



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

Eduardo Cesar Reis Braga Mendes

**REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA SOBRE
METODOLOGIAS DE PLANEJAMENTO APLICADAS À
CONSTRUÇÃO CIVIL PESADA:**

Benefícios, Barreiras e Aplicações por Tipo de Obra

Belo Horizonte

2026

Eduardo Cesar Reis Braga Mendes

**REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA SOBRE
METODOLOGIAS DE PLANEJAMENTO APLICADAS À
CONSTRUÇÃO CIVIL PESADA:**

Benefícios, Barreiras e Aplicações por Tipo de Obra

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Programa de Graduação em Engenharia Civil do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof.º Dr. Rogério Cabral Azevedo

Belo Horizonte

2026

M538r	Mendes, Eduardo Cesar Reis Braga Revisão sistemática da literatura sobre metodologias de planejamento aplicadas à construção civil pesada: benefícios, barreiras e aplicações por tipo de obra / Eduardo Cesar Reis Braga Mendes. – 2026. 100 f. : il. Trabalho de conclusão de curso apresentado no curso de graduação do Programa de Graduação em Engenharia Civil. Orientador: Rogério Cabral Azevedo. Bibliografia: f. 98-100. Trabalho de conclusão de curso (graduação) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Civil. 1. Indústria da construção – Administração – Teses. 2. Produção enxuta – Teses. 3. Projeto de construção – Gerenciamento – Teses. 4. Modelagem de informação da construção – Teses. 5. Construção civil – Planejamento – Teses. I. Azevedo, Rogério Cabral. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Departamento de Engenharia Civil. III. Título. CDD 692
-------	--



FOLHA DE APROVAÇÃO DE TCC N° 8/2026 - DEC (11.56.07)

N° do Protocolo: 23062.034542/2026-02

Belo Horizonte-MG, 03 de julho de 2026.

EDUARDO CESAR REIS BRAGA MENDES

**REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA SOBRE METODOLOGIAS DE
PLANEJAMENTO APLICADAS À CONSTRUÇÃO CIVIL PESADA: Benefícios, Barreiras e
Aplicações por Tipo de Obra**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, do Campus Nova Gameleira, como parte do requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em 16 de junho de 2026.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Rogério Cabral de Azevedo - Orientador
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Profa. Dra. Flávia Spitale Jacques Poggiali
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Profa. Dra. Luciana Nunes de Magalhães
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

**BELO HORIZONTE
2026**

(Assinado digitalmente em 06/07/2026 09:52)

FLAVIA SPITALE JACQUES POGGIALI

PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO

DEC (11.56.07)

Matrícula: ###908#6

(Assinado digitalmente em 05/07/2026 13:54)

LUCIANA NUNES DE MAGALHAES

PROF ENS BAS TEC TECNOLOGICO-SUBSTITUTO

DEC (11.56.07)

Matrícula: ###902#2

(Assinado digitalmente em 03/07/2026 16:13)

ROGERIO CABRAL DE AZEVEDO

PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO

DEC (11.56.07)

Matrícula: ###396#3

(Assinado digitalmente em 03/07/2026 18:07)

EDUARDO CESAR REIS BRAGA MENDES

DISCENTE

Matrícula: 2020#####3

Visualize o documento original em <https://sig.cefetmg.br/public/documentos/index.jsp> informando seu número: **8**, ano: **2026**, tipo: **FOLHA DE APROVAÇÃO DE TCC**, data de emissão: **03/07/2026** e o código de verificação: **5b22a6640f**



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
Av. Amazonas, 7675 – Bairro Nova Gameleira – Belo Horizonte - MG
Departamento de Engenharia Civil - Prédio 12 - Telefone: (31) 3319-6810 – secretaria@civil.cefetmg.br

TERMO DE ACEITE FINAL - ORIENTADOR

Titulo do TCC:	REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA SOBRE METODOLOGIAS DE PLANEJAMENTO APLICADAS À CONSTRUÇÃO CIVIL PESADA: Benefícios, Barreiras e Aplicações
Por Tipo de Obra	
Data defesa:	16/06/2026
Discente:	Eduardo Cesar Reis Braga Mendes
Orientador:	Rogério Cabral de Azevedo

Eu, Eduardo Cesar Reis Braga Mendes, declaro que todas as sugestões de correção e melhoria indicadas pela banca de avaliação de meu Trabalho de Conclusão de Curso e acordadas com meu Prof. Orientador foram implementadas no texto e entregues ao mesmo, Prof. Rogério Cabral de Azevedo, para validação final.

Documento assinado digitalmente
gov.br EDUARDO CESAR REIS BRAGA MENDES
Data: 26/06/2026 08:03:03-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

De acordo: Belo Horizonte, 26 de junho de 2026,

Assinatura do Discente

Declaro ter recebido e conferido a versão final do texto e que as sugestões de correção e melhorias indicadas pela banca e acatadas por mim foram implementadas.

Documento assinado digitalmente
gov.br ROGERIO CABRAL DE AZEVEDO
Data: 29/06/2026 14:44:58-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

De acordo: Belo Horizonte, 26 de junho de 2026,

Assinatura do Orientador

Dedico este trabalho, primeiramente, a Deus, que me sustentou e me guiou durante toda a trajetória acadêmica. À minha família, pelo amor, apoio e incentivo em cada etapa desta caminhada. E à minha namorada, por sua compreensão, carinho e presença constante nos momentos mais importantes.

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo, agradeço a Deus, por me conceder força, saúde, sabedoria e serenidade ao longo desta caminhada. Sem Ele, nada disso seria possível.

À minha família, manifesto meu carinho e reconhecimento por todo apoio, incentivo e confiança em meu potencial. Aos meus pais e familiares, que sempre foram meu alicerce, agradeço por estarem ao meu lado em todos os momentos e por contribuírem para que eu pudesse seguir em frente.

De forma especial, agradeço ao meu orientador, Rogério Cabral de Azevedo, pela dedicação, paciência, orientação e pelas contribuições essenciais para o desenvolvimento deste trabalho. Sua disponibilidade e seus ensinamentos foram fundamentais para a conclusão deste TCC.

Aos professores que fizeram parte da minha trajetória, expresso minha sincera gratidão pelos conhecimentos compartilhados, pelo empenho e pela contribuição para meu crescimento pessoal e profissional.

Aos colegas e amigos que estiveram presentes ao longo dessa jornada, agradeço pela parceria, pelo apoio e pelos momentos compartilhados, que tornaram esse percurso mais leve e enriquecedor.

À instituição de ensino, agradeço por proporcionar oportunidades de aprendizado, crescimento e construção de uma base sólida para minha atuação profissional.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para esta conquista, meu sincero muito obrigado.

RESUMO

A indústria da construção civil pesada e o desenvolvimento de grandes projetos de infraestrutura e megaprojetos caracterizam-se pela elevada complexidade técnica, longa duração, capital intensivo e diversas incertezas operacionais. Diante disso, esta pesquisa visa analisar metodologias contemporâneas de planejamento aplicadas à construção civil pesada, com o objetivo de sintetizar criticamente suas aplicações, benefícios, barreiras e relações com diferentes tipologias de obra. O estudo adota o método *Systematic Review for Engineering and Experiments* (SREE) para conduzir uma revisão sistemática da literatura científica publicada entre 2015 e 2026. Os resultados indicam limitações do uso isolado de cronogramas determinísticos e apontam uma transição para abordagens mais dinâmicas, visuais e colaborativas. Destacam-se o *Lean Construction*, especialmente o *Last Planner System*, na estabilização do fluxo de trabalho, e a Modelagem da Informação da Construção (BIM 4D/5D), na integração entre planejamento, custos e coordenação espacial. A literatura também evidencia barreiras relacionadas à fragmentação da cadeia de suprimentos, à baixa maturidade digital e aos modelos contratuais tradicionais. Além disso, os resultados mostram que a efetividade das metodologias depende da tipologia da obra e do contexto organizacional de aplicação. Conclui-se que a melhoria do desempenho na construção pesada não depende da adoção isolada de ferramentas tecnológicas, mas da integração entre métodos de planejamento, gestão colaborativa, qualidade dos dados e características específicas do empreendimento.

Palavras-chave: Construção Civil Pesada. *Lean Construction*. Megaprojetos. Modelagem da Informação da Construção (BIM). Planejamento de Obras.

ABSTRACT

The heavy civil construction industry and the development of large infrastructure projects and megaprojects are characterized by high technical complexity, long project durations, capital-intensive operations, and multiple operational uncertainties. In this context, this research aims to analyze contemporary planning methodologies applied to heavy civil construction, seeking to critically synthesize their applications, benefits, barriers, and relationships with different project typologies. The study adopts the Systematic Review for Engineering and Experiments (SREE) method to conduct a systematic review of the scientific literature published between 2015 and 2026. The results indicate limitations in the isolated use of deterministic scheduling methods and point to a transition toward more dynamic, visual, and collaborative approaches. Lean Construction, especially the Last Planner System, stands out for improving workflow stability, while Building Information Modeling (BIM 4D/5D) contributes to the integration of planning, cost management, and spatial coordination. The literature also highlights barriers related to supply chain fragmentation, low digital maturity, and traditional contractual models. Furthermore, the findings demonstrate that the effectiveness of planning methodologies depends on the project typology and the organizational context in which they are applied. It is concluded that improving performance in heavy civil construction does not depend on the isolated adoption of technological tools, but rather on the integration of planning methods, collaborative management practices, data quality, and the specific characteristics of each project.

Keywords: Heavy Civil Construction. Lean Construction. Megaprojects. Building Information Modeling (BIM). Construction Planning.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma do Método dos Procedimentos.....	32
Figura 2 - Rede de Coocorrência de Palavras-Chave do Portfólio Gerada no <i>VOSviewer</i> ..	42
Figura 3 - Matriz de Robustez: Metodologias x Tipologias	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Palavras-Chave Elegíveis Após Aplicação do Limiar Mínimo de Ocorrência ...41

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Resumo do Planejamento da Pesquisa (RSL)	33
Quadro 2 - Resumo da Extração e Seleção dos Artigos nas Bases de Dados	35
Quadro 3 - Distribuição do Portfólio Bibliográfico por Periódico e Métricas de Impacto .	37
Quadro 4 - Volume de Citações dos Trabalhos no Google Acadêmico	38
Quadro 5 - Parâmetros Adotados no Mapeamento de Coocorrência de Palavras-Chave	41
Quadro 6 - Lentes de Pesquisa Adotadas para a Síntese dos Dados	43
Quadro 7 - Síntese das Limitações do Planejamento Tradicional em Obras Lineares Viárias	50
Quadro 8 - Síntese do <i>Last Planner System</i> (LPS) e das Práticas <i>Lean</i> em Complexos Institucionais e Megaprojetos Urbanos	55
Quadro 9 - Síntese da Aplicação do BIM 4D/5D em Obras Lineares Viárias	59
Quadro 10 - Síntese da Aplicação do BIM 4D/5D em Complexos Institucionais e Megaprojetos Urbanos	65
Quadro 11 - Síntese dos Modelos de Entrega e Governança Colaborativa em Megaprojetos Urbanos	69
Quadro 12 - Síntese da Integração entre BIM 4D/5D e Práticas <i>Lean</i> em Edificações Verticais de Grande Porte	74
Quadro 13 - Síntese das Abordagens Computacionais e Preditivas em Obras Lineares Viárias	79
Quadro 14 - Síntese das Abordagens Computacionais e Sistemas de Apoio em Complexos Institucionais e Megaprojetos Urbanos	83
Quadro 15 - Síntese das Metodologias de Planejamento na Construção Civil Pesada	93

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2D – Bidimensional

3D – Tridimensional

4D – Quarta Dimensão do BIM, associada ao tempo

5D – Quinta Dimensão do BIM, associada ao custo

AEC – Architecture, Engineering and Construction

API – Application Programming Interface

AWP – Advanced Work Packaging

BIM – Building Information Modeling

CAFe – Comunidade Acadêmica Federada

CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

CCPM – Critical Chain Project Management

CDE – Common Data Environment

CEFET-MG – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

CPM – Critical Path Method

CRM – Gerenciamento de Comportamentos Relacionais

DES – Discrete Event Simulation

DMM – Domain Mapping Matrix

DSR – Design Science Research

ECI – Early Contractor Involvement

FANP – Fuzzy Analytic Network Process

GIS – Geographic Information System

IA – Inteligência Artificial

IFC – Industry Foundation Classes

IPD – Integrated Project Delivery

JCR – Journal Citation Reports

LBMS – Location-Based Management System

LBS – Location Breakdown Structure

LPS – Last Planner System

MC – Monte Carlo

MitC – Mitigation Controller

N/A – Not Applicable

PCP – Planejamento de Pré-Construção

PDF – Portable Document Format

PERT – Program Evaluation and Review Technique

PICO – Population, Intervention, Comparison and Outcomes

PIB – Produto Interno Bruto

PPC – Percent Plan Complete

QRA – Quantitative Risk Analysis

QTO – Quantity Take-off

RB-SVN – Role-Based Stakeholder Value Network

RFI – Request for Information

RIS – Research Information Systems

ROI – Return on Investment

RSL – Revisão Sistemática da Literatura

SD – System Dynamics

SD-DES – System Dynamics and Discrete Event Simulation

SREE – Systematic Review for Engineering and Experiments

TA – Tasks Anticipated

TBM – Tunnel Boring Machine

TFV – Transformação-Fluxo-Valor

TIN – Triangulated Irregular Network

TI – Tecnologia da Informação

TMR – Tasks Made Ready

TOC – Theory of Constraints

TPS – Toyota Production System

TTP – Takt-Time Planning

Web-GIS – Web Geographic Information System

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	17
1.1.	PERGUNTA DE PESQUISA	18
1.2.	OBJETIVOS	18
1.2.1.	Objetivo Geral.....	18
1.2.2.	Objetivos Específicos	18
1.3.	JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA	19
1.4.	RESTRIÇÕES E LIMITAÇÕES DA PESQUISA	20
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
2.1.	O PLANEJAMENTO NA CONSTRUÇÃO CIVIL PESADA E SUAS COMPLEXIDADES	22
2.2.	LEAN CONSTRUCTION E LAST PLANNER SYSTEM (LPS)	23
2.3.	MODELAGEM DA INFORMAÇÃO DA CONSTRUÇÃO (BIM 4D/5D) NO PLANEJAMENTO.....	24
2.4.	LOCATION-BASED MANAGEMENT SYSTEM (LBMS) E TAKT-TIME PLANNING (TTP).....	25
2.5.	INTEGRATED PROJECT DELIVERY (IPD) EM MEGAPROJETOS.....	26
2.6.	ADVANCED WORK PACKAGING (AWP) E GERENCIAMENTO DA CORRENTE CRÍTICA (CCPM)	28
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	30
3.1.	MÉTODO DE ABORDAGEM	30
3.2.	MÉTODO DOS PROCEDIMENTOS.....	31
3.3.	EXECUÇÃO DA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA	33
3.3.1.	Planejamento da Pesquisa e Validação	33
3.3.2.	Extração e Seleção dos Artigos	34
3.3.3.	Avaliação da Qualidade Metodológica e Relevância	36
3.3.4.	Síntese dos Dados e Lentes de Pesquisa	42
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4.1.	DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA E CARACTERIZAÇÃO DO PORTFÓLIO	45
4.1.1.	Caracterização Geral do Portfólio	45
4.1.2.	Critério de Organização Analítica	46
4.2.	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	47

4.2.1. Perfil Geral do Portfólio.....	47
4.2.2. Matriz de Robustez dos Clusters Analíticos	48
4.2.3. Análise Aprofundada dos Clusters de Evidência Forte (Nível A)	50
4.2.3.1. Planejamento Tradicional (CPM / Gráfico de Gantt) em Obras Lineares Viárias.....	50
4.2.3.2. Last Planner System (LPS) e Práticas Lean em Complexos Institucionais e Megaprojetos Urbanos (Horizontais)	54
4.2.3.3. Modelagem da Informação da Construção (BIM 4D/5D) em Obras Lineares Viárias.....	59
4.2.3.4. Modelagem da Informação da Construção (BIM 4D/5D) em Complexos Institucionais e Megaprojetos Urbanos (Horizontais).....	64
4.2.3.5. Modelos de Entrega e Governança Colaborativa (IPD, ECI e CRM) em Complexos Institucionais e Megaprojetos Urbanos (Horizontais).....	69
4.2.3.6. Modelagem da Informação da Construção (BIM 4D/5D) em Edificações Verticais de Grande Porte (Arranha-céus)	74
4.2.3.7. Abordagens Computacionais e Sistemas de Apoio (IA, Simulações Estocásticas e Redes) em Obras Lineares Viárias	78
4.2.3.8. Abordagens Computacionais e Sistemas de Apoio (IA, Simulações Estocásticas e Redes) em Complexos Institucionais e Megaprojetos Urbanos (Horizontais)	83
4.2.4. Evidências Complementares e Lacunas do Portfólio	88
4.2.5. Síntese Transversal dos Resultados.....	89
4.3. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	93
4.3.1. O que a literatura sustenta com maior robustez.....	94
4.3.2. A importância das abordagens integradas e do contexto de aplicação	95
4.3.3. Limites da evidência e implicações para pesquisas futuras	96
5. CONCLUSÃO.....	97
5.1. ATENDIMENTO AOS OBJETIVOS DA PESQUISA.....	97
5.2. RESPOSTA À PERGUNTA DE PESQUISA.....	98
5.3. CONTRIBUIÇÕES, LIMITAÇÕES E RECOMENDAÇÕES FUTURAS	100
REFERÊNCIAS	102

1. INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil pesada e o desenvolvimento de grandes projetos de infraestrutura e megaprojetos são caracterizados por sua alta complexidade técnica, longa duração, capital intensivo e por diversas incertezas operacionais (Ibrahim; Zayed; Lafhaj, 2025). Empreendimentos dessa magnitude envolvem múltiplos stakeholders e uma forte interdependência de contratos e frentes de trabalho, onde falhas de coordenação podem gerar um efeito cascata no desempenho global (Gondia; Ezzeldin; El-Dakhakhni, 2022). Como resultado, o setor frequentemente enfrenta ineficiências recorrentes, como baixa produtividade, excesso de desperdícios, desvios de custo e dificuldades no cumprimento de prazos (Pérez; Ávila; Sánchez, 2024).

Historicamente, o planejamento e o controle dessas obras têm se apoiado quase exclusivamente em métodos tradicionais, notadamente o Método do Caminho Crítico (CPM) (Sheikhhoshkar *et al.*, 2024). Contudo, a literatura recente mostra que o uso isolado de cronogramas estáticos não é suficiente para lidar com a natureza dinâmica e as variabilidades da construção pesada, resultando em sistemas de controle pouco eficazes e fragmentados (Sheikhhoshkar *et al.*, 2024). Diante desse cenário e da necessidade de garantir a previsibilidade e a eficiência no uso de recursos, o setor tem passado por uma transição importante para metodologias de planejamento mais ágeis, multinível e integradas (Torres *et al.*, 2025).

Entre as principais inovações gerenciais, destaca-se a adoção da filosofia *Lean Construction* (Construção Enxuta), que propõe uma mudança de paradigma focada na maximização de valor e na eliminação de atividades que não agregam valor ao produto final (Babalola; Ibem; Ezema, 2019). Como desdobramento dessa filosofia, ferramentas como o *LastPlanner System* (LPS) trouxeram avanços na gestão ao introduzir o controle de produção baseado no planejamento em múltiplos níveis (médio e curto prazo), promovendo a colaboração contínua, a análise de restrições e a melhoria da confiabilidade do fluxo de trabalho diário no canteiro (Hamzeh *et al.*, 2015). Metodologias complementares, como o *Takt Time Planning* (TTP) e o Gerenciamento da Corrente Crítica (CCPM), também têm demonstrado bons resultados na otimização do sequenciamento produtivo e na gestão de gargalos em ambientes de múltiplos projetos (Araszkiewicz, 2017).

Paralelamente às abordagens gerenciais, a transformação digital tornou-se um pilar importante (Torres *et al.*, 2025). A Modelagem da Informação da Construção (BIM),

especialmente com a integração das dimensões de tempo (4D) e custo (5D), permitiu a simulação virtual dos processos construtivos (Lu; Won; Cheng, 2016). A integração entre o BIM e as práticas *Lean* tem se mostrado efetiva na prevenção de erros de design, na resolução antecipada de conflitos espaciais e na facilitação da comunicação entre as equipes (Castañeda et al., 2025). Essa convergência metodológica torna o planejamento mais dinâmico, fornecendo dados mais precisos para a tomada de decisão e ajudando a reduzir fatores que geram atrasos na construção (Gharaibeh et al., 2024).

Assim, o estudo dessas metodologias vai além do cumprimento de prazos, tornando-se um recurso importante para a viabilidade e resiliência de megaprojetos (Gondia; Ezzeldin; El-Dakhakhni, 2022).

Diante do exposto, compreender e expor como essas abordagens operam em diferentes tipologias de obras pesadas, bem como mapear seus ganhos e barreiras de implementação, é uma etapa importante para difundir e consolidar práticas mais eficientes no setor da construção civil (Sheikhhoshkar et al., 2024).

1.1. PERGUNTA DE PESQUISA

Quais metodologias de planejamento têm sido aplicadas na construção civil pesada e o que a literatura científica revela sobre suas aplicações, benefícios, barreiras de implementação e relação com os diferentes tipos de obra?

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo Geral

Identificar e analisar as metodologias de planejamento aplicadas à construção civil pesada, sintetizando criticamente suas principais aplicações, benefícios e barreiras, e relacionando-as aos diferentes tipos de obra.

1.2.2. Objetivos Específicos

Para o desenvolvimento da pesquisa, espera-se alcançar os seguintes objetivos específicos:

- i. Mapear as principais metodologias de planejamento aplicadas em projetos de construção civil pesada, com base na literatura recente, identificando suas características, fundamentos e contextos de aplicação;

- ii. Analisar os benefícios associados à adoção dessas metodologias, considerando seus impactos em termos de desempenho, eficiência, qualidade, produtividade e otimização dos processos construtivos;
- iii. Identificar as principais barreiras enfrentadas na implementação dessas metodologias em projetos de infraestrutura, incluindo aspectos técnicos, organizacionais, culturais e contextuais;
- iv. Examinar a relação entre as metodologias de planejamento e os diferentes tipos de obras de construção civil pesada, avaliando sua aplicabilidade, adaptabilidade e limitações conforme a natureza do projeto;
- v. Avaliar as evidências disponíveis na literatura quanto aos ganhos mensuráveis proporcionados por essas metodologias, especialmente em relação a prazo, custo e produtividade, com base em estudos de caso e pesquisas empíricas.

1.3. JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

A indústria da construção civil pesada é caracterizada por empreendimentos de alta complexidade técnica, longa duração e capital intensivo, operando frequentemente em ambientes dinâmicos e incertos. Historicamente, o setor enfrenta ineficiências recorrentes, com baixas taxas de crescimento de produtividade e altos índices de atrasos e desvios de custo (Sheikhhoshkar et al., 2024). Fatores como mudanças de escopo, falhas na coordenação de cronogramas e dificuldades logísticas geram impactos econômicos e sociais relevantes (Pérez; Ávila; Sánchez, 2024). Nesse contexto, a adoção de metodologias avançadas de planejamento, como a integração entre *Building Information Modeling* (BIM), *Lean Construction* e o *Last Planner System* (LPS) — vai além da organização de tarefas, tornando-se uma prática importante para garantir maior previsibilidade e viabilidade dos megaprojetos (Ibrahim; Zayed; Lafhaj, 2025).

Do ponto de vista teórico, o estágio atual do conhecimento mostra um volume crescente de publicações sobre metodologias ágeis e tecnologias digitais aplicadas à construção. Contudo, a literatura aponta que a aplicação dessas abordagens ainda ocorre de forma fragmentada, focando ora na tecnologia (BIM), ora na filosofia gerencial (*Lean*), sem uma articulação adequada às características dos megaprojetos (Sheikhhoshkar et al., 2024). Autores como Ibrahim et al. (2025) e Torres et al. (2025) destacam uma lacuna na consolidação de evidências empíricas sobre a eficácia dessas integrações em diferentes tipologias de obras de infraestrutura.

Falta, portanto, uma sistematização clara que relacione as metodologias de planejamento aos seus benefícios, barreiras e contextos de aplicação na construção pesada.

Diante dessas constatações, a presente pesquisa se justifica por sua contribuição acadêmica e prática. No âmbito acadêmico, o trabalho contribui para reduzir a dispersão do conhecimento ao conduzir uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) estruturada, consolidando o estado da arte e evidenciando pontos de consenso e divergência entre os estudos recentes (Ibrahim; Zayed; Lafhaj, 2025). No âmbito prático, a pesquisa apresenta relevância ao traduzir o conhecimento acadêmico em uma ferramenta de apoio à tomada de decisão para os profissionais do setor. Ao mapear o que funciona, as barreiras enfrentadas e os ganhos mensuráveis (prazo, custo e produtividade) de acordo com o tipo de obra, este estudo busca fornecer diretrizes consistentes para planejamentos mais eficientes e realistas na construção civil pesada.

1.4. RESTRIÇÕES E LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Toda pesquisa científica está sujeita a limitações que definem as fronteiras de validade e a abrangência de seus resultados. Essas restrições não representam falhas no desenvolvimento do estudo, mas sim a delimitação do escopo de aplicação das conclusões. Assim, a presente pesquisa apresenta as seguintes restrições e limitações:

Em relação ao escopo temático, o estudo se restringe ao contexto da construção civil pesada e de megaprojetos de infraestrutura (como rodovias, barragens, portos e plantas industriais). Consequentemente, as evidências levantadas sobre a eficácia, os benefícios e as barreiras das metodologias de planejamento identificadas se limitam a esse cenário de alta complexidade. Os resultados e padrões identificados, portanto, não devem ser generalizados para edificações residenciais ou comerciais de pequeno e médio porte, cujas dinâmicas de escala, restrições de suprimentos e interdependências operacionais diferem de forma significativa.

Em segundo lugar, quanto ao delineamento metodológico, por se tratar de uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) de caráter exploratório e avaliativo, as conclusões estão condicionadas aos dados secundários obtidos. Ou seja, os resultados se limitam às evidências empíricas, aos estudos de caso e às métricas (como prazo, custo e produtividade) reportadas nos artigos científicos recuperados nas bases de dados durante a janela temporal definida. O estudo não realiza a coleta de dados primários em canteiros de obras para validação própria, dependendo do rigor metodológico e da qualidade das fontes consultadas na literatura.

Adicionalmente, na etapa de extração de dados, optou-se pela utilização da base *Science Direct* para a consolidação do portfólio final. Embora o método SREE e as revisões sistemáticas, de modo geral, recomendem buscas em múltiplas bases, essa delimitação foi adotada em razão da viabilidade prática e do escopo de um Trabalho de Conclusão de Curso de graduação. A pesquisa foi desenvolvida no último ano do curso, simultaneamente ao cumprimento de outras disciplinas e à atuação profissional em tempo integral na área de engenharia, o que impôs restrições de tempo para a realização de buscas mais amplas em outras plataformas.

Ainda assim, a base *Science Direct* apresentou abrangência adequada para o tema investigado, especialmente por sua relevância na área de Engenharia, permitindo a seleção de um portfólio final composto por 34 artigos aderentes ao escopo da pesquisa. Dessa forma, a utilização de uma única base principal mostrou-se compatível com os objetivos e as limitações do estudo, fornecendo fundamentação suficiente para a análise proposta.

Por fim, a estratégia geral de desenvolvimento do trabalho adota um critério de análise estratificada. Para as conclusões centrais do estudo, definidas como Evidência de Nível A, estabeleceu-se que os *clusters* analisados deveriam ser representados por, no mínimo, quatro artigos científicos. Esse critério busca aumentar a consistência das análises principais e reduzir o risco de generalizações baseadas em casos isolados.

Ao mesmo tempo, essa escolha representa uma limitação metodológica. Metodologias emergentes ou aplicações em tipologias muito específicas, ainda com menor volume de publicações, entre um e três artigos, foram mantidas no estudo apenas como evidências complementares ou pontuais. Assim, as constatações mais robustas e as comparações principais concentram-se nas abordagens mais consolidadas na literatura, enquanto as práticas mais recentes são discutidas com maior cautela.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. O PLANEJAMENTO NA CONSTRUÇÃO CIVIL PESADA E SUAS COMPLEXIDADES

A construção civil pesada e o desenvolvimento de megaprojetos de infraestrutura (como rodovias, pontes e barragens) são caracterizados por sua grande escala, longa duração e altos volumes de investimento (Xu et al., 2018). Esses empreendimentos operam em ambientes dinâmicos e de alta complexidade técnica, exigindo a mobilização de grandes quantidades de recursos e a coordenação contínua entre múltiplos stakeholders e equipes especializadas (Gondia; Ezzeldin; El-Dakhakhni, 2022). Devido a essas características, tais projetos são suscetíveis a incertezas e riscos que afetam diretamente o cumprimento de prazos, custos e padrões de qualidade (Pérez; Ávila; Sánchez, 2024).

Tradicionalmente, o planejamento e o sequenciamento de atividades nessas obras têm se apoiado em métodos convencionais, como o Gráfico de Gantt e o Método do Caminho Crítico (CPM). Embora essas ferramentas forneçam uma estrutura básica para a organização do projeto, a literatura aponta que apresentam limitações ao lidar com a complexidade dos megaprojetos atuais (Torres et al., 2025). O CPM, por exemplo, é criticado por priorizar o controle global do projeto em detrimento do controle diário da produção, além de apresentar dificuldades para gerenciar a variabilidade do fluxo de trabalho e não considerar adequadamente as flutuações de produtividade no canteiro de obras (Sheikhhoshkar et al., 2024).

A limitação desses métodos tradicionais em se adaptar rapidamente a mudanças em tempo real e em lidar com as interdependências das tarefas resulta em ineficiências recorrentes (Torres et al., 2025). Como consequência de falhas de planejamento e coordenação, estima-se que cerca de 90% dos megaprojetos enfrentem atrasos em seus cronogramas e desvios de custo (Ibrahim; Zayed; Lafhaj, 2025). Esse cenário evidencia a necessidade de transição de ferramentas estáticas e fragmentadas para metodologias de planejamento integradas e multinível, capazes de mitigar riscos operacionais e garantir a continuidade e eficiência do fluxo de produção na construção pesada (Sheikhhoshkar et al., 2024).

A seguir, são apresentadas as principais metodologias de planejamento identificadas neste estudo.

2.2. LEAN CONSTRUCTION E LAST PLANNER SYSTEM (LPS)

A filosofia *Lean Construction* (Construção Enxuta) originou-se da adaptação dos princípios do Sistema Toyota de Produção (TPS) para a indústria da construção. Essa transição foi fundamentada pela teoria Transformação-Fluxo-Valor (TFV), proposta por Koskela no início da década de 1990, que entende a produção não apenas como a conversão de insumos, mas também como a otimização de fluxos e a geração de valor para o cliente (Babalola; Ibem; Ezema, 2019). O princípio central do *Lean* é a maximização desse valor aliada à eliminação sistemática de desperdícios — entendidos como qualquer atividade que consuma tempo, recursos ou esforço sem agregar valor ao produto final (Ibrahim; Zayed; Lafhaj, 2025). No contexto de megaprojetos e obras de infraestrutura pesada, caracterizados por alta complexidade técnica e longos períodos de execução, o *Lean Construction* atua como uma abordagem importante para lidar com variabilidades, promover a colaboração entre múltiplos stakeholders e garantir maior flexibilidade no gerenciamento de riscos (Ibrahim; Zayed; Lafhaj, 2025).

Dentre as diversas práticas e ferramentas *Lean* mapeadas na literatura para a construção (como *Just-in-Time*, *ValueStreamMapping* e 5S), o *LastPlanner System* (LPS) se destaca como a metodologia de planejamento e controle de produção mais amplamente implementada e estudada no setor (Pérez; Ávila; Sánchez, 2024). Desenvolvido por Ballard e Howell, o LPS é um sistema baseado na lógica de produção "puxada" (*pull system*), projetado para estabilizar o fluxo de trabalho e proteger as frentes de serviço (unidades de produção) das incertezas do canteiro de obras (Hamzeh et al., 2015). Ao focar na confiabilidade do planejamento, o LPS atua na redução da diferença entre o que "deve ser feito" e o que realmente "pode ser feito", garantindo que as atividades operacionais só se iniciem quando todos os recursos, diretrizes e pré-requisitos estiverem estabelecidos (Ibrahim; Zayed; Lafhaj, 2025).

Para alcançar esse nível de controle, o funcionamento do LPS é estruturado em níveis hierárquicos e colaborativos de planejamento que conectam as metas globais do projeto à execução diária. A metodologia se desdobra em: (i) Planejamento de Longo Prazo (Plano Mestre e de Fase), que define os marcos globais e o que "deve" ser feito (*SHOULD*); (ii) Planejamento de Médio Prazo (*Lookahead Planning*), focado na preparação e análise de restrições (*Make ReadyProcess*) com semanas de antecedência, filtrando o que "pode" ser feito (CAN); e (iii) Planejamento de Curto Prazo (Plano de Trabalho Semanal), onde se estabelecem compromissos confiáveis com os líderes de frente de serviço — os "últimos planejadores" —

sobre o que "será" executado (*WILL*) (Heigermoser et al., 2019). Após a execução, o sistema avalia o que "foi" feito (*DID*), promovendo um ciclo de aprendizagem contínua por meio da análise de causas raiz das falhas de cumprimento do plano (Pérez; Ávila; Sánchez, 2024).

O monitoramento dessa dinâmica é sustentado por métricas de desempenho ágeis e específicas do sistema, com destaque para o Percentual de Planos Concluídos (*Percent Plan Complete* - PPC), Tarefas Preparadas (*Tasks Made Ready* - TMR) e Tarefas Antecipadas (*Tasks Anticipated* - TA) (Sheikhhoshkar et al., 2024). A literatura mostra que a adoção do LPS em projetos complexos, desde interseções rodoviárias até megaprojetos industriais, exerce influência na mitigação de fatores que geram atrasos (Castañeda et al., 2025). O método melhora a comunicação interdisciplinar, otimiza a alocação de recursos em tempo real e reduz a variabilidade, resultando em ganhos mensuráveis de produtividade e previsibilidade de prazos (Pérez; Ávila; Sánchez, 2024).

2.3. MODELAGEM DA INFORMAÇÃO DA CONSTRUÇÃO (BIM 4D/5D) NO PLANEJAMENTO

A Modelagem da Informação da Construção (BIM) representa uma mudança importante na indústria da construção, superando a simples representação geométrica em três dimensões (3D) para se consolidar como um repositório centralizado de dados integrados. No contexto do planejamento de projetos de alta complexidade e infraestrutura, a adoção do BIM vai além da fase de design, atuando como uma ferramenta gerencial que promove a colaboração interdisciplinar, a precisão da informação e a melhoria da tomada de decisão desde as fases iniciais do projeto (Torres et al., 2025).

A dimensão 4D do BIM surge da associação do modelo tridimensional ao cronograma de execução da obra. Essa integração permite a simulação visual e digital do sequenciamento das atividades construtivas ao longo do tempo (Pérez; Ávila; Sánchez, 2024). Na construção pesada, como em obras rodoviárias, viadutos e megaprojetos, onde as interferências logísticas e a gestão de frentes simultâneas são críticas, o BIM 4D possibilita a avaliação de múltiplos cenários construtivos (Castañeda et al., 2025). Ao simular virtualmente o processo de construção, é possível gerenciar o espaço físico (*workspace management*), avaliar rotas de tráfego, identificar antecipadamente conflitos espaço-temporais e realizar análises de construtibilidade antes que os problemas ocorram no canteiro de obras (Torres et al., 2025). A literatura mostra que o uso de simulações 4D contribui para a prevenção de erros de design e

para o aumento da eficiência organizacional, reduzindo fatores que causam atrasos nos cronogramas (Pérez; Ávila; Sánchez, 2024).

Expandindo as capacidades do planejamento, a dimensão 5D incorpora a variável custo ao modelo 4D. Essa evolução automatiza o levantamento de quantitativos de materiais (*Quantity Take-off* - QTO), extraindo dados dos elementos geométricos e semânticos do modelo (Lu; Won; Cheng, 2016). Ao integrar os quantitativos aos cronogramas e aos bancos de dados de custos externos, o BIM 5D permite a elaboração de orçamentos dinâmicos e simulações de fluxos de caixa em tempo real (Pérez; Ávila; Sánchez, 2024). Durante o desenvolvimento do cronograma, as ferramentas 5D possibilitam aplicar taxas de produtividade e custos de recursos (materiais, mão de obra e equipamentos) às atividades simuladas, garantindo que o cronograma não apenas seja tecnicamente viável, mas também financeiramente consistente e alinhado aos orçamentos iniciais (Heigermoser et al., 2019).

Desta forma, a adoção das dimensões 4D e 5D do BIM transforma o planejamento de cronogramas e custos, tradicionalmente estático e fragmentado, em um processo mais dinâmico e preditivo. A capacidade de prever conflitos de planejamento (*clashdetection* logístico), alinhar equipes com clareza visual e controlar dados financeiros em sincronia com o avanço físico da obra consolida o BIM como um importante recurso tecnológico para a eficiência na gestão de obras de construção pesada (Castañeda et al., 2025).

2.4. LOCATION-BASED MANAGEMENT SYSTEM (LBMS) E TAKT-TIME PLANNING (TTP)

Empreendimentos de infraestrutura e construção civil pesada, especialmente projetos de natureza linear, como rodovias, ferrovias, túneis e redes de dutos, apresentam desafios logísticos associados à movimentação contínua de recursos ao longo de grandes extensões geográficas (Castañeda et al., 2025). Nesses cenários, o planejamento tradicional focado predominantemente nas relações de precedência temporal das atividades (como o CPM) frequentemente não otimiza o uso do espaço físico, resultando em ineficiências produtivas. Para lidar com essa limitação, a literatura destaca a aplicação conjunta do *Location-Based Management System* (LBMS) e do *Takt-Time Planning* (TTP) como uma abordagem para garantir maior estabilidade do fluxo de trabalho na construção pesada (Sheikhhoshkar et al., 2024).

O LBMS é um sistema de planejamento e controle que modela o processo construtivo com base na localização das atividades, estruturando o projeto físico por meio de uma Estrutura Analítica de Localização (*Location Break down Structure - LBS*) (Babalola; Ibem; Ezema, 2019). Diferentemente das abordagens tradicionais, o LBMS prioriza a continuidade do trabalho das equipes ao longo das diversas frentes de serviço, organizando as tarefas de forma a minimizar interrupções, tempos ociosos e conflitos espaciais (Sheikhhoshkar et al., 2024). Ao planejar a alocação de recursos considerando as dimensões geográficas e geométricas das interseções e rodovias, o LBMS permite que os gestores visualizem a progressão física da obra, acompanhem as taxas de produção em comparação com as planejadas e adotem medidas corretivas diante da variabilidade das condições de campo (Castañeda et al., 2025).

Complementarmente à gestão de espaço promovida pelo LBMS, o *Takt-Time Planning* (TTP) atua como um mecanismo de controle temporal, sendo uma ferramenta derivada dos princípios do *Lean Construction*. O conceito de *Takt* (termo de origem alemã que remete a "ritmo" ou "compasso") refere-se à taxa de produção contínua necessária para atender aos objetivos do cronograma geral (Sheikhhoshkar et al., 2025). O TTP busca padronizar o ritmo de trabalho no canteiro, sincronizando as múltiplas disciplinas e subcontratados para que avancem pelas diferentes zonas de localização em blocos de tempo uniformes (Sheikhhoshkar et al., 2025). Essa padronização rítmica evita gargalos, equilibra a carga de trabalho, otimiza a utilização de mão de obra e maquinário pesado, e aumenta a previsibilidade da execução das tarefas (Sheikhhoshkar et al., 2025).

A integração do LBMS com o TTP (frequentemente associada também ao controle de curto prazo do *LastPlanner System*) constrói uma estrutura de controle de produção eficaz e dinâmica (Sheikhhoshkar et al., 2024). Enquanto o LBMS garante a organização sequencial e a liberação do espaço de trabalho, o TTP assegura que a cadência de avanço seja mais balanceada e previsível (Sheikhhoshkar et al., 2025). Evidências empíricas indicam que a combinação dessas abordagens contribui para reduzir o "efeito cascata" gerado por atrasos em megaprojetos, proporcionando um modelo de planejamento consistente que responde às complexidades operacionais típicas do setor de infraestrutura (Sheikhhoshkar et al., 2024).

2.5. INTEGRATED PROJECT DELIVERY (IPD) EM MEGAPROJETOS

Empreendimentos de construção civil pesada e infraestrutura frequentemente sofrem com a fragmentação gerada por modelos de contratação tradicionais (como o *Design-Bid-Build*), que impõem barreiras de comunicação, isolam as disciplinas e favorecem um ambiente propício a

disputas legais. Como alternativa a esse cenário, o *Integrated Project Delivery* (IPD), ou Entrega Integrada de Projetos, tem se consolidado como um modelo de contratação e gestão baseado na colaboração. O IPD alinha os interesses dos principais *stakeholders* — proprietários, projetistas, construtores e fornecedores — por meio de um contrato multiparte único, no qual os riscos operacionais e financeiros, bem como as recompensas, são compartilhados de forma transparente (Ibrahim; Zayed; Lafhaj, 2025).

A eficácia do IPD na governança de megaprojetos baseia-se no envolvimento antecipado dos participantes essenciais desde as fases iniciais do planejamento. Essa integração promove uma cultura de confiança e comunicação aberta, permitindo a tomada de decisão coletiva e a realização de análises de construtibilidade antes que falhas de design ou planejamento ocorram no canteiro de obras. Ao focar no sucesso global do empreendimento em detrimento de interesses corporativos individuais, o IPD altera a lógica da "transferência de culpa" para a resolução conjunta de problemas, reduzindo riscos de cronograma e divergências que tipicamente ocorrem na construção pesada (Gharaibeh et al., 2024).

A literatura científica recente destaca a sinergia entre o IPD, a Modelagem da Informação da Construção (BIM) e o *Lean Construction*, formando o que os pesquisadores classificam como um "esquema de colaboração trilateral". Nesse contexto, enquanto o BIM fornece a base tecnológica e visual para a gestão de dados (como simulações de prazos e custos) e a filosofia *Lean* fornece métodos para eliminação de desperdícios e controle de fluxo, o IPD atua como o modelo contratual e comportamental que viabiliza a aplicação de ambos. Essa tríade tem se mostrado um arranjo consistente para lidar com a complexidade dos megaprojetos, contribuindo para melhores resultados em termos de previsibilidade de custo, tempo, qualidade e sustentabilidade (Ibrahim; Zayed; Lafhaj, 2025).

Apesar dos benefícios documentados, a implementação do IPD na construção de infraestrutura enfrenta desafios que merecem atenção no planejamento gerencial. A literatura aponta que as principais barreiras incluem a complexidade legal na formulação e aceitação de contratos de risco compartilhado em mercados conservadores, a resistência cultural das organizações à quebra de hierarquias tradicionais, a dificuldade de engajar um número elevado de participantes nas fases iniciais e a necessidade de infraestrutura física e tecnológica para a co-localização das equipes (como o uso de *Big Rooms* e plataformas na nuvem). Superar essas barreiras técnicas e comportamentais exige comprometimento da alta gestão, sendo um passo importante para o sucesso do projeto (Ibrahim; Zayed; Lafhaj, 2025).

2.6. ADVANCED WORK PACKAGING (AWP) E GERENCIAMENTO DA CORRENTE CRÍTICA (CCPM)

A complexidade dos megaprojetos e portfólios de infraestrutura exige métodos que não apenas controlem os prazos, mas que também organizem a concepção das frentes de trabalho e a disponibilidade de recursos compartilhados. Nesse contexto, o *Advanced Work Packaging* (AWP) surge como uma metodologia de planejamento focada no alinhamento contínuo entre as etapas de engenharia, suprimentos e construção. O AWP fragmenta o escopo global do projeto em pacotes de trabalho progressivamente menores e gerenciáveis (pacotes de engenharia, pacotes de suprimentos e pacotes de instalação). A literatura mostra que a integração do AWP com os princípios do *Lean Construction* (como a garantia de que uma tarefa só se inicie quando todas as suas restrições forem removidas) promove um ambiente de execução mais eficiente, reduzindo atrasos, mitigando estouros de custo e melhorando os resultados do empreendimento (Ibrahim; Zayed; Lafhaj, 2025).

Enquanto o AWP estrutura a entrega dos pacotes de trabalho, o Gerenciamento da Corrente Crítica (CCPM - *Critical Chain Project Management*) atua diretamente no sequenciamento e na alocação de recursos escassos, especialmente em ambientes com múltiplos projetos simultâneos (como redes de rodovias ou portos) (Araszkiewicz, 2017). Baseado na Teoria das Restrições (TOC) de E. Goldratt, o CCPM propõe uma abordagem distinta dos modelos tradicionais (Araszkiewicz, 2017). Enquanto o Método do Caminho Crítico (CPM) considera apenas as relações lógicas de precedência entre as tarefas, a Corrente Crítica considera as precedências lógicas e a dependência de recursos (disponibilidade de mão de obra e equipamentos no momento da execução) (Araszkiewicz, 2017).

A principal inovação do CCPM está na forma como lida com as incertezas e reservas de tempo. Na prática tradicional, estimativas de duração costumam ser superestimadas para absorver riscos individuais de cada tarefa. O CCPM, por sua vez, adota estimativas de tempo mais enxutas e elimina essas reservas embutidas, transferindo a segurança para pontos estratégicos do cronograma na forma de "amortecedores" (*buffers*) (Araszkiewicz, 2017). São introduzidos três tipos principais de amortecedores: o *buffer* de projeto (alocado no final da corrente crítica para proteger a data de entrega global), os *buffers* de alimentação (inseridos onde caminhos não críticos se unem à corrente crítica) e os *buffers* de recurso (que garantem a disponibilidade de recursos críticos no momento necessário) (Araszkiewicz, 2017).

Estudos de caso aplicados à construção pesada mostram que a aplicação do CCPM resulta em benefícios, como a redução no tempo global de execução dos projetos e a melhor coordenação na transição de recursos críticos entre múltiplas frentes de obra (Araszkiewicz, 2017). Contudo, a literatura também aponta barreiras na implementação dessa metodologia no setor de infraestrutura. As principais limitações incluem a rigidez de contratos tradicionais, que frequentemente impõem prazos e marcos intermediários incompatíveis com a flexibilidade exigida pelos *buffers* do CCPM, bem como a necessidade de que subcontratados e demais *stakeholders* compreendam e adotem a mesma metodologia e um ritmo alinhado ao gargalo do projeto (Araszkiewicz, 2017).

A revisão desses conceitos evidencia que a construção civil pesada dispõe de um conjunto amplo de metodologias integradas, como *Lean*, BIM, LPS e AWP, voltadas a superar as limitações do planejamento tradicional. Contudo, para compreender a efetividade prática dessas abordagens, é necessário analisar o que a literatura recente apresenta sobre a aplicação desses métodos nos canteiros de obras. É nessa transição entre teoria e prática que se fundamenta o método desta pesquisa. A partir de três "lentes analíticas" centrais (a capacidade da metodologia em resolver problemas específicos, a geração de benefícios mensuráveis e sua adaptabilidade às diferentes tipologias de obras pesadas e suas barreiras), o próximo capítulo apresenta o processo metodológico utilizado para extrair, comparar e sintetizar os dados que respondem à pergunta central deste estudo.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta o delineamento metodológico adotado para o desenvolvimento da pesquisa. A definição da metodologia é importante para assegurar o rigor científico, a transparência e a possibilidade de replicação do estudo, além de justificar o caminho utilizado para responder à pergunta de pesquisa e alcançar os objetivos propostos.

Para isso, o capítulo foi organizado em três eixos principais: o método de abordagem, que define o enquadramento lógico e a classificação da investigação; o método de procedimentos, que apresenta o protocolo SREE (*Systematic Review for Engineering and Experiments*) adotado no estudo; e a execução da revisão sistemática da literatura, que descreve a aplicação prática das etapas do método, incluindo o planejamento da pesquisa, a extração e seleção dos artigos, a avaliação da relevância bibliométrica e as lentes de pesquisa utilizadas para a síntese dos dados.

3.1. MÉTODO DE ABORDAGEM

O enquadramento metodológico consiste na descrição e classificação da pesquisa a partir de diferentes perspectivas, indicando os pressupostos que orientam o trabalho científico. Nesse sentido, a presente pesquisa é classificada em quatro aspectos principais: natureza, objetivos, abordagem do problema e procedimentos técnicos.

Quanto à natureza, a pesquisa classifica-se como aplicada. Diferentemente da pesquisa básica, a pesquisa aplicada busca gerar conhecimentos voltados à solução de problemas práticos. No contexto deste trabalho, o estudo procura traduzir o estado da arte acadêmico em diretrizes aplicáveis à gestão do canteiro de obras, avaliando como metodologias de planejamento, como *Lean*, BIM e LPS, contribuem para a redução de atrasos e custos na construção civil pesada e de infraestrutura.

Quanto aos objetivos, o estudo caracteriza-se como exploratório e descritivo, com viés avaliativo. É exploratório porque busca aprofundar a compreensão sobre o comportamento de abordagens modernas de planejamento em ambientes de alta complexidade, como os megaprojetos, tema que ainda apresenta lacunas na literatura. Ao mesmo tempo, é descritivo, pois tem como finalidade caracterizar os fenômenos mapeados, descrevendo de forma estruturada os benefícios, as barreiras de implementação e as limitações dessas metodologias quando aplicadas a diferentes tipologias de obras, como rodovias, barragens e plantas industriais.

Quanto à abordagem do problema, a pesquisa enquadra-se como quali-quantitativa. A dimensão qualitativa está presente na leitura crítica dos estudos, com o objetivo de compreender o raciocínio prático, os fundamentos teóricos e a natureza das barreiras culturais e organizacionais associadas à adoção de cada metodologia.

Já a dimensão quantitativa aparece na análise de ganhos mensuráveis, como redução de cronograma, aumento de produtividade e retorno sobre investimento (ROI), bem como na adoção de critérios analíticos estratificados. Nesse caso, utiliza-se a quantidade de publicações como referência para definir o nível de robustez dos *clusters* analisados. Assim, estabelece-se um volume mínimo de estudos, de pelo menos quatro artigos, para sustentar as conclusões comparativas centrais, classificadas como evidência forte. *Clusters* com menor número de publicações são quantificados e tratados como evidências complementares.

Por fim, quanto aos procedimentos técnicos e à coleta de dados, a pesquisa é classificada como bibliográfica e documental, sendo sustentada exclusivamente por dados secundários. O estudo não realiza coleta de dados primários em campo, mas utiliza informações geradas e validadas por pesquisas empíricas já publicadas na literatura.

Para assegurar maior rigor na seleção e na análise desses dados, o procedimento técnico central adotado é a revisão sistemática da literatura (RSL), estruturada de forma organizada e rastreável.

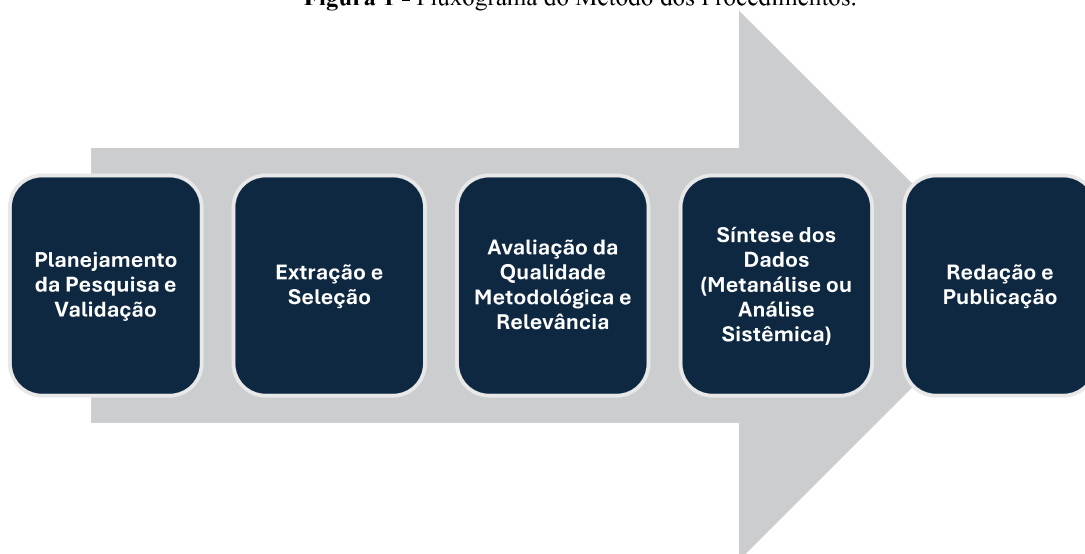
3.2. MÉTODO DOS PROCEDIMENTOS

O método de procedimentos define o caminho seguido desde a formulação do problema até a síntese final dos resultados, contribuindo para que a pesquisa seja reproduzível, transparente e menos sujeita a vieses. Para a condução desta revisão sistemática da literatura (RSL), adotou-se o método SREE (*Systematic Review for Engineering and Experiments*).

Esse método adapta o rigor das revisões sistemáticas ao contexto das ciências exatas e das engenharias, tendo como base teórica o método ProKnow-C (*Knowledge Development Process - Constructivist*).

A aplicação do método SREE organiza-se em cinco etapas principais, conforme ilustrado no fluxograma:

Figura 1 - Fluxograma do Método dos Procedimentos.



Fonte: Autor (2026).

Conforme as diretrizes do SREE, a operacionalização destas cinco etapas consiste em:

- (i) **Planejamento da pesquisa e validação:** Corresponde às definições iniciais e à estruturação dos critérios de busca. Envolve a transformação dos objetivos em perguntas de pesquisa, a escolha das bases de dados, o recorte temporal e a definição dos critérios de inclusão e exclusão dos documentos.
- (ii) **Extração e Seleção:** Refere-se à busca nas bases selecionadas, à exportação dos dados, à remoção de documentos duplicados e ao processo de filtragem. A seleção ocorre por meio da avaliação progressiva da aderência dos estudos aos objetivos da pesquisa, a partir da leitura dos títulos, dos resumos e, por fim, do texto completo.
- (iii) **Avaliação da Qualidade Metodológica e Relevância:** Busca verificar a validade e a relevância científica do portfólio selecionado. Para artigos de natureza teórica ou gerencial, essa etapa concentra-se na relevância acadêmica, por meio da análise bibliométrica, considerando métricas como a classificação dos periódicos e a rede de citações.
- (iv) **Síntese dos dados (Metanálise ou Análise Sistemática):** Corresponde à etapa em que o portfólio é analisado criticamente com base em lentes de pesquisa previamente definidas. O objetivo é identificar pontos fortes, limitações, tendências e lacunas na literatura que contribuam para responder à pergunta de pesquisa.

- (v) **Redação e publicação:** Consiste na consolidação final dos achados, evidenciando a análise do autor sobre os resultados obtidos e sua contribuição para o avanço do conhecimento na área estudada.

A execução detalhada de cada uma destas etapas para a construção desta pesquisa é apresentada na seção a seguir.

3.3. EXECUÇÃO DA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Este subcapítulo apresenta a operacionalização prática das etapas do método SREE. A seguir, são detalhados os parâmetros definidos no planejamento da pesquisa, os resultados quantitativos da etapa de extração e seleção nas bases de dados e os critérios utilizados para a consolidação do portfólio bibliográfico final.

3.3.1. Planejamento da Pesquisa e Validação

A etapa inicial da revisão sistemática consistiu na delimitação do escopo temático e na conversão da pergunta de pesquisa em parâmetros rastreáveis de busca nas bases de dados. A pergunta central que orientou a investigação foi: “Quais metodologias de planejamento têm sido aplicadas na construção civil pesada e o que a literatura científica revela sobre suas aplicações, benefícios, barreiras de implementação e relação com os diferentes tipos de obra?”.

A síntese das definições estabelecidas nesta etapa de planejamento, incluindo a pergunta de pesquisa, os termos de busca gerados a partir da combinação dos eixos e os critérios de elegibilidade, é apresentada no Quadro 1.

Quadro 1 - Resumo do Planejamento da Pesquisa (RSL).

Parâmetro	Definição adotada
Tema	Obras de construção civil pesada, megaprojetos e infraestrutura
Objetivo central	Identificar e analisar as metodologias de planejamento aplicadas à construção civil pesada, sintetizando criticamente suas principais aplicações, benefícios e barreiras, e relacionando-as aos diferentes tipos de obra.
Pergunta de pesquisa	Como as metodologias de planejamento têm sido aplicadas na construção civil pesada e o que a literatura revela sobre suas aplicações, benefícios, barreiras e relação com os diferentes tipos de obra?
Termos de busca	(“construction planning” OR “project scheduling”) AND (“heavy construction” OR “infrastructure projects”) AND (implementation OR benefits OR barriers OR challenges).
Bases de dados	ScienceDirect.
Aspecto temporal	Publicações entre 2015 e 2026.
Documentos-alvo	Artigos de pesquisa primária e artigos de revisão.

Parâmetro	Definição adotada
Critérios de inclusão	Artigos que abordem diretamente a aplicação, os benefícios ou as barreiras de metodologias de planejamento, gestão ou controle da produção, inseridos exclusivamente no contexto de infraestrutura, construção pesada e megaprojetos.
Critérios de exclusão	Estudos cujo escopo esteja voltado a edificações residenciais ou de pequeno e médio porte; pesquisas de caráter estritamente tecnológico, como análises de propriedades de materiais, mecânica dos solos ou medições de emissões ambientais, que não apresentem relação direta com o planejamento da obra; e documentos cujo texto integral não esteja disponível, seja por acesso restrito ou paywall.

Fonte: Autor (2026).

Para viabilizar a extração de documentos aderentes a essa questão, os termos de busca foram definidos a partir do fracionamento do tema em eixos de pesquisa. Com o objetivo de abranger as dimensões da pergunta central, os descritores foram organizados em três eixos principais:

- **Eixo 1 (Tema central):** *construction planning, project planning, planning methodologies.*
- **Eixo 2 (Contexto de aplicação):** *heavy construction, large-scale projects, infrastructure.*
- **Eixo 3 (Objetivos técnicos e análises):** *implementation, benefits, adoption, barriers, limitations.*

A partir das diretrizes consolidadas no Quadro 1, a equação de busca foi formulada com o uso dos operadores booleanos AND, para restringir e cruzar os eixos, e OR, para agrupar sinônimos dentro de um mesmo eixo. Optou-se por utilizar descritores amplos e não incluir siglas de metodologias específicas, como BIM, *Lean* ou LPS, na equação inicial. Essa estratégia buscou evitar vieses de seleção e permitir que a própria literatura indicasse quais abordagens predominam no estado da arte.

Além disso, conforme as diretrizes metodológicas do SREE, foi realizada uma validação preliminar da equação de pesquisa. Essa validação ocorreu na base *Science Direct*, com o objetivo de verificar o volume de retorno e a aderência inicial dos documentos. O resultado indicou que os descritores eram adequados, sem necessidade de ampliação ou restrição dos termos, permitindo consolidar os parâmetros e os critérios de inclusão e exclusão definidos para a extração definitiva.

3.3.2. Extração e Seleção dos Artigos

A etapa de seleção e extração seguiu as diretrizes do método SREE para o refinamento progressivo dos resultados, funcionando como um funil metodológico. Conforme previsto pelo

método, o refinamento dos termos de busca foi realizado previamente, na etapa de planejamento, com o uso da base *Science Direct* para validação. Após esse refinamento, a busca inicial definitiva foi executada com a aplicação da *string* consolidada na base de dados.

Para refinar o portfólio bruto e assegurar sua aderência ao escopo da pesquisa, foram aplicados os filtros disponíveis nas bases, em conformidade com os critérios de inclusão e exclusão definidos no planejamento. Utilizou-se um recorte temporal de 2015 a 2026, com o objetivo de contemplar o estado da arte recente; a tipologia documental foi limitada a artigos de pesquisa e de revisão; e a área do conhecimento foi restringida à Engenharia, reduzindo ruídos provenientes de outras disciplinas. O Quadro 2 apresenta o quantitativo de artigos retornados e filtrados na base em cada fase da seleção.

Quadro 2 - Resumo da Extração e Seleção dos Artigos nas Bases de Dados.

Etapas do funil de seleção	Quantitativo de artigos
1. Total de artigos retornados inicialmente	1.328
2. Após aplicação do filtro temporal (2015–2026)	1.109
3. Após filtro de tipo de documento (<i>researcharticles</i> e <i>review articles</i>)	1.012
4. Após filtro de área do conhecimento (<i>Engineering</i>)	432
5. Análise de aderência por leitura de títulos e resumos	Exclusão de 391
6. Estudos elegíveis para validação de acesso ao texto integral	41
7. Exclusão por indisponibilidade de acesso ao texto completo	Exclusão de 7
8. Portfólio final consolidado	34

Fonte: Autor (2026).

A partir do portfólio consolidado e sem duplicatas, a seleção dos artigos por análise qualitativa de aderência, considerando títulos e resumos, foi realizada com apoio da ferramenta de Inteligência Artificial (IA) *NotebookLM*. Para essa etapa, as informações das referências dos documentos selecionados foram exportadas do gerenciador de referências em formato *BibTeX*, convertidas para formato PDF e carregadas na ferramenta. A partir de interações analíticas sucessivas com a IA, foram excluídos os artigos não alinhados ao escopo da pesquisa, como estudos voltados a edificações residenciais, análises de materiais construtivos e medições de emissões de carbono de maquinário, com base nos critérios de inclusão e exclusão definidos no item 1.5 da etapa de planejamento da pesquisa e validação.

A terceira e última etapa do funil consistiu na validação e obtenção do texto integral dos artigos restantes. O acesso aos documentos foi realizado prioritariamente pelo Portal de Periódicos CAPES, com acesso institucional remoto via Comunidade Acadêmica Federada

(CAFe), disponibilizado pelo CEFET-MG. Os artigos que não estavam disponíveis para acesso gratuito foram descartados do portfólio.

Essa triagem eliminou desvios em relação à busca original e resultou em 34 artigos selecionados, lidos na íntegra, que compuseram o portfólio final da revisão sistemática da literatura. Esses trabalhos forneceram o portfólio necessário para a construção de hipóteses e busca de respostas para a pergunta de pesquisa proposta para esta revisão sistemática.

Para estruturar os clusters analíticos exigidos pela pesquisa, optou-se por adotar um critério de robustez estratificado. Definiu-se, assim, a exigência de no mínimo quatro artigos por combinação entre metodologia e tipologia de obra para sustentar o eixo principal de análise, classificado como evidência forte. Essa decisão busca assegurar que as conclusões comparativas centrais não sejam baseadas em casos isolados, conferindo maior consistência à síntese final. Clusters com menor volume de publicações, por sua vez, são categorizados e incorporados ao estudo como evidências complementares.

3.3.3. Avaliação da Qualidade Metodológica e Relevância

De acordo com as diretrizes do método SREE, a etapa de avaliação da qualidade metodológica tem como premissa verificar a validade científica dos estudos selecionados. Tradicionalmente, isso ocorre por meio da análise de critérios como randomização e uso de estatística inferencial em experimentos controlados. No entanto, considerando os objetivos desta revisão sistemática da literatura, voltada ao mapeamento de conceitos teóricos, métodos gerenciais de planejamento e suas aplicações na construção civil, a avaliação metodológica padrão, própria de estudos experimentais empíricos, não se aplica.

Para contornar essa limitação analítica e avaliar a robustez e a validade científica do portfólio selecionado, adotou-se a análise de relevância acadêmica, por meio da bibliometria. Essa análise quantitativa permite evidenciar a relevância das fontes consultadas, o reconhecimento dos autores na comunidade científica e a consistência da base bibliográfica utilizada para a síntese e discussão dos dados.

A validação bibliométrica e de relevância deste trabalho foi estruturada em três eixos principais de avaliação:

- a) **Classificação e Relevância dos Periódicos:** A qualidade das fontes de publicação foi avaliada por meio de duas métricas: o Fator de Impacto (JCR - *Journal Citation Reports*) e o *CiteScore*. O Fator de Impacto (JCR) calcula a média de citações recebidas pelos artigos

de uma revista nos últimos dois anos, funcionando como um indicador da influência do periódico na comunidade científica. Já o *CiteScore*, métrica da base *Scopus/Elsevier*, considera a média de citações recebidas ao longo de um período de quatro anos, sendo aplicável também a publicações de conferências, ou seja, trabalhos apresentados e publicados em eventos científicos.

Com base nessas métricas, o Quadro 3 apresenta a distribuição dos 34 artigos do portfólio entre suas respectivas fontes de publicação.

Quadro 3 - Distribuição do Portfólio Bibliográfico por Periódico e Métricas de Impacto.

Nome do Periódico (Revista)	Quantidade de Artigos no Portfólio	Fator de Impacto (JCR)*	CiteScore (Scopus)*
<i>Automation in Construction</i>	15	10,3	17,6
<i>International Journal of Project Management</i>	6	7,4	16,3
<i>Procedia Engineering</i> (Série de Conferências Elsevier)	4	N/A**	3,0
<i>AinShamsEngineeringJournal</i>	3	6,0	9,5
<i>Alexandria EngineeringJournal</i>	2	6,8	10,8
<i>Results in Engineering</i>	2	5,0	7,3
<i>Building andEnvironment</i>	1	7,4	13,5
<i>Developments in the Built Environment</i>	1	7,1	9,9
<i>The Open Civil Engineering Journal</i>	1	N/A	1,6
Total do Portfólio	34 artigos		

Fonte: Autor (2026).

Notas:

(*) Valores de referência relativos aos anos de 2023/2024.

(**) Por se tratar de uma série de conferências, a publicação não possui Fator de Impacto JCR aplicável.

A análise do Quadro 3 indica que as publicações do portfólio se concentram em periódicos das áreas de Engenharia Civil, Automação e Gestão de Projetos. Observa-se que a revista *Automation in Construction* reúne a maior parcela do portfólio, com 15 artigos, e apresenta o maior Fator de Impacto entre os periódicos selecionados (10,3). Em seguida, destaca-se o *International Journal of Project Management*, com 6 artigos e Fator de Impacto de 7,4.

A convergência temática desses periódicos, que juntos representam 60% do portfólio consolidado, reforça o alinhamento das fontes primárias com os objetivos desta revisão. Enquanto parte dessas publicações se concentra na modernização e otimização dos processos construtivos, outra parte está voltada às práticas e aos métodos de controle de projetos complexos.

Essa distribuição bibliométrica indica que o portfólio selecionado fornece uma base teórica adequada para investigar a pergunta de pesquisa. Dessa forma, a extração de dados, voltada à avaliação das metodologias de planejamento como sistemas estruturados de gestão para organizar frentes de trabalho, antecipar riscos e aumentar a previsibilidade de prazos e custos na construção pesada, não parte de um conjunto de fontes desalinhado ao tema. O portfólio também indica que a síntese das aplicações, benefícios e barreiras, a ser desenvolvida no capítulo de resultados, está fundamentada em uma base bibliográfica consistente e representativa do estado da arte em engenharia.

b) **Reconhecimento Científico dos Artigos:** Para estimar o reconhecimento científico e a influência de cada estudo na comunidade acadêmica, foi levantado o número de citações dos artigos do portfólio na base Google Acadêmico. O Quadro 4, apresentado a seguir, consolida o volume de citações dos trabalhos selecionados. Para facilitar a identificação e a referência aos artigos ao longo do estudo, cada publicação recebeu um código único, denominado ID, composto pela letra “A” seguida de uma numeração sequencial.

Quadro 4-Volume de Citações dos Trabalhos no Google Acadêmico.

ID	Estudo (Autor, Ano)	Título Completo do Artigo	Citações no Google Acadêmico
A19	Darko et al. (2020)	Artificial intelligence in the AEC industry: Scientometric analysis and visualization of research activities	746
A14	Babalola et al. (2019)	Implementation of <i>Lean</i> practices in the construction industry: A systematic review	443
A28	He et al. (2015)	Measuring the complexity of mega construction projects in China—A fuzzy analytic network process analysis	371
A01	Heigermoser et al. (2019)	BIM-based <i>Last Planner System</i> tool for improving construction project management	318
A04	Lu et al. (2016)	A financial decision making framework for construction projects based on 5D Building Information Modeling (BIM)	281
A34	Lu et al. (2015)	Measurement model of project complexity for large-scale projects from task and organization perspective	265
A31	Chapman (2016)	A framework for examining the dimensions and characteristics of complexity inherent within rail megaprojects	181
A16	Xu et al. (2018)	Schedule risk analysis of infrastructure projects: A hybrid dynamic approach	106
A07	Hamzeh et al. (2015)	Understanding the role of “tasks anticipated” in lookahead planning through simulation	90
A33	Koseoglu Balta et al. (2021)	Bayesian network based decision support for predicting and mitigating delay risk in TBM tunnel projects	76
A24	Ammar et al. (2022)	Risk factors causing cost overruns in road networks	69
A10	Araszkiewicz (2017)	Application of Critical Chain Management in Construction Projects Schedules in a Multi-Project Environment: a Case Study	57

ID	Estudo (Autor, Ano)	Título Completo do Artigo	Citações no Google Acadêmico
A11	Abbas et al. (2016)	Achieving Greater Project Success & Profitability Through Pre-Construction Planning: A Case-Based Study	54
A30	Zheng et al. (2021)	Unveiling complex relational behavior in megaprojects: A qualitative-quantitative network approach	52
A18	Gondia et al. (2022)	Dynamic networks for resilience-driven management of infrastructure projects	51
A27	Isaac et al. (2017)	Workpackagingwith BIM	49
A12	Kim et al. (2016)	Developing a 3D intelligent object model for the application of construction planning/simulation in a highway project	42
A05	Pérez et al. (2024)	Influence of BIM and <i>Lean</i> on mitigating delay factors in building projects	39
A13	Gharaibeh et al. (2024)	Quantifying the influence of BIM adoption: An in-depth methodology and practical case studies in construction	35
A22	Zhao et al. (2022)	Developing an Integrated BIM+GIS Web-Based Platform for a Mega Construction Project	35
A32	De Marco & Narbaev (2021)	Factors of Schedule and Cost Performance of Tunnel Construction Megaprojects	26
A06	Ibrahim et al. (2025)	Trends and gaps in <i>Lean Construction</i> practices for construction of megaprojects: A critical review	24
A15	Kammouh et al. (2022)	Dynamic control for construction project scheduling on-the-run	24
A17	Nabawy&Khodeir (2021)	Achieving efficiency in quantitative risk analysis process – Application on infrastructure projects	18
A23	Gurcanli et al. (2017)	Heavy Equipment Scheduling for Horizontal Construction Projects	18
A29	Li et al. (2024)	Examining owners' and contractors' motivations to participate in collaborative risk management of mega infrastructure projects	18
A09	Sheikhhoshkar et al. (2025)	A data-driven and knowledge-based decision support system for optimized construction planning and control	16
A25	Haugen et al. (2017)	Project delivery methods in large public road projects – a case study of E6 Jaktøyen - Sentervegen	16
A03	Torres et al. (2025)	Exploring the knowledge structure of building information modeling (BIM) adoption in construction scheduling: A bibliometric analysis from 2008 to 2024	14
A08	Sheikhhoshkar et al. (2024)	An innovative integrated framework for multi-level production planning and control systems in construction	14
A02	Castañeda et al. (2025)	BIM- <i>Lean</i> integration for construction scheduling of road intersections	7
A26	Lee et al. (2022)	Linear 4D system using schedule-location charts for infrastructure projects	7
A20	Peña et al. (2026)	BIM-based flowchart for improving road construction planning and management	1
A21	Peña et al. (2025)	BIM-based tool to support construction planning of earthworks in road projects	1

Fonte: Autor (2026). Acesso em: Maio de 2026.

A análise quantitativa indica o reconhecimento científico das fontes que compõem o portfólio. Observa-se que os estudos mais referenciados alcançam altas quantidades de citações,

com valores superiores a 300 e 700 citações, sendo que a média de citações por artigo é de 104 citações. Do ponto de vista temático, os artigos mais citados abordam a complexidade dos megaprojetos e as ineficiências em obras de infraestrutura, reforçando a relevância da adoção de sistemas estruturados de gestão e controle.

Esse nível de referenciamento contribui para qualificar o portfólio como uma base teórica confiável, capaz de apoiar a análise sobre formas de lidar com incertezas e melhorar a previsibilidade de prazos e recursos. Dessa forma, as evidências a serem discutidas no capítulo de resultados, referentes às aplicações, aos benefícios e às barreiras das metodologias de planejamento na construção civil pesada, apoiam-se em referências estabelecidas e amplamente debatidas na engenharia.

c) **Mapeamento de Redes e Clusters de Palavras-chave:** Por fim, como complemento à análise de relevância acadêmica do portfólio, foi realizado o mapeamento das redes de coocorrência de palavras-chave com o auxílio do software *VOSviewer*. A ferramenta é amplamente utilizada em análises bibliométricas, especialmente para a visualização de relações temáticas entre descritores presentes em bases de dados científicas.

Para viabilizar essa etapa, os 34 artigos do portfólio final foram previamente organizados em uma lista no Scopus e exportados em formato RIS, por ser uma opção operacionalmente mais simples para consolidar e exportar conjuntamente os registros bibliográficos. Embora a seleção definitiva do portfólio tenha sido conduzida a partir da *Science Direct*, o mapeamento bibliométrico foi operacionalizado no Scopus apenas para permitir a geração de um único arquivo compatível com o *VOSviewer*, sem alterar a composição final do portfólio analisado.

No *VOSviewer*, a rede foi gerada a partir de dados bibliográficos, utilizando arquivos de gerenciador de referências no formato RIS. Foi selecionado o tipo de análise *co-occurrence*, com unidade de análise em *keywords* e método de contagem *full counting*. Para evitar dispersão excessiva de termos pouco recorrentes e, ao mesmo tempo, preservar a representatividade temática do portfólio, adotou-se como critério mínimo a ocorrência de duas repetições por palavra-chave. Nessa configuração, das 159 palavras-chave identificadas no conjunto dos 34 artigos, 12 atenderam ao limiar mínimo estabelecido. Em seguida, realizou-se uma curadoria leve dos descritores, com exclusão de termos redundantes ou sobrepostos, a fim de obter uma rede final mais legível e interpretável.

O Quadro 5 resume os parâmetros adotados na construção da rede bibliométrica. A Tabela 1 apresenta os descritores inicialmente elegíveis após a aplicação do limiar mínimo de ocorrência.

Já a Figura 2 exibe a rede final de ocorrência conjunta gerada no *VOSviewer*, destacando os clusters temáticos formados pelos principais termos do portfólio.

Quadro 5-Parâmetros Adotados no Mapeamento de Ocorrência Conjunta de Palavras-Chave.

Parâmetro	Definição Adotada
Base de apoio para exportação bibliográfica	Scopus
Quantidade de artigos considerados	34
Formato do arquivo exportado	.RIS
Software de análise bibliométrica	VOSviewer
Tipo de mapa	“Basedonbibliographic data”
Fonte de dados	“Reference manager files”
Tipo de análise	“Co-occurrence”
Unidade de análise	“Keywords”
Método de contagem	“Full counting”
Critério mínimo de ocorrência	2 ocorrências
Total de palavras-chave identificadas	159

Fonte: Autor (2026).

Tabela 1 - Palavras-Chave Elegíveis Após Aplicação do Limiar Mínimo de Ocorrência.

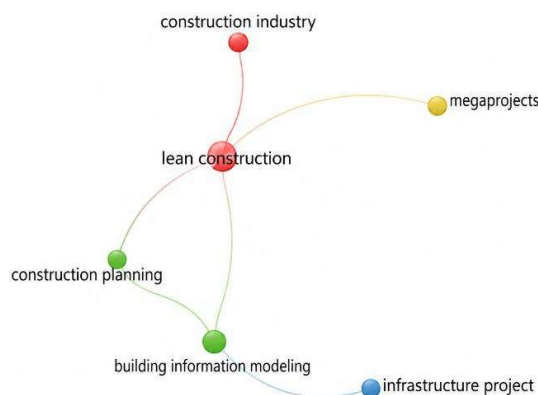
Palavra-Chave	Ocorrências	Total Link Strength
<i>leanconstruction</i>	5	7
<i>constructionplanning</i>	3	4
<i>buildinginformationmodeling</i>	3	3
<i>buildinginformationmodeling (bim)</i>	2	3
<i>automation</i>	2	2
<i>constructionindustry</i>	3	1
<i>bim</i>	2	0
<i>constructionprojects</i>	2	0
<i>infrastructureproject</i>	2	0
<i>megaprojects</i>	3	0
<i>projectcomplexity</i>	2	0
<i>risk management</i>	2	0

Fonte: Elaborado pelo autor com base no *VOSviewer* (2026).

A inspeção inicial dos descritores elegíveis indicou a presença de termos centrais diretamente relacionados ao foco desta pesquisa, com destaque para *lean construction*, *construction planning*, *Building information modeling*, *infrastructure project* e *megaprojects*. Também foram identificadas sobreposições terminológicas, como a coexistência de *Building information modeling*, *Building information modeling (bim)* e *bim*, o que justificou uma etapa posterior de curadoria para reduzir redundâncias e melhorar a leitura visual da rede.

Nessa filtragem, priorizou-se a manutenção dos descritores mais representativos do recorte temático da pesquisa, evitando tanto a exclusão excessiva de termos relevantes quanto a permanência de repetições conceituais desnecessárias.

Figura 2 - Rede de Coocorrência de Palavras-Chave do Portfólio Gerada no *VOSviewer*:



Fonte: Elaborado pelo autor com base no *VOSviewer* (2026).

A Figura 2 apresenta a rede final de coocorrência das palavras-chave selecionadas. Observa-se que os termos *lean construction*, *construction planning* e *building information modeling* formam o núcleo mais conectado da rede, indicando a convergência do portfólio em torno de metodologias contemporâneas de planejamento e coordenação aplicadas à construção.

Além disso, descritores como *infrastructureproject* e *megaprojects*, embora apresentem menor conectividade, reforçam o enquadramento do portfólio no contexto da construção civil pesada e de empreendimentos de maior complexidade, em conformidade com o recorte adotado pela pesquisa. Dessa forma, o mapeamento bibliométrico ilustra a distribuição temática dos estudos selecionados e reforça a aderência conceitual do portfólio à pergunta de pesquisa, aos objetivos do trabalho e às lentes analíticas que orientarão a síntese final dos resultados.

3.3.4. Síntese dos Dados e Lentes de Pesquisa

A etapa de síntese dos dados no método SREE tem como objetivo organizar e integrar as informações extraídas do portfólio bibliográfico, de modo a responder à pergunta de pesquisa de forma crítica e estruturada. Essa fase busca evitar que o trabalho se limite a um conjunto de resumos isolados, permitindo a construção de uma visão mais integrada sobre as soluções apresentadas na literatura.

Para viabilizar essa análise, a pergunta central da pesquisa foi desdobrada em variáveis de investigação denominadas lentes de pesquisa. Conforme as diretrizes do SREE, essas lentes correspondem aos pontos de análise que orientam a extração de dados de cada artigo, possibilitando a identificação de padrões, tendências, pontos fortes e lacunas no estado da arte.

As lentes de pesquisa definidas para a condução da metanálise descritiva desta revisão, em alinhamento com os objetivos estabelecidos no início do estudo, estão apresentadas no Quadro 6. Justificar numeração à esquerda

Quadro 6-Lentes de Pesquisa Adotadas para a Síntese dos Dados.

Lente de Pesquisa	Objetivo da Investigação (foco da análise)
1. Problemas e Metodologias (Método)	Quais são as principais ineficiências ou problemas de planejamento abordados pela literatura recente, e quais características e metodologias, isoladas ou integradas, são apontadas como alternativas para solucioná-los?
2. Tipologias de Obra	Em quais naturezas e nichos da construção civil pesada e de infraestrutura, como obras lineares viárias, megaprojetos horizontais e túneis, as metodologias identificadas têm sido implementadas com maior robustez?
3. Vantagens e Benefícios Mensuráveis	Quais são os ganhos práticos mensuráveis, como redução de cronograma, economia de custos, aumento de confiabilidade e ROI, e os benefícios recorrentes proporcionados por essas metodologias nos contextos analisados?
4. Barreiras à Implantação	Quais são os principais entraves e desafios, de ordem técnica, cultural, comportamental, contratual ou organizacional, que dificultam a adoção ampla e a efetividade dessas práticas no ambiente de obras pesadas?

Fonte: Autor (2026).

A partir dessas lentes, os resultados extraídos dos 34 artigos do portfólio final serão organizados, no capítulo de Resultados e Discussão, em *clusters* temáticos. A estruturação da análise será baseada no cruzamento entre a Lente 1, referente às metodologias, e a Lente 2, referente às tipologias de obra.

Para conferir maior robustez à comparação e evitar conclusões baseadas em casos isolados, foi estabelecido um critério de estratificação. Assim, os *clusters*, formados pela combinação entre metodologia e tipologia de obra, serão classificados em três níveis de evidência:

- **Evidência Forte (Nível A):** *Clusters* formados por quatro ou mais artigos. Esses clusters compõem a base principal da pesquisa, pois indicam práticas mais consolidadas na literatura.
- **Evidência Intermediária (Nível B):** *Clusters* formados por dois ou três artigos que retratam determinada metodologia aplicada a uma tipologia específica de obra.

- **Evidência Pontual ou Exploratória (Nível C):** *Clusters* formados por apenas um artigo que retrata determinada metodologia aplicada a uma tipologia específica de obra, indicando aplicações emergentes ou casos isolados.

A adoção desse critério permite que métodos novos ou ainda pouco difundidos não sejam descartados da revisão. Esses casos serão analisados como evidências complementares e possíveis tendências de inovação, contribuindo para uma síntese abrangente das abordagens identificadas no estado da arte.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir da revisão sistemática da literatura (RSL). Sua organização busca responder à pergunta central da pesquisa e atender, de forma progressiva, aos objetivos geral e específicos propostos.

Inicialmente, apresenta-se o processo de seleção e a caracterização geral do portfólio bibliográfico. Em seguida, é realizada a análise sistemática dos dados extraídos, organizada em clusters temáticos, ou clusters, conforme seu nível de robustez científica. Por fim, o capítulo apresenta uma discussão transversal das metodologias de planejamento, considerando seus benefícios, barreiras e aplicações no contexto da construção civil pesada.

4.1. DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA E CARACTERIZAÇÃO DO PORTFÓLIO

Esta seção tem como objetivo apresentar a trajetória de triagem realizada para a consolidação do portfólio final de artigos. Para assegurar a transparência e a reprodutibilidade da pesquisa, esta seção detalha o perfil geral das publicações selecionadas e o critério de estratificação analítica que servirá de base para as comparações e discussões das seções seguintes.

4.1.1. Caracterização Geral do Portfólio

O portfólio consolidado de 34 artigos científicos apresenta um panorama global das pesquisas em planejamento de infraestrutura, contemplando estudos desenvolvidos e aplicados em diferentes continentes, com presença de obras situadas na Ásia, Europa, América do Norte e América do Sul.

Quanto às tipologias de projeto, o portfólio abrange o escopo da construção civil pesada. O portfólio está distribuído em sete grandes tipologias padronizadas: obras lineares viárias, como rodovias, pontes e interseções; obras lineares ferroviárias e metroviárias; obras subterrâneas e túneis; plantas industriais e de energia; obras marítimas e portuárias; complexos institucionais e megaprojetos urbanos; além de edificações verticais de alta complexidade e grande porte.

Em relação ao perfil metodológico, as publicações indicam uma transição da literatura, com menor ênfase nos métodos estáticos tradicionais e maior atenção a sistemas dinâmicos, rítmicos e colaborativos. As abordagens predominantes no portfólio incluem a Modelagem da Informação da Construção, ou BIM, explorada em suas dimensões 4D e 5D; as práticas do *Lean Construction*, com destaque para o *LastPlanner System* (LPS); ferramentas de planejamento espacial e rítmico, como o *Location-Based Management System* (LBMS) e o *Takt-Time*

Planning (TTP); o *AdvancedWorkPackaging*(AWP); e modelos de governança integrada, como o *Integrated Project Delivery* (IPD) e o *Early ContractorInvolvement* (ECI). Também se observa a presença de estudos voltados à integração sistêmica entre essas metodologias, especialmente BIM e *Lean*, além do apoio de abordagens computacionais, como inteligência artificial, simulações estocásticas e teoria das redes complexas.

Por fim, quanto à natureza das evidências apresentadas, a literatura mapeada não se limita a ensaios puramente teóricos. A maior parte dos trabalhos apresenta evidências de caráter empírico e computacional. O portfólio é fundamentado em pesquisas de campo, estudos de caso extraídos de megaprojetos reais, aplicação de protótipos de software em canteiros e simulações matemáticas alimentadas por dados executivos (*as-built*), conferindo validade prática e aplicabilidade às metodologias analisadas.

4.1.2. Critério de Organização Analítica

Para garantir maior rigor comparativo e evitar que as conclusões fossem baseadas em casos isolados, o processo de síntese não avaliou os artigos de forma apenas individual ou descontextualizada. A estrutura da análise foi baseada em uma matriz de robustez, desenvolvida a partir do cruzamento entre as metodologias de planejamento identificadas e as tipologias de obra mapeadas no portfólio.

A partir desse cruzamento, foi definido um critério de robustez estratificado, que organizou os clusters temáticos, ou clusters, em três níveis de validade literária:

- **Nível A (Evidência Forte):** *Clusters* compostos por quatro ou mais artigos empíricos, reunindo a massa crítica necessária para sustentar o eixo principal de análise comparativa desta revisão sistemática.
- **Nível B (Evidência Intermediária):** *Clusters* formados por dois ou três artigos, que indicam a viabilidade da metodologia, mas apresentam menor concentração em uma tipologia específica de obra, sendo incorporados como evidências complementares.
- **Nível C (Evidência Pontual):** Aplicações emergentes, inovações recentes ou lacunas teóricas sustentadas por apenas um artigo.

Para assegurar a progressão lógica prevista pelo método SREE, a apresentação dos resultados, na Seção 4.2, inicia-se com o perfil geral do portfólio e com a matriz de robustez.

Em seguida, cada cluster de Nível A é analisado em subseções específicas, com o apoio de quadros-síntese estruturados a partir das quatro lentes de pesquisa definidas no método.

Posteriormente, os clusters com menor número de artigos, classificados como Níveis B e C, são apresentados em um panorama complementar. O capítulo se encerra com uma síntese transversal dos benefícios e das barreiras identificados no portfólio e, por fim, com a discussão dos resultados, apresentada na Seção 4.3.

4.2. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Esta seção apresenta, de forma objetiva, os achados extraídos do portfólio bibliográfico. A exposição dos dados inicia-se pelo mapeamento do perfil geral das publicações e pela classificação das evidências por meio da matriz de robustez.

Em seguida, as combinações mais representativas, que compõem os eixos centrais da análise, são detalhadas com maior profundidade. Por fim, são apresentados o mapeamento das abordagens complementares e a síntese transversal dos resultados encontrados.

4.2.1. Perfil Geral do Portfólio

A análise dos 34 artigos indica tendências claras quanto aos métodos e contextos de pesquisa no período de 2015 a 2026. Em relação às metodologias de planejamento, a Modelagem da Informação da Construção, com foco nas dimensões 4D e 5D, e os sistemas de apoio computacional, como simulações estocásticas, algoritmos e teoria de redes, aparecem como abordagens frequentes na literatura recente. Em paralelo, as práticas do *Lean Construction*, com ênfase no *LastPlanner System* (LPS), também apresentam recorrência significativa.

O planejamento tradicional, baseado no Método do Caminho Crítico (CPM) e no Gráfico de *Gantt*, também é mapeado de forma expressiva. No entanto, a literatura tende a utilizá-lo principalmente como parâmetro comparativo, a fim de evidenciar as limitações de métodos estáticos que as abordagens mais recentes buscam superar.

Quanto às tipologias de obra, o portfólio está concentrado principalmente em duas categorias: obras lineares viárias, como rodovias, pontes e interseções, e complexos institucionais e megaprojetos urbanos horizontais. Essa concentração indica áreas da construção pesada que têm demandado maior atenção em pesquisas sobre controle logístico e espacial.

Em relação ao tipo de estudo, observa-se predominância de pesquisas empíricas e simulações computacionais aplicadas, incluindo avaliações metodológicas, como *Design Science Research* (DSR), e estudos de caso realizados em megaprojetos reais.

Por fim, observa-se a presença relevante de abordagens integradas no portfólio. A literatura indica uma transição em que ferramentas isoladas passam a ser combinadas em sistemas metodológicos mais integrados. Nesse contexto, destaca-se a integração entre plataformas digitais BIM e princípios do *Lean Construction*, especialmente nas combinações BIM + LPS e BIM + *Takt-Time Planning*. Essa convergência tecnológica e gerencial aparece no portfólio como uma abordagem relevante para mitigar atrasos e otimizar o fluxo de trabalho em canteiros de obras pesadas.

4.2.2. Matriz de Robustez dos Clusters Analíticos

A consolidação dos dados extraídos do portfólio bibliográfico resultou na elaboração da matriz de robustez, apresentada na Figura 3. Esse instrumento metodológico funciona como um mapa de evidências da pesquisa, ao cruzar as 10 abordagens de planejamento identificadas com as 7 tipologias da construção civil pesada.

O objetivo da matriz é classificar o volume de publicações em cada cruzamento analítico, evidenciando de forma objetiva as áreas em que a literatura apresenta maior ou menor densidade empírica.

Figura 3 - Matriz de Robustez: Metodologias x Tipologias. Total?

MATRIZ DE ROBUSTEZ: METODOLOGIAS X TIPOLOGIAS								
Metodologia de Planejamento	1. Obras Lineares Viárias (Rodovias, Pontes e Interseções)	2. Obras Lineares Ferroviárias e Metroviárias	3. Obras Subterrâneas e Túneis	4. Obras de Energia e Plantas Industriais	5. Obras Marítimas e Portuárias	6. Complexos Institucionais e Megaprojetos Urbanos (Horizontais)	7. Edificações Verticais de Grande Porte (High-Rise / Arranha-céus)	TOTAL
1. Planejamento Tradicional (CPM / Gráfico de Gantt)	5 (A15, A16, A17, A23, A24)	1 (A31)	-	-	1 (A10)	1 (A08)	-	8
2. Last Planner System (LPS) e Práticas Lean de Canteiro	3 (A02, A03, A14)	-	-	-	-	4 (A06, A07, A08, A14)	2 (A01, A05)	9
3. Modelagem da Informação da Construção (BIM 4D/5D)	5 (A02, A03, A12, A20, A21)	1 (A26)	-	-	-	4 (A06, A08, A13, A22)	4 (A01, A04, A05, A27)	14
4. Integração Sistemática BIM + Lean	1 (A02)	-	-	-	-	2 (A08, A09)	2 (A01, A05)	5
5. Location-Based Management System (LBMS / Linha de Balanço)	-	1 (A26)	-	-	-	-	1 (A27)	2
6. Takt-Time Planning (TTP)	1 (A03)	-	-	-	-	-	2 (A08, A09)	3
7. Advanced Work Packaging (AWP)	-	-	-	-	-	-	1 (A27)	1
8. Gerenciamento da Corrente Crítica (CCPM)	-	-	-	-	1 (A10)	-	-	1
9. Modelos de Entrega e Governança Colaborativa (IPD, ECI e CRM)	2 (A25, A29)	-	1 (A32)	1 (A11)	1 (A29)	4 (A06, A11, A13, A30)	-	9
10. Abordagens Computacionais e Sistemas de Apoio (IA, Simulações Estocásticas e Redes)	5 (A15, A16, A17, A19, A23)	-	1 (A33)	1 (A18)	-	6 (A07, A09, A22, A28, A30, A34)	-	13
TOTAL	22	3	2	2	3	21	12	

Fonte: Autor (2026).

A análise das totalizações da matriz indica que a metodologia mais recorrente no portfólio é a Modelagem da Informação da Construção (BIM 4D/5D), identificada em 14 publicações. Em seguida, destacam-se as abordagens computacionais e os sistemas de apoio, presentes em 13 artigos. Quanto às tipologias de obra, observa-se maior concentração de estudos em obras lineares viárias e em complexos institucionais e megaprojetos urbanos, que reúnem, respectivamente, 22 e 21 artigos.

Em paralelo, a matriz também permite identificar os clusters de Nível B, classificados como evidência intermediária, e de Nível C, classificados como evidência pontual, conforme critérios estabelecidos no item 4.1.2 deste trabalho. Embora essas combinações não apresentem volume suficiente para sustentar o eixo principal de comparação, elas não foram descartadas.

Seu mapeamento contribui para o diagnóstico do setor, ao indicar abordagens emergentes, como o uso ainda inicial do AWP em arranha-céus complexos, e evidenciar lacunas na literatura em nichos específicos, como obras marítimas e de energia.

4.2.3. Análise Aprofundada dos Clusters de Evidência Forte (Nível A)

Esta subseção detalha os oito clusters temáticos que atingiram robustez mínima de quatro artigos científicos. A análise de cada cluster segue uma estrutura baseada nas lentes de pesquisa do método SREE.

Inicialmente, apresenta-se a síntese das evidências em um quadro central. Em seguida, são discutidos os problemas abordados, os mecanismos de aplicação metodológica, os ganhos quantitativos reportados e as barreiras de implementação identificadas na literatura.

4.2.3.1. Planejamento Tradicional (CPM / Gráfico de Gantt) em Obras Lineares Viárias

O primeiro *cluster* de evidência forte funciona como um diagnóstico das limitações que motivam a busca por novas tecnologias no setor. Sustentado por cinco artigos empíricos (A15, A16, A17, A23, A24), esse cluster analisa o comportamento, as limitações e os impactos do planejamento determinístico tradicional, baseado no Método do Caminho Crítico (CPM) e no Gráfico de Gantt, na construção de rodovias e infraestruturas horizontais.

O Quadro 7 consolida a análise deste cluster e destaca as limitações dos métodos clássicos de planejamento para prever e controlar desvios em megaprojetos viários. Esses resultados ajudam a evidenciar porque tais limitações têm impulsionado a adoção de novas abordagens metodológicas nesse tipo de empreendimento.

Quadro 7 - Síntese das Limitações do Planejamento Tradicional em Obras Lineares Viárias.

Lente de Pesquisa	Resultados Mapeados	Artigos Validadores
a) Problema de Planejamento abordado	Incapacidade estrutural dos métodos baseados em CPM para representar a interdependência estocástica, incluindo riscos correlacionados, retroalimentações da execução e relações não lineares presentes no canteiro de obras.	A15, A16
	Planejamento pouco flexível, baseado em estimativas subjetivas e extrapolações simples de dados históricos, que desconsideram variáveis de risco em escala macro, como inflação e interferência política, e em escala micro, como a produtividade de equipamentos pesados.	A23, A24
b) Forma de aplicação da metodologia	Sobreposição de análises quantitativas de risco (QRA), simulações de Monte Carlo (MC) e modelos híbridos dinâmicos, como SD-DES, às redes CPM originais, com o objetivo de prever atrasos e custos.	A15, A16, A17
c) Benefícios Recorrentes	Evidência das limitações dos cronogramas tradicionais: as simulações indicam que os planos determinísticos tendem a subestimar prazos e superestimar margens de lucro.	A15, A16, A17
d) Barreiras Recorrentes	Cronogramas frequentemente estruturados com erros lógicos, como atividades com pontas soltas ou fora de sequência, o que compromete o planejamento de prazos contratuais.	A15, A17

Fonte: Autor (2026).

a) Problemas de planejamento abordados: A literatura que compõe este cluster aponta limitações relevantes do planejamento tradicional na infraestrutura pesada. O problema central

identificado é a natureza estática e determinística do Método do Caminho Crítico (CPM) e do Gráfico de Gantt. Os estudos indicam que o CPM não considera adequadamente as interações complexas entre riscos, os ciclos de retroalimentação da produção e as relações não lineares presentes em obras horizontais (Xu et al., 2018).

Ao tratar a duração das atividades de forma independente, o método tradicional tende a desconsiderar a correlação estocástica do canteiro. Um exemplo disso é a ocorrência de chuva intensa, que não afeta apenas uma atividade isolada, mas pode atrasar simultaneamente diversas tarefas sensíveis às condições climáticas (Kammouh et al., 2022). Soma-se a isso a dificuldade recorrente na estimativa de produtividade de equipamentos pesados, que ainda se baseia, em muitas construtoras, em registros subjetivos e extrapolações simples de dados históricos (Gurcanli; Turkoglu; Bilir, 2017). Esse cenário contribui para estimativas de custo imprecisas, apontadas como um dos principais fatores internos de estouro de orçamento em obras viárias (Ammar; Abdel-Monem; El-Dash, 2022).

Sob a ótica da governança de megaprojetos, a permanência do CPM como base do planejamento na construção pesada pode ser explicada não apenas por sua adequação técnica, mas também por fatores contratuais e culturais. O Gráfico de Gantt oferece uma representação visual simples e linear, facilmente compreendida por diretores, contratantes e órgãos financiadores. No entanto, obras rodoviárias estão sujeitas a condições de elevada incerteza, como intempéries, desapropriações e interferências políticas (Ammar; Abdel-Monem; El-Dash, 2022), o que limita a capacidade de métodos determinísticos isolados representarem a realidade do canteiro.

Assim, a análise desse cenário demonstra que cronogramas determinísticos tendem a representar cenários excessivamente otimistas, nos quais as incertezas são tratadas como exceções, embora constituam elementos recorrentes no contexto da infraestrutura pesada (Kammouh et al., 2022).

b) Forma de aplicação da metodologia: Para contornar as limitações do planejamento determinístico, a literatura deste cluster propõe a aplicação de camadas de simulação probabilística e modelagem dinâmica sobre as redes CPM originais. A aplicação metodológica envolve o uso de análises quantitativas de risco (QRA), da técnica PERT (*Program Evaluation and Review Technique*) e de simulações de Monte Carlo (MC), frequentemente acopladas aos cronogramas de softwares comerciais, como o Primavera (Nabawy; Khodeir, 2021).

Estudos mais aprofundados avançam para modelos matemáticos mais complexos, integrando Dinâmica de Sistemas com Simulação de Eventos Discretos (SD-DES) ou desenvolvendo algoritmos de otimização estocástica, como o Controlador de Mitigação (MitC), para representar as correlações entre atividades e os ciclos de retroalimentação da produção (Xu et al., 2018). Em geral, essas ferramentas substituem prazos fixos por distribuições de probabilidade, como Beta-PERT ou triangular, utilizando estimativas pessimistas, otimistas e mais prováveis para executar milhares de iterações e gerar histogramas preditivos do prazo final (Kammouh et al., 2022).

Ao avaliar a viabilidade de implementação dessas soluções, observa-se uma distância relevante entre o rigor acadêmico dos modelos e a realidade operacional da engenharia de campo. Embora a literatura apresente as simulações probabilísticas como uma evolução do planejamento tradicional, sua aplicação pode ser pouco prática na rotina da construção pesada, especialmente quando exige que a equipe de planejamento construa modelos de Dinâmica de Sistemas ou execute algoritmos de otimização estocástica em tempo real.

Essa dificuldade é agravada pela pressão diária da obra, pela escassez de tempo e pela limitação dos dados de entrada disponíveis no canteiro. A qualidade de uma Simulação de Monte Carlo depende diretamente da consistência dos dados inseridos. Assim, quando a coleta de produtividade em campo é subjetiva, atrasada ou incompleta, modelos estatísticos complexos podem gerar previsões sofisticadas, mas pouco aderentes à realidade operacional.

Nesse contexto, a análise evidencia a necessidade de equilibrar o uso de ferramentas quantitativas com metodologias mais visuais, ágeis e voltadas ao controle logístico de curto prazo, evitando que o planejamento se torne excessivamente concentrado em análises de escritório e pouco conectado à dinâmica das frentes de serviço.

c) Discussão dos benefícios recorrentes: o principal benefício reportado pelos estudos deste cluster não está na otimização direta do canteiro, mas na capacidade das simulações estocásticas de evidenciar as limitações dos cronogramas tradicionais. A aplicação de ferramentas como Simulações de Monte Carlo e Dinâmica de Sistemas (SD-DES) revelou que abordagens probabilísticas clássicas podem superestimar os custos de mitigação em até 81%, ao assumir que todas as medidas corretivas devem ser aplicadas de forma permanente, sem considerar a dinâmica real do projeto (Kammouh et al., 2022).

Além disso, essas simulações indicam que a correlação entre riscos paralelos pode afetar o cronograma de forma mais severa do que a simples soma individual dos atrasos (Kammouh et

al., 2022). Por meio da geração de histogramas de probabilidade, o método oferece aos gestores uma visualização de possíveis cenários de datas de entrega e custos, além de auxiliar na identificação das atividades que mais influenciam os atrasos.

A análise dessas métricas evidencia que a principal contribuição da metodologia é mais diagnóstica do que prescritiva. Também se observa que o planejamento estático apresenta limitações para prever incertezas e, isoladamente, não oferece respostas suficientes aos problemas enfrentados na execução da obra.

Essas observações indicam que a indústria não precisa apenas de cronogramas capazes de simular falhas com maior precisão estatística, mas também de metodologias visuais e integradas que auxiliem no controle da variabilidade diretamente no campo.

d) Discussão das barreiras recorrentes: as barreiras identificadas neste cluster indicam limitações importantes no ecossistema de planejamento tradicional. A literatura aponta que cronogramas nativos baseados em CPM são frequentemente construídos com erros lógicos, como atividades com pontas soltas (*open-ended*), restrições arbitrárias e sequenciamentos incorretos, o que compromete qualquer simulação quantitativa de risco realizada posteriormente (Kammouh et al., 2022).

Além disso, a literatura também destaca limitações na coleta de dados em canteiro. Em muitas empresas, o planejamento de equipamentos pesados ainda é tratado de forma pouco sistemática, com estimativas de produtividade baseadas em anotações rotineiras, extrapolações subjetivas e documentações fiscais, sem rastreamento estruturado (Kammouh et al., 2022).

Como resultado, mesmo simulações matemáticas mais avançadas podem apresentar limitações para representar o comportamento estocástico real das frentes de serviço. Isso inclui situações como chuvas intensas que paralisam múltiplos recursos simultaneamente ou decisões gerenciais de aceleração da produção diante da possibilidade de multas contratuais (Kammouh et al., 2022).

Ao analisar a origem dessas barreiras, percebe-se uma disfunção organizacional relevante: a indústria tenta resolver um problema de gestão da produção por meio de ferramentas predominantemente estatísticas. A principal barreira, nesse caso, não parece ser a falta de capacidade computacional, mas a ausência de maturidade digital e de padronização na base da cadeia.

Enquanto as informações que alimentam os algoritmos dependerem de percepções subjetivas do engenheiro de campo, e não de medições integradas e confiáveis, o ciclo conhecido como “entra lixo, sai lixo” (*garbagein, garbage out*) tende a persistir. Nesse contexto, o planejamento determinístico na construção civil pesada passa a operar, muitas vezes, mais como ferramenta contratual e de suporte a pleitos financeiros (*claims*) do que como instrumento efetivo de gestão da execução física da obra.

e) Grau de consistência da evidência: As evidências reunidas neste cluster apresentam convergência entre os estudos, sendo apoiadas por testes computacionais e por dados empíricos extraídos de megaprojetos viários. A literatura indica que o uso isolado do Método do Caminho Crítico (CPM) e do Gráfico de Gantt apresenta limitações para representar a complexidade e a variabilidade características da infraestrutura pesada.

A análise crítica desses dados permite observar que há pouco respaldo para manter o planejamento tradicional como ferramenta exclusiva de controle operacional. A principal conclusão deste cluster está relacionada às limitações do cronograma estático no contexto do canteiro de obras. Embora o CPM ainda seja amplamente utilizado em processos licitatórios e contratuais, sua aplicação isolada apresenta dificuldades para acompanhar a dinâmica da produção em campo.

Ao evidenciar que os métodos clássicos têm limitações para representar reações em cadeia e riscos correlacionados, este cluster contribui para responder à pergunta geral da pesquisa, indicando a necessidade de abordagens mais aderentes à realidade operacional. Assim, a análise das informações permite inferir que parte das ineficiências do setor não será superada apenas pela complementação do CPM com simulações estatísticas de escritório, mas também pela incorporação, na linha de frente, de metodologias mais ágeis, visuais e voltadas ao controle contínuo do fluxo de trabalho, como *Lean Construction* e BIM.

4.2.3.2. Last Planner System (LPS) e Práticas Lean em Complexos Institucionais e Megaprojetos Urbanos (Horizontais)

O segundo *cluster* de evidência forte representa a transição da literatura para abordagens de planejamento colaborativas e orientadas à produção contínua. Sustentado por quatro artigos de alcance internacional (A06, A07, A08, A14), esse cluster analisa a implementação da filosofia *Lean Construction* e de sua principal ferramenta de controle, o *Last Planner System* (LPS), no contexto de megaprojetos horizontais e complexos institucionais.

O Quadro 8 consolida a análise deste *cluster* e sintetiza como a gestão de restrições e a ampliação da participação das frentes de serviço contribuem para estabilizar o fluxo de trabalho e reduzir as limitações dos cronogramas determinísticos.

Quadro 8 - Síntese do *Last Planner System* (LPS) e das Práticas *Lean* em Complexos Institucionais e Megaprojetos Urbanos

Lente de Pesquisa	Resultados Mapeados	Artigos Validadores
a) Problema de Planejamento abordado	Fragmentação do planejamento e prática de transferir os planos às equipes de linha de frente sem a preparação adequada das frentes de serviço, gerando interrupções constantes.	A15, A16
	Baixa produtividade, desperdícios de material e isolamento entre os stakeholders, resultando em fluxos de trabalho variáveis e em índices elevados de atrasos e estouros de custos.	A06, A08, A14
b) Forma de aplicação da metodologia	Implementação do <i>LastPlanner System</i> em seus múltiplos níveis: plano mestre, planejamento de fase, planejamento <i>lookahead</i> , de médio prazo, e plano de trabalho semanal, de curto prazo, com foco em tornar as tarefas prontas para execução (<i>make-ready</i>).	A06, A07, A08, A14
c) Benefícios Recorrentes	Estabilização do fluxo de trabalho e redução da variabilidade, observadas pelo aumento da confiabilidade das promessas por meio do PPC (<i>PercentPlan Complete</i>) e do índice TA (<i>TasksAnticipated</i>), contribuindo para a redução dos prazos totais.	A06, A07, A14
	Redução dos silos operacionais por meio de reuniões diárias (<i>huddles</i>) e compromissos colaborativos, alinhando a percepção dos envolvidos e promovendo aprendizagem contínua.	A06, A08, A14
d) Problema de Planejamento abordado	Resistência cultural à mudança, apego aos métodos tradicionais de trabalho, limitações do paradigma contratual e falta de expertise para estruturar um sistema ágil na base da pirâmide operacional, incluindo operários e encarregados.	A06, A14

Fonte: Autor (2026).

a) Problemas de planejamento abordados: a literatura deste cluster trata das ineficiências geradas pela desconexão entre o planejamento elaborado no escritório e a realidade da linha de frente da produção. O problema central abordado é a fragmentação das metodologias de planejamento na construção pesada (Sheikhhoshkar et al., 2024), muitas vezes baseadas em uma lógica empurrada (*push system*).

Os estudos indicam que a execução eficiente do trabalho se torna difícil quando os cronogramas são simplesmente repassados aos encarregados sem que as tarefas tenham sido previamente preparadas. Isso significa que suas restrições e pré-requisitos lógicos precisam ser removidos antes da execução (Hamzeh et al., 2015). Essa fragmentação contribui para uma colaboração limitada, falhas de comunicação, ciclos de retrabalho (Ibrahim; Zayed; Lafhaj, 2025), e perdas relevantes de produtividade e materiais na cadeia de suprimentos de megaprojetos (Babalola; Ibem; Ezema, 2019).

A análise crítica aponta a persistência dessas falhas e permite observar que a origem do problema não está apenas na ausência de ferramentas de software, mas também na cultura de comando e controle ainda presente no setor de infraestrutura. A construção pesada muitas vezes

opera sob a premissa de que um cronograma de longo prazo, suficientemente detalhado, será capaz de garantir a execução em campo. No entanto, essa postura não considera plenamente que um megaprojeto é um ambiente dinâmico, sujeito a mudanças, restrições e incertezas constantes.

A ineficiência persiste porque, em muitos casos, há separação entre quem planeja e quem executa. Enquanto o planejamento for tratado apenas como uma ferramenta de cobrança contratual imposta de cima para baixo, e não como um sistema colaborativo de preparação e liberação de frentes de serviço com a participação de mestres e encarregados, a distância entre o que está previsto no cronograma e o que pode ser executado no canteiro tende a continuar gerando perdas significativas.

b) Forma de aplicação da metodologia: a aplicação prática do *LastPlanner System* (LPS) e das práticas *Lean* em megaprojetos ocorre por meio da reestruturação do planejamento em múltiplos níveis hierárquicos e colaborativos (Babalola; Ibem; Ezema, 2019). Sob a lógica de produção puxada, a metodologia desdobra os cronogramas globais no plano mestre e no plano de fase, que definem o que deve ser feito (Hamzeh et al., 2015).

A aproximação entre o planejamento e a realidade do canteiro ocorre no *lookahead planning*, ou planejamento de médio prazo, cujo foco está no detalhamento das tarefas, na concepção das operações e na remoção antecipada de restrições, por meio do *make-ready process* (Ibrahim; Zayed; Lafhaj, 2025). A execução é então orientada pelo plano de trabalho semanal, de curto prazo, etapa na qual os líderes das frentes de serviço, os chamados últimos planejadores, assumem compromissos confiáveis sobre o que efetivamente será executado (Ibrahim; Zayed; Lafhaj, 2025).

O controle contínuo da produção é apoiado por métricas ágeis, tanto retrospectivas quanto preditivas, como o Percentual de Planos Concluídos (PPC), Tarefas Antecipadas (TA) e Tarefas Preparadas (TMR), permitindo ciclos rápidos de aprendizagem (Sheikhhoshkar et al., 2024).

A análise crítica da viabilidade de implementação desse sistema integrado no canteiro de obras indica que a adoção plena do LPS exige uma transição comportamental e contratual relevante para muitas construtoras tradicionais. Embora o modelo de compromissos confiáveis e as reuniões de alinhamento de curto prazo, conhecidas como *huddle meetings*, sejam soluções tecnicamente adequadas, a realidade da infraestrutura horizontal ainda é marcada por uma cadeia de suprimentos fragmentada.

Na prática, envolver encarregados de empresas terceirizadas, historicamente orientados por metas isoladas de produção, em um processo colaborativo com a construtora principal pode ser difícil em ambientes caracterizados por baixa confiança e transferência de riscos. Sem uma reestruturação prévia da governança dos contratos, como propõe o modelo IPD, e sem apoio efetivo da alta gestão, o LPS corre o risco de ser aplicado de forma limitada.

Nesse caso, em vez de descentralizar o poder de decisão, o sistema pode se tornar apenas mais uma camada burocrática de preenchimento de planilhas e medição isolada de PPC imposta pelo escritório, afastando-se de seu objetivo central de fortalecer a participação da linha de frente da produção.

c) Discussão dos benefícios recorrentes: O benefício mais frequentemente reportado e com maior consistência empírica neste cluster é a estabilização do fluxo de trabalho e a redução da variabilidade operacional. Esse resultado contribui para explicar por que o LPS aparece como uma das práticas *Lean* mais implementadas e documentadas na indústria da construção.

Os estudos indicam, por meio de métricas de confiabilidade como o Percentual de Planos Concluídos (PPC), Tarefas Preparadas (TMR) e Tarefas Antecipadas (TA), que a adoção de rotinas de remoção prévia de restrições tem impacto direto na redução do prazo global de megaprojetos. Além disso, a metodologia contribui para reduzir silos operacionais, melhorar a comunicação entre frentes de serviço e mitigar desperdícios de materiais na cadeia de suprimentos (Babalola; Ibem; Ezema, 2019).

A análise das implicações práticas dessas métricas permite observar que os resultados justificam o esforço de mudança cultural e técnica exigido das equipes. Em megaprojetos horizontais e complexos institucionais, nos quais o capital mobilizado e as despesas indiretas de canteiro são elevados, a previsibilidade logística proporcionada pelo LPS passa a ter papel relevante para o desempenho financeiro do empreendimento.

A análise do portfólio indica que a principal contribuição do *Lean Construction* não está necessariamente em acelerar a produção física de forma isolada, mas em reduzir interrupções e aumentar a confiabilidade do cronograma. Nesse sentido, a metodologia contribui para transformar um ambiente frequentemente marcado pela gestão reativa de problemas em um sistema de produção mais contínuo, estável e previsível.

d) Discussão das barreiras recorrentes: apesar da consistência dos benefícios identificados, a literatura aponta a resistência à mudança e a fragmentação da cadeia de suprimentos como barreiras relevantes à adoção mais ampla do planejamento *Lean*. Os autores

destacam a escassez de conhecimento sobre métodos colaborativos entre os stakeholders e a dificuldade gerencial de lidar com tarefas emergenciais não previstas, que podem comprometer os planos semanais de curto prazo (Babalola; Ibem; Ezema, 2019).

Também se observa, de forma recorrente, que a ausência de incentivos para contratados e fornecedores, somada à permanência de práticas tradicionais pouco flexíveis, dificulta a sustentação do sistema ao longo de todo o ciclo de vida do megaprojeto (Babalola; Ibem; Ezema, 2019).

A análise desses entraves indica que a principal dificuldade para a adoção do planejamento *Lean* e do LPS na infraestrutura não está associada à tecnologia ou à capacidade computacional, já que a lógica básica dessas abordagens não depende de softwares complexos. As limitações observadas relacionam-se mais diretamente à estrutura contratual e ao modelo de governança dos empreendimentos.

A dificuldade de superar esses obstáculos em larga escala está associada à tentativa de aplicar uma filosofia baseada em colaboração e transparência dentro de modelos de contratação tradicionais, como o *Design-Bid-Build*, que tendem a separar responsabilidades e incentivar posturas defensivas entre os agentes. Enquanto a execução de megaprojetos continuar dividida em diversos subcontratos isolados, nos quais cada empresa busca otimizar sua própria parcela da obra, mesmo que isso prejudique o fluxo global do projeto, o *Last Planner System* tende a encontrar limitações importantes.

Nesse sentido, a análise da literatura sugere que a consolidação dessas práticas depende não apenas da adoção de novas rotinas de planejamento, mas também da construção de relações contratuais voltadas ao desempenho sistêmico do projeto e à mitigação conjunta de riscos.

e) Grau de consistência da evidência: As evidências extraídas neste *cluster* apresentam elevada convergência e boa consistência metodológica. A literatura reúne revisões sistemáticas da indústria global, simulações matemáticas voltadas ao planejamento de médio prazo e frameworks de controle aplicados a megaprojetos, indicando resultados positivos da aplicação do *Last Planner System* (LPS) e das práticas *Lean* na estabilização do fluxo produtivo.

A avaliação desse conjunto de constatações permite considerar o planejamento *Lean* uma abordagem relevante para o contexto tático e operacional da construção civil pesada. A principal conclusão extraída deste cluster é que a indústria já dispõe de mecanismos gerenciais capazes de enfrentar parte das limitações dos cronogramas determinísticos tradicionais.

A transição de um sistema de produção empurrado para um sistema puxado, baseada na remoção prévia de restrições e no compromisso das equipes responsáveis pela execução, apresenta potencial para reduzir a variabilidade e melhorar a confiabilidade do fluxo de trabalho. Ainda assim, ao relacionar esse cluster à pergunta geral da pesquisa, identifica-se uma limitação importante: embora o LPS contribua para o engajamento das equipes e para a estabilização das frentes de serviço, sua atuação está mais concentrada na gestão de processos.

Dessa forma, a análise da síntese das evidências permite inferir que, isoladamente, o *Lean Construction* pode não ser suficiente para lidar com toda a complexidade espacial e informacional dos megaprojetos. Nesse contexto, ganha força a integração entre práticas *Lean*, modelagem digital e modelos contratuais colaborativos, como BIM + *Lean* e IPD, buscando combinar gestão colaborativa, visualização espacial e coordenação integrada da execução.

4.2.3.3. Modelagem da Informação da Construção (BIM 4D/5D) em Obras Lineares Viárias

O terceiro *cluster* de evidência forte analisa a aplicação da Modelagem da Informação da Construção (BIM) no contexto da infraestrutura viária, contemplando rodovias, interseções e terraplenagem de grande porte. Esse *cluster* é sustentado por cinco artigos científicos de natureza empírica e computacional, que formam uma base bibliográfica consistente sobre a necessidade de adaptar os parâmetros nativos de modelagem digital à execução física de canteiros horizontais.

O Quadro 9 consolida a análise deste *cluster* a partir das quatro lentes de pesquisa.

Quadro 9 - Síntese da Aplicação do BIM 4D/5D em Obras Lineares Viárias.

Lente de Pesquisa	Resultados Mapeados	Artigos Validadores
a) Problema de Planejamento abordado	Representação digital monolítica de rodovias, baseada em sólidos inteiriços, que não representa adequadamente a execução real em camadas, com fatiamento horizontal e vertical exigido no canteiro.	A20, A21
	Limitações dos métodos de planejamento estáticos para gerenciar a interdependência espacial, prever conflitos logísticos e integrar planos de tráfego.	A02, A03, A12
b) Forma de aplicação da metodologia	Criação de rotinas algorítmicas de programação visual, com uso de Dynamo/API, e de submontagens (<i>subassemblies</i>) para o fatiamento virtual automatizado de sólidos paramétricos.	A20, A21
	Extensão de entidades no padrão IFC, como <i>IfcRoad</i> , e uso de simulações 4D colaborativas para compatibilização de cronograma, tráfego e extração de quantitativos (QTO).	A02, A03, A12
c) Benefícios Recorrentes	Automação em larga escala do planejamento digital, com fatiamento mantendo as propriedades originais de tempo e custo preservadas no modelo.	A20

Lente de Pesquisa	Resultados Mapeados	Artigos Validadores
	Elevada precisão volumétrica na terraplenagem, reduzindo erros manuais de estimativa.	A20, A21
	Deteção antecipada de conflitos (<i>clash detection</i>), contribuindo para a otimização do sequenciamento produtivo e para a redução de incertezas do canteiro.	A02, A03
d) Barreiras Recorrentes	Limitações de software, como restrição no número de camadas modeláveis, perda de propriedades do corredor e erros de arredondamento de coordenadas na exportação IFC.	A20, A21
	Gargalos de processamento computacional ao renderizar malhas topográficas massivas (TIN), comuns em projetos de infraestrutura.	A12
	Exigência de elevada expertise em programação visual e ausência de padronização normativa de interoperabilidade no mercado.	A02, A03, A21

Fonte: Autor (2026).

a) Problemas de planejamento abordados: A literatura deste cluster concentra-se na inadequação das ferramentas nativas de BIM diante da natureza linear das rodovias. O problema central identificado é que os softwares tradicionais tendem a representar as camadas de pavimentação e os grandes volumes de aterro como blocos sólidos extensos e inteiriços (Peña; Camacho-Torregrosa; García, 2026).

Essa representação monolítica diverge da realidade da construção, na qual as frentes avançam em trechos curtos e os aterros são compactados em camadas, por exemplo, de 30 cm. Essa diferença dificulta a associação adequada de dados de tempo e custo, nas dimensões 4D e 5D, aos elementos 3D do modelo (Castañeda et al., 2025).

Em paralelo, a literatura também aborda a limitação dos cronogramas tradicionais para gerir a integração entre a execução da obra e os planos de controle de tráfego urbano em interseções complexas (Castañeda et al., 2025).

A persistência dessas ineficiências no setor está relacionada a um descompasso na origem da tecnologia. O BIM foi inicialmente concebido para edificações verticais, nas quais os elementos, como pilares, lajes e vigas, são naturalmente discretos e isolados. Ao aplicar essa lógica a ambientes horizontais contínuos, os planejadores encontram limitações nos softwares disponíveis.

A superação desse problema exige adaptações nos modelos e conhecimentos de programação que nem sempre fazem parte da formação tradicional do engenheiro civil. Com isso, ainda se mantém o uso de métodos 2D estáticos, que são mais familiares ao setor, mas apresentam limitações para representar o dinamismo logístico das obras de infraestrutura.

b) Forma de aplicação da metodologia: Para superar essas barreiras estruturais, o BIM é aplicado ao planejamento viário por meio de intervenções algorítmicas no modelo. A

metodologia utiliza linguagens de programação visual, como o *Dynamo* integrado ao *Civil 3D*, e submontagens paramétricas (*subassemblies*) modificadas por API (Kim et al., 2016).

Essa lógica permite segmentar os sólidos virtuais em estacas e camadas precisas, de acordo com o ritmo real das máquinas. A esses elementos são adicionados grupos de propriedades personalizadas, ou *Property Sets*, como estaqueamento, custo e tempo, posteriormente exportados em formatos de interoperabilidade IFC4 e IFC4.3 (Kim et al., 2016).

Além disso, o modelo segmentado é inserido em ambientes de simulação 4D, frequentemente integrados a práticas de *Lean Construction*, com o objetivo de validar rotas, tráfego e frentes de serviço de forma visual e iterativa (Torres et al., 2025).

Na prática, porém, a implementação desse fluxo no canteiro de obras evidencia uma distância relevante entre o ambiente acadêmico e a realidade operacional. Embora a avaliação das evidências apresente o fatiamento de sólidos por programação visual como uma solução promissora, essa abordagem ainda é pouco acessível para grande parte das construtoras de infraestrutura.

A necessidade de executar algoritmos paramétricos, como scripts em *Dynamo*, exige um nível de maturidade digital e de infraestrutura de TI que nem sempre está presente nas frentes de serviço. Assim, a metodologia encontra limitações práticas: sem um departamento de inovação ou profissionais dedicados à modelagem, a solução tende a sobrecarregar a equipe de planejamento da obra, que geralmente não dispõe de tempo nem de capacitação técnica para depurar códigos de software durante a execução do cronograma.

c) Discussão dos benefícios recorrentes: O principal benefício associado a esse conjunto metodológico, com apoio em métricas empíricas diretas, é o aumento da precisão e a redução do esforço manual no planejamento. Em termos de produtividade, rotinas automatizadas foram capazes de processar o fatiamento de 104 elementos sólidos, preservando suas propriedades de tempo e custo, em apenas 192 segundos. Esse resultado seria difícil de alcançar por métodos manuais convencionais, que tendiam a gerar perda significativa de metadados (Peña; Camacho-Torregrosa; García, 2026).

Na dimensão de custos e extração de volumes (QTO), protótipos voltados à terraplenagem apresentaram variações pouco significativas. Os modelos digitais alcançaram diferença de 0,0% para estruturas de pavimentação e variação de apenas -1,3% no volume de aterros reais, quando comparados aos dados da execução física (Peña et al., 2025). Além disso, a visualização prévia do planejamento em 4D indica potencial para mitigar riscos de forma antecipada, contribuindo

para a otimização do fluxo viário local e para a redução da necessidade de alterações que poderiam impactar os prazos (Torres et al., 2025).

A avaliação destas métricas indica que as implicações práticas dessa automação vão além da conveniência tecnológica, pois podem contribuir para maior controle financeiro em contratos de infraestrutura. Na construção civil pesada, em que os volumes de terraplenagem podem atingir milhões de metros cúbicos, erros de estimativa associados a métodos bidimensionais estáticos podem comprometer significativamente os resultados econômicos do projeto.

Nesse contexto, a redução do erro de quantificação para níveis próximos a zero, combinada à redução do tempo de processamento dos dados, ajuda a justificar o esforço financeiro e a mudança cultural necessários para a implementação da tecnologia e para a capacitação das equipes. A análise do portfólio indica que, nesse cenário, o BIM 4D/5D deixa de atuar apenas como instrumento de representação visual e passa a contribuir para a previsibilidade econômica da obra, oferecendo um nível de controle que o planejamento tradicional tende a não fornecer.

d) Discussão das barreiras recorrentes: A análise crítica do *cluster* indica que os principais entraves à adoção dessa tecnologia são de natureza técnica e computacional. Os autores relatam falhas de interoperabilidade entre softwares, como a perda de dados de propriedades topográficas e erros de arredondamento de coordenadas durante o intercâmbio de arquivos IFC (Peña; Camacho-Torregrosa; García, 2026).

Identificou-se também que os softwares apresentam limitações diante da complexidade do terreno natural, seja por restrições no número de pontos e blocos de decisão (*decision boxes*) na programação de *subassemblies*, o que pode limitar os projetos a cerca de cinco camadas de pavimento e trinta de aterro (Peña et al., 2025), seja pelo peso das malhas topográficas triangulares (TIN), que dificulta o carregamento ágil dos dados (Kim et al., 2016). Como consequência, a aplicação desse planejamento paramétrico depende de elevada qualificação em linguagens de programação, o que se configura como uma barreira relevante em canteiros de obras tradicionais (Torres et al., 2025).

A avaliação deste cenário demonstra que essas barreiras formam um ciclo que dificulta a inovação na infraestrutura. Conforme discutido na teoria da fragmentação dos contratos, apresentada na Seção 2.5, parte dessa ineficiência está relacionada ao modelo de trabalho em silos, que separa quem projeta de quem constrói. Em muitos casos, a equipe de projeto entrega um modelo digital voltado ao produto final, representado por um sólido monolítico conceitual.

Como não há integração inicial suficiente, característica comum em métodos como o *Design-Bid-Build*, a construtora recebe um projeto pouco compatível com a logística do canteiro.

Como consequência, o engenheiro de planejamento passa a assumir a tarefa de fatiar e reparametrizar o modelo para adequá-lo à execução. A dificuldade de superar esses obstáculos em larga escala está justamente nessa transferência de responsabilidade. As construtoras são geralmente estruturadas para gerenciar mão de obra, equipamentos e prazos, e não para atuar como desenvolvedoras de software corrigindo limitações de um projeto pouco integrado à execução.

Exigir que um engenheiro de planejamento domine algoritmos complexos de programação visual apenas para fatiar um modelo de aterro indica que a tecnologia ainda apresenta limitações de maturidade e usabilidade. Enquanto não houver maior padronização normativa, como a adoção mais ampla de protocolos abertos para rodovias, e ferramentas mais acessíveis, o planejamento BIM 4D/5D para obras lineares tende a permanecer concentrado em departamentos de inovação especializados, com menor disseminação entre os profissionais responsáveis pelas frentes de serviço diárias.

A análise do volume e da qualidade dessas constatações permite concluir que o BIM 4D/5D parametrizado oferece uma solução técnica relevante para a falta de previsibilidade espacial e logística na construção civil pesada. No entanto, sua aplicação prática imediata e ampla ainda exige cautela.

A principal conclusão extraída deste *cluster* é que a engenharia avançou na solução matemática do planejamento de rodovias por meio de algoritmos virtuais, mas ainda enfrenta barreiras operacionais importantes. Até que os desenvolvedores de *software* incorporem o fatiamento de obras lineares de forma mais nativa, intuitiva e sem exigir programação visual complexa, como scripts em *Dynamo*, essa metodologia tende a permanecer restrita a megaprojetos com orçamento suficiente para manter equipes dedicadas à inovação.

Assim, a adoção mais ampla da modelagem da informação na infraestrutura pesada dependerá do desenvolvimento de ferramentas mais compatíveis com a rotina e com a formação do engenheiro de canteiro.

e) Grau de consistência da evidência: As evidências extraídas apresentam convergência entre os estudos e são apoiadas por resultados numéricos reportados na literatura. O cluster indica que o uso nativo do BIM, originalmente voltado a edificações, apresenta limitações quando aplicado a obras de infraestrutura linear. Ao mesmo tempo, demonstra que o uso de

automações, como o fatiamento paramétrico de sólidos e a customização de atributos IFC, constitui uma abordagem relevante no estado da arte para aprimorar o planejamento de prazos e custos em rodovias e obras de terraplenagem de grande porte.

A análise do volume e da qualidade dessas constatações permite indicar o BIM 4D/5D parametrizado como uma solução técnica relevante para melhorar a previsibilidade espacial e logística na construção civil pesada. No entanto, sua aplicação prática imediata e em larga escala ainda exige cautela.

A análise deste cluster mostra que, embora a engenharia tenha avançado na solução computacional do problema, ainda persistem limitações operacionais e de governança. O aprimoramento isolado da ferramenta tecnológica tende a ser insuficiente quando o modelo de contratação mantém projetistas e construtores pouco integrados.

Nesse contexto, enquanto os softwares não incorporarem o fatiamento logístico de forma mais direta e intuitiva, a adoção dessa metodologia tende a depender de arranjos de entrega integrada, como o IPD, que antecipem o envolvimento da construtora na fase de projeto. Assim, a ampliação do uso da modelagem na infraestrutura pesada dependerá tanto da evolução das ferramentas quanto da adaptação dos modelos contratuais, permitindo que a lógica de execução da obra oriente a modelagem, e não o contrário.

4.2.3.4. Modelagem da Informação da Construção (BIM 4D/5D) em Complexos Institucionais e Megaprojetos Urbanos (Horizontais)

O quarto *cluster* de evidência forte direciona a análise para complexos institucionais e megaprojetos urbanos horizontais. Sustentado por quatro artigos (A06, A08, A13, A22), esse cluster investiga como a Modelagem da Informação da Construção (BIM 4D/5D) contribui para lidar com a fragmentação espacial e a dependência logística características dessas obras.

Diferentemente de uma rodovia isolada, um complexo urbano envolve a construção simultânea de múltiplas edificações, que interagem diretamente com o ambiente da cidade.

O Quadro 10 consolida a análise deste cluster e evidencia como a modelagem digital e geoespacial tem sido utilizada para enfrentar limitações relacionadas à previsibilidade técnica e financeira nesse contexto.

Quadro 10 - Síntese da Aplicação do BIM 4D/5D em Complexos Institucionais e Megaprojetos Urbanos.

Lente de Pesquisa	Resultados Mapeados	Artigos Validadores
a) Problema de Planejamento abordado	Desconexão entre o modelo tridimensional do projeto e o macroambiente urbano, gerando limitações na leitura espacial e na avaliação de conflitos com a infraestrutura existente e com o fluxo logístico do entorno.	A13, A22
	Baixa previsibilidade de custos e dificuldade de controle dos cronogramas, associadas à fragmentação das informações e à separação entre projetistas, equipes de planejamento e equipes de produção.	A06, A08, A13
b) Forma de aplicação da metodologia	Integração de modelos BIM à tecnologia <i>Web-GIS</i> para visualização geográfica unificada e inserção do BIM 4D em estruturas de planejamento de múltiplos níveis, como planejamento mestre e <i>lookahead</i> .	A08, A22
c) Benefícios Recorrentes	Redução de erros espaciais, como conflitos logísticos identificados por <i>clashdetection</i> , maior agilidade na extração de quantitativos (QTO) e evidências empíricas de retorno sobre investimento (ROI), associadas à mitigação de retrabalhos.	A13, A22
d) Barreiras Recorrentes	Alto custo inicial de implementação, envolvendo softwares, capacitação técnica e modelagem densa, além de falhas operacionais relacionadas à incompatibilidade de arquivos e à falta de maturidade digital na cadeia de suprimentos.	A06, A13, A2

Fonte: Autor (2026).

a) Problemas de planejamento abordados: as informações contidas neste cluster concentram-se nas falhas de coordenação espacial e financeira que afetam megaprojetos integrados a áreas urbanas e campi institucionais. O diagnóstico central extraído dos estudos é que o planejamento convencional tende a tratar as múltiplas edificações de um complexo como unidades isoladas, desconsiderando a interdependência logística e as restrições do macroambiente geográfico (GIS) (Gharaibeh et al., 2024).

Ao focar apenas no sequenciamento lógico de atividades estáticas, os métodos tradicionais apresentam limitações para prever conflitos entre a movimentação de equipamentos pesados e as estruturas já existentes na cidade. Além disso, os autores apontam ineficiências nos processos de orçamento e extração de dados, que ainda dependem de projetos bidimensionais fragmentados. Esse cenário contribui para baixa previsibilidade comercial, excesso de pedidos de informação (RFI) e desvios de custo (Gharaibeh et al., 2024).

A análise crítica da permanência dessas falhas permite observar que o problema não está relacionado apenas a limitações de software, mas também à cultura de fragmentação ainda presente no setor. A construção civil ainda tenta, em muitos casos, gerenciar ecossistemas urbanos complexos por meio de planilhas estáticas e desenhos bidimensionais pouco aderentes à realidade espacial.

A adoção mais ampla das dimensões 4D e 5D do BIM exige uma mudança relevante, pois antecipa e torna mais transparente a resolução de problemas técnicos na fase de pré-construção.

No entanto, parte do mercado ainda opera com base em modelos fragmentados, como o Design-Bid-Build, nos quais projetistas e construtoras nem sempre compartilham responsabilidades de forma integrada.

Nesse contexto, enquanto prevalecerem estruturas contratuais e culturais que toleram ambiguidade e baixa integração entre projeto e execução, os conflitos logísticos e espaciais tendem a continuar como fontes relevantes de perdas financeiras na infraestrutura horizontal.

b) Forma de aplicação da metodologia: para enfrentar a limitação de leitura espacial e a fragmentação dos complexos institucionais e urbanos, a literatura propõe ampliar o uso tradicional do BIM por meio de sua integração com plataformas de macroambiente e estruturas de planejamento em múltiplos níveis.

A aplicação técnica relatada nos estudos envolve a integração de modelos paramétricos, em arquivos no padrão IFC, com Sistemas de Informações Geográficas (GIS) em ambientes baseados na *web*, como *Web-GIS*. Utilizando linguagens como *WebGL* e plataformas de código aberto, como o *Cesium*, a metodologia reúne dados do edifício e do terreno em um único ambiente de visualização no navegador, convertendo de forma automatizada as coordenadas do BIM para o mundo real (Gharaibeh et al., 2024).

Em paralelo, os modelos tridimensionais integrados são utilizados como base para sistemas colaborativos, como o IPD, e alocados em servidores em nuvem. Isso permite que a equipe de engenharia e os múltiplos subcontratados realizem rotinas de detecção de conflitos logísticos (*clashdetection*) em tempo real, visualizem o sequenciamento de médio e longo prazo em 4D e extraiam dados de fabricação antes da mobilização física no campo (Gharaibeh et al., 2024).

A análise da viabilidade de implementação dessas soluções evidencia uma distância relevante entre a capacidade tecnológica disponível nos escritórios de engenharia e a realidade operacional dos canteiros de obras. Embora a literatura apresente a integração entre BIM e plataformas *Web-GIS* em nuvem como uma alternativa promissora para a logística de megaprojetos horizontais, sua aplicação prática pode enfrentar gargalos importantes.

Exigir que um canteiro de obras dinâmico, muitas vezes com conexão de internet instável e infraestrutura de TI limitada, consulte e atualize modelos geoespaciais pesados em tempo real pode não ser compatível com as condições reais do campo. Além disso, a eficácia dessas plataformas em nuvem depende da alimentação contínua de dados pela cadeia de suprimentos e por subcontratados que, em muitos casos, ainda apresentam baixa maturidade digital.

Assim, sem investimento significativo em conectividade no canteiro e em capacitação da base produtiva, esses modelos virtuais urbanos de alta complexidade podem acabar sendo utilizados principalmente como instrumentos de apoio documental ou apresentação, em vez de cumprirem plenamente sua função de orientar a tomada de decisão na frente de serviço.

c) Discussão dos benefícios recorrentes: A análise das informações deste *cluster* indica que o principal benefício associado à adoção do BIM 4D/5D em complexos horizontais está relacionado à otimização financeira e temporal, apoiada em métricas de Retorno sobre Investimento (ROI). Estudos quantitativos indicam que a implementação do BIM pode gerar ROI entre 10,17% e 16,10%, proporcionando economias na casa dos milhões de dólares ao longo do ciclo de vida do ativo e antecipando entregas em até 16 semanas (Gharaibeh et al., 2024).

Na dimensão espacial, a integração do modelo a plataformas *Web-GIS* reduziu o tempo de processamento de consultas de dados e de renderização de conflitos logísticos de centenas de segundos para apenas 2 a 20 segundos (Gharaibeh et al., 2024).

A análise dessas métricas permite observar que os ganhos obtidos contribuem para justificar o esforço necessário para a adoção tecnológica. Em megaprojetos urbanos, nos quais as margens de lucro são pressionadas pela complexidade logística e pelo elevado custo de capital, a redução de retrabalhos por meio de *clash detection* passa a ter papel relevante no controle financeiro do empreendimento.

A análise das informações contidas nos artigos deste cluster indica que o principal mérito dessa integração espacial e de dados está na possibilidade de identificar e corrigir inconsistências ainda no ambiente virtual, antes da execução física da obra. Com isso, o canteiro tende a ficar menos exposto a interrupções e retrabalhos que impactam o orçamento e o cronograma em obras de infraestrutura pesada.

d) Discussão das barreiras recorrentes: apesar dos retornos financeiros de longo prazo, as barreiras para a adoção mais ampla dessa tecnologia continuam relevantes e estão principalmente associadas ao alto custo inicial. A análise dos dados indica que a adoção do BIM exige investimentos em licenças de *software*, infraestrutura de servidores em nuvem, como ambientes comuns de dados (CDE), treinamento de equipes e reestruturação de processos. Esses custos podem ser especialmente restritivos para empresas de menor porte (Gharaibeh et al., 2024).

A análise da literatura aponta que essa tecnologia desloca parte importante dos custos para as fases iniciais do empreendimento, como projeto e pré-construção, podendo gerar aumentos de 7% a 13% nos gastos de engenharia antes mesmo da mobilização do canteiro. Além disso, persistem gargalos de estabilidade na integração de dados heterogêneos, exigindo intervenções manuais frequentes para evitar erros de compatibilização entre modelos BIM e mapas GIS (Gharaibeh et al., 2024).

A análise da origem dessas barreiras evidencia que o entrave não está apenas na capacidade financeira das empresas, mas também na incompatibilidade entre a lógica do BIM, que concentra investimentos nas fases iniciais do projeto, e o modelo de negócios predominante no setor. A infraestrutura tradicional, muitas vezes baseada em licitações pelo menor preço global, como no modelo *Design-Bid-Build*, tende a penalizar empresas que investem mais em engenharia preliminar.

Muitas construtoras relutam em assumir o custo de antecipar a resolução de conflitos espaciais em 3D porque os contratos atuais nem sempre recompensam diretamente a entrega de projetos mais compatibilizados. Em alguns casos, o modelo contratual ainda permite que falhas de projetos 2D incompletos sejam tratadas posteriormente por meio de aditivos contratuais e pleitos financeiros (*claims*). Assim, enquanto o ambiente de contratação não valorizar de forma mais clara a transparência e a eficiência ao longo do ciclo de vida do ativo, o investimento inicial exigido pelo BIM tende a continuar sendo visto por parte da alta gestão como custo adicional, e não como ativo estratégico.

e) Grau de consistência da evidência: as evidências consolidadas neste cluster apresentam boa consistência metodológica e convergência empírica. A literatura, apoiada em estudos de caso globais e análises de Retorno sobre Investimento (ROI), indica que a Modelagem da Informação da Construção (BIM 4D/5D), especialmente quando associada a sistemas geoespaciais, como *Web-GIS*, contribui para enfrentar deficiências de leitura espacial e de controle de custos em megaprojetos horizontais urbanos.

A análise dessas constatações demonstra que a adoção do BIM se apresenta como uma abordagem relevante para melhorar a previsibilidade logística e financeira de complexos institucionais modernos. O principal aprendizado deste cluster é que o BIM não atua apenas como uma ferramenta de engenharia, mas também como um elemento capaz de influenciar a forma de organização e gestão dos empreendimentos.

Ao relacionar essas evidências com o problema central desta pesquisa, a análise permite concluir que a tecnologia necessária para prever conflitos espaciais e melhorar o controle orçamentário já existe e apresenta resultados relevantes na literatura. No entanto, sua adoção plena exige maior transparência e antecipação de decisões na fase de pré-construção, condições que podem ser difíceis de alcançar em contratos tradicionais e fragmentados, como o *Design-Bid-Build*.

Essa constatação reforça o argumento central desta pesquisa: não basta à infraestrutura pesada implementar softwares sofisticados. Para que a previsibilidade do BIM, associada a espaço e custo, e o dinamismo do *Lean*, associado a fluxo e pessoas, se materializem no canteiro, a indústria precisa avançar em direção a modelos de governança e entrega integrada, como o IPD, capazes de alinhar os interesses de projetistas e construtores desde as fases iniciais do projeto.

4.2.3.5. Modelos de Entrega e Governança Colaborativa (IPD, ECI e CRM) em Complexos Institucionais e Megaprojetos Urbanos (Horizontais)

O quinto *cluster* de evidência forte aborda a dimensão contratual necessária para sustentar as inovações tecnológicas discutidas nos blocos anteriores. Sustentado por quatro artigos empíricos (A06, A11, A13, A30), esse cluster analisa como o *Integrated Project Delivery* (IPD), o envolvimento antecipado do empreiteiro (*Early Contractor Involvement* – ECI) e o gerenciamento de comportamentos relacionais (CRM) podem reduzir a fragmentação da cadeia de suprimentos em complexos urbanos e megaprojetos horizontais.

O Quadro 11 consolida a análise deste cluster e evidencia a transição de modelos tradicionais de contratação, historicamente baseados na transferência de riscos, para modelos de governança mais colaborativos e integrados. Essa mudança pode favorecer a aplicação mais efetiva do BIM e das práticas do *Lean Construction*.

Quadro 11 - Síntese dos Modelos de Entrega e Governança Colaborativa em Megaprojetos Urbanos.

Lente de Pesquisa	Resultados Mapeados	Artigos Validadores
a) Problema de Planejamento abordado	Fragmentação do ciclo de vida do projeto imposta por modelos tradicionais, como <i>Design-Bid-Build</i> , que isolam projetistas e construtores e geram esforços compartimentalizados, muitas vezes voltados à defesa contratual.	A06, A11, A30
	Comportamento oportunista, assimetria de informações e ausência de reciprocidade e de resolução conjunta de problemas entre stakeholders, elevando o risco de falhas de construtibilidade e litígios.	A11, A30
b) Forma de aplicação da metodologia	Adoção do <i>Integrated Project Delivery</i> (IPD) e do Planejamento de Pré-Construção (PCP), associados à governança relacional, para alinhar financeira e operacionalmente os objetivos das partes envolvidas.	A06, A11, A13

Lente de Pesquisa	Resultados Mapeados	Artigos Validadores
c) Benefícios Recorrentes	Criação de um ambiente de confiança que facilita a colaboração simultânea por meio do BIM, reduzindo pedidos de informação (RFI), retrabalho e tempo de tramitação de aprovações.	A06, A11, A13
d) Barreiras Recorrentes	Estruturas de aquisição e licitação pouco flexíveis, ausência de clareza na definição de papéis nas fases iniciais e resistência cultural à quebra das hierarquias tradicionais de poder e risco.	A06, A11

Fonte: Autor (2026).

a) Problemas de planejamento abordados: a literatura deste *cluster* trata das falhas de integração e dos comportamentos oportunistas que afetam as fases de pré-construção e execução de megaprojetos (Abbas; Din; Farooqui, 2016). O diagnóstico central dos estudos é que os modelos tradicionais de contratação tendem a separar projetistas e construtores, dificultando a conexão entre o projeto e a realidade de execução (Zheng et al., 2021).

Essa separação limita o Planejamento de Pré-Construção (PCP) e pode resultar em escopos com baixa construtibilidade e falhas de integração, muitas vezes identificadas apenas quando a obra já está em andamento (Abbas; Din; Farooqui, 2016). Sem colaboração antecipada e sem relações baseadas em reciprocidade, flexibilidade e resolução conjunta de problemas, o canteiro tende a apresentar assimetria de informações e transferência de riscos entre os agentes (Zheng et al., 2021).

Nesses cenários, os esforços produtivos permanecem divididos e voltados ao cumprimento de marcos contratuais isolados, o que contribui para falhas de comunicação e interrupções no fluxo de trabalho global (Ibrahim; Zayed; Lafhaj, 2025).

A análise da permanência dessas falhas evidencia que a infraestrutura ainda opera, em muitos casos, com modelos de governança pouco integrados. Em contratações públicas, é comum a manutenção da lógica de menor preço global do modelo *Design-Bid-Build*, que oferece maior previsibilidade formal ao processo, mas pode gerar custos adicionais durante a execução.

A fragmentação também funciona como um mecanismo defensivo do sistema. Projetistas tendem a se afastar das decisões de construtibilidade para evitar responsabilidades de campo, enquanto construtoras podem aceitar projetos ainda imaturos porque parte da recomposição econômica ocorre posteriormente por meio de pleitos financeiros (*claims*) e aditivos contratuais.

Nesse contexto, a colaboração plena, o uso efetivo de modelos BIM compartilhados e a otimização logística integrada tornam-se mais difíceis quando os próprios contratos ainda favorecem comportamentos individualizados, baixa transparência e transferência de riscos entre as partes.

b) Forma de aplicação da metodologia: Para reduzir a fragmentação dos megaprojetos, a análise dos estudos aponta a adoção de modelos de entrega integrada, como o IPD, e do envolvimento antecipado do empreiteiro (ECI) ainda nas fases iniciais de viabilidade e projeto.

Na prática, esses modelos buscam aproximar proprietários, projetistas e construtores desde o início do empreendimento. Em vez de cada parte atuar de forma isolada e transferir responsabilidades para os demais, a proposta é compartilhar riscos, decisões e resultados do projeto (Abbas; Din; Farooqui, 2016).

A gestão ocorre por meio do Planejamento de Pré-Construção (PCP), que envolve a equipe de execução antes da mobilização em campo. Essa participação antecipada permite discutir construtibilidade, engenharia de valor e riscos ainda na fase de projeto (Abbas; Din; Farooqui, 2016).

A análise do portfólio também indica que esses modelos colaborativos contribuem para integrar ferramentas como BIM e práticas *Lean*. Essa integração depende de relações mais cooperativas entre as partes, com maior troca de informações e resolução conjunta de problemas (Abbas; Din; Farooqui, 2016).

A análise da viabilidade desses modelos no mercado de infraestrutura demonstra que sua aplicação ainda enfrenta barreiras legais e culturais. No setor público, por exemplo, a adoção de IPD e ECI pode ser limitada por regras de licitação que separam as etapas do empreendimento e priorizam o menor preço global.

Além disso, muitas construtoras e projetistas ainda estão habituados a trabalhar de forma defensiva, preservando informações para reduzir riscos contratuais. Por isso, a adoção ampla desses modelos exige maior maturidade institucional e cultural. Embora sejam soluções promissoras, sua aplicação em larga escala depende de contratos mais voltados à colaboração e à geração de valor do que apenas à transferência de responsabilidades.

c) Discussão dos benefícios recorrentes: A análise dos estudos indica que os principais benefícios associados à adoção de Modelos de Entrega Integrada (IPD) e do Planejamento de Pré-Construção (PCP) estão relacionados à redução de litígios e à melhoria do desempenho financeiro dos projetos. Estudos empíricos indicam que o envolvimento antecipado das partes pode gerar reduções médias de 6,1% a 15% nos custos totais e diminuir o prazo de megaprojetos em até 15% (Abbas; Din; Farooqui, 2016).

Em aplicações práticas que integram IPD e BIM, foram reportadas economias superiores a US\$ 3 milhões e antecipações de até 16 semanas no cronograma, associadas à resolução de conflitos ainda na fase virtual (Gharaibeh et al., 2024). A literatura também indica que a colaboração entre IPD, *Lean* e BIM reduz o número de Pedidos de Informação (RFIs) e o volume de litígios, pois cria um ambiente mais favorável à troca de informações, ao alinhamento de interesses e à resolução conjunta de problemas (Zheng et al., 2021).

A análise dessas métricas permite constatar que o principal ganho do IPD vai além da economia financeira. O modelo contribui para reduzir conflitos entre projetistas, construtores e contratantes, diminuindo o esforço gasto em disputas e transferências de responsabilidade.

Em obras de infraestrutura, nas quais as margens costumam ser pressionadas, o IPD pode justificar o esforço de transição cultural ao reduzir a dependência de aditivos contratuais e pleitos financeiros (*claims*) como forma de recomposição econômica. Seu maior mérito está em criar condições contratuais e organizacionais para que ferramentas como BIM e práticas *Lean* sejam aplicadas com maior efetividade, alinhando os interesses dos stakeholders ao desempenho global do projeto.

d) Discussão das barreiras recorrentes: a análise dos dados aponta que a adoção de modelos colaborativos enfrenta barreiras culturais e institucionais relevantes. Entre os principais obstáculos estão a falta de tempo dedicado ao Planejamento de Pré-Construção (PCP), a indefinição de papéis e o não envolvimento de *stakeholders* importantes, como subempreiteiros críticos, nas fases iniciais do projeto (Abbas; Din; Farooqui, 2016).

Além disso, os autores destacam que a assimetria de informações e a permanência de comportamentos oportunistas dificultam a construção de relações mais colaborativas. Muitos agentes hesitam em compartilhar informações ou assumir compromissos conjuntos por receio de que outros participantes atuem de forma unilateral (Zheng et al., 2021).

Em uma escala mais ampla, a literatura também aponta limitações nos mecanismos de resolução de disputas, ausência de seguros adequados a arranjos IPD e fragmentação jurídica da cadeia de suprimentos, fatores que dificultam a inovação nas relações contratuais (Ibrahim; Zayed; Lafhaj, 2025).

A análise da natureza destes entraves permite observar que a resistência ao IPD e ao ECI na construção pesada é principalmente estrutural e contratual. A barreira central não está apenas na disposição dos engenheiros para colaborar, mas no modelo jurídico e institucional que organiza grande parte do setor, especialmente em obras públicas.

Muitos megaprojetos ainda são regidos por leis de licitação pouco flexíveis, com foco no menor preço global e na separação entre projeto e execução. Nesse contexto, torna-se difícil aplicar uma filosofia baseada em confiança, compartilhamento de riscos e alinhamento de interesses dentro de contratos tradicionalmente voltados à proteção individual das partes.

Enquanto o modelo de negócios e as regras de contratação não evoluírem para permitir a seleção de parceiros com base em valor agregado, inovação e capacidade de colaboração, o IPD tende a permanecer mais restrito a empreendimentos privados ou projetos com maior abertura institucional, com menor alcance sobre a infraestrutura pública.

e) Grau de consistência da evidência: As evidências reunidas neste cluster apresentam elevada consistência qualitativa e forte convergência teórica. O portfólio estruturado utiliza diferentes métodos, incluindo estudos empíricos sobre comportamento relacional e casos reais de integração entre *Lean*, BIM e IPD, indicando de forma recorrente que o desempenho dos megaprojetos está associado à redução da fragmentação contratual.

A análise desse conjunto de constatações demonstra que há evidências suficientes para considerar modelos de entrega integrada, como IPD e ECI, abordagens relevantes para a modernização da construção civil pesada. A principal conclusão deste cluster é que a inovação tecnológica, representada pelo BIM, e a melhoria operacional, associada à *LeanConstruction*, dependem de um ambiente contratual compatível com práticas colaborativas.

Ao relacionar esses achados à pergunta central da pesquisa, constata-se que muitas limitações do planejamento em infraestrutura não decorrem apenas da ausência de ferramentas modernas, mas também de modelos contratuais que ainda incentivam fragmentação, transferência de riscos e baixa integração entre os agentes.

Nesse contexto, a governança colaborativa atua como um mecanismo de alinhamento entre os interesses das partes envolvidas, reduzindo conflitos e favorecendo a aplicação mais efetiva de metodologias integradas. Assim, a síntese das evidências indica que a ampliação do uso do BIM 4D/5D e do *LastPlanner System* em megaprojetos horizontais tende a depender não apenas da evolução tecnológica, mas também de mudanças na engenharia contratual e nos modelos de gestão adotados pelo setor.

4.2.3.6. Modelagem da Informação da Construção (BIM 4D/5D) em Edificações Verticais de Grande Porte (Arranha-céus)

O sexto *cluster* de evidência forte direciona a análise para edificações verticais de grande porte, como torres e arranha-céus. Sustentado por quatro estudos de caso aplicados em torres de 15 a 45 pavimentos (A01, A04, A05, A27), esse cluster investiga como a integração entre a Modelagem da Informação da Construção (BIM 4D/5D) e práticas de gestão enxuta contribui para lidar com conflitos espaciais e pressões financeiras associadas à verticalização.

O Quadro 12 consolida a análise deste cluster e evidencia como a tecnologia pode contribuir para a gestão dos gargalos verticais e da interdependência entre diferentes subcontratados em edificações de grande porte.

Quadro 12 - Síntese da Integração entre BIM 4D/5D e Práticas *Lean* em Edificações Verticais de Grande Porte.

Lente de Pesquisa	Resultados Mapeados	Artigos Validadores
a) Problema de Planejamento abordado	Alta fragmentação da execução em edificações verticais de grande porte, com múltiplos subempreiteiros atuando simultaneamente em espaços físicos restritos, o que intensifica conflitos de interface, sobreposição de frentes e ciclos reentrantes de retrabalho.	A27
	Fragilidade no controle financeiro do empreendimento em razão da separação manual entre cronograma e custos, especialmente quando os fluxos de desembolso não refletem os padrões reais de pagamento contratual, podendo comprometer a liquidez e a sustentabilidade financeira da construtora.	A04
	Atrasos recorrentes associados a mudanças de design durante a execução, inconsistências em documentos bidimensionais e baixa confiabilidade do planejamento tradicional, com elevados índices de falha no cumprimento das atividades planejadas.	A01, A05
b) Forma de aplicação da metodologia	Integração do BIM 4D ao <i>LastPlanner System</i> (LPS) para apoiar o controle visual de curto prazo, combinada ao uso de algoritmos aplicados a matrizes <i>Design Structure Matrix</i> (DSM) para decompor o modelo em pacotes de trabalho logicamente sequenciados.	A01, A27
	Aplicação do BIM 5D para automatizar a extração de quantitativos (QTO) e integrar cronograma, custos e simulações de fluxo de caixa com base em padrões reais de pagamento e condições contratuais.	A04
c) Benefícios Recorrentes	Redução de atrasos logísticos e conflitos espaciais por meio da simulação prévia em BIM 4D, permitindo antecipar interferências, apoiar reuniões colaborativas e recuperar desvios gerados por mudanças de design durante a obra.	A05
d) Barreiras Recorrentes	Resistência cultural e organizacional de subempreiteiros à alteração de práticas tradicionais de trabalho, exigindo redefinição de papéis, ajustes de governança e maior integração entre agentes para viabilizar o uso efetivo de pacotes de trabalho orientados pelo BIM.	A27
	Limitações de infraestrutura tecnológica no canteiro, especialmente relacionadas ao processamento e à visualização de modelos 3D complexos em dispositivos móveis, além da limitação do BIM em mitigar fatores externos ao planejamento digital, como atrasos em licenças governamentais.	A01, A05

Fonte: Autor (2026).

a) Problemas de planejamento abordados: a análise deste cluster trata das ineficiências associadas à elevada concentração espacial e financeira das obras verticalizadas. O diagnóstico extraído dos estudos indica que edificações de grande porte, como os arranha-céus de 29 e 45 pavimentos mapeados no portfólio, apresentam forte fragmentação do trabalho. Em alguns casos, até 70% da execução é delegada a diferentes subempreiteiros, que precisam compartilhar áreas reduzidas de apoio e recursos limitados de içamento (Isaac; Curreli; Stoliar, 2017).

Os autores indicam que o planejamento tradicional apresenta limitações para representar as interfaces espaciais entre equipes, gerando ciclos de fluxos reentrantes, nos quais uma mesma equipe é interrompida e precisa retornar ao mesmo pavimento em diferentes momentos. Além disso, as análises mostram que os métodos tradicionais de previsão de fluxo de caixa, baseados na integração manual entre cronogramas e custos, tendem a desconsiderar condições contratuais reais, como retenções e adiantamentos. Esse cenário pode contribuir para crises de liquidez, apontadas como uma das principais causas de falência e insolvência de construtoras do setor (Lu; Won; Cheng, 2016).

A avaliação do portfólio também reforça essas limitações ao indicar que métodos convencionais de sequenciamento apresentam taxa média de falha de planejamento de 54%, mostrando dificuldade para conectar metas de longo prazo à execução diária no canteiro (Heigermoser et al., 2019).

A análise da permanência dessas falhas mostra que o setor ainda tenta gerenciar obras de alta densidade vertical com ferramentas pouco adequadas à complexidade espacial desse tipo de empreendimento. Uma edificação vertical de grande porte funciona como uma estrutura produtiva concentrada, na qual diversos subempreiteiros disputam os mesmos espaços, equipamentos de transporte vertical e recursos financeiros.

A permanência dessas ineficiências está relacionada à separação entre cronogramas, orçamentos, pacotes de trabalho e modelos tridimensionais. Enquanto o planejamento financeiro, a divisão dos pacotes de trabalho, a modelagem BIM 4D/5D e as rotinas de gestão de campo, como LPS e *Lean*, forem tratados de forma isolada, o gestor tende a atuar principalmente sobre os efeitos dos problemas, como atrasos, multas e litígios, em vez de enfrentar a causa principal: a combinação entre restrição de espaço físico e pressão financeira no ciclo vertical da obra.

b) Forma de aplicação da metodologia: A análise da literatura aponta que os desafios logísticos dos arranha-céus têm sido enfrentados por meio da integração entre BIM e práticas *Lean*. A aplicação envolve o uso de algoritmos e matrizes, como *Design Structure Matrix* (DSM) e *Domain Mapping Matrix* (DMM), para analisar as relações do projeto e dividi-lo em pacotes de trabalho executáveis, com menor interferência entre equipes (Isaac; Curreli; Stoliar, 2017).

Em paralelo, a dimensão 4D é integrada às rotinas do *LastPlanner System* (LPS), com uso de cores no modelo 3D para apoiar reuniões de planejamento de curto prazo, como *lookahead* e *weeklyworkplan*, e indicar visualmente o status de restrição de cada tarefa (Heigermoser et al., 2019).

Na dimensão financeira, o BIM 5D é utilizado para extrair quantitativos (QTO) automaticamente e cruzar esses dados com bases de custos, cronogramas e condições contratuais reais, como retenções e adiantamentos. Com isso, torna-se possível gerar curvas preditivas de fluxo de caixa mais aderentes ao andamento da obra (Lu; Won; Cheng, 2016).

A análise da viabilidade dessas soluções integradas evidencia uma diferença relevante entre a capacidade dos escritórios técnicos e a infraestrutura tecnológica disponível no canteiro de obras. A consulta a modelos 3D densos e a atualização do status das tarefas em tempo real podem enfrentar limitações de hardware, já que tablets e dispositivos móveis nem sempre conseguem renderizar modelos pesados nas frentes de serviço, reduzindo a utilidade prática do sistema (Heigermoser et al., 2019).

Além disso, a divisão da obra em pacotes de trabalho otimizados pode encontrar resistência em uma cadeia de suprimentos fragmentada, na qual subempreiteiros nem sempre estão dispostos a alterar práticas tradicionais de execução para se adequar ao sequenciamento proposto pela construtora principal (Isaac; Curreli; Stoliar, 2017). Assim, embora o modelo seja tecnicamente consistente, sua aplicação em obras verticalizadas depende de condições operacionais e contratuais que viabilizem o uso efetivo dessas ferramentas no canteiro.

c) Discussão dos benefícios recorrentes: o uso integrado do BIM 4D/5D e de práticas *Lean* em arranha-céus apresenta benefícios quantitativos relevantes para o desempenho da obra. A automação espacial via BIM demonstrou capacidade de reduzir o tempo de definição de pacotes de trabalho de semanas para três dias, diminuindo interfaces conflitantes entre equipes.

Em situações de crise, a simulação prévia em 4D, associada a reuniões colaborativas, mostrou-se capaz de recuperar até 28 dias de atraso decorrentes de mudanças relevantes de projeto solicitadas pelo cliente (Pérez; Ávila; Sánchez, 2024).

Do ponto de vista financeiro, a integração 5D automatizou o cálculo do fluxo de caixa e permitiu projetar os custos de financiamento bancário, como juros sobre descobertos. Com isso, a construtora pôde simular diferentes cenários de projeto e pagamento para melhorar o resultado econômico da operação (Lu; Won; Cheng, 2016).

A análise do impacto prático dessas métricas demonstra que o BIM 4D/5D em edificações de grande porte não atua apenas como ferramenta de otimização de cronograma, mas também como apoio ao controle financeiro da obra. Em empreendimentos altamente verticalizados, nos quais o espaço físico é limitado e não pode ser facilmente ampliado para absorver equipes adicionais, interrupções podem gerar efeitos em cadeia sobre o prazo e o caixa.

A análise realizada indica que o principal mérito dessas metodologias está em aproximar a gestão financeira da dinâmica física da obra. Em vez de depender apenas de planilhas isoladas e análises reativas, o planejamento passa a incorporar informações mais integradas sobre produção, prazo e custo, contribuindo para reduzir riscos de estrangulamento financeiro e insolvência.

d) Discussão das barreiras recorrentes: as barreiras para a adoção mais ampla do BIM e do *Lean* neste nicho estão associadas à resistência comportamental e a fatores externos ao controle direto da equipe de obra. A literatura aponta a relutância de subempreiteiros em modificar suas práticas operacionais e redistribuir tarefas para se adequar aos fluxos definidos pelos modelos 4D (Isaac; Curreli; Stoliar, 2017).

Soma-se a isso a limitação de conectividade e de hardware no canteiro, especialmente em dispositivos como tablets, que nem sempre conseguem suportar a visualização de modelos pesados de grandes edifícios. Além disso, os autores destacam que, apesar do potencial preditivo dessas ferramentas, o BIM 4D/5D e o LPS não conseguem mitigar plenamente atrasos causados por fatores externos, como trâmites prolongados de licenciamento, restrições financeiras repentinas do proprietário ou condições climáticas adversas (Pérez; Ávila; Sánchez, 2024).

A análise da origem dessas barreiras permite constatar que o problema central não está apenas no software, mas também na fragmentação da cadeia produtiva. A tentativa de otimizar um edifício por meio de pacotes de trabalho colaborativos encontra limites quando cada

subempreiteiro, como instalações, estrutura e vedações, é contratado de forma isolada e tende a priorizar sua própria margem de resultado.

Sem avanços nos modelos de contratação, que incentivem maior compartilhamento de riscos, resultados e responsabilidades, a aplicação plena dessas tecnologias tende a ser limitada pela baixa colaboração entre os agentes envolvidos na execução.

e) Grau de consistência da evidência: as evidências reunidas neste cluster apresentam elevada consistência empírica, sendo sustentadas por testes computacionais e estudos de caso aplicados a edifícios verticalizados de alta complexidade, variando de 15 a 45 pavimentos (Isaac; Curreli; Stoliar, 2017). A literatura converge ao demonstrar que a integração entre BIM 4D/5D e ferramentas *Lean* contribui para lidar com as restrições espaciais e financeiras típicas das obras de grande altura, por meio de soluções como a divisão em pacotes de trabalho e a projeção automatizada do fluxo de caixa baseada em contratos (Lu; Won; Cheng, 2016).

A avaliação destas constatações demonstra que o uso integrado de BIM e *Lean* em edificações verticalizadas deixa de representar apenas um diferencial tecnológico e passa a assumir papel relevante para a viabilidade logística e financeira do empreendimento. A principal conclusão fornecida pela análise deste cluster é que a engenharia já dispõe de ferramentas capazes de organizar o fluxo de trabalho, estruturar o uso do espaço e melhorar o controle operacional do canteiro.

No entanto, ao relacionar essas conclusões à escala mais ampla dos megaprojetos, identifica-se uma limitação importante: embora BIM e LPS contribuam para a gestão da execução diária, eles apresentam restrições para lidar, de forma isolada, com incertezas mais amplas, como oscilações macroeconômicas, eventos climáticos e riscos correlacionados de grande escala.

Nesse contexto, a síntese dos dados indica a necessidade de complementar a gestão operacional com abordagens preditivas mais avançadas, incluindo Inteligência Artificial, Teoria de Redes e Simulações de Monte Carlo. Essas ferramentas não substituem a gestão de campo, mas funcionam como suporte analítico para avaliar cenários, testar vulnerabilidades do cronograma e ampliar a capacidade de previsão em empreendimentos complexos.

4.2.3.7. Abordagens Computacionais e Sistemas de Apoio (IA, Simulações Estocásticas e Redes) em Obras Lineares Viárias

O sétimo *cluster* de evidência forte introduz a dimensão preditiva do planejamento. Após a literatura destacar o papel do *Lean Construction* na organização do fluxo de trabalho e do BIM

na coordenação espacial, este cluster — sustentado por cinco artigos (A15, A16, A17, A19, A23) — analisa a aplicação de Inteligência Artificial (IA), Dinâmica de Sistemas (SD) e Simulações de Monte Carlo na modelagem de riscos e incertezas em obras lineares viárias e de infraestrutura.

O Quadro 13 consolida a análise deste cluster ao evidenciar como abordagens computacionais têm sido utilizadas para realizar análises preditivas de cronogramas, avaliando o impacto de variáveis probabilísticas e riscos correlacionados que os métodos determinísticos tradicionais apresentam dificuldade em representar de forma sistêmica.

Quadro 13 - Síntese das Abordagens Computacionais e Preditivas em Obras Lineares Viárias.

Lente de Pesquisa	Resultados Mapeados	Artigos Validadores
a) Problema de Planejamento abordado	Limitação dos métodos tradicionais, como CPM/PERT, para representar a interdependência estocástica, as correlações entre múltiplos riscos simultâneos e os ciclos de retroalimentação operacional no canteiro.	A15, A16
	Estimativas de produtividade de equipamentos pesados baseadas principalmente em dados empíricos subjetivos e documentação primária, como notas de despacho, resultando em cronogramas pouco realistas e desvios orçamentários.	A17, A23
b) Forma de aplicação da metodologia	Aplicação de Simulações de Monte Carlo (MC), Análise Quantitativa de Risco (QRA), algoritmos de Inteligência Artificial (IA) e modelos híbridos dinâmicos (SD-DES) às redes de cronograma originais.	A16, A17, A19
	Uso de Controladores de Mitigação (MitC) para automatizar a seleção de estratégias estocásticas de aceleração e otimizar frotas de maquinário pesado, como caminhões basculantes e escavadeiras, com base em cenários de risco.	A15, A23
c) Benefícios Recorrentes	Redução de até 81% na superestimativa de custos corretivos, identificação matemática do efeito cascata gerado por riscos correlacionados e economia financeira na otimização estocástica de frotas logísticas.	A15, A16, A23
d) Barreiras Recorrentes	Cronogramas nativos frequentemente inconsistentes, com erros de lógica, como atividades com pontas soltas (<i>open-ended</i>), coleta incipiente de dados em campo e baixa maturidade digital da cadeia produtiva.	A17, A19,

Fonte: Autor (2026).

a) Problemas de planejamento abordados: a análise deste cluster avalia a fragilidade preditiva do planejamento determinístico. O problema central identificado está na dificuldade de métodos como o CPM representarem adequadamente as interações entre variáveis de risco, os ciclos de retroalimentação e as relações não lineares presentes nas frentes de serviço (Xu et al., 2018).

Ao atribuir durações isoladas às atividades, o planejamento estático tende a desconsiderar correlações estocásticas importantes (Xu et al., 2018). A síntese dos dados destaca, por exemplo, que um evento climático adverso pode afetar simultaneamente várias tarefas

interdependentes e sensíveis ao clima, alterando de forma significativa a incerteza do prazo (Kammouh et al., 2022).

Além disso, a avaliação aponta limitações na coleta e gestão de dados em obras de infraestrutura. A previsão de produtividade de maquinário pesado ainda depende, em muitos casos, de anotações de engenheiros de campo, notas de despacho e extrapolações simples, o que aumenta a subjetividade do processo (Gurcanli; Turkoglu; Bilir, 2017). Como consequência, o setor de infraestrutura registra historicamente atrasos e estouros de custo em diferentes contextos globais (Xu et al., 2018).

A avaliação da permanência destas limitações evidencia que a construção pesada ainda utiliza, com frequência, ferramentas lineares de planejamento em ambientes operacionais marcados por elevada incerteza. Isso resulta em cronogramas com menor confiabilidade, pois muitas vezes são baseados em estimativas empíricas pouco estruturadas, e não em modelagens probabilísticas.

No planejamento viário tradicional, incertezas e correlações de risco, comuns em obras a céu aberto, tendem a ser tratadas como desvios excepcionais. No entanto, sob a ótica da engenharia de sistemas, esses fatores fazem parte do comportamento esperado das frentes de serviço.

b) Forma de aplicação da metodologia: para contornar as limitações probabilísticas dos cronogramas tradicionais, a literatura propõe a adoção de abordagens computacionais preditivas (Nabawy; Khodeir, 2021). A metodologia inclui, por exemplo, o desenvolvimento de modelos híbridos que integram Dinâmica de Sistemas (SD), voltada à representação de fenômenos macro e ciclos de retroalimentação, à Simulação de Eventos Discretos (DES), utilizada para simular a operação em nível mais detalhado e a sequência das frentes de serviço (Xu et al., 2018).

Em paralelo, Simulações de Monte Carlo e Análises Quantitativas de Risco (QRA) são aplicadas em milhares de iterações computacionais, com o objetivo de gerar distribuições de probabilidade para prazos de entrega e custos contratuais (Nabawy; Khodeir, 2021). A análise do portfólio também aponta o uso de Controladores de Mitigação dinâmicos (MitC), que auxiliam na seleção de estratégias de aceleração e na otimização de frotas de maquinário pesado, como caminhões basculantes, considerando o comportamento da obra e gatilhos contratuais de penalidades e recompensas (Kammouh et al., 2022).

A análise da viabilidade de aplicação destas ferramentas na infraestrutura viária demonstra uma distância relevante entre a sofisticação dos modelos teóricos e a maturidade da coleta de

dados em campo. Embora a literatura indique o potencial preditivo de algoritmos estocásticos, a efetividade dessas ferramentas depende diretamente da qualidade das informações utilizadas como entrada.

Aplicar Simulações de Monte Carlo ou sistemas de controle dinâmico em canteiros que ainda não possuem mecanismos consistentes de rastreamento de produtividade, dependendo principalmente de apontamentos manuais para controle de equipamentos, pode limitar a utilidade prática dos modelos. Assim, sem a estruturação prévia do controle dos processos operacionais na linha de frente, a dimensão preditiva corre o risco de produzir simulações estatisticamente sofisticadas, mas pouco aderentes à realidade física e às limitações reais do projeto.

c) Discussão dos benefícios recorrentes: quando apoiadas por bases de dados consistentes, as abordagens computacionais apresentam impacto analítico e financeiro relevante. Estudos indicam que a aplicação de Controladores de Mitigação (MitC) evitou a superestimativa de custos corretivos em até 81%, pois o algoritmo identificou a ineficiência de manter medidas de aceleração ativas de forma contínua, ajustando o esforço ao comportamento dinâmico da obra (Kammouh et al., 2022).

Na gestão de maquinário de terraplenagem, a Simulação de Monte Carlo permitiu dimensionar frotas logísticas com maior precisão, gerando economias estimadas em aproximadamente US\$ 55 mil por unidade de transporte otimizada (Gurcanli; Turkoglu; Bilir, 2017). Além disso, a modelagem dinâmica demonstrou matematicamente o efeito cascata, indicando que o atraso causado por riscos simultâneos pode ser maior do que a simples soma de seus impactos individuais (Xu et al., 2018).

A interpretação destas métricas permite constatar que o principal benefício da dimensão preditiva é atuar como instrumento de diagnóstico e apoio ao planejamento. A modelagem matemática evidencia, de forma quantitativa, as limitações do cronograma tradicional diante da complexidade dos megaprojetos.

Embora prever cenários não substitua a gestão operacional direta das equipes de produção, essas tecnologias ajudam a demonstrar, por meio de análises de probabilidade e sensibilidade, que a infraestrutura pesada exige uma gestão capaz de lidar com incertezas. Essa constatação oferece aos gestores uma justificativa técnica e financeira para investir na estruturação do controle de canteiro, incluindo práticas como *LeanConstruction* e Modelagem da Informação da Construção (BIM).

d) Discussão das barreiras recorrentes: apesar da eficácia das modelagens preditivas, sua disseminação ainda enfrenta entraves organizacionais e de maturidade metodológica. A literatura aponta que um dos principais obstáculos é a baixa qualidade da estruturação lógica dos cronogramas das construtoras, que frequentemente apresentam inconsistências, como atividades com pontas soltas (*open-ended*), inviabilizando simulações probabilísticas confiáveis (Nabawy; Khodeir, 2021).

Além disso, o setor de Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC) é apontado como um dos menos digitalizados e automatizados da economia, o que dificulta a implementação de tecnologias baseadas em grande volume de dados, como Inteligência Artificial e Algoritmos Genéticos. Na prática, a coleta de dados de produtividade de maquinário ainda depende, em muitos casos, de apontamentos empíricos e julgamentos subjetivos de engenheiros de campo (Gurcanli; Turkoglu; Bilir, 2017).

A análise destas barreiras evidencia que o limite para a adoção de simulações avançadas e IA na infraestrutura é principalmente cultural e contratual. Análises Quantitativas de Risco (QRA) rigorosas ainda não são amplamente adotadas porque, em modelos tradicionais de contratação, o planejamento muitas vezes é usado mais para justificar aditivos contratuais (*claims*) do que para controlar efetivamente a produção.

Nesse contexto, inserir algoritmos preditivos em um ambiente baseado na transferência reativa de riscos tende a ter eficácia limitada. O uso pleno dessas ferramentas depende de modelos de negócio que valorizem a transparência dos dados e de uma cadeia produtiva com maior digitalização contínua.

e) Grau de consistência da evidência: as evidências agrupadas neste cluster apresentam convergência metodológica e matemática. As investigações incluem revisões cienciométricas sobre Inteligência Artificial na indústria AEC, simulações estocásticas aplicadas à gestão de frotas e análises de cronogramas viários reais. Em conjunto, os estudos indicam que sistemas de apoio computacional são ferramentas adequadas para representar correlações de risco que os métodos determinísticos têm dificuldade de capturar.

A análise da robustez dessas constatações demonstra que abordagens preditivas, como Inteligência Artificial, Simulações de Monte Carlo e Dinâmica de Sistemas, representam uma evolução analítica relevante para complementar as limitações estatísticas do planejamento clássico.

A principal conclusão fornecida pela análise deste cluster, em resposta à pergunta de pesquisa sob a ótica da previsão de cenários, é que a infraestrutura viária, por estar exposta a variáveis externas como clima, geologia e suprimentos, não deve depender exclusivamente de cronogramas lineares. A análise sistêmica indica que o papel dessas metodologias não é organizar diretamente a rotina física dos operários, mas atuar como uma camada de diagnóstico e apoio à decisão.

Essas ferramentas ajudam a demonstrar quantitativamente as fragilidades do modelo tradicional e reforçam a necessidade de avaliar o cronograma sob uma ótica probabilística, antecipando impactos financeiros e temporais de riscos correlacionados antes que eles comprometam o desempenho do megaprojeto.

4.2.3.8. Abordagens Computacionais e Sistemas de Apoio (IA, Simulações Estocásticas e Redes) em Complexos Institucionais e Megaprojetos Urbanos (Horizontais)

O oitavo e último *cluster* de evidência forte encerra a dimensão preditiva do planejamento. Apoiado por seis artigos (A07, A09, A22, A28, A30, A34), esse cluster analisa o uso de Inteligência Artificial (IA), Teoria de Redes e simulações avançadas em complexos institucionais e megaprojetos urbanos.

O Quadro 14 consolida a análise deste cluster e demonstra como a ciência de dados pode auxiliar na análise de problemas antes tratados como pouco visíveis ou subjetivos, como a complexidade das equipes, os atritos entre os envolvidos e o retrabalho oculto. Esses achados indicam que, em obras densas e urbanas, o sucesso do planejamento depende de ferramentas capazes de mapear não apenas materiais e atividades, mas também as relações entre os agentes envolvidos.

Quadro 14 - Síntese das Abordagens Computacionais e Sistemas de Apoio em Complexos Institucionais e Megaprojetos Urbanos.

Lente de Pesquisa	Resultados Mapeados	Artigos Validadores
a) Problema de Planejamento abordado	Os métodos tradicionais apresentam limitações para representar a complexidade do projeto e o trabalho oculto, como retrabalho e excesso de coordenação, que contribuem para atrasos em megaprojetos urbanos.	A28, A34
	Relações complexas e falhas de comunicação entre os diversos envolvidos, como proprietários, empreiteiros e projetistas, geram atritos e dificultam a escolha do sistema de planejamento mais adequado.	A09, A30
b) Forma de aplicação da metodologia	Uso de Teoria de Redes, como <i>Stakeholder Value Network</i> , simulações de fluxo de trabalho e Inteligência Artificial para apoiar a tomada de decisão gerencial.	A07, A09, A28, A30, A34

Lente de Pesquisa	Resultados Mapeados	Artigos Validadores
	Capacidade de transformar fatores organizacionais e comportamentais em dados analisáveis, permitindo prever falhas no cronograma associadas a atritos entre equipes e apoiar decisões complexas.	A09, A30, A34
c) Benefícios Recorrentes	Modelos matemáticos exigem dados precisos e bem estruturados. A eficácia da IA pode ser limitada pela baixa maturidade digital das empresas e pela falta de informações confiáveis da obra.	A09, A30
d) Barreiras Recorrentes	Os métodos tradicionais apresentam limitações para representar a complexidade do projeto e o trabalho oculto, como retrabalho e excesso de coordenação, que contribuem para atrasos em megaprojetos urbanos.	A28, A34

Fonte: Autor (2026).

a) Problemas de planejamento abordados: a análise deste cluster mostra por que o planejamento tradicional apresenta limitações em grandes obras urbanas. Diferentemente de uma rodovia, em que parte relevante dos riscos está ligada à logística e ao clima, nos complexos urbanos o desafio central envolve a relação entre pessoas, empresas e instituições (He et al., 2015).

Os métodos clássicos tendem a não representar adequadamente as chamadas cargas de trabalho ocultas (*hiddenworkloads*), como o tempo gasto com coordenação excessiva, retrabalhos e esperas entre diferentes equipes (Lu et al., 2015). Além disso, a presença de várias empreiteiras, projetistas e fiscais no mesmo ambiente pode gerar atritos e dificultar a troca de informações, especialmente quando cada parte busca proteger seus próprios interesses (Zheng et al., 2021).

Diante dessa complexidade, torna-se difícil escolher o sistema de planejamento mais adequado apenas com base na experiência individual dos gestores, o que pode levar ao uso de métodos genéricos e pouco aderentes à realidade do projeto (Sheikhhoshkar et al., 2025).

A avaliação deste cenário evidencia que a gestão de megaprojetos urbanos exige uma leitura mais ampla do canteiro. Cronogramas tradicionais, como o CPM, concentram-se principalmente na execução física, mas nem sempre capturam os efeitos das relações contratuais, dos conflitos entre agentes e das falhas de comunicação.

Um complexo urbano não é apenas um conjunto de edificações, mas uma rede de contratos, interesses e decisões em constante interação. Por isso, enquanto o planejamento não considerar o peso do comportamento humano e da sobrecarga de coordenação, os cronogramas tendem a representar apenas parte da realidade da obra. Nesse contexto, métodos computacionais e Teoria de Redes tornam-se úteis para mapear essas relações e compreender melhor os fatores que influenciam o desempenho do canteiro.

b) Forma de aplicação da metodologia: para lidar com a complexidade dos megaprojetos urbanos, a literatura propõe uma evolução na forma de planejar. Em vez de utilizar apenas planilhas estáticas, os estudos combinam modelos BIM tridimensionais com mapas geográficos interativos, como *WebGIS*, permitindo que os gestores visualizem a obra inserida no contexto do trânsito e da infraestrutura urbana (Zhao; Mbachu; Liu, 2022).

Para organizar o comportamento dos agentes e medir as cargas de trabalho ocultas, os estudos aplicam modelos matemáticos, como a Teoria de Redes de Valor (RB-SVN), a Análise de Rede Analítica Fuzzy (FANP) e simulações de eventos discretos. Essas ferramentas permitem transformar relações de confiança, atritos entre empreiteiras e riscos de retrabalho em informações analisáveis para a gestão (He et al., 2015).

Além disso, a tomada de decisão passa a ser apoiada por Sistemas de Suporte e Inteligência Artificial, utilizando lógicas computacionais como a Teoria dos Conjuntos Aproximados (*Rough Set Theory*). Esses sistemas analisam as características do projeto e auxiliam na escolha da combinação mais adequada de ferramentas de planejamento e controle (Sheikhkhoshkar et al., 2025).

A avaliação da aplicação prática destas inovações demonstra uma distância relevante entre a sofisticação das ferramentas propostas pela literatura e a realidade operacional dos canteiros de obras. A academia apresenta recursos avançados, como inteligência artificial, redes comportamentais e simulações estocásticas, para apoiar a organização de obras urbanas complexas. No entanto, a eficácia desses modelos depende diretamente da qualidade dos dados de entrada.

Aplicar redes matemáticas complexas em uma obra com falhas de comunicação entre parceiros e controle de produtividade ainda pouco estruturado pode limitar o valor prático dos resultados. A inteligência artificial não substitui colaboração, organização básica e qualidade da informação. Para que essas ferramentas preditivas contribuam de fato para a tomada de decisão, a cadeia produtiva precisa desenvolver maior maturidade digital e transparência nos dados.

Sem essa base confiável, os sistemas computacionais tendem a produzir análises visualmente sofisticadas, mas pouco úteis para resolver os problemas logísticos enfrentados na linha de frente da execução.

c) Discussão dos benefícios recorrentes: a análise dos dados indica que essas abordagens computacionais ampliam a capacidade de análise dos gestores. Com o uso da Teoria de Redes, por exemplo, comportamentos antes tratados como subjetivos, como confiança e comunicação

entre equipes, podem ser transformados em dados mensuráveis. Isso auxilia na redução de conflitos entre empresas e no uso mais eficiente dos recursos, permitindo que a construtora desenvolva estratégias de engajamento entre os envolvidos (Zheng et al., 2021).

O uso de tecnologias como BIM integrado a mapas geográficos (GIS) também permite identificar interferências físicas com maior antecedência, reduzindo retrabalhos e perdas de tempo (Zhao; Mbachu; Liu, 2022). Além disso, sistemas de apoio baseados em Inteligência Artificial ajudam a selecionar as ferramentas de planejamento e controle mais adequadas para cada fase da obra, considerando as necessidades reais da equipe (Sheikhkhoshkar et al., 2025).

Por fim, modelos que simulam o trabalho oculto, como o tempo gasto com reuniões, esperas e retrabalho, permitem que os gestores identifiquem gargalos relevantes antes que eles comprometam o andamento do canteiro (Lu et al., 2015).

A análise destes ganhos permite observar que o principal benefício dessas tecnologias está em transformar percepções gerenciais em dados mais objetivos. Em megaprojetos urbanos, nos quais há elevada complexidade organizacional e logística, essas ferramentas preditivas funcionam como apoio antecipado à tomada de decisão.

Elas permitem identificar problemas pouco visíveis, como atritos entre empresas e sobrecarga de coordenação, antes que se convertam em atrasos e prejuízos financeiros. A Inteligência Artificial e as simulações também possibilitam testar cenários no ambiente computacional, reduzindo o risco de que erros sejam identificados apenas durante a execução física da obra.

d) Discussão das barreiras recorrentes: apesar dos benefícios identificados, a aplicação desses modelos avançados enfrenta barreiras importantes na prática. O principal obstáculo técnico é que algoritmos e sistemas de Inteligência Artificial dependem de dados completos e confiáveis para funcionar adequadamente. No entanto, as informações provenientes do canteiro frequentemente apresentam limitações, seja pela interpretação subjetiva dos profissionais, seja pela falta de dados estruturados (Sheikhkhoshkar et al., 2025).

Além disso, ainda há baixo nível de familiaridade dos profissionais de obra com sistemas complexos de planejamento, o que pode exigir a contratação de especialistas apenas para configurar e interpretar esses modelos (Sheikhkhoshkar et al., 2025).

Do ponto de vista cultural, um dos principais desafios é que os diferentes agentes envolvidos em um megaprojeto urbano, como proprietários, empreiteiros e projetistas, tendem a analisar

os problemas a partir de seus próprios interesses. Isso pode reduzir a disposição para compartilhar informações e colaborar de forma transparente (Zheng et al., 2021).

A análise dessas barreiras evidencia que a aplicação de tecnologias avançadas depende de condições organizacionais que nem sempre estão presentes no setor. A implementação de Inteligência Artificial e modelos matemáticos exige não apenas capacidade computacional, mas também transparência, colaboração e qualidade dos dados.

Assim, o principal aprendizado da análise deste cluster é que algoritmos sofisticados não resolvem, sozinhos, relações pouco colaborativas ou processos mal estruturados. Enquanto a cadeia produtiva não avançar em digitalização, padronização de dados e modelos contratuais que incentivem a colaboração real, essas simulações tendem a permanecer restritas a ambientes mais inovadores ou a empresas com maior maturidade tecnológica.

e) Grau de consistência da evidência: as evidências reunidas neste último cluster apresentam boa consistência científica. Os estudos utilizam diferentes métodos, desde simulações de fluxo e Inteligência Artificial de apoio à decisão (Hamzeh et al., 2015), até modelos de redes comportamentais (Zheng et al., 2021), aplicados e validados em megaprojetos reais, como a construção da Expo Xangai (He et al., 2015) e grandes centros urbanos em Pequim (Zhao; Mbachu; Liu, 2022).

A síntese do portfólio indica que os sistemas de apoio computacional são capazes de medir e modelar incertezas, cargas de trabalho pouco visíveis e relações de conflito que os cronogramas tradicionais têm dificuldade de representar.

A avaliação destas constatações demonstra que os modelos matemáticos e as simulações de redes representam uma evolução importante para lidar com a densidade dos megaprojetos urbanos. Sob a ótica dos grandes complexos institucionais, a evidência mostra que o desafio nesses ambientes não é apenas técnico, mas também humano e organizacional.

A principal conclusão extraída da análise deste cluster é que a tecnologia preditiva não deve afastar o gestor do canteiro, mas servir como apoio diagnóstico à tomada de decisão. Ela permite transformar conflitos entre empreiteiras, sobrecarga de coordenação e falta de confiança em informações analisáveis, reforçando que um planejamento mais eficiente depende também da capacidade de antecipar e organizar as relações entre as pessoas responsáveis pela execução.

4.2.4. Evidências Complementares e Lacunas do Portfólio

Conforme as diretrizes metodológicas do método SREE adotado nesta pesquisa, o processo de metanálise descritiva estratificou o portfólio em diferentes níveis de robustez. Os *clusters* temáticos que não atingiram o critério mínimo de quatro artigos para compor o eixo principal de análise, classificados como Evidência Intermediária (Nível B) e Evidência Pontual (Nível C), não foram descartados da revisão. A permanência desses dados se justifica pela importância de mapear metodologias promissoras, aplicações específicas e lacunas existentes na literatura primária. Assim, os resultados apresentados nesta seção devem ser interpretados como evidências complementares, capazes de indicar tendências emergentes e nichos específicos, mas que, de forma isolada, não sustentam as conclusões centrais do estudo.

Sob a ótica metodológica, as evidências revelam a presença de abordagens potencialmente relevantes, porém ainda pouco recorrentes dentro do escopo delimitado. Metodologias voltadas à gestão de ritmo, localização e pacotes de trabalho, como o *Takt-Time Planning* (TTP), o *Location-Based Management System* (LBMS) e o *AdvancedWorkPackaging* (AWP), apareceram no portfólio de forma dispersa, variando entre um e três artigos empíricos. Situação semelhante foi observada no caso do *Critical Chain Project Management* (CCPM). Esses achados sugerem que, embora tais práticas apresentem potencial para contribuir com a sincronização das frentes de serviço, a gestão de gargalos e a estruturação do planejamento produtivo, a literatura analisada ainda não dispõe de volume empírico suficiente para permitir comparações mais robustas com métodos amplamente recorrentes no portfólio, como o *LastPlanner System* (LPS) e a Modelagem da Informação da Construção (BIM).

Em relação aos contextos de aplicação, a estratificação também evidenciou lacunas importantes em tipologias críticas da construção civil pesada. Enquanto rodovias e megaprojetos urbanos concentraram a maior parte dos estudos validados, segmentos de elevada complexidade técnica e financeira, como obras marítimas e portuárias, plantas industriais e energéticas e infraestruturas subterrâneas, como túneis, apresentaram apenas evidências pontuais. Essa limitação indica que, para esses perfis específicos de empreendimento, a literatura ainda não oferece uma base empírica homogênea que permita detalhar, com maior profundidade, barreiras operacionais, benefícios recorrentes ou a efetividade da transição do planejamento tradicional para modelos mais integrados, dinâmicos e colaborativos.

A avaliação do conjunto destas evidências complementares indica que o julgamento metodológico recomenda cautela interpretativa. Os resultados identificados nesses clusters

ampliam a compreensão sobre o estado da arte e apontam caminhos relevantes para a evolução do planejamento na construção pesada. Entretanto, dentro do portfólio analisado, ainda não há suporte empírico suficiente para afirmar, de forma abrangente, a aplicabilidade ampla ou a eficácia dessas abordagens em diferentes contextos.

Dessa forma, tais lacunas não devem ser interpretadas como limitações definitivas das metodologias emergentes ou das tipologias menos exploradas, mas como reflexo de um campo de pesquisa ainda em consolidação. Essas constatações cumprem papel importante na revisão ao indicar temas, métodos e contextos de obra que demandam aprofundamento em pesquisas futuras.

4.2.5. Síntese Transversal dos Resultados

A estruturação e a análise do portfólio bibliográfico demonstraram que a aplicação de metodologias de planejamento na construção civil pesada não ocorre de forma isolada, mas responde a padrões recorrentes de problemas, benefícios e limitações. Após o detalhamento do comportamento das metodologias em seus respectivos clusters, esta seção consolida as informações de forma integrada. O objetivo é apresentar os benefícios e as barreiras mais recorrentes em todo o conjunto da literatura, encerrando a apresentação dos dados empíricos com um quadro-síntese do estado da arte do planejamento em infraestrutura.

a) Benefícios Recorrentes

A avaliação conjunta dos resultados indica que o principal ganho das abordagens modernas está no aumento da confiabilidade do planejamento e na estabilização do fluxo de trabalho. A transição de cronogramas tradicionais e “empurrados” para sistemas mais colaborativos e orientados pela lógica “puxada”, característica do *LeanConstruction* e do *LastPlanner System* (LPS), permite antecipar restrições antes que elas comprometam a execução no campo. Em megaprojetos urbanos e edificações verticais de grande porte, essa gestão de curto prazo demonstrou reduzir cargas de trabalho ocultas, como esperas, interrupções e retrabalho, contribuindo para uma execução mais estável e previsível.

Sob a ótica tecnológica, a literatura também destaca a melhoria da visualização espacial e a integração entre prazo, custo e produção como benefícios recorrentes. A possibilidade de simular virtualmente o canteiro por meio do BIM 4D e 5D favorece a detecção antecipada de conflitos logísticos (*clashdetection*) e a extração automatizada de quantitativos (QTO). Tanto no fatiamento de sólidos para cálculo de terraplenagem em obras rodoviárias quanto na

simulação de fluxo de caixa e pacotes de trabalho em edificações verticalizadas, a modelagem digital contribui para reduzir erros de estimativa e ampliar a previsibilidade financeira da obra.

Por fim, o portfólio evidencia que o apoio à tomada de decisão e a melhoria da coordenação entre os agentes envolvidos tornam-se ganhos relevantes quando as ferramentas tecnológicas são associadas a modelos preditivos e arranjos colaborativos de governança. Abordagens computacionais, como Inteligência Artificial e Simulações de Monte Carlo, juntamente com modelos contratuais colaborativos, como o *Integrated Project Delivery* (IPD), permitem transformar informações antes tratadas de forma empírica em dados analisáveis. Enquanto as simulações auxiliam na otimização de recursos e na avaliação de cenários de risco, os modelos colaborativos contribuem para reduzir conflitos, pedidos de informação (RFI) e a dependência excessiva de litígios e aditivos contratuais.

b) Barreiras Recorrentes

Por outro lado, as evidências indicam que as principais barreiras não estão apenas na capacidade das ferramentas tecnológicas, mas também nas condições culturais, organizacionais e contratuais de implantação. De forma transversal, a literatura aponta a resistência à mudança e a fragmentação da cadeia de suprimentos como obstáculos relevantes à colaboração. O mercado de infraestrutura pesada ainda lida com comportamentos defensivos e divisões em silos, nos quais empresas subcontratadas priorizam metas próprias em detrimento do fluxo global da obra. Essa dinâmica, muitas vezes reforçada por modelos tradicionais de contratação, como o Design-Bid-Build, limita a transparência de informações necessária para a aplicação de filosofias como *LeanConstruction* e modelos colaborativos como IPD.

Na dimensão tecnológica, a imaturidade digital do setor e a inadequação de softwares nativos também representam gargalos importantes. O portfólio demonstra, por exemplo, que a Modelagem da Informação da Construção (BIM), originalmente mais voltada à lógica das edificações, apresenta limitações quando aplicada à infraestrutura linear, como rodovias e obras de terraplenagem de grande porte. Nesses casos, a adaptação do modelo exige dos engenheiros de planejamento elevada familiaridade com programação visual, algoritmos e rotinas paramétricas para processar malhas topográficas, o que distancia a tecnologia da rotina diária das frentes de serviço. Soma-se a isso a limitação de hardware, uma vez que dispositivos móveis utilizados no canteiro nem sempre suportam o processamento de modelos 3D ou plataformas *Web-GIS* complexas.

Além disso, a literatura indica que a dependência de dados confiáveis é um dos pontos mais frágeis para o avanço da dimensão preditiva. A dificuldade de estruturar e padronizar a coleta de informações em campo faz com que algoritmos de Inteligência Artificial e Simulações de Monte Carlo sejam, muitas vezes, alimentados por estimativas subjetivas e registros manuais. Esse cenário mostra que a alta tecnologia tem sua eficácia limitada quando o controle básico da produção ainda não está bem estruturado pela construtora, resultando em diagnósticos tecnicamente sofisticados, mas pouco aderentes à realidade operacional da obra.

c) Aplicações por Tipo de Obra (Visão Macro)

A análise transversal do portfólio indica que não existe uma solução universal para o planejamento da construção civil pesada. A eficácia das metodologias depende da natureza da obra e dos principais gargalos logísticos de cada tipologia.

Em obras lineares viárias e de terraplenagem, como rodovias e interseções, o desafio central está na movimentação contínua e em larga escala ao longo do espaço. Nesses casos, a literatura indica que o planejamento depende fortemente da adaptação tecnológica. A eficácia tende a aumentar quando o BIM 4D/5D é parametrizado para fatiar os modelos virtuais de acordo com o ritmo das máquinas e quando métodos estocásticos, como Simulações de Monte Carlo, são utilizados para otimizar o dimensionamento das frotas de equipamentos pesados, superando limitações do planejamento determinístico.

Em complexos institucionais e megaprojetos urbanos horizontais, por outro lado, a expansão ocorre por meio de múltiplas edificações simultâneas, que interagem com o tráfego e a infraestrutura da cidade. Nessas tipologias, as evidências indicam que o maior risco não está apenas na logística física, mas também no atrito organizacional e nas falhas de comunicação. Por isso, as metodologias mais aderentes tendem a ser aquelas voltadas à governança e à integração espacial, como plataformas *Web-GIS* para macrocoordenação, *LastPlanner System* para estabilizar cargas de trabalho ocultas e modelos contratuais, como IPD, para alinhar interesses entre construtores e projetistas.

Nas edificações verticais de grande porte, como arranha-céus e torres complexas, o planejamento enfrenta forte restrição de espaço físico e gargalos no fluxo vertical, especialmente em içamentos e elevadores. Para essa tipologia, a literatura aponta o sequenciamento rítmico como uma solução relevante. O BIM contribui para decompor a obra em pacotes de trabalho menores e com menor conflito espacial, enquanto metodologias de

ritmo, como o *Takt-Time Planning*, ajudam a manter a cadência dos subempreiteiros pavimento a pavimento, reduzindo colisões entre frentes de serviço.

Por fim, em nichos críticos, como infraestruturas subterrâneas, obras marítimas e plantas de energia, a literatura primária apresenta evidências mais pontuais, indicando um campo ainda em amadurecimento. Nesses ambientes, marcados por elevado risco geotécnico, ambiental e por forte dependência de equipamentos especializados, como máquinas TBM, conhecidas no Brasil como tatuzões, e dragas, os estudos indicam benefícios no uso de modelagem de cenários por Redes Bayesianas e Gerenciamento da Corrente Crítica (CCPM). Essas abordagens auxiliam no diagnóstico de vulnerabilidades mecânicas e na gestão de amortecedores de recursos, ou buffers, diante de imprevistos que métodos lineares tendem a lidar com maior dificuldade.

d) Quadro-Síntese Final

O Quadro 15 encerra a apresentação dos resultados da Revisão Sistemática da Literatura. Nele, as metodologias analisadas são relacionadas às tipologias de obra em que apresentaram maior aderência, destacando os principais benefícios, barreiras e o grau de consistência das evidências identificadas no portfólio.

Esse cruzamento entre metodologias de planejamento e tipologias de obra permite visualizar a evolução do estado da arte no planejamento da construção civil pesada, marcada pela transição do uso predominante de cronogramas determinísticos para abordagens mais dinâmicas, espaciais, preditivas e colaborativas de gestão.

Quadro 15 - Síntese das Metodologias de Planejamento na Construção Civil Pesada.

Metodologia / Abordagem	Tipologia mais associada	Problema abordado	Benefícios principais	Barreiras principais	Força da evidência
<i>Last Planner System</i> (LPS) e práticas <i>Lean</i>	Complexos urbanos, rodovias e arranha-céus	Variabilidade produtiva, trabalho oculto e desconexão entre escritório e campo.	Estabilização do fluxo, aumento da confiabilidade do planejamento (PPC), antecipação de restrições e apoio à gestão visual.	Resistência cultural, falta de treinamento da base operacional e contratos com viés punitivo.	Forte (Nível A)
Modelagem da Informação da Construção (BIM 4D/5D)	Obras lineares, complexos urbanos e arranha-céus	Conflitos espaciais e logísticos, orçamentos imprecisos e distanciamento entre projeto e execução.	Visualização espacial, detecção de conflitos (<i>clash detection</i>), extração automatizada de quantitativos (QTO) e integração entre prazo e custo.	Dificuldade de modelagem contínua em infraestrutura linear e alto custo inicial de implementação.	Forte (Nível A)
Governança colaborativa (IPD / ECI)	Complexos institucionais e megaprojetos	Fragmentação contratual, atritos entre parceiros e transferência de riscos entre as partes.	Maior confiança entre agentes, redução de RFIs e antecipação de decisões de construtibilidade.	Leis de licitação pouco flexíveis, assimetria de informações e resistência ao compartilhamento de riscos.	Forte (Nível A)
Abordagens computacionais (IA e simulações)	Obras lineares viárias e complexos urbanos	Riscos estocásticos pouco capturados pelo CPM, efeito cascata e estimativas empíricas pouco estruturadas.	Previsão matemática de cenários, diagnóstico antecipado de riscos e otimização de frotas de equipamentos.	Baixa maturidade digital do setor e uso de dados de campo subjetivos ou pouco estruturados.	Forte (Nível A)
Sistemas de ritmo e pacotes (TTP, LBMS, AWP)	Arranha-céus, portos, ferrovias e outras tipologias específicas	Falta de ritmo contínuo, pacotes de trabalho com dependências falhas e gargalos de recursos críticos.	Maior cadência de produção, otimização do espaço físico e apoio à gestão de correntes críticas.	Elevada exigência de disciplina logística e resistência de subcontratados especializados.	Intermediária (Níveis B e C)

Fonte: Autor (2026).

4.3. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A apresentação dos resultados, realizada na seção anterior, mapeou e estratificou o comportamento das metodologias de planejamento a partir da literatura científica recente. Concluída a etapa de exposição dos dados, esta seção adota uma abordagem crítico-analítica.

O objetivo não é introduzir novas evidências, mas consolidar transversalmente os achados do portfólio para responder à pergunta central da pesquisa. Para isso, discute-se o que se mostra aplicável na prática, os limites das soluções analisadas e a importância de considerar o ambiente organizacional da construção civil pesada.

4.3.1. O que a literatura sustenta com maior robustez

A consolidação dos dados analisados nesta revisão sistemática evidencia as constatações de maior consistência sobre o planejamento de megaprojetos e obras de infraestrutura. A análise crítica dos clusters de evidência forte (Nível A) permite afirmar que os métodos tradicionais de planejamento, quando aplicados de forma isolada, são insuficientes para gerenciar a complexidade, a interdependência logística e a variabilidade presentes na construção civil pesada. A literatura indica que cronogramas estáticos e determinísticos, como o CPM, apresentam limitações como ferramentas de controle efetivo da produção, sendo muitas vezes utilizados principalmente para fins contratuais e para a gestão de pleitos financeiros.

Em contrapartida, a literatura sustenta que a estabilização do canteiro depende da transição para sistemas mais ágeis, visuais e dinâmicos. As metodologias baseadas no *Lean Construction*, especialmente o *Last Planner System* (LPS), mostram-se relevantes ao descentralizar o planejamento, apoiar a gestão antecipada de restrições e aumentar a confiabilidade do fluxo de trabalho diário das equipes de linha de frente. Por sua vez, a Modelagem da Informação da Construção (BIM), em suas dimensões 4D e 5D, consolida-se como uma ferramenta importante para reduzir limitações de visualização espacial, permitindo a detecção antecipada de interferências físicas e a integração entre avanço físico e projeção de custos.

No entanto, a principal conclusão desta pesquisa vai além da validação individual dessas ferramentas. Os resultados do portfólio indicam que as metodologias de planejamento tendem a ser mais efetivas quando deixam de atuar como soluções isoladas e passam a compor sistemas integrados de coordenação, controle e tomada de decisão. O estado da arte revela que não existe uma única metodologia capaz de resolver todas as ineficiências da infraestrutura, mas sim a necessidade de respostas complementares.

Por fim, as evidências indicam que a efetividade dessa integração metodológica não é universal. Os resultados são mais consistentes quando há aderência entre a metodologia escolhida, a tipologia da obra, como o uso de simulação algorítmica em terraplenagem rodoviária ou a divisão em pacotes de trabalho em arranha-céus, e o nível de maturidade organizacional da construtora. A literatura sugere que inovações mais avançadas dependem de uma cadeia produtiva preparada para lidar com transparência técnica, colaboração e dados confiáveis.

4.3.2. A importância das abordagens integradas e do contexto de aplicação

A constatação de que métodos determinísticos isolados são insuficientes levanta um questionamento importante: substituir o Gráfico de Gantt por uma metodologia mais moderna seria suficiente para resolver as ineficiências do setor? A análise crítica do portfólio indica que não. O estado da arte da engenharia mostra que metodologias aplicadas de forma isolada, mesmo quando tecnologicamente avançadas, encontram limitações estruturais.

As evidências demonstram que a filosofia *Lean Construction* e o *Last Planner System* (LPS) apresentam resultados relevantes na estabilização do fluxo de trabalho e no engajamento das equipes de linha de frente. No entanto, essas abordagens, isoladamente, não resolvem problemas relacionados à coordenação espacial e à precisão dos quantitativos em obras complexas, como rodovias e edifícios verticalizados. Por outro lado, a Modelagem da Informação da Construção (BIM) oferece avanços importantes na visualização 4D e na integração de custos 5D, mas tende a perder efetividade quando aplicada em cadeias produtivas marcadas por fragmentação, falhas de comunicação e baixa colaboração entre os agentes envolvidos. Da mesma forma, modelos colaborativos como o *Integrated Project Delivery* (IPD) favorecem a integração entre as partes, mas dependem de ferramentas operacionais e mecanismos de controle de campo para converter colaboração em ganhos concretos de produtividade.

Nesse contexto, a literatura aponta a convergência entre BIM e *Lean* como uma das combinações mais consistentes para o planejamento de megaprojetos. O BIM atua como suporte tecnológico para simulação espacial, detecção de conflitos e integração de informações de prazo e custo, enquanto o *Lean* contribui para a gestão do fluxo de produção, remoção de restrições e fortalecimento do compromisso das equipes com o planejamento de curto prazo.

Entretanto, as evidências também indicam que a integração metodológica depende fortemente do contexto organizacional em que será aplicada. A implementação de ferramentas avançadas, como Inteligência Artificial, Simulações de Monte Carlo ou sistemas complexos de pacotes de trabalho, tende a apresentar resultados limitados em ambientes com baixa maturidade digital, equipes pouco capacitadas ou modelos contratuais excessivamente fragmentados e punitivos, como ocorre em muitos contratos tradicionais do tipo *Design-Bid-Build*.

Assim, a principal contribuição da literatura analisada não está em apontar uma metodologia universalmente superior, mas em demonstrar que a efetividade do planejamento em obras

pesadas depende da combinação entre método, tecnologia, modelo contratual, cultura organizacional e tipologia da obra. Os resultados sugerem que o desempenho de megaprojetos está menos relacionado à adoção isolada de uma ferramenta específica e mais à capacidade de integrar soluções técnicas e organizacionais de forma coerente com a realidade do empreendimento.

4.3.3. Limites da evidência e implicações para pesquisas futuras

Apesar da consistência dos achados apresentados e do avanço das metodologias analisadas, uma avaliação crítica do estado da arte exige o reconhecimento das limitações da própria literatura científica revisada. O portfólio demonstra forte concentração de estudos em metodologias específicas, como BIM e *Lean Construction*, aplicadas principalmente a megaprojetos urbanos e obras lineares viárias. Em contrapartida, segmentos de elevada complexidade técnica e alto risco de engenharia, como obras marítimas, plantas de energia e túneis profundos, ainda apresentam número reduzido de validações empíricas, aparecendo na literatura de forma mais pontual.

Além disso, observa-se significativa heterogeneidade nas métricas de avaliação utilizadas pelos estudos. Enquanto parte das pesquisas utiliza indicadores operacionais de curto prazo, como o PPC no *Last Planner System*, outras concentram-se em métricas financeiras globais, como retorno sobre investimento (ROI), ou em simulações probabilísticas realizadas em ambiente computacional. Essa diversidade metodológica, somada à forte dependência de estudos de caso específicos, dificulta a generalização dos resultados quantitativos para o conjunto da construção civil pesada.

Metodologias promissoras de sequenciamento e controle, como o *Advanced WorkPackaging* (AWP) e o *Takt-Time Planning* (TTP), demonstraram potencial relevante em aplicações piloto, mas ainda demandam maior volume de validação empírica em obras reais.

Sob a ótica teórica, os resultados desta revisão reforçam premissas clássicas da gestão da produção, como a Teoria das Restrições (TOC) e os princípios de Transformação-Fluxo-Valor (TFV) associados ao *Lean Construction*. Essas abordagens já indicavam que o planejamento determinístico tende a apresentar limitações diante da variabilidade, da complexidade e da interdependência presentes nas frentes de serviço. Os dados analisados confirmam essa percepção ao mostrar que o CPM, quando utilizado de forma isolada, apresenta dificuldades para responder à dinâmica real dos megaprojetos.

No entanto, a revisão também amplia essa discussão ao indicar que a simples adoção de ferramentas computacionais avançadas não garante, por si só, a estabilidade do planejamento. As evidências sugerem que a efetividade do controle da produção depende não apenas de capacidade tecnológica, mas também de integração organizacional, maturidade digital, qualidade dos dados e modelos contratuais compatíveis com colaboração e transparência.

Diante dessas constatações, as implicações para pesquisas futuras tornam-se evidentes. A literatura da engenharia civil pode avançar ao investigar, de forma mais integrada, a aplicação conjunta de metodologias como BIM, *Lean Construction* e *Advanced Work Packaging* em contextos reais de infraestrutura pesada.

Além disso, observa-se a necessidade de ampliar estudos sobre modelos de governança colaborativa, como IPD e ECI, especialmente em ambientes de contratação pública, nos quais a rigidez dos processos licitatórios e a fragmentação típica do modelo *Design-Bid-Build* ainda representam barreiras importantes para a inovação tecnológica e para práticas mais integradas de planejamento.

5. CONCLUSÃO

Este estudo teve como objetivo investigar o planejamento de empreendimentos de alta complexidade e infraestrutura, setor historicamente associado a desvios de cronograma e orçamento. Para isso, utilizou-se a Revisão Sistemática da Literatura (RSL) não apenas como levantamento bibliográfico, mas como método estruturado para analisar as limitações dos métodos tradicionais e consolidar abordagens ágeis, tecnológicas e colaborativas presentes no estado da arte da construção civil pesada.

Após as etapas de extração, análise e discussão crítica do portfólio, este capítulo final consolida o encerramento da pesquisa, apresentando o atendimento aos objetivos, a resposta à pergunta central e as principais contribuições do estudo.

5.1. ATENDIMENTO AOS OBJETIVOS DA PESQUISA

O objetivo geral desta pesquisa consistiu em analisar as metodologias de planejamento aplicadas à construção civil pesada, sintetizando criticamente suas aplicações, benefícios e barreiras, além de relacioná-las aos diferentes tipos de obra. Esse propósito foi alcançado por meio da aplicação do método *Systematic Review for Engineering and Experiments* (SREE), que permitiu conduzir uma análise estruturada e com critérios explícitos de seleção.

Para demonstrar o cumprimento desse objetivo geral, os cinco objetivos específicos definidos na pesquisa foram atendidos ao longo do Capítulo 4, conforme apresentado a seguir:

- **Mapear as principais metodologias e contextos de aplicação:** este objetivo foi atendido nas Seções 4.1 e 4.2.1, por meio da triagem e catalogação do portfólio bibliográfico. O cruzamento das metodologias, como BIM, *Lean*, IPD e IA, com as tipologias de obras pesadas, como rodovias, arranha-céus e túneis, originou a matriz de robustez, apresentada no Quadro 15, permitindo estratificar as práticas mais consolidadas.
- **Analisar os benefícios associados e a otimização dos processos:** este objetivo foi desenvolvido ao longo da análise dos clusters de evidência forte (Nível A), na Seção 4.2.3, e sintetizado de forma transversal na Subseção 4.2.5, alínea “a”. Nessa etapa, foram detalhados benefícios como a estabilização do fluxo de trabalho e a detecção antecipada de conflitos espaciais.
- **Identificar as principais barreiras enfrentadas:** o mapeamento dos entraves técnicos, contratuais e culturais foi realizado ao longo da apresentação dos resultados empíricos e consolidado de forma transversal na Subseção 4.2.5, alínea “b”.
- **Examinar a relação entre metodologias e tipos de obras:** este objetivo estruturou a lógica dos clusters analíticos do trabalho e foi consolidado na Subseção 4.2.5, alínea “c”, em que a eficácia de abordagens específicas, como *Takt-Time* em edifícios e Simulações de Monte Carlo em terraplenagem, foi relacionada à natureza logística de cada tipo de projeto.
- **Avaliar as evidências quanto a ganhos mensuráveis, como prazo, custo e produtividade:** este objetivo foi atendido durante a análise dos clusters robustos, na Subseção 4.2.3, em que dados extraídos de estudos de caso reais e simulações computacionais permitiram quantificar impactos financeiros, como o ROI do BIM 5D, e operacionais, como o índice PPC do *Last Planner System*, reportados pela literatura analisada.

5.2. RESPOSTA À PERGUNTA DE PESQUISA

A essência desta Revisão Sistemática da Literatura está na busca por uma resposta fundamentada à pergunta central que orientou o estudo: “Como as metodologias de

planejamento têm sido aplicadas na construção civil pesada e o que a literatura científica revela sobre suas aplicações, benefícios, barreiras e relação com os diferentes tipos de obra?”.

A análise crítica do portfólio bibliográfico permite responder que as metodologias modernas de planejamento têm sido aplicadas principalmente como formas de superar limitações dos modelos estáticos e determinísticos tradicionais. Diante da complexidade e da interdependência dos megaprojetos, a literatura aponta uma transição para o uso do *Lean Construction*, com destaque para o *Last Planner System*, da Modelagem da Informação da Construção (BIM 4D/5D), de arranjos de governança colaborativa e de modelos computacionais de apoio à decisão.

Quanto aos benefícios, os estudos indicam que a adoção dessas metodologias contribui para aumentar a confiabilidade do planejamento, melhorar a coordenação entre frentes de trabalho, antecipar restrições de campo, visualizar conflitos espaciais e integrar prazo e custo. Por outro lado, as barreiras identificadas mostram que a eficácia dessas ferramentas depende do contexto organizacional. A baixa maturidade digital da cadeia produtiva, os modelos contratuais fragmentados e a resistência cultural à transparência de informações aparecem como obstáculos relevantes ao sucesso gerencial no canteiro.

Por fim, em relação às tipologias de obra, a pesquisa conclui que a literatura não sustenta a existência de uma solução única e universal para a construção pesada. O desempenho das metodologias depende do contexto de aplicação e da aderência entre a abordagem escolhida e a natureza logística do empreendimento. Assim, a resposta ao problema de pesquisa é que a redução de atrasos e sobrecustos na infraestrutura não depende apenas da troca de softwares ou ferramentas, mas da adoção de abordagens integradas, como a convergência entre BIM e *Lean*, adaptadas ao tipo de projeto e apoiadas por um ambiente contratual mais colaborativo.

Dessa forma, conclui-se que a principal contribuição desta pesquisa está em demonstrar que o planejamento da construção civil pesada deve ser compreendido como um sistema integrado de coordenação, e não apenas como a aplicação isolada de ferramentas de cronograma, modelagem ou controle. A literatura analisada indica que os maiores ganhos ocorrem quando métodos de controle da produção, tecnologias digitais, governança colaborativa e maturidade organizacional atuam de forma combinada e aderente à natureza logística de cada tipo de obra. Assim, o trabalho contribui para organizar o estado da arte e oferecer uma base crítica para a escolha mais consciente de metodologias de planejamento em projetos de infraestrutura e megaprojetos.

5.3. CONTRIBUIÇÕES, LIMITAÇÕES E RECOMENDAÇÕES

O encerramento desta pesquisa permite consolidar suas principais contribuições, reconhecer as limitações metodológicas do estudo e indicar caminhos para investigações futuras sobre metodologias de planejamento aplicadas à construção civil pesada.

a) Contribuições

A principal contribuição acadêmica deste trabalho está na organização estruturada do estado da arte sobre metodologias de planejamento aplicadas à construção civil pesada. A adoção do método SREE permitiu analisar o portfólio bibliográfico de forma sistemática, classificando as evidências em diferentes níveis de robustez e relacionando metodologias, tipologias de obra, benefícios, barreiras e contextos de aplicação.

Do ponto de vista prático, a pesquisa oferece uma base de apoio à tomada de decisão para engenheiros, planejadores e gestores envolvidos em projetos de infraestrutura e megaprojetos. A matriz comparativa final sintetiza os principais achados do estudo e reforça que a escolha de uma metodologia de planejamento deve considerar não apenas a ferramenta em si, mas também a natureza da obra, a maturidade digital da organização, o modelo contratual, a qualidade dos dados disponíveis e o grau de integração entre as equipes.

b) Limitações

Apesar do rigor metodológico adotado, a pesquisa apresenta limitações próprias de seu delineamento. A primeira refere-se à utilização da base *Science Direct* como única fonte de busca, o que pode restringir a abrangência do portfólio em comparação com revisões conduzidas em múltiplas bases acadêmicas. Além disso, o recorte temporal adotado e a exclusão de artigos sem acesso ao texto integral também delimitaram o conjunto de evidências analisadas.

Outra limitação está associada à natureza bibliográfica da pesquisa. Por se tratar de uma Revisão Sistemática da Literatura, o estudo baseou-se exclusivamente em dados secundários reportados por pesquisas anteriores, sem validação direta em campo. Soma-se a isso a heterogeneidade das métricas utilizadas nos artigos, o que dificultou comparações plenamente equivalentes entre metodologias, benefícios e contextos de aplicação.

c) Recomendações futuras

Como recomendação para estudos futuros, sugere-se ampliar o levantamento bibliográfico para outras bases acadêmicas, como *Scopus*, *Web of Science* e *Engineering Village*, a fim de verificar se os padrões identificados neste trabalho se mantêm em um portfólio mais amplo. Também se recomenda aprofundar a investigação sobre metodologias que apareceram com menor recorrência, como *Takt-Time Planning*, *Location-Based Management System*, *Advanced Work Packaging* e Gerenciamento da Corrente Crítica.

Além disso, futuras pesquisas podem avançar por meio de estudos empíricos aplicados a tipologias específicas da construção pesada, especialmente túneis, obras marítimas e portuárias, plantas industriais, projetos de energia e ferrovias. Por fim, recomenda-se o desenvolvimento de modelos de apoio à decisão que auxiliem na seleção de metodologias de planejamento de acordo com a tipologia da obra, a maturidade digital da organização, o modelo de contratação, a disponibilidade de dados e a complexidade técnica do empreendimento.

REFERÊNCIAS

ABBAS, Ali; DIN, Zia Ud; FAROOQUI, Rizwan. Achieving Greater Project Success & Profitability through Pre-construction Planning: A Case-based Study. **Procedia Engineering**, v. 145, p. 804–811, 1 jan. 2016.

AMMAR, Taher; ABDEL-MONEM, Mohamed; EL-DASH, Karim. Risk factors causing cost overruns in road networks. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 13, n. 5, 1 set. 2022.

ARASZKIEWICZ, Krystyna. Application of Critical Chain Management in Construction Projects Schedules in a Multi-Project Environment: A Case Study. **Procedia Engineering**, v. 182, p. 33–41, 1 jan. 2017.

BABALOLA, Oluwatosin; IBEM, Eziyi O.; EZEMA, Isidore C. Implementation of lean practices in the construction industry: A systematic review. **Building and Environment**, v. 148, p. 34–43, 15 jan. 2019.

CASTAÑEDA, Karen *et al.* BIM-lean integration for construction scheduling of road intersections. **Automation in Construction**, v. 176, p. 106247, 1 ago. 2025.

GHARAIBEH, Lina *et al.* Quantifying the influence of BIM adoption: An in-depth methodology and practical case studies in construction. **Results in Engineering**, v. 23, p. 102555, 1 set. 2024.

GONDIA, Ahmed; EZZELDIN, Mohamed; EL-DAKHAKHNI, Wael. Dynamic networks for resilience-driven management of infrastructure projects. **Automation in Construction**, v. 136, p. 104149, 1 abr. 2022.

GURCANLI, G. Emre; TURKOGLU, Harun; BILIR, Senem. Heavy Equipment Scheduling for Horizontal Construction Projects. *In*: Elsevier Ltd, 2017.

HAMZEH, Farook R. *et al.* Understanding the role of “tasks anticipated” in lookahead planning through simulation. **Automation in Construction**, v. 49, n. PA, p. 18–26, 1 jan. 2015.

HEIGERMOSER, Daniel *et al.* BIM-based Last Planner System tool for improving construction project management. **Automation in Construction**, v. 104, p. 246–254, 1 ago. 2019.

IBRAHIM, Abdelazim; ZAYED, Tarek; LAFHAJ, Zoubeir. Trends and gaps in lean construction practices for construction of megaprojects: A critical review. **Alexandria Engineering Journal**, v. 118, p. 174–193, 1 abr. 2025.

ISAAC, Shabtai; CURRELI, Mauro; STOLIAR, Yaniv. Work packaging with BIM. **Automation in Construction**, v. 83, p. 121–133, 1 nov. 2017.

KAMMOUH, O. *et al.* Dynamic control for construction project scheduling on-the-run. **Automation in Construction**, v. 141, p. 104450, 1 set. 2022.

KIM, Hyunjoet *al.* Developing a 3D intelligent object model for the application of construction planning/simulation in a highway project. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 20, n. 2, p. 538–548, 1 mar. 2016.

LU, Qiqi; WON, Jongsung; CHENG, Jack C. P. A financial decision making framework for construction projects based on 5D Building Information Modeling (BIM). **International Journal of Project Management**, v. 34, n. 1, p. 3–21, 1 jan. 2016.

NABAWY, Mohamed; KHODEIR, Laila M. Achieving efficiency in quantitative risk analysis process – Application on infrastructure projects. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 12, n. 2, p. 2303–2311, 1 jun. 2021.

PEÑA, Carlos A. *et al.* BIM-based tool to support construction planning of earthworks in road projects. **Alexandria Engineering Journal**, v. 133, p. 284–317, dez. 2025.

PEÑA, Carlos A.; CAMACHO-TORREGROSA, Francisco Javier; GARCÍA, Alfredo. BIM-based flowchart for improving road construction planning and management. **Automation in Construction**, v. 184, p. 106845, abr. 2026.

PÉREZ, Yeimi; ÁVILA, Jeffer; SÁNCHEZ, Omar. Influence of BIM and Lean on mitigating delay factors in building projects. **Results in Engineering**, v. 22, p. 102236, 1 jun. 2024.

SHEIKHKHOSHKAR, Moslem *et al.* An innovative integrated framework for multi-level production planning and control systems in construction. **Developments in the Built Environment**, v. 19, p. 100524, 1 out. 2024.

SHEIKHKHOSHKAR, Moslem *et al.* A data-driven and knowledge-based decision support system for optimized construction planning and control. **Automation in Construction**, v. 173, p. 106066, 1 maio 2025.

TORRES, Kevin *et al.* Exploring the knowledge structure of building information modeling (BIM) adoption in construction scheduling: A bibliometric analysis from 2008 to 2024. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 16, n. 8, p. 103446, 1 ago. 2025.

XU, Xiaoxiao *et al.* Schedule risk analysis of infrastructure projects: A hybrid dynamic approach. **Automation in Construction**, v. 95, p. 20–34, 1 nov. 2018.

ZHENG, Xian *et al.* Unveiling complex relational behavior in megaprojects: A qualitative-quantitative network approach. **International Journal of Project Management**, v. 39, n. 7, p. 738–749, 1 out. 2021.