem tipicamente a gestão do transporte de entrada e saída, gestão de frotas, armazenagem, manuseio de materiais, atendimento de pedidos, design da rede logística, gestão de inventário, planejamento da demanda e oferta, e gestão de prestadores de serviços logísticos terceirizados. Em diferentes graus, a função logística também engloba aquisição e compras, planejamento e programação da produção, embalagem e montagem, e atendimento ao cliente. Está envolvida em todos os níveis de planejamento e execução – estratégico, operacional e tático. A gestão da logística é uma função integradora que coordena e otimiza todas as atividades logísticas, além de integrar estas atividades com outras funções, incluindo marketing, vendas, manufatura, finanças e tecnologia da informação.

Essas definições fornecidas pelo CSCMP ressaltam que, enquanto a logística envolve as operações básicas de movimentação e armazenamento, a gestão da logística amplia esse escopo ao incluir atividades de planejamento estratégico e integração com outras áreas funcionais da empresa, visando a otimização global dos processos logísticos.

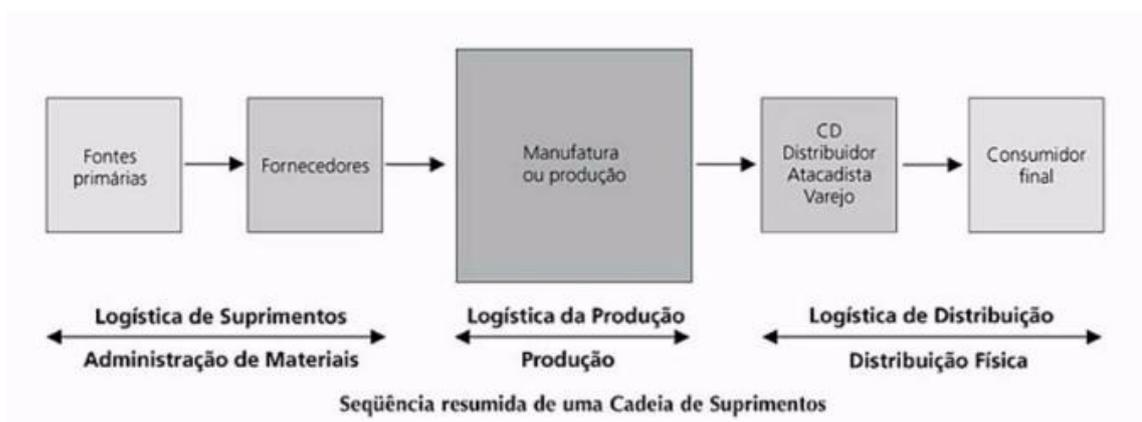
Em resumo, a literatura sobre a definição de logística revela uma disciplina dinâmica e em constante evolução, com enfoques que variam desde a gestão eficiente de fluxos de materiais e informações até a integração estratégica dentro da cadeia de suprimentos. As definições convergem na ideia de que a logística é fundamental para a otimização dos processos organizacionais e para a criação de valor tanto para as empresas quanto para os clientes.

2.3. Logística na Construção

2.3.1. Cadeia de logística na construção civil

De modo geral uma cadeia de logística pode ser dividida em três áreas: suprimentos ou fornecedor, manufatura ou produção e distribuição física ou distribuição (VIEIRA, 2006; MARINS, 2019). Como mostrado na **Figura 2.2** abaixo:

Figura 2.2: Cadeia de suprimentos



Fonte: Vieira (2006).

De acordo com Cruz (2002) e Marins (2019), a cadeia logística na indústria da construção civil, especialmente no setor de edificações, pode ser entendida como um sistema complexo com aspectos que a distinguem dos modelos tradicionais de outras indústrias. Esses aspectos se manifestam em todas as três áreas citadas anteriormente, assim como no transporte, responsável por fazer a conexão entre elas.

Suprimentos

A área de suprimentos é responsável por gerenciar todo o processo relacionado à aquisição de matéria prima e componentes de fornecedores externos, dando início ao ciclo da cadeia de logística (VIEIRA, 2006). Nela as empresas de construção civil mantêm relações com um vasto número de fornecedores. Essa multiplicidade de relações frequentemente resulta em conflitos, acentuados pela falta de definição clara do nível de serviço logístico desejado pelas empresas construtoras (CRUZ, 2002). Esta indefinição dificulta a padronização dos processos e a implementação de práticas logísticas eficientes.

Produção

A área da produção se caracteriza pela administração do fluxo de materiais e serviços dentro do ambiente produtivo, com atividades relacionadas ao planejamento, programação e apoio às operações de produção (VIEIRA, 2006). Na construção civil ela possui características distintas da indústria em geral. O longo tempo de produção, a natureza temporária e improvisada dos canteiros de obras, o baixo investimento em equipamentos de produção e transporte interno de materiais, além da exposição às intempéries, são aspectos que influenciam negativamente a eficiência logística no setor (CRUZ, 2002). Essas condições desafiadoras exigem soluções logísticas adaptáveis e resilientes para garantir o fluxo contínuo de materiais e recursos.

Distribuição Física

A área da distribuição física é responsável por administrar a demanda do cliente com os canais de distribuição logística (VIEIRA, 2006). Ao contrário de outras indústrias, a construção civil não apresenta a distribuição física tradicional de produtos, uma vez que as edificações, como produto final, não são distribuídas e possuem um local fixo (CRUZ, 2002; VIEIRA, 2006). Em vez disso, devido à essa natureza posicional da produção, os clientes são atraídos até os produtos por meio de campanhas publicitárias, exposição durante a construção ou procura direta (CRUZ, 2002). Nesse contexto, o fluxo de informações entre cliente, empresa de construção e fornecedores torna-se crucial, devendo ser o ponto de partida de toda a cadeia logística, com foco na satisfação das necessidades dos clientes (CRUZ, 2002).

Fluxo de Materiais e Informações

Outro aspecto crítico na logística da construção civil é o extenso fluxo de materiais, que abrange desde o fornecedor até o ponto final de aplicação no canteiro de obras. Esse fluxo inclui o transporte externo, realizado pelo transportador, e o transporte interno dentro do canteiro. Contudo, esse processo geralmente é acompanhado por um fluxo de informações precário e quase informal, dificultando a coordenação eficiente das atividades logísticas e a tomada de decisão, o que contribui para que o gerenciamento da construção se torne uma atividade caótica (CRUZ, 2002; SALES; BARROS NETO; FRANCELINO, 2003).

Papel do Transportador e Modais de Transporte

Os transportadores desempenham um papel fundamental na cadeia logística da construção civil, atuando como elos entre as empresas de construção e seus fornecedores. No entanto, a independência e a falta de compromisso sistêmico dos transportadores com os demais elos da cadeia dificultam a prestação de serviços logísticos diferenciados e adaptados às necessidades específicas do setor. Exemplos incluem a adaptação de caminhões para entregas de produtos paletizados, entregas just in time, e transporte de produtos em pequenos lotes com maior frequência e pontualidade (CRUZ, 2002; MARINS, 2019).

A variedade de modais de transporte utilizados entre fornecedores e empresas construtoras é outra característica marcante. A escolha do modal de transporte adequado, que pode incluir opções aéreas, marítimas ou rodoviárias, deve ser baseada em análises de custo que considerem a visão de custo total e o nível de serviço logístico necessário. No entanto, as empresas do setor de edificações ainda não utilizam essa estratégia de forma eficaz para reduzir seus custos logísticos (CRUZ, 2002).

Em resumo, a logística na construção civil é caracterizada por uma complexidade que exige soluções personalizadas e adaptáveis. A gestão eficiente dos fluxos de materiais e informações, a escolha adequada dos modais de transporte e o fortalecimento das relações com transportadores e fornecedores são essenciais para a melhoria da eficiência logística neste setor.

2.3.2. Cadeia de logística no canteiro: logística interna

A abordagem logística no gerenciamento dos fluxos internos de produção no setor de edificações oferece uma visão diferenciada, contribuindo significativamente para a racionalização e redução dos custos de produção (CRUZ, 2002). No contexto do canteiro de obras, a logística interna se concentra na coordenação eficiente de diversas atividades primárias e de apoio, fundamentais para alcançar os objetivos de custo e nível de serviço desejados.

Atividades Primárias

As atividades primárias incluem o transporte, a manutenção de estoques e o processamento de pedidos (CRUZ, 2002; SANTOS et al., 2016). Estas atividades são essenciais para garantir que os materiais e recursos estejam disponíveis conforme necessário, suportando a continuidade do trabalho no canteiro de obras e minimizando interrupções.

Atividades de Apoio

As atividades de apoio, embora secundárias, são igualmente cruciais para a logística no canteiro de obras. Elas englobam armazenagem, manuseio de materiais, embalagens de proteção, obtenção, programação do produto e manutenção de informação (CRUZ, 2002; SANTOS et al., 2016). Essas atividades garantem que os materiais sejam adequadamente protegidos, organizados e disponibilizados quando e onde forem necessários, facilitando a fluidez dos processos de construção.

Objetivo do Sistema Logístico e o Valor Agregado pela Logística no canteiro

O objetivo principal do sistema logístico no canteiro de obras é alcançar o maior e mais conveniente nível de serviço tanto para clientes externos (consumidores) quanto para clientes internos (empresa e operários), sempre considerando os menores custos totais. (CRUZ, 2002).

Um sistema logístico bem gerenciado pode agregar valor significativo à produção no canteiro de obras. Na execução de processos no canteiro, a logística pode criar valor na: utilidade de lugar – valor criado ao tornar os produtos (materiais e/ou equipamentos) disponíveis para consumo no local correto; utilidade de tempo – criação de valor ao disponibilizar os produtos no momento adequado, evitando atrasos e garantindo a continuidade do trabalho; utilidade de propriedade – valor criado ao permitir que o cliente tenha acesso aos produtos desejados, quando e onde forem necessários (CRUZ, 2002).

Embora o fluxo material, por si só, não agregue valor diretamente aos clientes externos ou internos, o correto gerenciamento desse fluxo (gerenciamento logístico)

é fundamental para assegurar que os produtos corretos estejam disponíveis nos locais e momentos corretos. Este gerenciamento eficaz contribui para a eficiência e produtividade do canteiro de obras, otimizando os recursos e minimizando desperdícios (CRUZ, 2002).

2.3.3. Principais desafios e oportunidades de melhorias da logística na construção

A literatura destaca vários desafios logísticos específicos da construção civil. Bankvall et al. (2010) aponta para a complexidade do setor devido às fortes interdependências entre tarefas e partes envolvidas. A fragmentação da indústria torna a coordenação uma tarefa árdua, exacerbada pela falta de confiança e compromisso entre os atores envolvidos (SUNDQUIST; GADDE; HULTHÉN, 2018). Problemas comuns incluem gestão inadequada de materiais, entregas não conformes e manuseio inadequado, resultando em desperdícios e aumento de custos (SUNDQUIST; GADDE; HULTHÉN, 2018).

Por isso, identifica-se como essencial a integração entre logística de suprimentos e logística de canteiro para melhorar a eficiência e a eficácia dos projetos de construção. Destaca-se que, embora algumas organizações tenham alcançado benefícios significativos, os princípios de gerenciamento da cadeia de suprimentos ainda não são amplamente adotados na construção civil. A falta de planejamento adequado e a gestão improvisada das atividades logísticas contribuem para a ineficiência (SUNDQUIST; GADDE; HULTHÉN, 2018).

Para melhorar a eficiência logística no canteiro de obras, é fundamental antecipar o planejamento logístico, incluindo o layout do canteiro, otimização dos processos de descarga, zonas de estocagem e fluxo de materiais e trabalhadores (SANTOS; FARIAS FILHO, 2012). A eficiência logística pode ser alcançada através do controle rigoroso dos fluxos físicos, gestão das interfaces entre os agentes e gestão da praça de trabalho (CARDOSO, 1996 apud REZENDE; JESUS; MOURA, 2013). Além disso, a logística deve focar na redução de fatores prejudiciais ao transporte e descarregamento dos materiais, considerando a localização da obra e as condições de acesso (CARDOSO, 1996 apud REZENDE; JESUS; MOURA, 2013).

Em suma, a gestão logística na construção civil envolve uma série de desafios únicos que requerem uma abordagem integrada e bem planejada. A eficiência na logística não só reduz os custos, mas também agrega valor ao processo produtivo, melhorando a qualidade e a entrega dos projetos de construção.

3. METODOLOGIA

3.1. Estratégia de Pesquisa

Este trabalho busca preencher uma lacuna na literatura sobre os fatores logísticos que interferem na adoção de sistemas construtivos industrializados. Para alcançar este objetivo, foi traçada uma estratégia composta por uma revisão sistemática da literatura (RSL).

A revisão sistemática da literatura é uma metodologia de pesquisa que segue protocolos específicos para compreender e organizar um grande corpus documental. Seu foco principal é verificar o que funciona e o que não funciona em um dado contexto, garantindo reprodutibilidade para outros pesquisadores. Para isso, a RSL apresenta explicitamente as bases de dados bibliográficas consultadas, as estratégias de busca utilizadas em cada base, o processo de seleção dos artigos científicos, os critérios de inclusão e exclusão dos artigos, e o processo de análise de cada artigo. Além disso, a RSL destaca as limitações de cada artigo analisado e as limitações da própria revisão (GALVÃO; RICARTE, 2020).

De forma geral, a revisão sistemática da literatura possui um alto nível de evidência, sendo um importante documento para a tomada de decisões em diversos contextos (GALVÃO; RICARTE, 2020).

Morandi e Camargo (2015, p. 142 apud ALMEIDA; PICCHI, 2018) sugerem que a RSL serve para "[...] mapear, encontrar, avaliar criticamente, consolidar e agregar os resultados de estudos primários relevantes acerca de uma questão de pesquisa [...]", além de identificar lacunas de conhecimento a serem preenchidas. Caracterizada como uma pesquisa secundária baseada em evidências, a RSL tem o objetivo de criar novos conhecimentos pela síntese e diagnóstico da literatura.

Uma das práticas utilizadas nesta revisão é a revisão mista de convergência qualitativa, que transforma os resultados de estudos qualitativos, quantitativos e de métodos mistos em achados qualitativos, como temas. Este tipo de revisão é aplicável quando os estudos analisados possuem amostras pequenas e estão voltados para desenvolver, refinar e revisar um quadro conceitual (GALVÃO; RICARTE, 2020).

A realização da revisão sistemática da literatura permite uma análise robusta e abrangente dos fatores logísticos que influenciam a adoção de sistemas construtivos industrializados. A RSL oferece uma visão fundamentada e detalhada da literatura existente, permitindo identificar lacunas no conhecimento e fornecer respostas embasadas para questões relevantes, contribuindo assim para uma compreensão mais profunda do tema.

3.2. Revisão Sistemática da Literatura

Como apresentado acima, para a realização de uma RSL é essencial a definição da estratégia de busca, para isso devem ser selecionadas as bases de dados a serem utilizadas, assim como a realização de busca, com critérios de seleção formalizados.

Dessa forma, considerando os conceitos apresentados ao longo da revisão bibliográfica, foram escolhidos os seguintes termos para a busca: *modular, industrialized, off-site, construction, building e logistics*.

Em relação à escolha das bases de dados foram escolhidas: Scopus, Web of Science, Science Direct, por serem bases de extrema relevância no setor da engenharia civil, assim com a Revista Ambiente Construído e o Catálogo de Teses e Dissertações da Capes, pelo interesse em encontrar publicações feitas no Brasil sobre o assunto.

As condições estabelecidas durante o processo de seleção foram as seguintes: os artigos devem ter sido publicados em revistas ou conferências, como forma de inserir um critério de qualidade na escolha, eles devem ter sido publicados após 2011, como forma de garantir a atualidade das publicações, e terem sido publicadas em línguas dominadas pelo autor, sendo elas português, inglês, francês e espanhol.

Para a realização das buscas nas bases foi formalizada uma string: (*modular OR industrialized OR off-site*) AND (*construction OR building*) AND *logistics*.

A seleção considerou apenas publicações aderentes ao tema e que trouxessem respostas à questão de pesquisa previamente definida. Inicialmente, foram analisados os títulos dos artigos, seguidos dos resumos e, em alguns casos, do texto completo, mantendo-se apenas aqueles que se enquadravam no escopo da pesquisa.

Além disso, foi utilizada a metodologia de amostragem por bola de neve, que consiste em analisar as referências dos artigos selecionados para identificar possíveis publicações relevantes não encontradas nas buscas iniciais.

O **Quadro 3.1** abaixo apresenta um resumo das etapas de busca realizadas e seus objetivos:

Quadro 3.1: Etapas de busca RSL

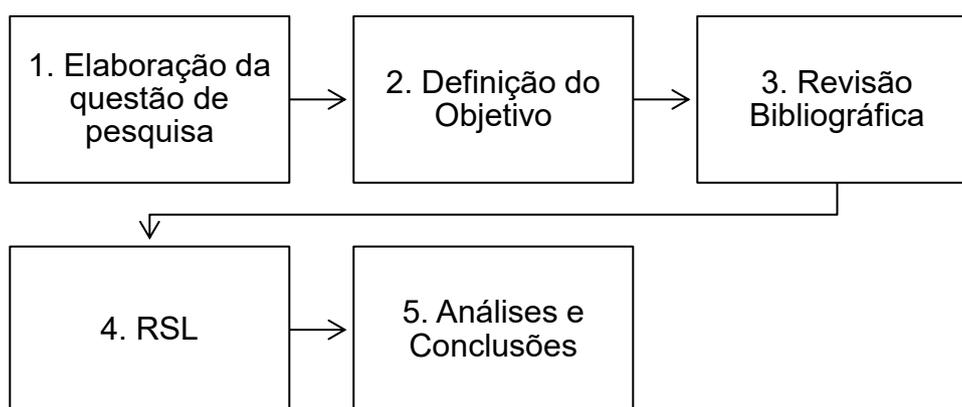
Etapa RSL	Objetivo	Decisões de pesquisa
1. Definição dos termos de busca	Definir termos que representem o tema de pesquisa e que possibilitem retornar na busca artigos relevantes para a pesquisa.	Termos: <i>modular, industrialized, off-site, construction, building, logistics</i>
2. Seleção de bases de dados	Selecionar bases de dados que retornem a maior quantidade de trabalhos relevantes sobre o tema estudado; definir as condições de contorno da busca.	Bases: Scopus, Web of Science, Science Direct, Revista Ambiente Construído, Catálogo de Teses e Dissertações da CAPES. Condições: artigos de revistas e conferências, publicados depois de 2011, em inglês, português, espanhol ou francês.
3. Formulação de string de busca	Formular uma string que represente os termos de busca da melhor forma possível e que possibilite ser replicado nas diversas bases de dados de maneira semelhante.	String: (modular OR industrialized OR off-site) AND (construction OR building) AND logistics
4. Critérios de seleção dos artigos	Definir critérios de seleção e exclusão dos artigos retornados das bases de dados. Possibilitar triagem eficiente e eficaz dos artigos relevantes para avaliação.	Critérios: artigos repetidos, aderência do título, do resumo e do artigo como um todo à questão da pesquisa.
5. Amostragem em "bola de neve"	Identificar trabalhos relevantes para a pesquisa que não foram encontrados pelas bases de pesquisa e string utilizados.	Amostragem: busca por outros trabalhos relevantes a partir das referências dos artigos selecionados para análise.

Uma vez o processo de busca concluído, deve-se realizar uma análise quantitativa e qualitativa dos artigos selecionados. Para tal, será realizada uma análise bibliométrica seguida de uma classificação dos artigos de acordo com os temas abordados.

3.3. Etapas de Pesquisa

Diante do exposto, o fluxograma da **Figura 3.1** abaixo apresenta uma visão global das etapas que serão realizadas ao longo desta pesquisa:

Figura 3.1: Fluxograma das etapas de pesquisa



Fonte: Elaborado pelo autor.

- 1. Elaboração da questão de pesquisa:** Nesta etapa, será definida claramente a questão central que a pesquisa busca responder, identificando o problema a ser investigado.
- 2. Definição do Objetivo:** estabelecimento dos objetivos específicos e gerais que a pesquisa pretende alcançar, delineando os resultados esperados.
- 3. Revisão Bibliográfica:** Será realizada uma revisão da literatura existente sobre o tema para fundamentar teoricamente a pesquisa, identificando lacunas e contribuindo para o embasamento teórico.
- 4. RSL:** Será conduzida uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) para identificar, avaliar e sintetizar estudos relevantes, assegurando uma base sólida e atualizada para a pesquisa.
- 5. Análises e Conclusões:** Por fim, os dados coletados serão analisados e as conclusões da pesquisa serão elaboradas com base nas evidências encontradas, fornecendo respostas para a questão de pesquisa e atingindo os objetivos propostos.

4. RSL: Aspectos logísticos na construção industrializada

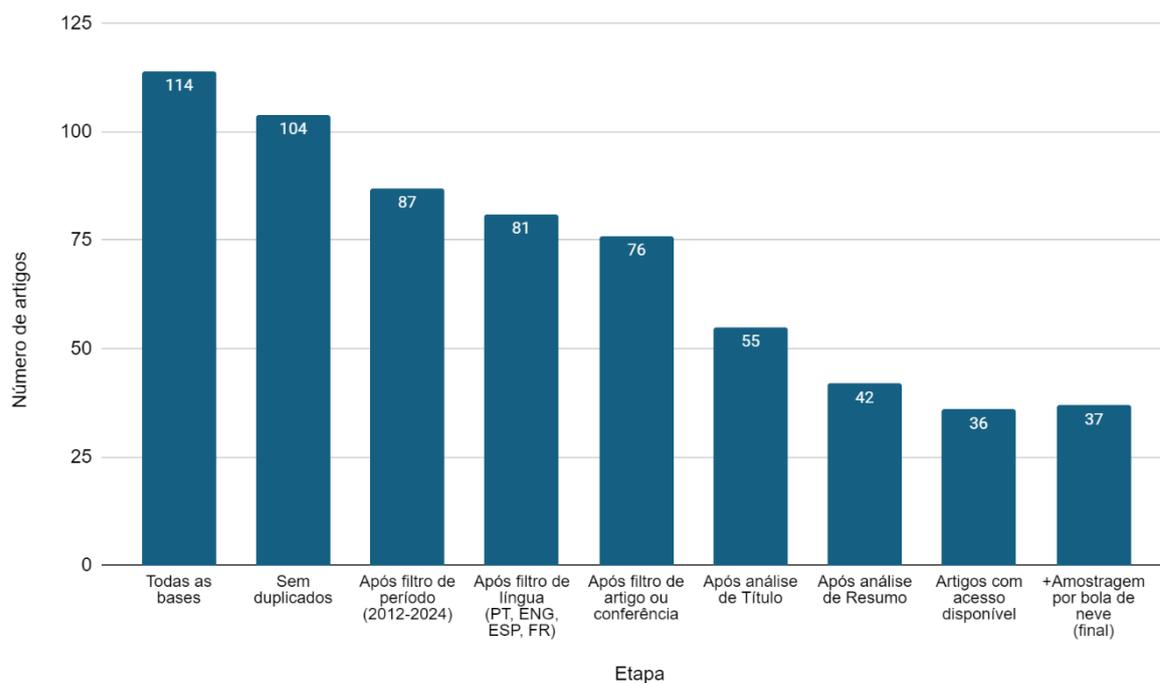
4.1. Resultados da Busca

Foi realizada pesquisa nas bases de dados previamente definidas utilizando a string de pesquisa "(modular OR industrialized OR off-site) AND (construction OR building) AND logistics". Essa string precisou ser adaptada para a realização das pesquisas nas bases Revista Ambiente Construído, Catálogo de Teses e Dissertações da CAPES, traduzindo as palavras para português – modular, industrializada, off-site, construção, logística – e realizando todas as combinações de termos possíveis como descrito na string de pesquisa, por exemplo, “logística construção modular”. Em seguida foram realizadas as pesquisas nas demais bases com a string somente nos campos de Título do Artigo e Palavras-chave, visando garantir maior aderência ao tema e às questões de pesquisa.

Após realizar a pesquisa nas 5 bases selecionadas, a busca realizada pelo título não retornou resultados na Web of Science, e a busca apenas por palavras-chave não foi possível na Science Direct, além de não ter obtido nenhum resultado na Revista Ambiente Construído, Catálogo de Teses e Dissertações da CAPES.

Ao final, um total de 114 artigos foi encontrado em todas as bases combinadas. No entanto, foram identificados e eliminados 10 artigos duplicados, 17 artigos fora do período definido (2012-2024), 6 artigos em idiomas não compreendidos pelo autor, e 5 documentos que não se enquadravam na categoria de artigos ou publicações de conferência. Uma análise preliminar dos artigos restantes foi realizada. Inicialmente, 21 artigos foram desconsiderados por se desviarem completamente do tema ao analisar os títulos. Em seguida, 13 artigos foram excluídos após a análise do resumo, por estarem fora do escopo de análise. Além disso, 6 artigos não tinham acesso disponível, portanto não podiam ser analisados. Um artigo foi encontrado a partir da técnica de amostragem por bola de neve. Dessa forma, obteve-se 37 artigos selecionados dentro dos critérios de seleção estabelecidos.

O gráfico presente na **Figura 4.1** abaixo apresenta os resultados obtidos ao final de cada etapa da busca:

Figura 4.1: Número de artigos selecionados ao final de cada etapa de busca

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2. Análise Bibliométrica

Foi realizada uma análise bibliométrica dos artigos com o objetivo de identificar padrões e tendências entre as publicações selecionadas sobre o assunto estudado, para isso foram avaliados os seguintes aspectos:

Ano de publicação: Esta análise visa observar a evolução temporal do interesse e da pertinência do tema ao longo dos anos.

País de origem dos autores: Este aspecto identifica os países e continentes que mais investigam o tema, proporcionando uma visão geográfica da pesquisa sobre logística em sistemas construtivos industrializados.

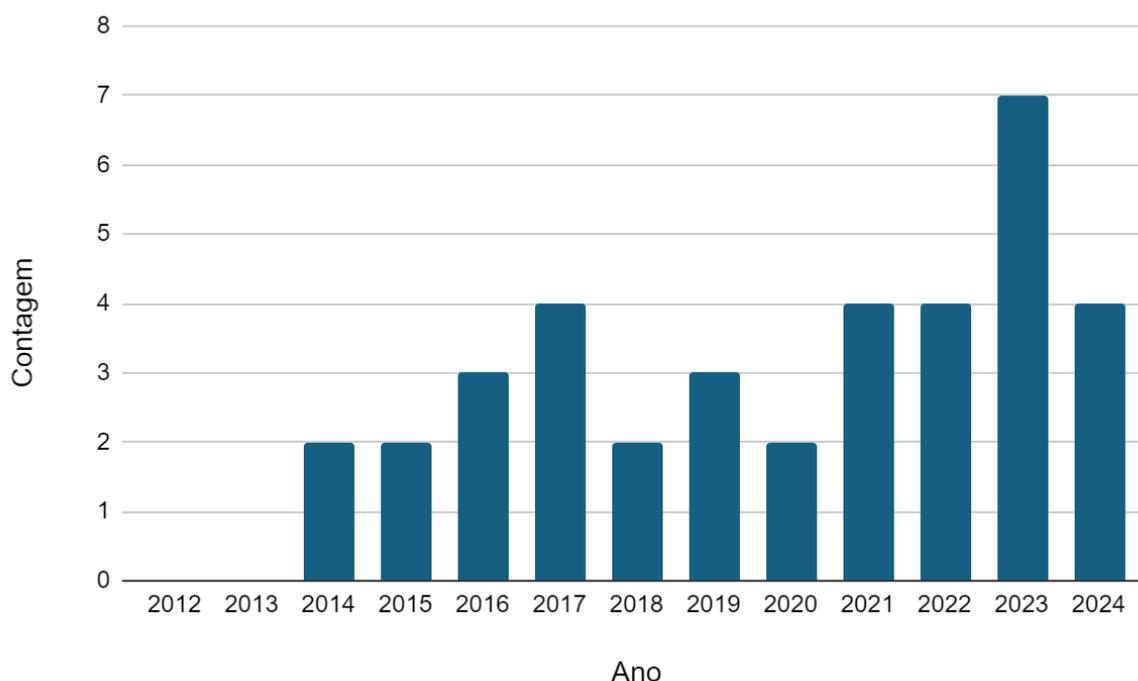
Veículos de publicação: Essa análise permitirá identificar onde são publicados os esses artigos mais relevantes.

Autores: Esse aspecto pode indicar autores que se dedicam mais nessa área de pesquisa.

4.2.1. Ano de publicação

Na **Figura 4.2** abaixo está apresentada a distribuição do número de publicações ao longo dos anos. Nela pode-se identificar um aumento do número de publicações feitas nos últimos anos, o que indica a relevância do assunto atualmente.

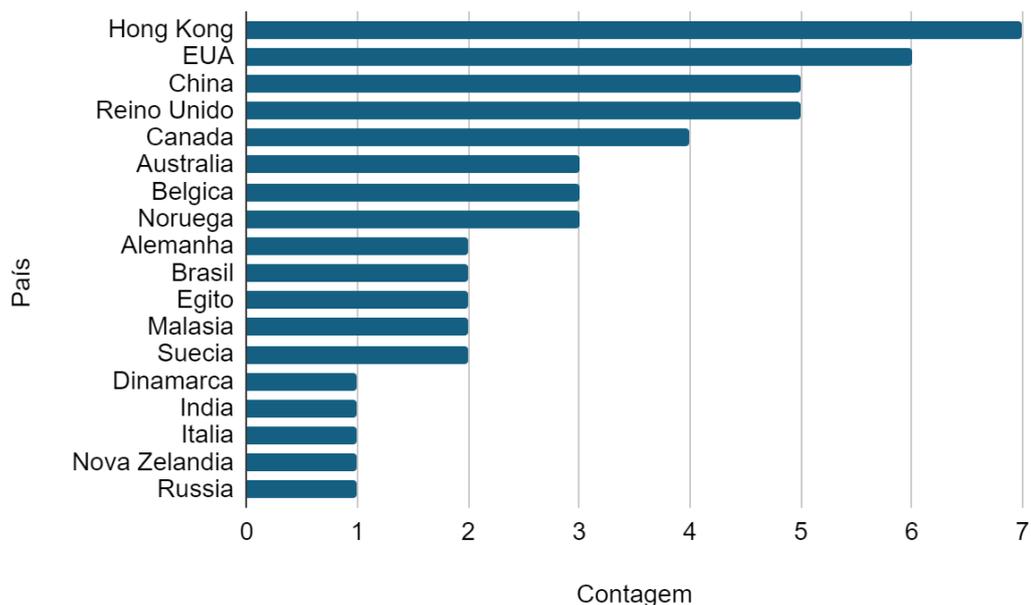
Figura 4.2: Número de artigos publicados por ano



Fonte: Elaborado pelo Autor.

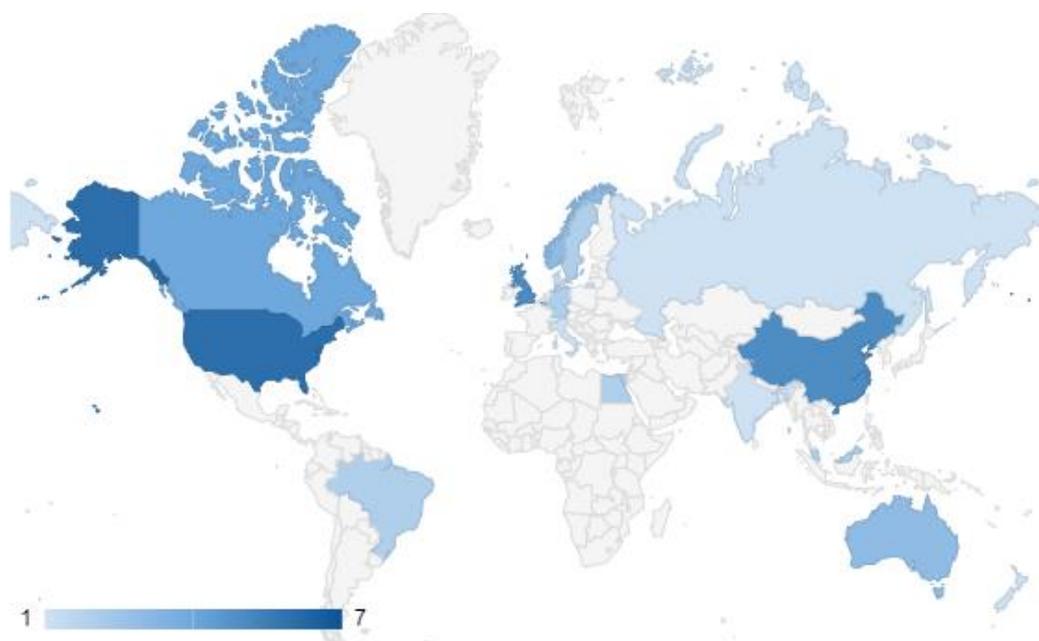
4.2.2. Publicações por País de origem dos autores

Na análise da distribuição geográfica das publicações foi considerada a origem dos autores envolvidos, contabilizando somente uma vez cada país publicação em caso de múltiplos autores de mesma origem. Pode-se observar na **Figura 4.3**, que Hong Kong é o país que mais realizou pesquisas sobre os assuntos estudados, com 10 publicações.

Figura 4.3: Número de artigos publicados por País dos autores

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao analisar a **Figura 4.4** abaixo, o infográfico apresenta a distribuição geográfica das publicações, dando um maior contraste para as regiões mais influentes no assunto. Nela pode-se notar a forte concentração do número de publicações de autores com origem na região da China e Sudeste Asiático, assim como na América do Norte, seguidos por Europa e Oceania.

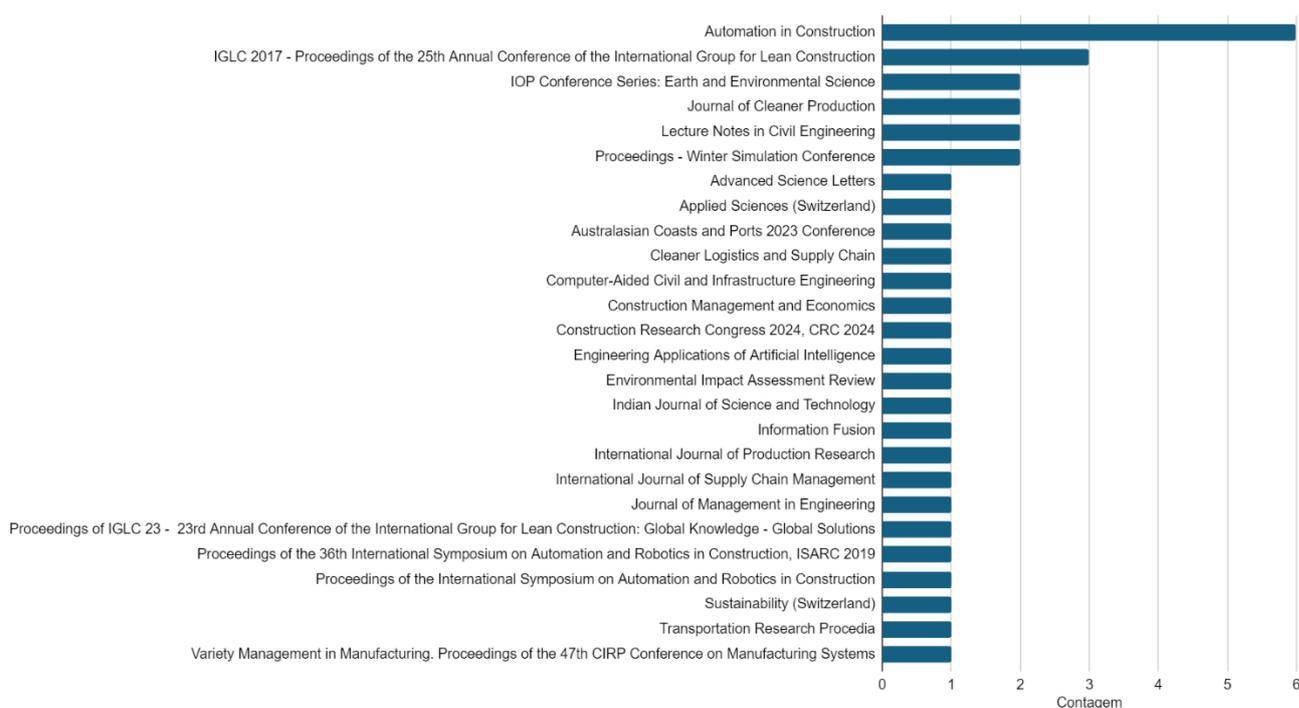
Figura 4.4: Distribuição geográfica das origens dos autores

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.3. Publicações por Veículo de Publicação

Na análise por veículo de publicações pode-se identificar que a logística na adoção de sistemas construtivos industrializados foi alvo de publicações principalmente no periódico *Automation in Construction*, com seis publicações ao total dentro dos critérios de análise, o que indica uma possível relação entre a adoção de tecnologias automatizadas para a gestão logística de sistemas construtivos industrializados. Os resultados estão presentes na **Figura 4.5**, na sequência.

Figura 4.5: Número de artigos publicados por veículo de publicação

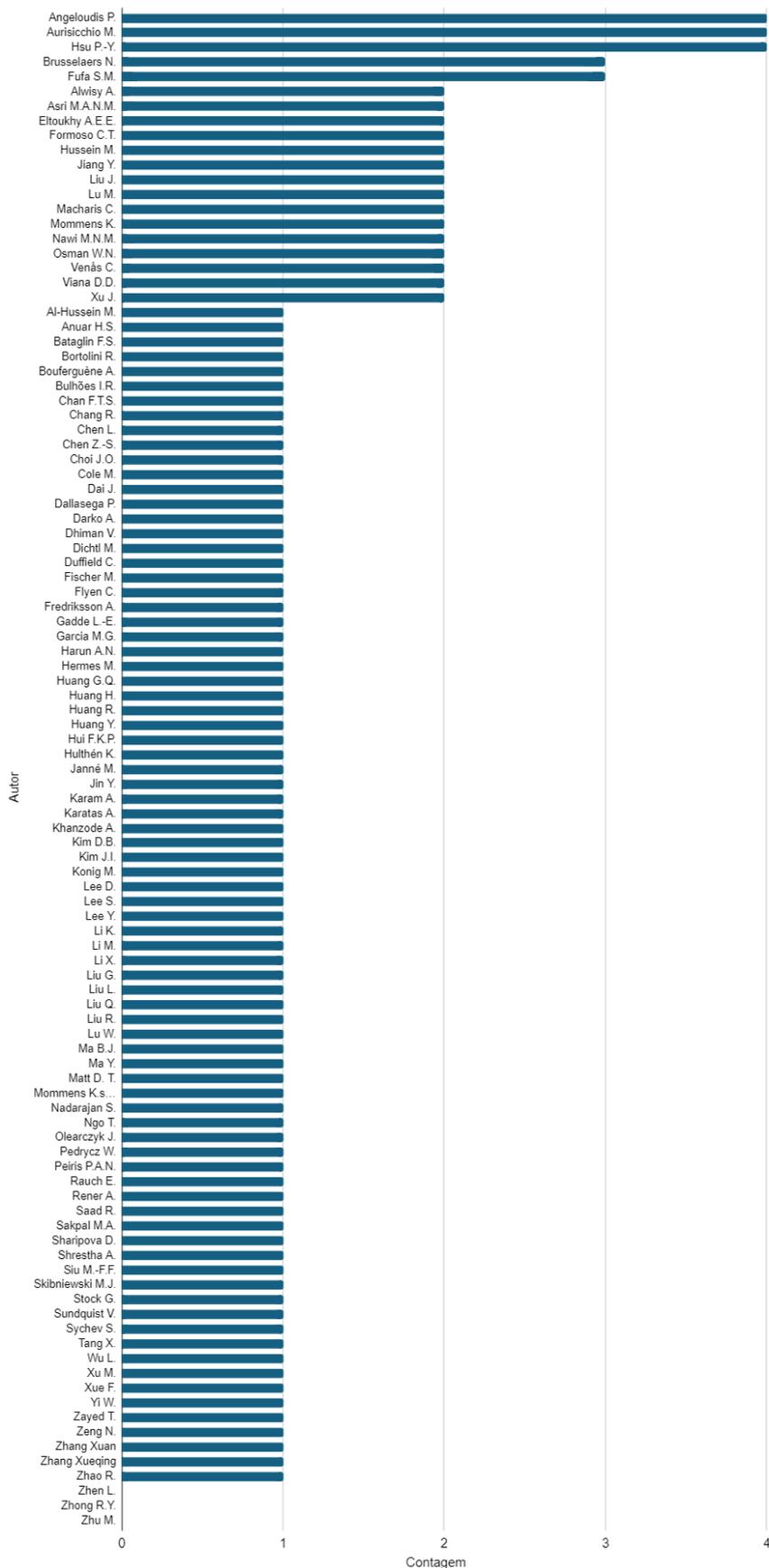


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.4. Publicações por autor

Na análise por autores das publicações identifica-se, na **Figura 4.6** abaixo, que 3 autores se destacam como os mais produtivos dentro desse assunto estudado, sendo eles: Hsu P.-Y., Aurisicchio M., Angeloudis P.. Todos os três participaram das mesmas publicações, focadas principalmente na otimização da cadeia logística de construções modulares sob diferentes aspectos, e trabalham no Imperial College London, no Reino Unido.

Figura 4.6: Número de Artigos publicados por Autor



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3. Análise da RSL: Estudo dos aspectos logísticos nos artigos selecionados

Com o intuito de identificar os aspectos logísticos mais estudados nessas publicações, a Revisão Sistemática da Literatura (RSL) será aprofundada realizando-se uma análise dos artigos selecionados.

Para isso serão considerados os aspectos logísticos identificados por Arshad e Zayed (2022), que são considerados cruciais para a eficiência da construção industrializada e modular. Esses aspectos são:

- **Manuseio dos Módulos (Log1):** Prevenir danos durante carregamento, descarregamento e transporte.
- **Transporte Flexível (Log2):** Utilização de transporte multimodal e rotas alternativas.
- **Atrasos Logísticos (Log3):** Mitigar atrasos devido a fatores externos, como clima, desastres naturais e trânsito.
- **Rota de Transporte Otimizada (Log4):** Planejar redes de suprimentos eficientes e roteirização de veículos.
- **Controle de Inventário (Log5):** Gerenciar estoque e espaço de buffer nos armazéns.
- **Custo Logístico (Log6):** Considerar custos de transporte, armazenamento e serviços de terceiros.
- **Tempo de Ciclo (Log7):** Minimizar o tempo total das operações logísticas.
- **Localização e Proximidade das Instalações Logísticas (Log8):** Disponibilidade de instalações próximas à fábrica e à rota de transporte.
- **Regulamentações de Transporte (Log9):** Cumprir regulamentações de transporte e tráfego.
- **Padronização das Atividades Logísticas (Log10):** Implementar procedimentos operacionais padronizados e sistemas integrados de gestão.
- **Transporte Verde (Log11):** Priorizar transporte e distribuição ambientalmente amigáveis.

Esses aspectos destacam a importância de uma gestão logística bem estruturada para superar desafios como atrasos, danos aos módulos e

regulamentações de transporte na construção modular. Eles representam uma extensão da definição de logística, incorporando elementos de gestão para garantir a eficiência operacional e a satisfação do cliente nesse contexto específico.

4.3.1. Identificação dos aspectos estudados por artigo

Para compreender melhor a relevância de cada aspecto logísticos estudado, assim como as relações entre eles, realizou-se uma avaliação por artigo buscando identificar quais aspectos foram abordados em cada artigo. Os resultados dessa análise estão apresentados no **Quadro 4.1** abaixo. Em seguida, será realizada uma análise crítica detalhada de cada aspecto.

Quadro 4.1: Aspectos estudados por artigo na RSL

Autores	Ano de Publicação	Título do Artigo	Log1	Log2	Log3	Log4	Log5	Log6	Log7	Log8	Log9	Log10	Log11
Jiang Y.; Li M.; Ma B.J.; Zhong R.Y.; Huang G.Q.	2024	Data-driven out-of-order model for synchronized planning, scheduling, and execution in modular construction fit-out management	X		X		X		X			X	
Liu L.; Huang Y.; Jiang Y.	2024	Developing a Logistic Chain-Enabled BIM System for Material Management in Modular Construction					X					X	
Liu Q.; Ma Y.; Chen L.; Pedrycz W.; Skibniewski M.J.; Chen Z.-S.	2024	Artificial intelligence for production, operations and logistics management in modular construction industry: A systematic literature review				X	X			X			
Zhang X.; Zhang X.	2024	Automated component delivery management under uncertainty for prefabricated buildings to minimize cost and harmful emissions			X	X	X	X					X
Brusselaers N.; Huang H.; Macharis C.; Mommens K.	2023	A GPS-based approach to measure the environmental impact of construction-related HGV traffic on city level				X		X			X		X
Dhiman V.; Sakpal M.A.	2023	Engineering Solutions to Mitigate Logistics Changes on a Modular Project	X	X	X			X					
Eltoukhy A.E.E.; Hussein M.; Xu M.; Chan F.T.S.	2023	Data-driven Game-theoretic Model Based on Blockchain for Managing Resource Allocation and Vehicle Routing in Modular Integrated Construction	X		X	X		X	X				X
Fufa S.M.; Venås C.	2023	Environmental impact assessment of on-site and off-site construction logistics activities - A case study analysis from Norway		X		X					X		X
Hussein M.; Karam A.; Eltoukhy A.E.E.; Darko A.; Zayed T.	2023	Optimized multimodal logistics planning of modular integrated construction using hybrid multi-agent and metamodeling		X	X	X		X					
Peiris P.A.N.; Hui F.K.P.; Ngo T.; Duffield C.; Garcia M.G.	2023	Challenges in Transport Logistics for Modular Construction: A Case Study	X		X		X	X					X

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Quadro 4.1 - Aspectos estudados por artigo na RSL (continuação)

Autores	Ano de Publicação	Título do Artigo	Log1	Log2	Log3	Log4	Log5	Log6	Log7	Log8	Log9	Log10	Log11
Stock G.	2023	Large-Scale Modular Wharf Design Considerations for the Port of Alaska Modernization Program	X	X	X			X	X		X		
Brusselaers N.; Fufa S.M.; Mommens K.	2022	A Sustainability Assessment Framework for On-Site and Off-Site Construction Logistics		X		X		X					X
Huang R.; Li K.; Liu G.; Shrestha A.; Chang R.; Tang X.	2022	A bi-level model and hybrid heuristic algorithm for the optimal location of prefabricated building industrial park				X		X		X			X
Reiner A.; Karatas A.; Cole M.	2022	Innovative Model for Forecasting Trailer Usage for Prefabricated Exterior Wall Panels			X	X	X	X					
Wu L.; Li X.; Zhao R.; Lu W.; Xu J.; Xue F.	2022	A blockchain-based model with an incentive mechanism for cross-border logistics supervision and data sharing in modular construction	X		X						X	X	
Lee D.; Lee S.	2021	Digital twin for supply chain coordination in modular construction			X	X			X		X	X	
Lee Y.; Kim J.I.; Khanzode A.; Fischer M.	2021	Empirical Study of Identifying Logistical Problems in Prefabricated Interior Wall Panel Construction	X					X	X				
Yi W.; Zhen L.; Jin Y.	2021	Stackelberg game analysis of government subsidy on sustainable off-site construction and low-carbon logistics				X				X	X		X
Zhu M.; Dai J.; Liu R.; Xu J.; Alwisy A.	2021	Two-period based carbon-economy equilibrium strategy for modular construction supply planning				X	X	X		X			X
Brusselaers N.; Mommens K.; Janné M.; Fredriksson A.; Venås C.; Flyen C.; Fufa S.M.; Macharis C.	2020	Economic, social and environmental impact assessment for off-site construction logistics: The data availability issue				X		X					X
Hsu P.-Y.; Auricchio M.; Angeloudis P.	2020	Optimal logistics planning for modular construction using multi-stage stochastic programming	X		X	X	X	X		X			X
Bortolini R.; Formoso C.T.; Viana D.D.	2019	Site logistics planning and control for engineer-to-order prefabricated building systems using BIM 4D modeling	X				X		X			X	
Choi J.O.; Kim D.B.	2019	A new UAV-based module lifting and transporting method: Advantages and challenges	X					X	X		X		

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Quadro 4.1 - Aspectos estudados por artigo na RSL (continuação)

Autores	Ano de Publicação	Título do Artigo	Log1	Log2	Log3	Log4	Log5	Log6	Log7	Log8	Log9	Log10	Log11
Hsu P.-Y.; Aurisicchio M.; Angeloudis P.	2019	Risk-averse supply chain for modular construction projects			X	X		X		X			
Hsu P.-Y.; Angeloudis P.; Aurisicchio M.	2018	Optimal logistics planning for modular construction using two-stage stochastic programming			X	X	X	X	X				
Sundquist V.; Gadde L.-E.; Hulthén K.	2018	Reorganizing construction logistics for improved performance	X		X			X	X			X	
Bataglin F.S.; Viana D.D.; Formoso C.T.; Bulhões I.R.	2017	Application of BIM for supporting decision-making related to logistics in prefabricated building systems	X		X		X		X			X	
Hsu P.-Y.; Aurisicchio M.; Angeloudis P.	2017	Supply chain design for modular construction projects			X		X	X	X	X			
Liu J.; Lu M.	2017	Optimization on supply-constrained module assembly process			X		X	X	X				
Zeng N.; Dichtl M.; König M.	2017	A scenario-based simulation framework of on- and off-site construction logistics			X				X			X	
Asri M.A.N.M.; Nawi M.N.M.; Nadarajan S.; Osman W.N.; Harun A.N.	2016	Success factors of JIT integration with IBS construction projects—a literature review	X		X		X	X	X			X	
Asri M.A.N.M.; Nawi M.N.M.; Saad R.; Osman W.N.; Anuar H.S.	2016	Exploring lean construction component for Malaysian industrialized building system logistics management—A literature review	X				X		X			X	
Liu J.; Siu M.-F.F.; Lu M.	2016	Modular construction system simulation incorporating off-shore fabrication and multi-mode transportation	X	X	X	X			X				
Hermes M.	2015	Prefabrication & modularization as a part of lean construction - status quo in Germany					X	X				X	
Sychev S.; Sharipova D.	2015	Monitoring and logistics of erection of prefabricated modular buildings	X	X	X	X		X					
Matt D. T.; Dallasega P.; Rauch E.	2014	Synchronization of the Manufacturing Process and On-site Installation in ETO Companies			X		X		X				
Olearczyk J.; Al-Hussein M.; Bouferguène A.	2014	Evolution of the crane selection and on-site utilization process for modular construction multilifts	X						X				

Fonte: Elaborado pelo Autor.

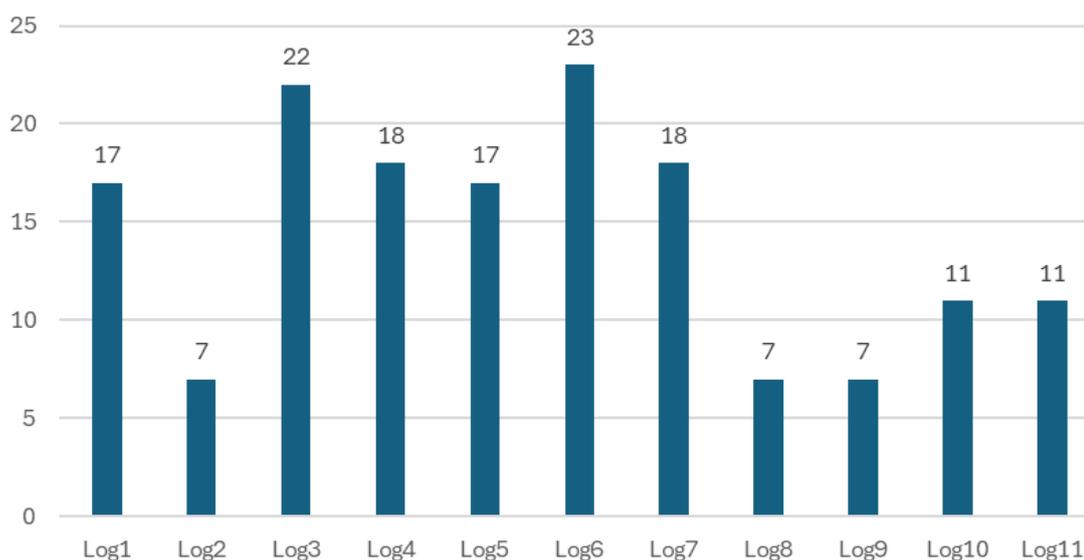
4.3.2. Análise geral dos resultados obtidos pela RSL

Com intuito de identificar as maiores tendências dos estudos realizados sobre logística na construção industrializada, foi realizada uma análise quantitativa em relação à classificação feita. Nessa análise foram avaliadas as quantidades de artigos por aspecto, assim como a correlação existente entre os aspectos estudados.

4.3.2.1. Número de Artigos por aspecto

O gráfico da **Figura 4.7**, apresenta um histograma com a quantidade de artigos por aspecto logístico analisado. Diante disso, é possível identificar alguns aspectos relevantes sobre a frequência e a importância de diferentes temas no contexto da adoção de sistemas construtivos industrializados.

Figura 4.7: Gráfico da distribuição dos artigos por aspecto logístico analisado



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os temas mais recorrentes incluem o **manuseio de módulos, atrasos logísticos, custo logístico, controle de inventário, rota de transporte otimizada e tempo de ciclo**. Estes tópicos são amplamente discutidos na literatura, indicando uma preocupação constante com a eficiência logística e a redução de custos na implementação de tais sistemas.

Por outro lado, alguns temas menos recorrentes chamam a atenção, como o **transporte flexível, localização e proximidade das instalações logísticas, regulamentação de transporte, padronização das atividades logísticas e transporte verde**. É interessante observar que, apesar da expectativa de que a **localização dos centros logísticos** e a **padronização das atividades** seriam aspectos de grande relevância, esses não se destacam tanto nas pesquisas analisadas. Esse resultado levanta a necessidade de um estudo mais aprofundado para entender como esses fatores realmente impactam a adoção de sistemas construtivos industrializados.

4.3.2.2. **Correlação entre os aspectos**

A análise de correlação é uma ferramenta estatística essencial para identificar relações entre variáveis dentro de um conjunto de dados. No contexto deste estudo, a correlação entre aspectos logísticos identificados nos artigos revisados permite compreender quais temas aparecem frequentemente juntos, revelando associações relevantes e padrões temáticos. Esse tipo de análise é mais interessante do ponto de vista estatístico do que simplesmente observar números brutos, pois, enquanto a contagem isolada mostra apenas a frequência individual de cada categoria, a correlação explora como elas interagem entre si. Essa abordagem ajuda a identificar sinergias e relações temáticas que podem não ser evidentes em uma análise simples, oferecendo uma visão mais profunda sobre como diferentes aspectos logísticos se conectam e influenciam o cenário estudado.

Com o intuito de analisar a correlação entre os 11 aspectos avaliados nos artigos, foi utilizada uma abordagem binária. Inicialmente, os dados foram organizados em uma matriz binária, onde cada aspecto foi representado por um vetor de 37 posições (correspondendo ao número de artigos analisados). Para cada artigo, o valor do vetor foi definido como 1 caso o aspecto estivesse presente no artigo e 0 caso contrário. Dessa forma, cada coluna da matriz representa um aspecto logístico, enquanto cada linha corresponde a um artigo analisado.

A fim de investigar como esses aspectos se relacionam entre si, foi calculada a correlação de Pearson entre as colunas dessa matriz. O coeficiente de correlação de Pearson é definido pela seguinte equação:

$$Corr(X, Y) = \frac{\sum[(X_i - \bar{X}) \cdot (Y_i - \bar{Y})]}{\sqrt{\sum(X_i - \bar{X})^2} \cdot \sqrt{\sum(Y_i - \bar{Y})^2}}$$

onde:

- X_i e Y_i correspondem aos valores binários dos aspectos X e Y no artigo i , ou seja, 1 se o aspecto foi identificado no artigo e 0 caso contrário;
- \bar{X} e \bar{Y} são as médias dos valores binários para os aspectos X e Y , respectivamente;
- $Corr(X, Y)$ varia entre -1 e 1, indicando correlação negativa ou positiva entre os aspectos.

Para ilustrar essa metodologia, a **Quadro 4.2** apresenta um exemplo simplificado da estrutura de dados categorizados. Nessa matriz, diferentes elementos (A, B, C e D) estão associados a determinados aspectos logísticos numerados de 1 a 6. A partir desses dados, a **Tabela 4.1** exibe a matriz de correlação correspondente, calculada com base na equação de Pearson.

Quadro 4.2: Exemplo de distribuição de elementos

	1	2	3	4	5	6
A				X		X
B	X	X	X		X	X
C	X	X				
D				X	X	X

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Tabela 4.1: Matriz de correlação entre os aspectos do exemplo do Quadro 4.2

	1	2	3	4	5	6
1		1,000	0,577	-1,000	0,000	-0,577
2	1,000		0,577	-1,000	0,000	-0,577
3	0,577	0,577		-0,577	0,577	0,333
4	-1,000	-1,000	-0,577		0,000	0,577
5	0,000	0,000	0,577	0,000		0,577
6	-0,577	-0,577	0,333	0,577	0,577	

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Na matriz de correlação da **Tabela 4.1**, observa-se que os aspectos **1 e 4** possuem uma correlação de **-1**, indicando que sempre que um está presente, o outro está ausente. Já os aspectos **3 e 5** apresentam uma correlação positiva de **0,577**, sugerindo que tendem a aparecer juntos nos elementos analisados. Da mesma forma, os aspectos **2 e 6** possuem uma correlação de **-0,577**, indicando uma relação inversa moderada.

Esse exemplo demonstra como a matriz de correlação pode revelar associações entre categorias, permitindo uma análise mais aprofundada dos padrões existentes nos dados. No contexto deste estudo, a aplicação dessa metodologia possibilita identificar quais aspectos logísticos frequentemente aparecem juntos nos artigos analisados, fornecendo insights sobre possíveis relações temáticas e contribuindo para uma compreensão mais estruturada da literatura revisada.

Com essa mesma abordagem, são apresentados, na Tabela 4.2, os valores da correlação entre os 11 aspectos logísticos abordados no estudo da RSL, destacando as principais associações observadas e seus possíveis significados dentro desse contexto.

Tabela 4.2: Matriz de Correlação entre os aspectos estudados na RSL

	Log1	Log2	Log3	Log4	Log5	Log6	Log7	Log8	Log9	Log10	Log11
Log1	1,000	0,109	0,209	-0,463	-0,088	-0,063	0,405	-0,307	-0,030	0,231	-0,244
Log2	0,109	1,000	0,118	0,220	-0,445	0,092	-0,194	-0,233	0,119	-0,314	-0,012
Log3	0,209	0,118	1,000	-0,077	0,099	0,150	0,253	-0,163	-0,163	0,055	-0,306
Log4	-0,463	0,220	-0,077	1,000	-0,246	0,202	-0,515	0,358	0,082	-0,515	0,550
Log5	-0,088	-0,445	0,099	-0,246	1,000	-0,063	0,079	0,109	-0,445	0,231	-0,125
Log6	-0,063	0,092	0,150	0,202	-0,063	1,000	-0,244	0,092	-0,192	-0,468	0,264
Log7	0,405	-0,194	0,253	-0,515	0,079	-0,244	1,000	-0,332	-0,056	0,313	-0,515
Log8	-0,307	-0,233	-0,163	0,358	0,109	0,092	-0,332	1,000	-0,057	-0,314	0,290
Log9	-0,030	0,119	-0,163	0,082	-0,445	-0,192	-0,056	-0,057	1,000	-0,012	0,139
Log10	0,231	-0,314	0,055	-0,515	0,231	-0,468	0,313	-0,314	-0,012	1,000	-0,423
Log11	-0,244	-0,012	-0,306	0,550	-0,125	0,264	-0,515	0,290	0,139	-0,423	1,000

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Ao analisar a matriz de correlação para os 11 aspectos logísticos estudados, pode-se identificar algumas relações de correlação forte positiva:

- Log4 (Rota de Transporte Otimizada) e Log11 (Transporte Verde) apresentam uma correlação forte, de 0,550, sugerindo que a otimização das rotas de transporte pode estar relacionada a práticas de transporte mais sustentáveis.
- Log1 (Manuseio dos Módulos) e Log7 (Tempo de Ciclo) têm uma correlação de 0,405, indicando que a eficiência no manuseio dos módulos pode reduzir o tempo de ciclo nas operações logísticas.
- Log4 (Rota de Transporte Otimizada) e Log8 (Localização e Proximidade das Instalações Logísticas) apresentam uma correlação de 0,358, o que sugere que a localização e proximidade das instalações logísticas possui um grande impacto sobre a otimização das rotas de transporte.
- Log7 (Tempo de Ciclo) e Log10 (Padronização das Atividades Logísticas) têm uma correlação de 0,313, possivelmente indicando que a padronização das práticas logísticas está atrelada a uma melhora de eficiência, que consequentemente reduz o tempo de ciclo.

As correlações fracas ou negativas não permitem uma análise conclusiva, contudo identifica-se temas que raramente costumam ser estudados simultaneamente, como:

- Log7 (Tempo de Ciclo) e Log11 (Transporte Verde) apresenta uma correlação de -0,515.
- Log6 (Custo Logístico) e Log10 (Padronização das Atividades Logísticas) apresenta uma correlação de -0,468.
- Log5 (Controle de Inventário) e Log9 (Localização e Proximidade das Instalações Logísticas) apresenta uma correlação de -0,445.
- Log5 (Controle de Inventário) e Log2 (Transporte Flexível) apresenta uma correlação de -0,445.
- Log5 (Controle de Inventário) e Log9 (Localização e Proximidade das Instalações Logísticas) apresenta uma correlação de -0,445.
- Log10 (Padronização das Atividades Logísticas) e Log11 (Transporte Verde) apresenta uma correlação de -0,423.

4.3.3. Análise por aspecto

A análise por aspecto tem o intuito de compreender como os artigos encontrados abordaram os aspectos logísticos estudados ao longo desta RSL, identificando os pontos principais de cada tema e possíveis lacunas.

4.3.3.1. Manuseio dos Módulos (Log1)

A introdução de sistemas construtivos industrializados em canteiros de obras traz uma série de desafios logísticos relacionados ao manuseio de módulos e componentes. A eficácia desses processos depende de uma coordenação precisa e de um planejamento estratégico que englobe desde o transporte até a instalação. O manuseio ineficiente pode causar danos estruturais e atrasos no cronograma, afetando negativamente o sucesso do projeto. Estudos recentes ressaltam a importância de evitar danos durante o transporte e montagem, sincronizar as operações no canteiro, e utilizar tecnologias como gêmeos digitais e IoT (Internet of Things) para otimizar o processo (JIANG et al., 2024). Além disso, questões como alocação de recursos e rotas logísticas são críticas para garantir que os módulos sejam entregues e instalados no momento certo, minimizando custos e interrupções (ELTOUKHY et al., 2023). A integração entre transporte e montagem, juntamente com o controle de estoques no local, também é essencial para evitar desperdícios e aumentar a eficiência (HUSSEIN et al., 2023; HSU; AURISICCHIO; ANGELOUDIS, 2020; SUNDQUIST; GADDE; HULTHÉN, 2018; ASRI et al., 2016a; ASRI et al., 2016b).

Para enfrentar esses desafios, várias soluções podem ser adotadas. Em primeiro lugar, a organização das etapas de montagem deve ser refinada, com uma sequência clara de descarregamento e instalação dos módulos (HSU; AURISICCHIO; ANGELOUDIS, 2020; BORTOLINI; FORMOSO; VIANA, 2019). Nesse quesito, o uso de tecnologias, como o BIM (Building Information Modeling) 4D para visualização e coordenação das atividades, podem trazer benefícios de produtividade e reduzindo a possibilidade de erros (BATAGLIN et al., 2017).

A priorização de componentes e o levantamento detalhado dos materiais utilizados em cada etapa permitem uma logística mais fluida, reduzindo o trabalho em

progresso e otimizando o espaço no canteiro. Conforme Sundquist, Gadde e Hulthén (2018), a empresa CSL exemplifica essa eficiência ao entregar materiais diretamente à área de montagem, evitando manuseios extras e minimizando o risco de danos. Além disso, o manuseio ocorre fora do horário de trabalho, evitando interferências nas atividades de montagem. Com uma equipe especializada e um sistema de agendamento online, a CSL assegura que os materiais sejam entregues no momento certo, melhorando a eficiência e reduzindo retrabalhos e perdas (SUNDQUIST; GADDE; HULTHÉN, 2018).

O Just-in-Time (JIT) também desempenha um papel importante, ajudando a reduzir a necessidade de grandes áreas de armazenamento e minimizando o risco de danos e desperdícios (ASRI et al., 2016a; ASRI et al., 2016b).

A coordenação entre as equipes de transporte e montagem deve ser contínua e integrada, com a implementação de tecnologias avançadas para monitorar o fluxo de materiais em tempo real e ajustar os cronogramas conforme necessário (JIANG et al., 2024; ELTOUKHY et al., 2023). Um exemplo dessas tecnologias é o sistema baseado no Modelo de Jogo de Stackelberg Líder-Seguidor (Leader-Follower Stackelberg Game Model – LFSGM). Esse modelo é utilizado para otimizar a interação entre a alocação de recursos nos canteiros de obras e o roteamento de veículos de logística em projetos de Construção Modular Integrada (MiC). A alocação de recursos é realizada através da resolução do problema de alocação de recursos (RAP), que visa alocar os recursos necessários (como equipamentos e mão de obra) para descarregar módulos de construção pré-fabricados (MiC) em um canteiro de obras. O objetivo é minimizar os custos de recursos. O RAP gerencia conjuntos de módulos MiC e recursos, produzindo um plano de alocação de recursos que inclui o tempo de descarregamento e o fechamento do serviço de descarregamento, com base nos recursos alocados. A alocação de recursos depende das decisões logísticas, pois as empresas devem garantir a entrega eficiente dos módulos, resolvendo o problema de roteamento de veículos (MT-TV RPTW-ES) para assegurar a pontualidade no canteiro de obras (ELTOUKHY et al., 2023).

Ao ser testado em um estudo de caso real, o modelo revelou uma forte interdependência entre as etapas de transporte e descarregamento dos módulos, essencial para a otimização da alocação de recursos necessários. Embora a

abordagem tradicional apresente um custo relativamente menor para a alocação de recursos no canteiro, ela não oferece uma solução integrada para o planejamento logístico das entregas. Em contraste, o modelo Stackelberg mostrou resultados superiores ao fornecer uma solução mais completa e eficiente para esse processo (ELTOUKHY et al., 2023).

Outras ferramentas como gêmeos digitais e sistemas de controle de inventário também desempenham um papel eficiente para manter a visibilidade dos componentes e garantir que os módulos sejam manuseados e instalados com precisão (LEE et al., 2021; LEE et al., 2021).

Além disso, a precisão na instalação e a organização do processo de ereção dos módulos são essenciais, com a seleção adequada de equipamentos, como guindastes, para garantir um manuseio seguro e eficiente, minimizando a necessidade de movimentos não planejados (SYCHEV; SHARIPOVA, 2015; OLEARCZYK; AL-HUSSEIN; BOUFERGUÈNE, 2014). E também, aplicação de soluções inovadoras, como o uso de drones para o manuseio de módulos em áreas congestionadas, pode melhorar ainda mais a eficiência e segurança no canteiro (CHOI; KIM, 2019).

Em conclusão, o sucesso na adoção de sistemas construtivos industrializados depende de um planejamento logístico robusto, onde cada fase do manuseio e transporte é cuidadosamente coordenada para evitar danos e maximizar a eficiência. A integração de tecnologias como BIM, JIT e IoT, juntamente com a priorização de componentes e o levantamento detalhado dos materiais, são soluções essenciais para enfrentar os desafios logísticos e garantir a fluidez nas operações de construção industrializada.

4.3.3.2. Transporte Flexível (Log2)

A adoção de sistemas construtivos industrializados apresenta desafios e oportunidades logísticas consideráveis em termos de transporte. Entre os principais aspectos a serem considerados, o transporte flexível e multimodal surge como um fator relevante para garantir a eficiência e viabilidade desses sistemas. Estudos têm explorado as vantagens e limitações do uso de diferentes modos de transporte combinados, como terrestre, marítimo e ferroviário, assim como a adaptação de rotas,

para otimizar a movimentação de grandes módulos e componentes, ao mesmo tempo em que se reduz o impacto ambiental e se aumenta a eficiência logística. Os artigos analisados ressaltam a importância do planejamento logístico rigoroso e dinâmico, destacando que a flexibilidade e a integração de diferentes modos de transporte são essenciais para mitigar riscos e otimizar os processos.

A combinação de diferentes modos de transporte, como rodoviário, ferroviário e marítimo, permite uma melhor integração e otimização das rotas de transporte, especialmente em cenários de modularização. O transporte por barcaças, por exemplo, tem se mostrado eficiente em termos de redução de emissões de gases de efeito estufa (GHG), podendo reduzir em até 58% as emissões comparadas ao transporte exclusivamente rodoviário. Além disso, o uso de centros de consolidação e hubs logísticos possibilita a reutilização de recursos e otimização de rotas, promovendo maior eficiência e redução de custos (FUFA; VENÂS, 2023).

Outro ponto abordado por Hussein et al. (2023) é a importância de encontrar uma combinação ideal de modos de transporte e rotas que garantam a resiliência da cadeia de suprimentos em cenários de interrupção. Utilizando uma abordagem de logística multimodal, como caminhões e navios, o estudo busca otimizar o transporte de módulos pré-fabricados em projetos de construção modular integrada (MiC). A metodologia adotada combina simulação baseada em agentes (ABS) para modelar o comportamento e interações dos stakeholders, e simulação de eventos discretos (DES) para capturar as operações internas de transporte e construção, como o carregamento, despacho e armazenamento de módulos. Para refinar ainda mais as decisões, o estudo faz uso do design de experimentos (DOE), uma técnica que permite testar várias combinações de variáveis e identificar quais delas têm maior impacto no desempenho logístico, e da metamodelagem, que cria modelos matemáticos simplificados a partir dos resultados das simulações, facilitando a otimização de decisões complexas, como o número de caminhões, capacidade dos navios, tempos de despacho e armazenamento de módulos.

Essas ferramentas permitiram realizar uma análise detalhada e otimizar as decisões logísticas e de construção em um estudo de caso real em Hong Kong, reduzindo a duração do projeto em 28%, os custos totais em 50%, e as emissões de carbono em 17%. Através da metamodelagem, foi possível encontrar soluções

próximas do ideal de maneira eficiente, equilibrando o uso de recursos e minimizando atrasos e custos adicionais. O estudo enfatiza a importância da colaboração entre transportadores, operadores portuários e empreiteiros, para garantir um planejamento flexível, adaptável e sustentável, integrando diferentes modos de transporte para superar desafios logísticos e melhorar a eficiência geral da cadeia de suprimentos (HUSSEIN et al., 2023).

Liu, Siu e Lu (2016) discutem a logística na construção modular na fabricação offshore e a adoção de transporte multimodal. Destaca a necessidade de integrar diferentes modos de transporte (caminhões, navios e trens) para otimizar a entrega e montagem de módulos em projetos industriais, já que a falta de planejamento logístico pode causar atrasos significativos. Utilizando um modelo de simulação na plataforma Symphony, a pesquisa avaliou cenários logísticos em um estudo de caso em Alberta, Canadá, onde módulos foram fabricados offshore e transportados por várias rotas e modais. Foram analisados três cenários “what-if”, revelando que o equilíbrio entre recursos e tempo de espera nos pontos de descarregamento é essencial. O cenário mais eficiente obteve uma eficiência de entrega de 80%, indicando melhorias na cadeia logística e redução do tempo total do projeto, ressaltando a importância do planejamento logístico para evitar atrasos na entrega e instalação dos módulos.

Além disso, Dhiman e Sakpal (2023) abordam os desafios e soluções associados ao transporte multimodal em projetos de construção modular em larga escala, destacando a importância de um planejamento logístico eficiente para minimizar impactos no custo e cronograma do projeto. Utilizando transportadores modulares autopropelidos (SPMT) e embarcações/balsas, o estudo explora como mudanças nos parâmetros logísticos em fases avançadas exigem soluções de engenharia para garantir a integridade estrutural dos módulos durante o transporte sobre a terra e mar. Entre os desafios estão revisões nos valores de aceleração do mar e reconfigurações de trailers, que foram mitigados com o uso de embarcações mais robustas, gestão de viagens para evitar condições marítimas adversas, e reposicionamento estratégico dos módulos para reduzir os esforços nas estruturas.

Em conclusão, o transporte multimodal e flexível surge como uma solução viável para lidar com os desafios logísticos impostos pela construção modular e industrializada. A integração de diferentes modos de transporte, aliada ao

planejamento dinâmico e à flexibilidade nas rotas, permite otimizar a entrega de módulos, reduzir custos e mitigar impactos ambientais. Com a crescente demanda por soluções logísticas mais eficientes e sustentáveis, a adoção de estratégias multimodais promete ser um componente essencial para o sucesso de projetos que empregam sistemas construtivos industrializados.

4.3.3.3. **Atrasos Logísticos (Log3)**

Os atrasos logísticos na adoção de sistemas construtivos industrializados podem ser atribuídos a uma variedade de fatores. De acordo com a literatura, incertezas e variabilidades são causas predominantes. Flutuações nas condições climáticas, a disponibilidade de mão de obra e problemas de transporte podem afetar significativamente o cronograma de entrega dos materiais. Além disso, a falta de coordenação eficiente entre as operações logísticas e as atividades de construção resulta em descompassos críticos, levando a atrasos na execução. A limitação de espaço no canteiro de obras também contribui para esses atrasos, dificultando a movimentação de módulos e materiais (JIANG et al., 2024; ZHANG; ZHANG, 2024; HSU; AURISICCHIO; ANGELOUDIS, 2020).

O atraso na entrega de módulos ainda é um dos fatores de risco mais críticos que afetam os benefícios da construção modular. Por isso, a logística modular exige uma gestão de cronograma mais sofisticada do que os métodos de construção tradicionais, com uma necessidade maior de técnicas de monitoramento e simulação logísticas mais precisas para melhorar a coordenação da cadeia de suprimentos (LEE; LEE, 2021).

Um outro fator crítico é o planejamento logístico insuficiente, principalmente em relação à capacidade de transporte e à disponibilidade de recursos, como baias de descarregamento. A falta de uma estrutura adequada pode causar atrasos consideráveis na chegada dos materiais ao canteiro de obras (LIU; SIU; LU, 2016).

As condições climáticas adversas, como vento forte e chuvas intensas, também são uma das principais causas de interrupções em canteiros de obras, impactando a montagem de produtos modulares ((HSU; AURISICCHIO; ANGELOUDIS, 2019; HSU; ANGELOUDIS; AURISICCHIO, 2018). Além disso, a distância entre o armazém e o

local de construção é um fator que pode aumentar significativamente a chance de atrasos nas entregas (HSU; AURISICCHIO; ANGELOUDIS, 2019). A entrega tardia de produtos modulares, além de causar ociosidade de equipamentos e mão de obra, pode resultar em penalidades financeiras (HSU; AURISICCHIO; ANGELOUDIS, 2019).

Esses atrasos, muitas vezes, desencadeiam um efeito dominó, impactando não apenas a entrega de materiais, mas também a programação de montagem dos módulos e sua instalação no local, além de gerar ineficiências e a necessidade de ajustes constantes nas operações (LIU; SIU; LU, 2016; (SUNDQUIST; GADDE; HULTHÉN, 2018). Mais criticamente, os atrasos logísticos podem impactar diretamente a demanda por componentes e recursos no canteiro de obras. Quando o cronograma de construção é afetado, a demanda por componentes pré-fabricados se desalinha, criando um fluxo irregular de pedidos que aumenta a pressão sobre o inventário e a cadeia de suprimentos (ZHANG; ZHANG, 2024; BATAGLIN et al., 2017). Essa discrepância entre oferta e demanda pode elevar significativamente os custos de estocagem, ao mesmo tempo que aumenta a complexidade de reprogramar entregas (ZHANG; ZHANG, 2024; HSU; AURISICCHIO; ANGELOUDIS, 2020).

A falta de sincronização entre as entregas e o cronograma de montagem afeta diretamente a eficiência do projeto. Por exemplo, Čuš-Babič et al. (2014 apud BATAGLIN et al., 2017) mostram que a integração do BIM com dados de produção aumentou a confiabilidade na troca e atualização de informações, permitindo que 95% das cargas solicitadas fossem entregues no prazo. Essa integração reduziu o tempo de espera dos componentes e melhorou a produtividade da equipe de montagem, ao mesmo tempo que reduziu a necessidade de buffers de materiais, diminuindo, assim, os atrasos (BATAGLIN et al., 2017).

Além disso, estudos anteriores indicam que atrasos no canteiro de obras são a maior causa de desvios de cronograma (HSU; ANGELOUDIS; AURISICCHIO, 2018). A fragmentação da indústria da construção e a falta de comunicação entre os diversos atores envolvidos são fatores críticos que contribuem para a ineficiência, resultando em atrasos na entrega de materiais e na execução das atividades (SUNDQUIST; GADDE; HULTHÉN, 2018).

Para mitigar esses atrasos e seus impactos na demanda, várias soluções foram propostas na literatura. Uma abordagem eficaz é a implementação de um modelo baseado em dados em tempo real, que promove a sincronização das operações logísticas com as atividades de construção, melhorando a previsibilidade e reduzindo desvios (JIANG et al., 2024; BATAGLIN et al., 2017). A adoção de um modelo de otimização robusta, que leve em consideração incertezas de demanda e fatores externos como condições climáticas, permite o ajuste de planos de produção e transporte, além de sugerir a melhor localização para armazéns (HSU; AURISICCHIO; ANGELOUDIS, 2019; HSU; ANGELOUDIS; AURISICCHIO, 2018).

A integração de ferramentas como o BIM 4D, citada anteriormente, também é destacada como uma solução para melhorar o planejamento logístico. O uso do BIM permite uma melhor visualização e coordenação das atividades de montagem e transporte, garantindo que os componentes sejam entregues no momento certo, minimizando o risco de atrasos e sua influência na demanda de materiais e mão de obra (BATAGLIN et al., 2017).

A implementação de sistemas de *digital Twin*, junto da utilização de BIM e GIS (Sistemas de Informação Geográfica), pode prever riscos logísticos e calcular tempos estimados de chegada com base em diferentes cenários, proporcionando uma resposta mais ágil a eventuais atrasos (LEE; LEE, 2021). A formação de um modelo estocástico multiestágio para a programação de produção e transporte é outra solução promissora, pois ajuda a identificar planos que considerem as incertezas de demanda (HSU; AURISICCHIO; ANGELOUDIS, 2020). E o desenvolvimento de modelos de simulação, como o proposto no Symphony, também é um recurso relevante para identificar gargalos e otimizar processos de transporte e descarregamento (LIU; SIU; LU, 2016).

Além disso, a especialização das atividades de logística, como a transferência do manuseio de materiais para equipes especializadas, permite que os trabalhadores da construção se concentrem em suas tarefas principais, aumentando a eficiência e reduzindo interrupções (SUNDQUIST; GADDE; HULTHÉN, 2018). O planejamento antecipado, como a exigência de que os contratantes agendem entregas com antecedência, é outra estratégia eficaz para organizar o fluxo de materiais e minimizar atrasos (SUNDQUIST; GADDE; HULTHÉN, 2018).

Portanto, a complexidade dos atrasos logísticos na construção modular demanda uma abordagem inovadora e integrada para a gestão logística. A adoção de tecnologias avançadas e sistemas de informação pode melhorar a coordenação e a eficiência nas operações, minimizando os impactos negativos dos atrasos. As soluções propostas, que vão desde a sincronização das operações até a implementação de modelos automatizados e de otimização, destacam a importância de uma gestão logística bem planejada para o sucesso da construção industrializada e a garantia de que a oferta de materiais esteja sempre alinhada com a demanda do projeto. Além dos artigos supracitados, diversos outros estudos citam assuntos relacionados a uma melhoria da eficiência logística, consequentemente resultando em uma diminuição de atrasos.

4.3.3.4. Rota de Transporte Otimizada (Log4)

Na adoção de sistemas construtivos industrializados, a otimização das rotas de transporte dos componentes é uma questão relevante, não apenas para a eficiência logística, mas também para a sustentabilidade e redução de custos, especialmente em ambientes urbanos e comumente congestionados. A partir de uma análise detalhada da literatura, é possível identificar que a roteirização eficaz dos veículos, aliada ao uso de tecnologias avançadas e algoritmos de otimização, oferece oportunidades para aprimorar o desempenho do transporte de componentes na construção industrializada.

Liu et al. (2024), apresenta alguns estudos sobre a otimização de rotas de veículos com a adoção de inteligência artificial (IA) no contexto da construção modular. Esses estudos empregam diferentes métodos, como o uso de algoritmos evolucionários, incluindo algoritmos genéticos (GA), bem como modelos de planejamento de rota em tempo real para veículos guiados automaticamente. Um exemplo específico é o modelo multiuso de coleta e entrega modular, que visa otimizar a utilização de caminhões e reduzir os tempos de serviço. Embora esses métodos demonstrem avanços significativos, o artigo conclui que existe uma lacuna na literatura atual, principalmente no que se refere à integração ampla e abrangente de IA com a logística modular, destacando a necessidade de pesquisas que considerem

variáveis como os locais de armazenamento e as interdependências de carga e tempo nos processos de construção industrializada.

Eltoukhy et al. (2023) explora o problema de Roteirização de Veículos com Janelas de Tempo Múltiplas (MT-VRPTW-ES) no contexto de Construção Modular Integrada (MiC). O estudo propõe um modelo baseado em blockchain para gerenciar a alocação de recursos e otimizar rotas de veículos, considerando variáveis como a demanda por módulos, janelas de tempo em que os serviços devem ser realizados, períodos de tráfego, capacidade dos veículos e número de visitas. A interdependência entre as operações de construção e logística é ressaltada, evidenciando a necessidade de um planejamento que coordene as entregas com as atividades no canteiro de obras, permitindo que os recursos sejam disponibilizados conforme necessário. O objetivo da roteirização neste algoritmo é minimizar custos totais, que incluem custos de transporte, emissões de CO₂ e impactos sociais. Isso pode levar à análise de diferentes rotas para encontrar a solução que melhor atenda a esses critérios (ELTOUKHY et al., 2023).

A utilização de tecnologias avançadas, como digital twin, IoT, BIM e GIS, surge como uma solução integrada para otimizar as rotas de transporte e a roteirização de veículos na construção modular. Conforme discutido por Lee e Lee (2021), o digital twin simula diferentes cenários logísticos, considerando riscos potenciais, e permite a atualização em tempo real das rotas, o que é crucial para mitigar problemas como acidentes ou mudanças nas condições de tráfego. A atualização contínua de dados por meio de sensores IoT oferece uma visão detalhada do status logístico, assegurando que os veículos sigam as rotas mais eficientes e que o tempo ocioso seja minimizado. Além disso, a integração de diferentes fontes de dados, como BIM e GIS, evita a perda de informações e melhora a coordenação entre os stakeholders, possibilitando que decisões rápidas sejam tomadas quando imprevistos surgem durante o transporte. A abordagem com digital twin exemplifica um método de roteirização dinâmico, onde a análise de dados em tempo real e a simulação de cenários "what-if" contribuem para a escolha de rotas mais seguras e ágeis (LEE; LEE, 2021).

Huang et al. (2022) complementa discussão sobre rotas ótimas ao abordar a construção de Parques Industriais de Pré-fabricação (PBIPs), utilizando um modelo

de programação bi-nível para integrar a escolha da localização dos PBIPs e as rotas de transporte associadas. Nesse contexto, o planejamento logístico torna-se uma ferramenta estratégica para a sustentabilidade, pois a localização e a otimização das rotas influenciam diretamente os custos de transporte e as emissões de carbono. A consideração do tráfego e da congestão nas rotas garante que o planejamento logístico atenda tanto à eficiência operacional quanto aos objetivos ambientais (HUANG et al., 2022).

Liu, Siu e Lu (2016) abordam a criação de elementos de seleção de rotas em modelos de simulação, que são empregados para identificar as rotas viáveis para o transporte de materiais dentro da cadeia de suprimentos. Esses elementos tornam o processo logístico mais ágil, ao permitir que a escolha de rotas seja ajustada conforme as necessidades específicas dos projetos e as condições de transporte (LIU; SIU; LU, 2016).

Em resumo, a otimização das rotas de transporte na adoção de sistemas construtivos industrializados depende de uma abordagem integrada, que combina algoritmos de roteirização, análise geoespacial, tecnologias avançadas (como digital twin e IoT) e coordenação logística. A aplicação dessas técnicas promove não apenas a eficiência e a redução de custos, mas também atende aos requisitos de sustentabilidade e às demandas dinâmicas do setor da construção industrializada, especialmente em áreas urbanas. Vale ressaltar que, por esse motivo, a otimização de rotas de transporte é abordada de forma indireta em diversos estudos que tratam sobre otimização de custos e análise de impacto ambiental, uma vez que as distâncias percorridas entram como um fator crítico para essas análises, contudo poucos estudos tratam diretamente o tema.

4.3.3.5. **Controle de Inventário (Log5)**

A adoção de sistemas construtivos industrializados enfrenta desafios complexos em termos de gestão e controle de inventário, especialmente devido ao espaço limitado e à diversidade das operações distribuídas nos canteiros de obra, que podem resultar em desperdício de material e atrasos no planejamento em caso de má gestão (JIANG et al., 2024). Com o intuito de superar esses problemas, os artigos

estudados apontam algumas soluções, entre elas: JIT, IA, digital twins, modelos de programação estocástica, BIM e IMS. Os principais aspectos identificados para cada solução serão apresentados na sequência.

A adoção de um Sistema de Gestão de Inventário (IMS) pode ser útil no controle de inventário em projetos de construção modular. O IMS permite monitorar o status dos materiais, prever a demanda e identificar itens faltantes, o que pode ajudar a minimizar atrasos e custos. Além disso, ao padronizar procedimentos, o sistema pode facilitar a colaboração entre os envolvidos na gestão do inventário (LIU; HUANG; JIANG, 2024).

O uso de princípios como o Just-in-Time se também pode trazer benefícios ao coordenar a entrega de materiais e evitar o acúmulo de estoques desnecessários, que podem comprometer o espaço e a eficiência logística (ZHANG; ZHANG, 2024; BATAGLIN et al., 2017). A implementação do JIT reduz a necessidade de grandes buffers e minimiza o desperdício de materiais, melhorando a transparência no processo logístico e evitando o armazenamento excessivo no local, tanto de fabricação quanto no canteiro, o que é crucial em ambientes urbanos com espaço limitado (ASRI et al., 2016b). Dessa forma, práticas como a sincronização entre produção e montagem no local, associadas ao planejamento detalhado e à gestão de espaço, promovem a eficiência e a continuidade do projeto, evitando a necessidade de paralizações das linhas de produção (PEIRIS et al., 2023; BORTOLINI; FORMOSO; VIANA, 2019; HSU; ANGELOUDDIS; AURISICCHIO, 2018).

Além disso, a utilização de tecnologias emergentes, como a inteligência artificial e o aprendizado de máquina, podem contribuir para a eficiência da cadeia de suprimentos ao otimizar o uso de espaços e prever demandas futuras, abordando lacunas existentes na pesquisa sobre logística enxuta e gestão de inventário em obras industrializadas (LIU et al., 2024).

A sincronização em tempo real, como a otimização online e o uso de modelos digitais (Digital Twins), também ajuda a melhorar a resiliência e a flexibilidade da gestão de inventário em ambientes incertos. Os resultados sugerem que o modelo é capaz de atingir soluções quase otimizadas, apresentando melhorias consideráveis no tempo de ciclo, especialmente em ambientes com incertezas (JIANG et al., 2024).

Um outro exemplo dessa abordagem tecnológica é o uso de modelos de programação estocástica, que permitem ajustar os níveis de inventário com base nas demandas incertas do projeto, otimizando o armazenamento em diferentes locais, como fábricas, armazéns e canteiros de obras (HSU; AURISICCHIO; ANGELOUDIS, 2020). Isso ajuda a reduzir a necessidade de transporte frequente e, conseqüentemente, diminui os custos e impactos ambientais associados. O modelo de programação estocástica em multiestágios apresentado no estudo de Hsu, Aurisicchio e Angeloudis (2020) busca a otimização dos custos operacionais em projetos de construção modular, que englobam custos relacionados à produção, transporte e armazenamento dos módulos. Esse modelo considera variáveis relacionadas à definição da demanda incerta para definição da taxa de produção, os níveis de estoque no armazém, na fábrica e no canteiro de obra, número de veículos disponíveis, assim como custos fixos e variáveis. Para efeitos de comparação, esse modelo em multiestágios resultou em uma redução de custos operacionais de £31,644 em comparação com o modelo de programação em duas etapas (2SP), apresentado por Hsu, Aurisicchio e Angeloudis (2018) o que representa uma melhoria de 7,44%.

Além disso, a adoção do BIM também desempenha um papel crucial na melhoria da gestão de inventário e logística na construção modular. Ferramentas BIM, especialmente em 4D, permitem a simulação de diferentes cenários de produção e logística, sincronizando as atividades da fábrica com as do canteiro de obras. O uso de BIM facilita a visualização do progresso do projeto e melhora a coordenação entre diferentes departamentos, resultando em processos mais eficientes e uma redução significativa dos estoques e do tempo de transporte (BORTOLINI; FORMOSO; VIANA, 2019; BATAGLIN et al., 2017).

Diante disso, percebe-se que a gestão de inventário em sistemas construtivos industrializados depende do uso de práticas como Just-in-Time e tecnologias avançadas para otimizar o espaço e reduzir desperdícios. No entanto, ainda há lacunas na aplicação dessas tecnologias e na integração de logística enxuta, indicando a necessidade de mais pesquisas para aprimorar a eficiência da cadeia de logística desses sistemas construtivos.

4.3.3.6. Custo Logístico (Log6)

A adoção de sistemas construtivos industrializados em projetos de construção modular demanda um planejamento logístico detalhado, uma vez que a complexidade e os custos associados ao transporte e armazenamento de componentes pré-fabricados podem ser mais do que o dobro em comparação à construção tradicional (LEE et al., 2021). Os custos logísticos em sistemas de construção modular envolvem uma gama variada de elementos, incluindo transporte, manuseio e armazenamento temporário em canteiros de obras, que requerem uma integração estreita entre planejamento de produção e gestão de inventário (ZHANG; ZHANG, 2024).

A aplicação de modelos de otimização robustos oferece soluções para gerenciar as incertezas inerentes aos projetos de construção modular. Nesse sentido, um Programação Estocástica de Dois Estágios (2SP) é utilizado para melhorar a configuração da cadeia de suprimentos modular. Ele avalia custos de fabricação, transporte e armazenamento e propõe um sistema just-in-time que reduz a necessidade de estoques elevados e agiliza as entregas conforme a demanda, promovendo assim a minimização dos custos totais e aumentando a eficiência logística (HSU; ANGELOUDIS; AURISICCHIO, 2018).

Apesar de sua eficiência, o 2SP limita a tomada de decisões a apenas duas etapas, o que reduz a flexibilidade em resposta a incertezas. Em contraste, o modelo de Programação Estocástica Multiestágio (MSP) permite revisões contínuas das decisões à medida que novas informações sobre a demanda surgem, tornando-a mais adequada para projetos de construção modular. Essa abordagem resulta em soluções mais econômicas e avessas ao risco, destacando a eficácia do MSP em ambientes dinâmicos (HSU; AURISICCHIO; ANGELOUDIS, 2020). Como apresentado na análise do Log5 (Controle de Inventário, o uso (MSP) demonstrou uma redução substancial nos custos operacionais, além de maior estabilidade financeira em cenários de incerteza na demanda (HSU; AURISICCHIO; ANGELOUDIS, 2020).

Adicionalmente, um outro modelo de otimização robusta (RO) apresentado por Hsu, Aurisicchio e Angeloudis (2019) buscou apresentar uma abordagem que acomodasse diferentes níveis de aversão ao risco para tomadores de decisão, permitindo lidar com incertezas em variáveis, como demanda e atraso na entrega, no contexto de projetos modulares. O modelo considera variáveis de design que são

fixadas referentes a configuração da cadeia de suprimento, e variáveis de controle que podem ser ajustadas em resposta a flutuações imprevistas, como falhas mecânicas e variações de produtividade. A estratégia abrange cenários múltiplos e suas respectivas probabilidades de ocorrência, permitindo otimização do inventário e minimização dos custos totais. Os resultados sugerem uma configuração de inventário que equilibre a produção e a demanda ao longo do tempo, com a localização do armazém estabelecida para maximizar a eficiência.

De modo similar, outro estudo explora a utilização de modelos de otimização baseados em teoria dos jogos e blockchain para gerenciar a alocação de recursos e o roteamento de veículos. A aplicação do problema de roteamento de veículos com janelas de tempo (VRPTW) assegura que as restrições de tempo sejam atendidas, o que reduz custos operacionais e aumenta a eficiência logística (ELTOUKHY et al., 2023). A utilização do blockchain, além de melhorar a transparência e confiança entre as partes envolvidas, contribui para uma melhor coordenação e, assim, se mostrou eficaz na redução de custos operacionais e na melhoria da eficiência dos processos de construção modular integrada (ELTOUKHY et al., 2023).

Outro fator relevante é a consideração dos custos externos, os quais representam os impactos ambientais não arcados diretamente pelo poluidor, como poluição do ar e congestionamentos. A tradução desses impactos em termos monetários revela o impacto econômico das operações logísticas de construção, como discutido na análise da região de Bruxelas. Essa abordagem permite uma avaliação mais holística dos custos, que são frequentemente subestimados em análises de custo-benefício tradicionais (BRUSSELAERS et al., 2023). A adoção de estratégias de redução de emissões e o uso de modos de transporte alternativos também podem ser integrados a modelos de otimização para mitigar esses impactos, promovendo uma logística mais sustentável (BRUSSELAERS; FUFA; MOMMENS, 2022).

Nesse mesmo sentido, o Zhang e Zhang (2024) abordam a gestão de custos logísticos na entrega de componentes pré-fabricados em projetos de construção modular, propondo um sistema automatizado de gestão de entrega (PCDMS) que integra planejamento logístico com a programação de atividades de construção. A pesquisa destaca que a ineficiência na entrega de componentes pode resultar em

custos logísticos elevados, como sobrecarga de inventário e custos de "crashing" devido a atrasos. O modelo desenvolvido considera não apenas os custos diretos de transporte e armazenamento, mas também as emissões de carbono associadas, buscando um equilíbrio entre custo, tempo e sustentabilidade. Através de simulações, o estudo demonstra que a implementação de estratégias de entrega otimizadas pode reduzir significativamente os custos logísticos, permitindo que os contratantes realizem economias substanciais e melhorem a eficiência operacional em um ambiente de construção frequentemente marcado por incertezas e complexidades.

Outro modelo de otimização multiobjetivos, proposto por Zhu et al. (2021), se destaca por considerar simultaneamente os custos totais e as emissões de CO₂, adaptando-se a diferentes condições de custo e impacto ambiental durante o planejamento da cadeia de suprimentos. Esse modelo dinâmico de dois períodos permite que empresas ajustem suas estratégias logísticas conforme mudanças no custo e nas emissões de carbono (ZHU et al., 2021).

Finalmente, a adoção de práticas lean, como o Just-In-Time, que integra a produção e a logística, também se destaca como uma abordagem eficaz para otimizar custos. A implementação de sistemas de produção responsivos, pode permitir uma reação mais ágil às flutuações na demanda, o que resulta em menos desperdícios e uma eficiência operacional superior, principalmente ao reduzir o armazenamento prolongado de módulos pré-fabricados e permitindo que a produção responda a mudanças na demanda de forma ágil (PEIRIS et al., 2023).

Esse alinhamento entre planejamento logístico e de produção é fundamental em projetos de construção modular, onde os atrasos e falhas logísticas podem levar a aumentos consideráveis nos custos totais da cadeia de suprimentos (HUSSEIN et al., 2023). Um modelo de otimização apresentado no Hussein et al. (2023) visa minimizar simultaneamente a duração do projeto, os custos totais da cadeia de suprimentos (TSCC) e as emissões totais da cadeia de suprimentos (TSCE) por meio da identificação de variáveis de decisão e a aplicação de metamodelagem local para guiar a busca por soluções quase-ótimas (HUSSEIN et al., 2023).

Portanto, a eficiência logística em sistemas construtivos industrializados depende de um planejamento integrado, que envolva desde a gestão de custos diretos de transporte até a minimização dos custos externos e ambientais associados. O uso

de modelos de otimização e a aplicação de tecnologias avançadas são fundamentais para atingir um equilíbrio entre custo, tempo e sustentabilidade, promovendo a adoção de práticas de construção modular com um custo logístico otimizado e ambientalmente responsável.

4.3.3.7. Tempo de Ciclo (Log7)

A adoção de sistemas construtivos industrializados envolve desafios logísticos que afetam diretamente o tempo de ciclo dos projetos. O tempo de ciclo, entendido como o intervalo necessário para completar uma série de etapas logísticas e de montagem, é um dos indicadores fundamentais para a eficiência na construção modular. A minimização do tempo de ciclo depende de uma série de práticas logísticas que abordam desde o planejamento de entregas até a montagem dos módulos, e incluem a coordenação entre transportadores, a alocação de recursos, e o uso de ferramentas digitais para otimização.

Uma abordagem eficiente para minimizar o tempo de ciclo está no uso de simulações que possibilitam identificar gargalos e ajustar a programação das tarefas, otimizando o transporte e a alocação de recursos como baias de descarregamento e equipamentos de montagem (LIU; SIU; LU, 2016). Essa técnica permite um planejamento antecipado e a criação de um cronograma que considera possíveis variabilidades e restrições operacionais, especialmente em cenários complexos onde a coordenação de transporte é essencial para reduzir o tempo de espera e o tempo total de ciclo (JIANG et al., 2024).

Um aspecto central na redução do tempo de ciclo é a eficiência na entrega de materiais. O indicador "Eficiência da Entrega" mede a capacidade do sistema em transportar os módulos rapidamente entre as etapas, maximizando o uso dos recursos disponíveis. Um aumento na eficiência da entrega indica uma redução na ociosidade e, conseqüentemente, no tempo de ciclo total, já que os materiais chegam ao canteiro prontos para montagem sem atrasos significativos (LIU; SIU; LU, 2016). Ainda nessa linha, a "Relação de Espera" (WS) e a "Taxa de Ocupação" (OR) são indicadores de desempenho que ajudam a mensurar o tempo que os transportadores passam esperando, e a ocupação de áreas de descarregamento. Altos índices nesses

parâmetros podem indicar gargalos logísticos, e quando otimizados, contribuem para um fluxo contínuo e ágil das operações, reduzindo o tempo de ciclo (LIU; SIU; LU, 2016).

A utilização de modelos digitais, como o gêmeo digital, tem se mostrado eficaz na previsão e minimização do tempo de ciclo. A tecnologia de digital twin possibilita uma visibilidade em tempo real sobre o trajeto e o cronograma de montagem, o que é crucial para realizar ajustes imediatos em caso de desvios (LEE; LEE, 2021). Simulações de cenários "what-if", permitidas pelo digital twin, contribuem significativamente para a previsão de riscos e a minimização de tempos de espera desnecessários. Com o uso de sensores de GPS e outras tecnologias de IoT, é possível calcular com precisão o ETA (tempo estimado de chegada) dos módulos, o que facilita a sincronização das atividades na cadeia de suprimentos e reduz a ociosidade de equipamentos e mão de obra, melhorando o desempenho logístico do projeto (LEE; LEE, 2021). Essa coleta de dados em tempo real não apenas viabiliza o ajuste dinâmico de cronogramas, mas também reduz o tempo ocioso em processos logísticos, conforme demonstrado em um estudo onde a aplicação do digital twin reduziu significativamente o tempo ocioso em até 157,5 horas (LEE; LEE, 2021). Nesse mesmo sentido, o modelo desenvolvido pelo estudo de Jiang et al. (2024) apresentou uma boa eficiência na diminuição de três indicadores de desempenho: makespan (tempo total do projeto), holding time (tempo de espera dos materiais) e tardiness (atraso nas operações).

Outras práticas de gestão, como a aplicação de princípios de produção enxuta (Lean Production), colaboram para a minimização do tempo de ciclo. Com a adoção da produção puxada e a redução do tamanho de lotes, garante-se um fluxo mais ágil e adaptável, reduzindo a variabilidade e os tempos de espera entre as etapas de produção e montagem. A eliminação de atividades sem valor agregado e o uso do Last Planner System são abordagens que aumentam a confiabilidade do planejamento e garantem que os recursos e materiais estejam disponíveis no momento necessário, minimizando atrasos e otimizando o tempo de ciclo (BORTOLINI; FORMOSO; VIANA, 2019).

A implementação do BIM 4D, ao integrar cronogramas e visualização de operações logísticas, fornece um suporte valioso para o planejamento e a

coordenação, permitindo que as atividades logísticas sejam otimizadas em tempo real, o que reduz o tempo de ciclo e maximiza a eficiência das operações (BORTOLINI; FORMOSO; VIANA, 2019; BATAGLIN et al., 2017). Bataglin et al., (2017) destacam que, com a utilização do BIM, houve uma redução de 33% no tempo em que o gerente de obra gastava no planejamento do recebimento de cargas de estruturas de concreto pré-fabricado em um campus universitário. Isso foi alcançado pela eliminação de atividades que não agregavam valor, como a geração manual de listas de componentes e a comparação cruzada de informações, e simplificando a comunicação entre as equipes envolvidas. Esse tipo de tecnologia permite a visualização e o ajuste dinâmico dos cronogramas, promovendo uma coordenação eficaz que reduz o tempo de ciclo e melhora a produtividade (BATAGLIN et al., 2017).

Por fim, a programação de restrições, que visa minimizar o tempo de espera dos módulos no pátio de montagem e reduzir o desperdício de materiais, também se destaca como uma abordagem eficaz para a otimização do tempo de ciclo. Este tipo de modelo é utilizado para resolver problemas complexos de programação, integrando várias técnicas de pesquisa operacional, inteligência artificial e teoria dos gráficos. A metodologia integra informações de sistemas de gerenciamento logístico, documentos contratuais, dados sobre a disponibilidade de recursos, tempos de espera e condições de transporte, resultando em um plano de montagem ideal. A eficácia da abordagem é demonstrada por meio de um estudo de caso real em Alberta, no Canadá, que ilustra como a otimização pode melhorar a eficiência do processo de montagem e, conseqüentemente, a produtividade do setor de construção (LIU; LU, 2017).

Em síntese, a literatura destaca que a redução do tempo de ciclo na construção modular depende de uma combinação de planejamento logístico robusto, indicadores de desempenho precisos, tecnologias digitais avançadas, e práticas Lean. O uso de modelos de simulação, o monitoramento em tempo real com gêmeos digitais, e a integração do BIM 4D são estratégias que fortalecem a coordenação e a previsibilidade dos processos, minimizando atrasos e garantindo uma execução mais ágil e eficiente do projeto.

4.3.3.8. Localização e Proximidade das Instalações Logísticas (Log8)

A seleção de localizações logísticas em relação aos canteiros de obras é um tema importante, especialmente no contexto de projetos de construção modular e pré-fabricada. A proximidade dessas instalações aos canteiros de obras pode influenciar diretamente os custos de transporte, o tempo de entrega, a poluição ambiental e a competitividade de preços.

Huang et al., (2022) destacam que, em projetos de Parques Industriais de Pré-fabricação (PBIPs), a escolha da localização ideal deve equilibrar custos e benefícios ambientais. O estudo sugere que, embora a proximidade das instalações logísticas aos canteiros de obras possa reduzir custos de transporte e emissões de gases de efeito estufa, o modelo ideal de localização nem sempre é o mais próximo. A análise empírica realizada em Chongqing, China, ilustra como um modelo bi-nível pode ajudar a encontrar um ponto de equilíbrio entre a eficiência operacional e os benefícios ambientais, considerando os interesses tanto dos gestores dos parques industriais quanto dos clientes envolvidos (HUANG et al., 2022).

Dentro do modelo de otimização robusta apresentado por Hsu, Aurisicchio e Angeloudis (2019), é abordada a seleção de locais de armazéns para construção modular, destacando que a proximidade do armazém ao canteiro de obras é essencial para garantir a pontualidade das entregas. Devido à natureza just-in-time das entregas, qualquer interrupção no transporte pode afetar os cronogramas de montagem e resultar em penalidades por atrasos. O estudo sugere que locais de armazenamento bem localizados, com capacidade adequada e custo de estabelecimento controlado, são cruciais para garantir a eficiência logística e o sucesso dos projetos de construção modular (HSU; AURISICCHIO; ANGELOUDIS, 2019).

Esse modelo, permite a seleção da localização dos armazéns com base em uma análise que considera diversos fatores, como a probabilidade de atrasos nas entregas, a eficiência do transporte e a proximidade em relação ao canteiro de obras. O modelo utiliza dados históricos e probabilidades de ocorrências, como condições climáticas e tempos de transporte, para avaliar diferentes locais potenciais para os armazéns. Além disso, a análise inclui a avaliação dos custos associados a cada localização, como penalidades por atrasos e a eficiência na gestão de estoques. O

objetivo é identificar a localização que minimize os riscos de atrasos e maximize a eficiência operacional, garantindo que os módulos sejam entregues de forma pontual e que a montagem no local ocorra sem interrupções (HSU; AURISICCHIO; ANGELOUDIS, 2019).

Em modelos de otimização estocásticos, a distância entre os armazéns e o canteiro de obras emerge como um fator importante para o controle dos custos operacionais. Em ambientes urbanos, onde o espaço de armazenamento é limitado, é comum que esses armazéns sejam temporários e posicionados nos subúrbios, o que aumenta a complexidade da cadeia de suprimentos. A variabilidade na demanda por materiais, somada à necessidade de transporte especializado e rotas específicas, eleva os custos, tornando a distância uma variável central nos modelos. Esses modelos buscam otimizar a configuração logística ao considerar a incerteza nas demandas e minimizar tanto o impacto da distância quanto os custos associados, garantindo um equilíbrio entre eficiência e viabilidade operacional (HSU; AURISICCHIO; ANGELOUDIS, 2020).

Além disso, Yi, Zhen e Jin (2021) mencionam as instalações de produção de concreto pré-moldado que são mais próximas aos canteiros de obras pode reduzir substancialmente as emissões de gases de efeito estufa relacionadas ao transporte, além de impactar positivamente os custos de transporte. Além disso, o estudo sugere que subsídios governamentais precisam ser cientificamente projetados para incentivar a utilização de concreto pré-moldado regional e reduzir as emissões de transporte, destacando a importância de uma localização estratégica das instalações logísticas em projetos de construção modular (YI; ZHEN; JIN, 2021).

Portanto, a proximidade e localização das instalações logísticas em relação aos canteiros de obras desempenham um papel fundamental na redução de custos, melhora da eficiência e minimização de impactos ambientais, como ressaltado nos artigos citados. A escolha estratégica desses locais pode contribuir significativamente para o sucesso de projetos de construção modular e pré-fabricada, desde que sejam considerados fatores econômicos, operacionais e ambientais.

4.3.3.9. Regulamentações de Transporte (Log9)

A adoção de sistemas construtivos industrializados depende de uma logística de transporte eficiente, o que exige uma consideração atenta das regulamentações de transporte impostas em áreas urbanas e rodoviárias, gerando desafios, principalmente, devido às restrições de tamanho, peso e rotas específicas para o transporte de módulos. Estudos estimam que as atividades logísticas de construção off-site representam entre 20% e 35% do tráfego urbano de carga na União Europeia, gerando uma carga ambiental significativa em áreas urbanas, o que leva as autoridades a buscarem estratégias mais eficazes para regulamentação e monitoramento do (BRUSSELAERS et al., 2023).

No contexto urbano, a regulamentação do transporte de carga é essencial para reduzir a poluição, melhorar a segurança no trânsito e mitigar congestionamentos. Para enfrentar essa complexidade, tecnologias de coleta de dados digitais, como unidades de bordo (On-Board Units - OBU) e GPS, possibilitam um monitoramento mais preciso do impacto ambiental causado pelo tráfego de construção. Isso permite que as cidades estimem a contribuição da construção ao tráfego e implementem estratégias mais eficazes para reduzir seus impactos ambientais (BRUSSELAERS et al., 2023).

Além disso, o transporte de módulos na construção modular também é afetado por regulamentações específicas de peso e dimensões. Como descrito por Lee e Lee (2021), caminhões que transportam módulos de construção devem obedecer a limites rigorosos, tanto de peso quanto de tamanho, que variam conforme a legislação local. Essas restrições obrigam os transportadores a planejar rotas específicas, muitas vezes exigindo permissões adicionais e o acompanhamento de veículos de escolta para garantir a segurança nas vias. Essas exigências, combinadas com restrições de velocidade e limitações de infraestrutura, impactam diretamente o planejamento e a execução de projetos de construção modular, uma vez que qualquer desvio dos regulamentos pode causar atrasos e custos adicionais.

A proposta de um "gêmeo digital" se destaca como uma solução inovadora para prever e mitigar os riscos associados à regulamentação de transporte. Integrando dados de BIM e GIS, o gêmeo digital permite uma simulação de cenários logísticos que consideram as restrições de transporte e otimiza rotas, reduzindo os atrasos e

maximizando a eficiência. Essa abordagem, aplicada com sucesso em um projeto piloto em Seattle, melhorou a coordenação logística e o cumprimento de prazos na entrega de módulos, oferecendo uma visão prática sobre o uso de tecnologias digitais para aprimorar a logística na construção modular (LEE; LEE, 2021).

Além das regulamentações urbanas, em projetos que exigem o transporte marítimo, como a construção modular para regiões portuárias, leis específicas podem impor restrições adicionais. Por exemplo, uma lei federal dos EUA, a Lei Jones, exige que o transporte marítimo entre portos dos EUA seja realizado em embarcações de bandeira americana, restringindo o acesso a transportadores internacionais e elevando os custos de logística para esses projetos de grande porte (STOCK, 2023). Essa situação exemplifica como a regulamentação pode limitar a flexibilidade na escolha dos métodos de transporte, impactando a escolha dos equipamentos e as rotas a serem seguidas.

Portanto, a regulamentação de transporte no contexto da construção industrializada é um aspecto importante que influencia tanto o planejamento quanto a execução dos projetos. Soluções tecnológicas e inovações, aliadas ao entendimento das regulamentações, são fundamentais para mitigar os desafios impostos, promovendo uma maior eficiência e sustentabilidade no setor de construção industrializada.

4.3.3.10. Padronização das Atividades Logísticas (Log10)

Para implementar com sucesso sistemas construtivos industrializados é essencial adotar práticas logísticas padronizadas e sistemas integrados de gestão. De acordo com Liu, Huang e Jiang (2024), um dos principais desafios nessa abordagem é a complexidade da coordenação entre os diversos stakeholders, como clientes, designers, engenheiros, fornecedores e contratantes. A padronização dos procedimentos logísticos e a integração de informações por meio de sistemas como o BIM visam resolver essa fragmentação, facilitando a acessibilidade aos dados, o rastreamento de materiais e a gestão de inventário, e assim otimizando a eficiência das operações logísticas (LIU; HUANG; JIANG, 2024).

A implementação de Procedimentos Operacionais Padronizados (SOPs) e de Sistemas de Gerenciamento de Inventário (IMS), conforme descrito por Liu, Huang e Jiang (2024), também se mostra essencial para gerenciar a logística em construções modularizadas. Os SOPs definem diretrizes claras para operações como o registro de materiais e a realização de auditorias, enquanto a documentação padronizada aumenta a transparência e facilita a auditoria e a análise de dados. A visibilidade em tempo real, proporcionada por esses sistemas, permite uma gestão de inventário mais eficaz, essencial para reduzir a perda de tempo e custos com a busca por materiais.

A padronização logística é um elemento central para melhorar o desempenho em projetos de construção modular, especialmente pela necessidade de uma conexão eficaz entre as operações locais e externas. Conforme discutido por Sundquist, Gadde e Hulthén (2018), a reorganização das práticas logísticas pode reduzir a fragmentação e melhorar a interação entre stakeholders, fator crítico em um setor onde as relações e a coordenação são complexas e múltiplos atores devem trabalhar de maneira coesa. Um dos pontos levantados é que a fragmentação e a falta de confiança dificultam a implementação de práticas logísticas integradas e colaborativas, mas a padronização e os sistemas integrados de gestão podem ser uma estratégia promissora para superar esses desafios, promovendo um ambiente mais eficiente e colaborativo para todos os envolvidos (SUNDQUIST; GADDE; HULTHÉN, 2018).

No contexto da construção modular e de projetos sob demanda (engineer-to-order), a padronização logística se relaciona não apenas com a redução de variabilidade nas operações de transformação, mas também nas operações logísticas. Essas atividades, muitas vezes vistas como atividades sem valor agregado, são fundamentais para garantir a previsibilidade e a eficiência no processo de montagem e na implementação de sistemas de produção puxada (pull production). A padronização logística, associada a sistemas de gestão integrados como o Last Planner System (LPS), contribui para proteger a produção da variabilidade e garantir que os insumos necessários estejam disponíveis no momento certo (BORTOLINI; FORMOSO; VIANA, 2019).

O uso do BIM também se destaca na padronização e documentação dos processos operacionais, ao permitir que todos os participantes do projeto acessem um modelo compartilhado e atualizado, promovendo uma coordenação eficaz entre

as equipes. Além de facilitar a visualização e simulação de fluxos logísticos, o BIM possibilita o monitoramento do desempenho dos processos, permitindo ajustes baseados em feedback contínuo e alinhando-se aos princípios de melhoria contínua da filosofia Lean (BORTOLINI; FORMOSO; VIANA, 2019).

Essa padronização logística possibilita uma melhor coordenação entre as operações de manufatura e as atividades no canteiro de obras, permitindo a integração de tecnologias como o Lean Project Delivery System (LPDS) que é uma abordagem para a gestão de projetos de construção que visa integrar as diversas fases do processo, como design, construção e operação, promovendo uma colaboração estreita entre todos os stakeholders envolvidos. Ao contrário dos métodos tradicionais que tratam essas fases de forma isolada, o LPDS enfatiza a importância do planejamento e da preparação antecipada, garantindo que todos os recursos e informações necessárias estejam disponíveis no momento certo, o que resulta na redução de desperdícios e custos. Além disso, o sistema incentiva uma cultura de melhoria contínua, onde as equipes são motivadas a identificar e implementar melhorias nos processos, alinhando-se aos princípios do Kaizen. Dessa forma, o LPDS é especialmente adequado para aproveitar a integração de componentes pré-fabricados e modulares no processo de planejamento (HERMES, 2015).

Como apresentado, a adoção de sistemas como o Building Information Modeling (BIM), e o Enterprise Resource Planning (ERP) e o Geographic Information System (GIS) têm desempenhado um papel central ao facilitar o compartilhamento de informações em tempo real. No entanto, os sistemas ou plataformas de informação atuais operam de maneira centralizada, o que gera problemas de segurança da informação (WU et al., 2022).

Por isso, a aplicação da tecnologia blockchain surge como uma alternativa para aprimorar a segurança e a descentralização das informações logísticas, como sugerido por Wu et al. (2022). Esse sistema proporciona maior rastreabilidade e responsabilidade dos produtos durante o transporte e armazenamento, oferecendo uma solução para as assimetrias de informação que podem surgir em um ambiente colaborativo como o da construção modular. Essa abordagem descentralizada é

importante para garantir que todos os stakeholders tenham acesso simultâneo e seguro aos dados necessários para a tomada de decisão.

Portanto, a padronização dos processos logísticos, aliada a sistemas integrados de gestão como o BIM e o LPS, apresenta-se como uma abordagem estratégica para otimizar a logística na construção modular e pré-fabricada. Esses sistemas não apenas asseguram uma gestão mais eficiente dos materiais, mas também promovem a colaboração entre os diferentes stakeholders, minimizam os riscos de erros e perdas e permitem uma adaptação flexível às necessidades específicas de cada projeto.

4.3.3.11. Transporte Verde (Log11)

A adoção de sistemas construtivos industrializados exige um planejamento logístico cuidadoso, especialmente em relação ao transporte verde e à redução de emissões de poluentes, fatores fundamentais para tornar o setor mais sustentável e atender às regulamentações ambientais cada vez mais rigorosas. O transporte verde visa reduzir a emissão de gases de efeito estufa (GHG) e minimizar os impactos ambientais, considerando tanto os custos econômicos quanto as implicações ambientais e a poluição em áreas urbanas.

Contudo, a falta de dados precisos sobre os fluxos logísticos urbanos é um obstáculo significativo para a realização de cálculos de impacto confiáveis, pois impede a consideração de variáveis cruciais que influenciam as externalidades ambientais e sociais do transporte na construção (BRUSSELAERS et al., 2020). Para isso, o uso de tecnologias como GPS e análise geoespacial contribui significativamente para uma logística mais sustentável, pois permite uma avaliação precisa das rotas e das distâncias percorridas pelos veículos. A integração dessas tecnologias proporciona uma redução dos chamados "custos externos", que incluem o impacto ambiental e social não arcado diretamente pelos poluidores, mas que afeta a sociedade como um todo (i.e., custos de danos ambientais, como a poluição do ar), conforme detalhado por (BRUSSELAERS et al., 2023).

Nesse sentido, modelos multiobjetivo têm sido empregados para equilibrar os custos de transporte e as emissões de carbono. Esses modelos permitem a seleção

de fornecedores e o planejamento de rotas que não apenas minimizam o custo, mas também reduzem a pegada de carbono das entregas. Alguns cenários, por exemplo, atribuem valores monetários às emissões, o que incentiva a escolha de fornecedores e métodos que reduzem o impacto ambiental, enquanto outros oferecem opções que equilibram custo e emissões, promovendo tomadas de decisão informadas e ambientalmente conscientes, dessa forma permite-se que sejam feitos trade-offs abrangentes entre custo e impacto ambiental (ZHANG; ZHANG, 2024).

O Eltoukhy et al. (2023) introduzem o modelo MT-TVRPTW-ES, que leva em consideração tanto o impacto ambiental quanto o social, além da eficiência econômica. Esse modelo de roteamento de veículos utiliza abordagens como a otimização de rotas para reduzir a pegada de carbono. Essa integração entre alocação de recursos e planejamento de rotas permite que as operações de transporte sejam conduzidas de forma mais sustentável e responsável, em linha com os objetivos globais de desenvolvimento sustentável.

Já Brusselaers, Fufa e Mommens (2022) abordam um framework de sustentabilidade para avaliar a logística de construção, especialmente em áreas urbanas que visam metas de zero emissão até 2035. A pesquisa destaca que, embora os caminhões elétricos apresentem grande potencial para reduzir o impacto ambiental, a eficácia depende da infraestrutura e da capacidade de mercado para fornecer veículos que atendam à demanda de transporte. Sem essa infraestrutura adequada, o impacto positivo pode ser compensado por congestionamentos adicionais.

Em outra abordagem, o Fufa e Venãs (2023) indicam que estratégias como a eletrificação dos veículos e uso de modais alternativos, com a transição do transporte rodoviário para alternativas mais sustentáveis como trens e barcaças, destacam-se como soluções de grande potencial para reduzir as emissões no transporte de materiais pesados. Como já mencionado anteriormente no Log2 (Transporte Flexível) o estudo indica que a transição para modos de transporte de baixo carbono pode diminuir as emissões de GHG em até 58%, tornando-se uma alternativa viável e impactante para projetos de construção de grande escala.

Além da implementação de tecnologias de baixo carbono, a criação de políticas de incentivo, como subsídios para o uso de concreto pré-moldado produzido

regionalmente, também pode promover práticas mais sustentáveis. Esses subsídios, quando bem desenhados, incentivam a produção local, reduzindo as distâncias de transporte e, portanto, as emissões associadas. No entanto, um subsídio mal estruturado pode gerar efeitos adversos, como o aumento das emissões de GHG e o desestímulo à produção regional, comprometendo a sustentabilidade (YI; ZHEN; JIN, 2021).

Por fim, é fundamental considerar os aspectos de localização e a infraestrutura de transporte ao planejar os Parques Industriais de Pré-fabricação (PBIPs). De acordo com Huang et al. (2022), um modelo de localização que minimize as emissões e os custos de transporte contribui significativamente para um desenvolvimento urbano sustentável. Esse estudo também enfatiza a importância de um “raio econômico de transporte”, onde a escolha de distâncias estratégicas pode reduzir as emissões de carbono e custos, equilibrando a eficiência econômica e a sustentabilidade.

Essas abordagens de transporte sustentável e otimização logística nos estudos revisados demonstram que a construção modular e pré-fabricada pode ser significativamente aprimorada ao integrar tecnologias que visam à redução de emissões, ao incentivar políticas públicas e a adoção de veículos de baixo impacto ambiental. A diversidade das estratégias reforça a necessidade de adaptação das práticas de transporte para se alinhar com as metas ambientais e os requisitos de responsabilidade social, criando um impacto positivo e sustentável no ambiente urbano.

4.3.4. Resumo sobre a análise da RSL

Diante do grande volume de informação presente na análise da RSL, buscou-se fazer uma síntese das principais ideias apontadas em cada aspecto estudado. Este resumo está apresentado no **Quadro 4.3**, abaixo.

Quadro 4.3: Resumo da Análise da RSL

Aspecto Logístico	Principais observações
Manuseio dos Módulos (Log1)	<ol style="list-style-type: none"> 1. A eficácia do manuseio de módulos depende de coordenação precisa e planejamento estratégico, desde o transporte até a instalação. 2. Manuseio ineficiente pode causar danos estruturais e atrasos, comprometendo o sucesso do projeto. Sendo necessário, um planejamento detalhado e agendamento cuidadoso das entregas para evitar manuseios extras, atrasos e retrabalhos no projeto. 3. Tecnologias como gêmeos digitais, IoT e BIM 4D auxiliam na visualização, coordenação e monitoramento em tempo real, otimizando o processo. 4. O Just-in-Time reduz a necessidade de armazenamento e minimiza o risco de danos e desperdícios. 5. A integração entre transporte e montagem e a seleção adequada de equipamentos, como guindastes, são essenciais para um manuseio seguro e eficiente. 6. Soluções inovadoras, como o uso de drones em áreas congestionadas, aprimoram a eficiência e segurança no canteiro de obras.
Transporte Flexível (Log2)	<ol style="list-style-type: none"> 1. O transporte multimodal (rodoviário, ferroviário e marítimo) permite otimização das rotas e redução de custos e emissões. 2. Centros de consolidação e hubs logísticos aumentam a eficiência e promovem a reutilização de recursos. 3. A combinação ideal de modais de transporte melhora a resiliência da cadeia de suprimentos, especialmente em cenários de interrupção. 4. Ferramentas como simulação e metamodelagem auxiliam na tomada de decisões complexas, otimizando recursos e minimizando custos. 5. Colaboração entre transportadores e operadores portuários é essencial para um planejamento flexível e sustentável. 6. O planejamento dinâmico e a integração de modais facilitam a entrega de módulos, mitigando impactos ambientais e logísticos.

<p>Atrasos Logísticos (Log3)</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Incertezas como clima, disponibilidade de mão de obra e transporte afetam significativamente o cronograma de entrega de materiais. 2. Falta de coordenação entre logística e construção gera descompassos e atrasos na execução. 3. A logística modular exige gestão de cronograma avançada, com técnicas de monitoramento precisas para evitar atrasos. 4. Planejamento logístico insuficiente e problemas de transporte e descarregamento afetam a entrega no canteiro de obras. 5. A integração de BIM e Digital Twin auxilia na previsão de riscos e sincronização de operações logísticas. 6. A especialização das atividades e o planejamento antecipado de entregas melhoram a eficiência e reduzem os atrasos.
<p>Rota de Transporte Otimizada (Log4)</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. A otimização de rotas de transporte melhora a eficiência logística e reduz custos, especialmente em áreas urbanas congestionadas. 2. Tecnologias como inteligência artificial (IA), algoritmos genéticos e modelos de planejamento em tempo real otimizam a roteirização de veículos na construção modular. 3. Modelos com blockchain, janelas de tempo e variáveis operacionais minimizam custos e emissões, sincronizando entregas com atividades do canteiro. 4. Tecnologias como digital twin, IoT, BIM e GIS integram dados e aprimoram a gestão logística em tempo real, reduzindo o tempo ocioso e prevenindo problemas. 5. A escolha estratégica de localização de parques industriais pré-fabricados otimiza rotas, reduz emissões e impactos do tráfego na sustentabilidade logística. 6. A integração de algoritmos e análise geoespacial oferece soluções para rotas ágeis e seguras, promovendo eficiência, sustentabilidade e alinhamento ambiental.
<p>Controle de Inventário (Log5)</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. A gestão de inventário enfrenta desafios de espaço e coordenação em obras urbanas com operações distribuídas, o que pode causar desperdício e atrasos. 2. O Just-in-Time coordena entregas de materiais para evitar estoques excessivos e otimizar o espaço, essencial em áreas limitadas. 3. Tecnologias como IA e aprendizado de máquina otimizam o uso de espaço e preveem demandas, contribuindo para uma logística enxuta. 4. A sincronização em tempo real com Digital Twins aprimora a resiliência do inventário, reduzindo atrasos e tempos de espera.

	<ol style="list-style-type: none"> 5. Modelos de programação estocástica ajustam estoques conforme demanda incerta, reduzindo transporte e custos operacionais. 6. O Building Information Modeling (BIM) em 4D melhora a visualização e a coordenação, otimizando o fluxo logístico e o planejamento.
<p style="text-align: center;">Custo Logístico (Log6)</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Sistemas de construção modular apresentam custos logísticos elevados, demandando planejamento detalhado para transporte e armazenamento de componentes pré-fabricados. 2. Modelos de otimização, como a Programação Estocástica Multiestágio (MSP) e otimização robusta (RO), ajudam a reduzir custos logísticos e aumentar a estabilidade financeira em cenários incertos. 3. Tecnologias como blockchain e teoria dos jogos são aplicadas para melhorar a transparência e eficiência na alocação de recursos, com foco na redução de custos operacionais. 4. Custos externos, como impacto ambiental, também devem ser considerados, permitindo uma avaliação mais abrangente dos custos logísticos em construção modular. 5. Estratégias como Just-In-Time e práticas lean otimizam custos ao alinhar produção e logística, diminuindo desperdícios e o armazenamento excessivo.
<p style="text-align: center;">Tempo de Ciclo (Log7)</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. O tempo de ciclo na construção modular depende de práticas logísticas eficientes, como o planejamento de entregas e a coordenação entre transportadores e recursos. 2. A simulação de cenários permite identificar gargalos logísticos, otimizar alocações de recursos e criar cronogramas que minimizam o tempo de ciclo. 3. Indicadores de desempenho, como "Eficiência da Entrega" e "Taxa de Ocupação", ajudam a monitorar e reduzir tempos de espera e ociosidade de materiais e equipamentos. 4. A integração de BIM 4D facilita a coordenação e visualização logística, promovendo uma execução mais ágil e eficaz das operações. 5. Abordagens Lean, como produção puxada e redução de lotes, ajudam a reduzir variabilidade e tempos de espera, otimizando o tempo de ciclo. 6. A combinação de tecnologia e planejamento robusto aumenta a coordenação e previsibilidade, minimizando atrasos e promovendo uma execução eficiente.

<p>Localização e Proximidade das Instalações Logísticas (Log8)</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. A proximidade reduz custos de transporte, melhora a pontualidade das entregas e diminui as emissões de gases de efeito estufa. 2. No entanto, a localização ideal nem sempre é a mais próxima, sendo necessário equilibrar benefícios ambientais e operacionais. 3. Capacidade regional das instalações deve ser considerada para evitar transporte de longa distância e custos elevados, sendo importante o apoio de subsídios governamentais. 4. Armazéns próximos ao canteiro ajudam a garantir entregas just-in-time e evitam penalidades por atrasos, especialmente em construção modular. 5. Em ambientes urbanos, a distância entre armazéns e canteiro impacta os custos operacionais, tornando a localização estratégica essencial para eficiência logística.
<p>Regulamentações de Transporte (Log9)</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. A construção modular depende de uma logística eficiente, que é influenciada por restrições de tamanho, peso e rotas específicas para o transporte de módulos. 2. Regulamentações urbanas de transporte visam reduzir a poluição, melhorar a segurança no trânsito e diminuir congestionamentos. 3. Tecnologias como OBUs e GPS facilitam o monitoramento dos impactos ambientais do tráfego de construção em áreas urbanas. 4. Restrições de peso e dimensões para o transporte de módulos exigem planejamento específico e podem acarretar custos e atrasos. 5. Em projetos portuários, regulamentações como a Lei Jones nos EUA limitam o transporte marítimo e aumentam custos logísticos.
<p>Padronização das Atividades Logísticas (Log10)</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. A padronização e sistemas integrados, como BIM e LPS, otimizam a logística em construções modularizadas, garantindo eficiência e redução de custos. 2. A coordenação eficaz entre stakeholders é essencial para superar a fragmentação e melhorar a colaboração nos projetos. 3. Procedimentos Operacionais Padronizados (SOPs) e Sistemas de Gerenciamento de Inventário (IMS) aumentam a transparência e facilitam a auditoria e a gestão de inventário em tempo real. 4. A integração de tecnologias como o BIM e o LPDS promove a coordenação entre manufatura e operações de campo, reduzindo desperdícios e garantindo disponibilidade de insumos no momento certo.

	<ol style="list-style-type: none"> 5. Blockchain pode aprimorar a segurança e descentralização da informação logística, aumentando a rastreabilidade e a responsabilidade em ambientes colaborativos. 6. A padronização logística e o uso de sistemas integrados promovem uma colaboração mais eficiente entre todos os envolvidos, minimizando erros e adaptando-se às especificidades de cada projeto.
<p style="text-align: center;">Transporte Verde (Log11)</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Transporte verde visa reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GHG) e minimizar os impactos ambientais em áreas urbanas. 2. Falta de dados logísticos precisos limita a análise de impacto ambiental e social do transporte na construção. 3. Tecnologias como GPS e análise geoespacial auxiliam na logística sustentável, otimizando rotas e diminuindo “custos externos” ambientais. 4. Modelos multiobjetivo equilibram custo e emissões, promovendo decisões informadas com menor pegada de carbono. 5. Incentivos para transporte sustentável incluem eletrificação de veículos e o uso de modais alternativos, como trens e barcas. 6. Políticas de incentivo à produção local e planejamento estratégico de localização reduzem as emissões e promovem sustentabilidade em áreas urbanas.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

5. CONCLUSÃO

A crescente adoção de sistemas construtivos industrializados coloca em evidência os diversos desafios que existem relacionados à coordenação logística. Diante disso, este trabalho explorou os aspectos logísticos relacionados à adoção de sistemas construtivos industrializados, buscando entender suas implicações, principais desafios e diretrizes que possam contribuir para uma implementação eficaz. O estudo foi embasado em uma revisão sistemática da literatura que permitiu uma análise aprofundada dos fatores logísticos essenciais que interferem na logística desses sistemas, e, portanto, a resposta à questão de pesquisa.

Foram identificados 11 aspectos logísticos que apresentam forte relevância no estudo sobre a adoção de sistemas construtivos industrializados. A análise desses fatores revelou a complexidade e a interdependência entre os aspectos logísticos estudados e apontou que os desafios encontrados podem ser mitigados por meio de práticas e ferramentas específicas, como observou-se que, o uso de tecnologias como BIM, digital Twin, IoT, IA, modelos de otimização estocásticos e estratégias de Lean Management, como Just-in-Time, entre outras alternativas, podem contribuir para o aumento da eficiência logística, e a redução de custos e da emissão de poluentes.

Os resultados apontam que os aspectos mais críticos incluem o manuseio de módulos, otimização das rotas de transporte, controle de inventário, custo logístico e tempo de ciclo, indicando a necessidade de estratégias para aumentar a eficiência e reduzir custos. Além disso, a análise de correlações evidenciou interdependências importantes, indicando que as análises dos aspectos não podem ser completamente dissociadas.

Observou-se que a maioria dos modelos de otimização encontrados prioriza fatores de custo em suas funções objetivo, incorporando variáveis monetizadas para otimizar outros aspectos. Por esse motivo, o custo logístico se destaca como o principal foco entre os artigos analisados.

Para estudos futuros, sugere-se investigar mais a fundo temas menos recorrentes, como a localização das instalações logísticas e a padronização das atividades, que se mostraram subestimados, mas potencialmente impactantes na logística de construção modular. É recomendável, ainda, explorar os demais aspectos

quanto a aplicação de novas tecnologias, como a adoção de inteligência artificial, práticas sustentáveis especialmente em contextos urbanos, onde o espaço limitado, as regulamentações de transporte e as preocupações ambientais exigem maior eficiência. Além da realização de estudos mais aprofundados sobre a aplicações de conceitos Lean nesse contexto. Esses caminhos poderão ampliar o conhecimento sobre logística industrializada, beneficiando o setor com práticas ainda mais eficazes e sustentáveis.

Em complemento, sugere-se a realização de um estudo de caso, com empresas brasileiras atuantes no setor da construção industrializada, a fim de melhor compreender o contexto local, identificado as práticas adotadas e os principais desafios enfrentados no Brasil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, E. L. G. DE; PICCHI, F. A. Relação entre construção enxuta e sustentabilidade. **Ambiente Construído**, v. 18, p. 91–109, mar. 2018.

ALVES, J.; SANTOS, A. DA P. DOS. LOGÍSTICA LEAN PARA REDUÇÃO DOS EFEITOS DA VARIAÇÃO DA DEMANDA NO ABASTECIMENTO DE LINHAS DE PRODUÇÃO. **Revista Perspectivas Contemporâneas**, v. 8, n. 1, p. 53–66, jun. 2013.

ARSHAD, H.; ZAYED, T. Critical influencing factors of supply chain management for modular integrated construction. **Automation in Construction**, v. 144, p. 104612, 1 dez. 2022.

ASRI, M. A. N. M. et al. Success factors of JIT integration with IBS construction projects- a literature review. **International Journal of Supply Chain Management**, v. 5, n. 2, p. 71–76, 2016a.

ASRI, M. A. N. M. et al. Exploring lean construction component for malaysian industrialized building system logistics management—A literature review. **Advanced Science Letters**, v. 22, n. 5–6, p. 1593–1596, 2016b.

BALLOU, R. H. **Logística Empresarial: Transportes, Administração De Materiais, Distribuição Física**. 1ª edição ed. São Paulo: Atlas, 1993.

BANKVALL, L. et al. Interdependence in supply chains and projects in construction. **Supply Chain Management: An International Journal**, v. 15, n. 5, p. 385–393, 1 jan. 2010.

BARKOKEBAS, B. et al. **Glossário Aliança Construção Modular**. (Aliança Construção Modular, Ed.), 2022. Disponível em: <https://cics.prp.usp.br/wp-content/uploads/2022/04/Gloss%C3%A1rioAlian%C3%A7a_Completo.pdf>. Acesso em: 7 jun. 2024

BATAGLIN, F. S. et al. **Application of Bim for Supporting Decisionmaking Related to Logistics in Prefabricated Building Systems**. . Em: 25TH ANNUAL CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL GROUP FOR LEAN CONSTRUCTION. 2017. Disponível em: <<https://iglc.net/Papers/Details/1467>>. Acesso em: 29 out. 2024

BORTOLINI, R.; FORMOSO, C. T.; VIANA, D. D. Site logistics planning and control for engineer-to-order prefabricated building systems using BIM 4D modeling. **Automation in Construction**, v. 98, p. 248–264, 1 fev. 2019.

BRUSSELAERS, N. et al. **Economic, social and environmental impact assessment for off-site construction logistics: The data availability issue**. . Em: IOP CONFERENCE SERIES: EARTH AND ENVIRONMENTAL SCIENCE. 2020.

BRUSSELAERS, N. et al. A GPS-based approach to measure the environmental impact of construction-related HGV traffic on city level. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 98, p. 106955, 1 jan. 2023.

BRUSSELAERS, N.; FUFA, S. M.; MOMMENS, K. A Sustainability Assessment Framework for On-Site and Off-Site Construction Logistics. **Sustainability (Switzerland)**, v. 14, n. 14, 2022.

CHOI, J. O.; KIM, D. B. **A new UAV-based module lifting and transporting method: Advantages and challenges**. . Em: PROCEEDINGS OF THE 36TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON AUTOMATION AND ROBOTICS IN CONSTRUCTION, ISARC 2019. 2019.

COUNCIL OF SUPPLY CHAIN MANAGEMENT PROFESSIONALS (CSCMP) (ED.). **SUPPLY CHAIN MANAGEMENT Definitions and Glossary of Terms**. , 2013. Disponível em: <https://cscmp.org/CSCMP/CSCMP/Educate/SCM_Definitions_and_Glossary_of_Terms.aspx>. Acesso em: 7 jun. 2024

CRUZ, A. L. G. DA. **Método para o estudo do comportamento do fluxo material em processos construtivos, em obras de edificações, na indústria da construção civil: uma abordagem logística**. Doutorado em Engenharia de Produção—Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.

DHIMAN, V.; SAKPAL, M. A. **Engineering Solutions to Mitigate Logistics Changes on a Modular Project**. (M. Madhavan, J. S. Davidson, N. E. Shanmugam, Eds.) Proceedings of the Indian Structural Steel Conference 2020 (Vol. 2). **Anais...** Singapore: Springer Nature, 2023.

ELTOUKHY, A. E. E. et al. Data-driven Game-theoretic Model Based on Blockchain for Managing Resource Allocation and Vehicle Routing in Modular Integrated Construction. **International Journal of Production Research**, v. 61, n. 13, p. 4472–4502, 3 jul. 2023.

FUFA, S. M.; VENÂS, C. **Environmental impact assessment of on-site and off-site construction logistics activities - A case study analysis from Norway**. . Em: IOP CONFERENCE SERIES: EARTH AND ENVIRONMENTAL SCIENCE. 2023.

GALVÃO, M. C. B.; RICARTE, I. L. M. REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA: CONCEITUAÇÃO, PRODUÇÃO E PUBLICAÇÃO. **Logeion: Filosofia da Informação**, v. 6, n. 1, p. 57–73, 15 set. 2019.

HERMES, M. **Prefabrication & modularization as a part of lean construction - status quo in Germany**. . Em: PROCEEDINGS OF IGLC 23 - 23RD ANNUAL CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL GROUP FOR LEAN CONSTRUCTION: GLOBAL KNOWLEDGE - GLOBAL SOLUTIONS. 2015.

HSU, P.-Y.; ANGELOUDIS, P.; AURISICCHIO, M. Optimal logistics planning for modular construction using two-stage stochastic programming. **Automation in Construction**, v. 94, p. 47–61, 1 out. 2018.

HSU, P.-Y.; AURISICCHIO, M.; ANGELOUDIS, P. **Supply chain design for modular construction projects**. . Em: IGLC 2017 - PROCEEDINGS OF THE 25TH ANNUAL CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL GROUP FOR LEAN CONSTRUCTION. 2017.

HSU, P.-Y.; AURISICCHIO, M.; ANGELOUDIS, P. Risk-averse supply chain for modular construction projects. **Automation in Construction**, v. 106, p. 102898, 1 out. 2019.

HSU, P.-Y.; AURISICCHIO, M.; ANGELOUDIS, P. Optimal logistics planning for modular construction using multi-stage stochastic programming. **Transportation Research Procedia**, The 11th International Conference on City Logistics, Dubrovnik, Croatia, 12th - 14th June 2019. v. 46, p. 245–252, 1 jan. 2020.

HUANG, R. et al. A bi-level model and hybrid heuristic algorithm for the optimal location of prefabricated building industrial park. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 116, p. 105393, 1 nov. 2022.

HUSSEIN, M. et al. Sustainable Logistics Planning in Modular Integrated Construction Using Multimethod Simulation and Taguchi Approach. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 148, n. 6, 2022.

HUSSEIN, M. et al. Optimized multimodal logistics planning of modular integrated construction using hybrid multi-agent and metamodeling. **Automation in Construction**, v. 145, p. 104637, 1 jan. 2023.

JIANG, Y. et al. Data-driven out-of-order model for synchronized planning, scheduling, and execution in modular construction fit-out management. **Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering**, v. 39, n. 16, p. 2457–2480, 2024.

KAMAR, K. A. M.; ALSHAWI, M.; HAMID, Z. A. **INDUSTRIALISED BUILDING SYSTEM: THE CRITICAL SUCCESS FACTORS**. 2012. Disponível em: <<https://www.semanticscholar.org/paper/INDUSTRIALISED-BUILDING-SYSTEM%3A-THE-CRITICAL-Alshawi-Hamid/70065a2924d93d5eba01947b4e16427cbcd6b8ab>>. Acesso em: 7 jun. 2024

LEE, D.; LEE, S. Digital twin for supply chain coordination in modular construction. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 11, n. 13, 2021.

LEE, Y. et al. Empirical Study of Identifying Logistical Problems in Prefabricated Interior Wall Panel Construction. **Journal of Management in Engineering**, v. 37, n. 3, 2021.

LIU, J.; LU, M. **Optimization on supply-constrained module assembly process**. . Em: IGLC 2017 - PROCEEDINGS OF THE 25TH ANNUAL CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL GROUP FOR LEAN CONSTRUCTION. 2017.

LIU, J.; SIU, M.-F. F.; LU, M. **Modular construction system simulation incorporating off-shore fabrication and multi-mode transportation**. . Em: PROCEEDINGS - WINTER SIMULATION CONFERENCE. 2016.

LIU, L.; HUANG, Y.; JIANG, Y. **Developing a Logistic Chain-Enabled BIM System for Material Management in Modular Construction**. . Em: CONSTRUCTION RESEARCH CONGRESS 2024, CRC 2024. 2024.

LIU, Q. et al. Artificial intelligence for production, operations and logistics management in modular construction industry: A systematic literature review. **Information Fusion**, v. 109, p. 102423, 1 set. 2024.

MARINS, L. R.; ALVES, L. A. Logística Aplicada ao Canteiro de Obras. **Boletim do Gerenciamento**, v. 7, n. 7, p. 41–19, 28 jun. 2019.

MATT, D. T.; DALLASEGA, P.; RAUCH, E. Synchronization of the Manufacturing Process and On-site Installation in ETO Companies. **Procedia CIRP**, Variety Management in Manufacturing. v. 17, p. 457–462, 1 jan. 2014.

OLEARCZYK, J.; AL-HUSSEIN, M.; BOUFERGUÈNE, A. Evolution of the crane selection and on-site utilization process for modular construction multilifts. **Automation in Construction**, v. 43, p. 59–72, 1 jul. 2014.

OLIVEIRA, A. B. D. F. **Processo de produção integrado: aplicabilidade na construção industrializada**. Doutorado em Tecnologia da Arquitetura—São Paulo: Universidade de São Paulo, 8 ago. 2019.

PEIRIS, P. A. N. et al. **Challenges in Transport Logistics for Modular Construction: A Case Study**. (R. Dissanayake et al., Eds.) 12th International Conference on Structural Engineering and Construction Management. **Anais...** Singapore: Springer Nature, 2023.

PELTOKORPI, A. et al. Categorizing modularization strategies to achieve various objectives of building investments. **Construction Management and Economics**, v. 36, n. 1, p. 32–48, 2 jan. 2018.

PIMENTA, L. DE C. P. Fatores que influenciam a confiabilidade do planejamento em obras de habitação de interesse social com ênfase na utilização de sistemas construtivos industrializados. 27 jul. 2022.

RENER, A.; KARATAS, A.; COLE, M. **Innovative Model for Forecasting Trailer Usage for Prefabricated Exterior Wall Panels**. . Em: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON AUTOMATION AND ROBOTICS IN CONSTRUCTION. 2022.

REZENDE, H. A.; JESUS, R. B. DE; MOURA, R. C. A. A logística no contexto da Construção Civil. **Caderno de Graduação - Ciências Exatas e Tecnológicas - UNIT - SERGIPE**, v. 1, n. 2, p. 135–146, 26 fev. 2013.

RICHARD, R.-B. Industrialized building system categorization. Em: **Offsite Architecture**. 1. ed. Londres: Routledge, 2017. p. 3–20.

SAGGAFF, A. Industrialized building system - an innovative construction method. **MATEC Web of Conferences**, v. 101, p. 05001, 2017.

SALES, A. L. F.; BARROS NETO, J. DE P.; FRANCELINO, T. R. **O fluxo de informação na construção civil: estudo aplicado em uma empresa construtora de Fortaleza**. . Em: XXIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. Ouro Preto, MG: Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2003. Disponível em: <<http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/6494>>. Acesso em: 7 jun. 2024

SANTANA, G. R.; HASHIZUME, S. H.; OLIVIERI, H. Utilização de checklist estruturado para seleção de sistemas construtivos industrializados em empreendimentos logísticos. **Revista IPT: Tecnologia e Inovação**, v. 8, n. 25, 25 abr. 2024.

SANTOS, C. A. B.; FARIAS FILHO, J. R. DE. **CONSTRUÇÃO CIVIL: UM SISTEMA DE GESTÃO BASEADA NA LOGÍSTICA E NA PRODUÇÃO ENXUTA**. Anais do Encontro Nacional de Engenharia de Produção - Enegep. **Anais...** Em: ENCONTRO

NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. 1998. Disponível em: <https://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP1998_ART549.pdf>

SANTOS, B. DOS et al. **2-06.pdf**. (UNESPAR, Ed.). Em: X ENCONTRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO AGROINDUSTRIAL. Campo Mourão, PR: set. 2016. Disponível em: <http://www.fecilcam.br/anais/x_eepa/data/uploads/2-logistica/2-06.pdf>. Acesso em: 7 jun. 2024

STOCK, G. **Large-Scale Modular Wharf Design Considerations for the Port of Alaska Modernization Program**. . Em: AUSTRALASIAN COASTS AND PORTS 2023 CONFERENCE. 2023.

SUNDQUIST, V.; GADDE, L.-E.; HULTHÉN, K. Reorganizing construction logistics for improved performance. **Construction Management and Economics**, v. 36, n. 1, p. 49–65, 2 jan. 2018.

SYCHEV, S.; SHARIPOVA, D. Monitoring and logistics of erection of prefabricated modular buildings. **Indian Journal of Science and Technology**, v. 8, n. 29, 2015.

VIEIRA, H. F. **Logística Aplicada à Construção Civil. Como Melhorar o Fluxo de Produção nas Obras**. 1ª edição ed. [s.l.] Pini, 2006.

WU, L. et al. A blockchain-based model with an incentive mechanism for cross-border logistics supervision and data sharing in modular construction. **Journal of Cleaner Production**, v. 375, p. 133460, 15 nov. 2022.

YI, W.; ZHEN, L.; JIN, Y. Stackelberg game analysis of government subsidy on sustainable off-site construction and low-carbon logistics. **Cleaner Logistics and Supply Chain**, v. 2, p. 100013, 1 dez. 2021.

YING, F.; TOOKEY, J.; ROBERTI, J. Addressing effective construction logistics through the lens of vehicle movements. **Engineering, Construction and Architectural Management**, v. 21, n. 3, p. 261–275, 1 jan. 2014.

ZENG, N.; DICHTL, M.; KONIG, M. **A scenario-based simulation framework of on- and off-site construction logistics**. . Em: PROCEEDINGS - WINTER SIMULATION CONFERENCE. 2017.

ZHANG, X.; ZHANG, X. Automated component delivery management under uncertainty for prefabricated buildings to minimize cost and harmful emissions. **Automation in Construction**, v. 162, p. 105388, 1 jun. 2024.

ZHU, M. et al. Two-period based carbon-economy equilibrium strategy for modular construction supply planning. **Journal of Cleaner Production**, v. 290, p. 125674, 25 mar. 2021.