



UNIVERSIDADE
ESTADUAL de LONDRINA

BRUNO JOSÉ OLIVARI PASELLO

RISCOS DE TRANSPORTE NA CONSTRUÇÃO MODULAR:
MODELO PREDITIVO PARA APOIO À TOMADA DE
DECISÃO

BRUNO JOSÉ OLIVARI PASELLO

**RISCOS DE TRANSPORTE NA CONSTRUÇÃO MODULAR:
MODELO PREDITIVO PARA APOIO À TOMADA DE DECISÃO**

Tese apresentada à Universidade Estadual de Londrina - UEL, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Arquitetura e Urbanismo.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Daniel de Melo Moura

Londrina
2026

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UEL

PASELLO, Bruno José Olivari .

RISCOS DE TRANSPORTE NA CONSTRUÇÃO MODULAR: MODELO PREDITIVO PARA APOIO À TOMADA DE DECISÃO / Bruno José Olivari PASELLO. - Londrina, 2026.
225 f.

Orientador: Jorge Daniel de Melo Moura.

Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Tecnologia e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, 2026.

Inclui bibliografia.

1. construção modular - Tese. 2. transporte modular - Tese. 3. modelo preditivo - Tese. 4. gestão de riscos - Tese. I. Daniel de Melo Moura, Jorge . II. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Tecnologia e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

CDU 711/72

BRUNO JOSÉ OLIVARI PASELLO

RISCOS DE TRANSPORTE NA CONSTRUÇÃO MODULAR: MODELO PREDITIVO PARA APOIO À TOMADA DE DECISÃO

Tese apresentada como parte das exigências para a obtenção de título de Doutor em Arquitetura e Urbanismo no Programa Associado UEM/UEL de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Londrina.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Jorge Daniel de Melo Moura
Universidade Estadual de Londrina - UEL

Profa. Dr. Marieli Azoia Lukiantchuki
Universidade Estadual de Maringá - UEM

Prof. Dr. Márcio Minto Fabricio
Universidade de São Paulo - USP

Prof. Dr. Ricardo M. S. F. Almeida
Instituto Politécnico de Viseu - IPV

Prof. Dr. Maurício Hidemi Azuma
Universidade Estadual de Londrina – UEL

Londrina, 31 de Julho de 2026.

DECLARAÇÃO DE USO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL GENERATIVA

Declaro que ferramentas de inteligência artificial generativa foram utilizadas de forma auxiliar e supervisionada durante a elaboração deste trabalho, especialmente para apoio à revisão textual, organização de ideias, aprimoramento da clareza redacional e padronização da linguagem acadêmica. A ferramenta utilizada foi o ChatGPT, da OpenAI.

Ressalta-se que o conteúdo final, as análises, interpretações, decisões metodológicas, estudos de campo, testes, resultados e conclusões são de responsabilidade exclusiva do autor. O uso da ferramenta não substituiu a autoria intelectual, a análise crítica nem a validação científica realizada no desenvolvimento da pesquisa.

Esta declaração é apresentada em conformidade com as diretrizes de integridade científica estabelecidas pela Portaria CNPq nº 2.664, de 6 de março de 2026.

AGRADECIMENTOS

A conclusão desta tese representa mais do que o encerramento de uma etapa acadêmica, representa a materialização de um caminho construído com apoio, confiança, generosidade e propósito. Nenhuma pesquisa de fôlego se faz de maneira solitária, e por isso registro aqui minha mais sincera gratidão àqueles que, de diferentes formas, tornaram este trabalho possível.

Ao meu orientador, Professor Jorge Daniel de Melo Moura, expresso minha profunda gratidão pela atenção dedicada ao longo desta trajetória, por sua paciência, por sua confiança e por sua constante disposição em orientar com seriedade e humanidade. Sua dedicação foi fundamental não apenas para o desenvolvimento desta tese, mas também para minha formação como pesquisador. Em muitos momentos, sua postura me motivou a seguir em frente e a acreditar na relevância do caminho que estava sendo construído.

Ao Professor Ricardo Almeida, manifesto meu especial agradecimento. Sua colaboração foi decisiva para que esta pesquisa alcançasse um nível mais elevado de desenvolvimento. Sem o seu apoio, não teria sido possível aplicar o modelo em Portugal e aprofundar esta investigação em bases tão consistentes. Sua contribuição ampliou horizontes e fortaleceu de modo significativo a qualidade deste trabalho.

Agradeço também aos profissionais das empresas participantes pela confiança depositada nesta pesquisa e pelo apoio oferecido ao desenvolvimento tecnológico no setor. Em um campo que demanda inovação, coragem e comprometimento com a transformação da prática, a abertura de vocês para colaborar com este estudo demonstra que a aproximação entre academia e mercado pode produzir resultados concretos, relevantes e necessários.

À minha esposa, deixo um agradecimento profundamente especial. Tenho imenso orgulho da sua força, da sua garra e da forma admirável com que enfrentou, ao meu lado, os desafios deste período. Sua dedicação no cuidado com a nossa filha, Marina, que nasceu durante o desenvolvimento desta tese, foi essencial para que eu tivesse o tempo, a serenidade e o suporte necessários para concluir esta escrita. Nada disso teria sido possível sem o seu amor, sua generosidade e seu companheirismo.

Por fim, agradeço a Deus, pela minha família, pelo amparo nos momentos difíceis, pela força para continuar e pela bênção de me permitir chegar até aqui cercado de amor, propósito e esperança.

“O que sabemos é uma gota; o que ignoramos
é um oceano.”

Isaac Newton

RESUMO

PASELLO, Bruno José Olivari. **Riscos de Transporte na Construção Modular: Modelo Preditivo para Apoio à Tomada de Decisão**. 2026. 225 f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo), Centro de Tecnologia e Urbanismo CTU, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2026.

Esta tese investiga os riscos associados ao transporte de módulos na construção modular, considerando que, embora essa etapa seja amplamente reconhecida como crítica, ainda são escassos os instrumentos analíticos capazes de antecipar e hierarquizar esses eventos de forma contextualizada, sistemática e operacionalmente aplicável. Em resposta a essa lacuna, a pesquisa teve como objetivo desenvolver e avaliar um modelo preditivo de apoio à tomada de decisão, orientado a identificar, avaliar e priorizar eventos de risco, bem como a subsidiar a definição de medidas preventivas e mitigadoras. O estudo foi conduzido segundo a abordagem da Design Science Research (DSR), articulando revisão de literatura, estudo de campo, estruturação analítica do artefato, definição de variáveis operacionais, formulação de critérios de criticidade e ciclos sucessivos de avaliação e refinamento em contextos empíricos distintos. Os resultados demonstraram que a criticidade no transporte modular não é fixa nem homogênea, mas varia conforme a natureza da movimentação da carga e a interação entre fatores técnicos, logísticos, ambientais e organizacionais. As aplicações empíricas reforçaram essa leitura ao evidenciar que a criticidade se altera conforme as restrições concretas de cada operação. O refinamento do artefato conduziu à consolidação de uma estrutura analítica comum, posteriormente desdobrada em dois domínios específicos: transporte rodoviário e operações de içamento associadas ao carregamento, descarregamento e posicionamento dos módulos. Conclui-se que a principal contribuição da tese consiste em demonstrar que, no transporte de módulos, a criticidade não deve ser tratada como atributo fixo ou genérico, mas como resultado de uma configuração contextual, relacional e operacionalmente variável. Com isso, a pesquisa oferece uma base analítica mais precisa, inteligível e aplicável para apoiar a avaliação, a priorização e a definição de medidas preventivas e mitigadoras na construção modular.

Palavras-chave: construção modular; transporte modular; gestão de riscos; modelo preditivo; Design Science Research.

ABSTRACT

PASELLO, Bruno José Olivari. **Transportation Risks in Modular Construction: A Predictive Model for Decision Support**. 2026. 225f. Thesis (Doctorate in Architecture and Urbanism) Center for Technology and Urbanism., State University of Londrina, Londrina, 2026.

This thesis investigates the risks associated with the transportation of modules in modular construction, considering that, although this stage is recognized as critical, analytical instruments capable of anticipating and ranking these events in a contextualized, systematic, and operationally applicable manner remain scarce. In response to this gap, the research aimed to develop and evaluate a predictive decision-support model designed to identify, assess, and prioritize risk events, as well as to support the definition of preventive and mitigation measures. The study was conducted according to the Design Science Research (DSR) approach, integrating a literature review, field study, analytical structuring of the artifact, definition of operational variables, formulation of criticality criteria, and cycles of evaluation and refinement in distinct empirical contexts. The results demonstrated that criticality in modular transportation is neither fixed nor homogeneous, but varies according to the nature of load movement and the interaction among technical, logistical, environmental, and organizational factors. The empirical applications reinforced this interpretation by showing that criticality changes according to the constraints of each operation. The refinement of the artifact led to the consolidation of a common analytical structure, subsequently divided into two specific domains: road transportation and lifting operations associated with the loading, unloading, and positioning of modules. It is concluded that the main contribution of this thesis lies in demonstrating that, in module transportation, criticality should not be treated as a fixed or generic attribute, but as the result of a contextual, relational, and operationally variable configuration. In doing so, the research offers a more precise, intelligible, and applicable analytical basis to support the assessment, prioritization, and definition of preventive and mitigation measures in modular construction.

Keywords: modular construction; modular transportation; risk management; predictive model; Design Science Research.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura geral da tese	29
Figura 2 - Etapas de desenvolvimento, avaliação e refinamento do artefato	79
Figura 3 - Fluxo Lógico de Construção do Artefato	85
Figura 4 - Estudo de caso	89
Figura 5 - Representação da Distribuição dos Riscos no Plano Frequência-impacto, acompanhada da Régua de Criticidade Global do Cenário Analisado.....	100
Figura 6 - Matriz preditiva de riscos 5 × 5 para priorização dos eventos mais críticos no cenário analisado.....	101
Figura 7 - Fluxo de dados do artefato	103
Figura 8 - Carregamento do módulo na unidade industrial.....	108
Figura 9 - Elementos auxiliares de apoio utilizados sob a sapata do estabilizador do guindaste tipo Munck.....	110
Figura 10 - Lçamento do módulo com guindaste posicionado fora do terreno, sobrepondo o muro de divisa.	111
Figura 11 - Interferência na faixa de rolamento provocada pelo caminhão de transporte modular em trecho urbano.	115
Figura 12 - Comparação dos cenários de criticidade operacional: (a) menos favorável, (b) projetado, (c) mais favorável.	117
Figura 13 - Matriz preditiva de riscos da operação analisada.....	119
Figura 14 - Arquitetura funcional da versão refinada do artefato.....	138
Figura 15 - Módulo transportado em caminhão truck plataforma durante a operação analisada no segundo ciclo de avaliação.	142

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Eixos analíticos dos riscos operacionais no transporte rodoviário de módulos	58
Quadro 2 - Eixos analíticos dos riscos operacionais no içamento de módulos	62
Quadro 3 - Síntese crítica da literatura e requisitos para o modelo preditivo	70
Quadro 4 - Procedimentos e instrumentos de coleta de dados adotados na pesquisa	75
Quadro 5 - Requisitos para a construção do artefato.	80
Quadro 6 – Dimensões operacionais contempladas pelas variáveis de entrada da primeira versão do artefato	86
Quadro 7 - Critérios de graduação do impacto dos riscos cadastrados	92
Quadro 8 - Variáveis operacionais inseridas no modelo.....	114
Quadro 9 - Síntese da apreciação do especialista sobre a primeira aplicação do modelo	125
Quadro 10 - Síntese dos grupos de variáveis operacionais inseridos no modelo ..	143
Quadro 11 - Síntese das contribuições científicas da tese	160
Quadro 12 - Articulação metodológica que sustentou o desenvolvimento e o refinamento do artefato.....	163

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BIM	<i>Building Information Modeling</i>
CAAE	Certificado de Apresentação para Apreciação Ética
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CM	Construção Modular
DfMA	<i>Design for Manufacture and Assembly</i>
DSR	<i>Design Science Research</i>
EVA	Etileno Acetato de Vinila
IA	Inteligência Artificial
IPV	Instituto Politécnico de Viseu
MiC	<i>Modular Integrated Construction</i>
PDSE	Programa Institucional de Doutorado Sanduíche no Exterior
IOT	Internet of Things

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DA CONSTRUÇÃO MODULAR	15
1.2	O TRANSPORTE COMO ETAPA CRÍTICA DA CONSTRUÇÃO MODULAR	17
1.3	LACUNAS NA GESTÃO DE RISCOS EM OPERAÇÕES DE TRANSPORTE MODULAR ..	19
1.4	PROBLEMA DE PESQUISA.....	22
1.5	OBJETIVO GERAL E OBJETIVOS ESPECÍFICOS	23
1.6	DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	24
1.7	ESTRATÉGIA DA PESQUISA	25
1.8	CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA.....	26
1.9	ESTRUTURA DA TESE	27
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	30
2.1	A CONSTRUÇÃO MODULAR	30
2.1.1	<i>Fundamentos e Lógica Produtiva da Construção Modular.....</i>	<i>30</i>
2.1.2	<i>Módulos Volumétricos e Implicações Logísticas</i>	<i>33</i>
2.2	TRANSPORTE DE MÓDULOS PARA CM	36
2.2.1	<i>Transporte Rodoviário</i>	<i>36</i>
2.2.2	<i>Operações de Içamento.....</i>	<i>42</i>
2.2.3	<i>Assinatura Operacional da Criticidade.....</i>	<i>46</i>
2.3	RISCOS NO TRANSPORTE DE MÓDULOS	51
2.3.1	<i>Conceitos Fundamentais de Risco</i>	<i>51</i>
2.3.2	<i>Principais Riscos Operacionais no Transporte Rodoviário de Módulos ..</i>	<i>55</i>
2.3.3	<i>Principais Riscos Operacionais no Içamento de Módulos.....</i>	<i>59</i>
2.4	MODELAGEM ANALÍTICA DE RISCOS NO TRANSPORTE DE MÓDULOS	63
2.4.1	<i>Métodos Tradicionais de Avaliação de Riscos e suas Limitações.....</i>	<i>64</i>
2.4.2	<i>Contribuições da Automação Analítica</i>	<i>68</i>
2.5	SÍNTESE CRÍTICA DA LITERATURA E IMPLICAÇÕES PARA O DESENVOLVIMENTO DO MODELO PREDITIVO.....	69
3	PERCURSO METODOLÓGICO DA PESQUISA.....	71
3.1	ABORDAGEM METODOLÓGICA DA PESQUISA	71
3.1.1	<i>Natureza da Pesquisa e Justificativa da Adoção do Método.....</i>	<i>71</i>
3.1.2	<i>Procedimentos e Instrumentos Mobilizados na Pesquisa</i>	<i>73</i>

3.1.3	<i>Etapas de Desenvolvimento do Artefato</i>	76
3.2	REQUISITOS PARA A CONSTRUÇÃO DO ARTEFATO	79
3.3	CONSTRUÇÃO DA PRIMEIRA VERSÃO DO ARTEFATO	81
3.3.1	<i>Arquitetura do Artefato</i>	83
3.3.2	<i>Variáveis de Entrada do Artefato</i>	85
3.3.3	<i>Levantamento Complementar de Riscos em Campo e Análise Documental</i>	87
3.3.4	<i>O Banco de Riscos</i>	90
3.3.5	<i>Regras de Associação</i>	93
3.3.6	<i>Processamento Analítico do Modelo</i>	96
3.3.7	<i>Estrutura de Apresentação dos Resultados do Artefato</i>	99
3.3.8	<i>Fluxo de Dados</i>	102
3.4	ESTRATÉGIA E PROCEDIMENTOS DE AVALIAÇÃO DO ARTEFATO	104
4	PRIMEIRO CICLO DE AVALIAÇÃO EXPLORATÓRIA - PORTUGAL	107
4.1	CARACTERIZAÇÃO DO CONTEXTO OPERACIONAL.....	107
4.2	VARIÁVEIS OPERACIONAIS INSERIDAS NO MODELO.....	112
4.3	RESULTADOS GERADOS PELA APLICAÇÃO DO MODELO.....	115
4.3.1	<i>A Criticidade Operacional Global</i>	116
4.3.2	<i>Riscos Prioritários Identificados pela Matriz Preditiva</i>	118
4.3.3	<i>Medidas de Mitigação Associadas aos Riscos Prioritários</i>	120
4.4	APRECIAÇÃO DO ESPECIALISTA DA EMPRESA PORTUGUESA.....	122
4.5	LIMITAÇÕES DO PRIMEIRO CICLO DE AVALIAÇÃO	125
5	REFINAMENTO DO ARTEFATO	127
5.1	PREMISSAS DO REFINAMENTO	128
5.2	REDEFINIÇÃO DO ESCOPO DO ARTEFATO.....	128
5.3	ESTRUTURA DE VARIÁVEIS E DERIVAÇÃO AUTOMATIZADA	130
5.4	LÓGICA BINÁRIA DE ATIVAÇÃO DE RISCOS	131
5.5	NOVO CÁLCULO DA CRITICIDADE: FREQUÊNCIA NORMALIZADA E MAJORAÇÃO SISTÊMICA.....	133
5.6	PRIORIZAÇÃO POR AGRUPAMENTOS DE RISCO	135
5.7	SÍNTESE DO ARTEFATO REFINADO	137
6	SEGUNDO CICLO DE AVALIAÇÃO – BRASIL	139

6.1	CARACTERIZAÇÃO DO CONTEXTO OPERACIONAL.....	139
6.2	INSERÇÃO DAS VARIÁVEIS OPERACIONAIS NO MODELO.....	143
6.3	RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO MODELO.....	145
6.3.1	<i>Resultados do Içamento na Fábrica</i>	<i>145</i>
6.3.2	<i>Resultados do Transporte Rodoviário</i>	<i>147</i>
6.3.3	<i>Resultados do Içamento na Entrega.....</i>	<i>149</i>
6.4	APRECIÇÃO DO ESPECIALISTA DA EMPRESA BRASILEIRA.....	151
6.5	AVANÇOS E LIMITAÇÕES DO SEGUNDO CICLO DE AVALIAÇÃO	154
7	DISCUSSÃO	157
7.1	OS ACHADOS DA TESE À LUZ DA LITERATURA	157
7.2	CONTRIBUIÇÕES CIENTÍFICAS	159
7.3	CONTRIBUIÇÕES METODOLÓGICAS.....	161
7.4	CONTRIBUIÇÕES PARA INDÚSTRIA	164
7.5	LIMITAÇÕES DA PESQUISA	166
7.6	POTENCIAL DE INTEGRAÇÃO COM INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL	169
8	CONCLUSÕES	174
8.1	SÍNTESE DOS RESULTADOS	174
8.2	ATENDIMENTO AOS OBJETIVOS	175
8.3	IMPLICAÇÕES PARA A CONSTRUÇÃO MODULAR	177
8.4	RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	178
8.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	180
	REFERÊNCIAS	181
	APÊNDICES	191
	APÊNDICE A - ENTREVISTA SEMIESTRUTURADA	192
	ANEXOS.....	194
	ANEXO A - RELATÓRIO APRESENTADO À EMPRESA PORTUGUESA.....	195
	ANEXO B - RELATÓRIO DE IÇAMENTO DE ENTREGA APRESENTADO À EMPRESA BRASILEIRA	210
	ANEXO C - RELATÓRIO DE IÇAMENTO DE FÁBRICA APRESENTADO À EMPRESA BRASILEIRA	216
	ANEXO D - RELATÓRIO DE TRANSPORTE RODOVIÁRIO APRESENTADO À EMPRESA	

BRASILEIRA	221
------------------	-----

1 INTRODUÇÃO

A construção civil ocupa posição estratégica na economia e na configuração do ambiente construído, mas permanece marcada por um paradoxo persistente: embora mobilize cadeias produtivas extensas, recursos intensivos e sucessivos avanços tecnológicos, o setor ainda convive com limitações estruturais de produtividade, previsibilidade e controle. Em comparação com outras indústrias, a construção continua exposta a elevados níveis de desperdício, instabilidade de cronogramas, variabilidade de desempenho e dificuldades recorrentes de coordenação entre agentes, processos e fluxos de informação (Van Tam, 2024).

Esse diagnóstico não se reduz a uma percepção abstrata de ineficiência. Dados recentes publicados por Mischke *et al.* (2024) revelam que, entre 2000 e 2022, a produtividade global da construção cresceu apenas 10% (0,4% ao ano), enquanto a produtividade da economia total aumentou 50% (2% ao ano) e a da manufatura 90% (3% ao ano) no mesmo período. Mais do que um descompasso conjuntural, esses números revelam a persistência de um problema estrutural, uma vez que, mesmo em um contexto de crescente disseminação tecnológica, a produtividade global do setor apresentou retração de 8% entre 2020 e 2022. Van Tam (2024) reforça que a baixa produtividade continua sendo um dos desafios mais relevantes da construção em diversos países, com implicações diretas sobre custo, prazo, qualidade e desempenho dos empreendimentos.

A esse quadro somam-se desafios históricos de segurança. Gondia *et al.* (2023) observam que a construção é constantemente classificada entre as atividades mais inseguras em escala global e destacam que, em diferentes países, os indicadores de lesões apresentaram comportamento relativamente estável na última década, sugerindo um platô de desempenho e limites das estratégias tradicionais de gestão da segurança. Esse aspecto reforça que a transformação do setor exige não apenas ganhos de produtividade, mas também processos mais previsíveis, controláveis e capazes de apoiar decisões preventivas em contextos operacionais complexos.

Estas limitações tornam-se ainda mais relevantes quando consideradas em conjunto com a pressão ambiental associada ao setor. Khan *et al.* (2023) assinalam que a indústria da construção e das edificações responde por parcela expressiva das emissões globais de carbono e impõe significativa carga ambiental em termos de

consumo de energia, o que torna indispensável sua transformação diante das metas contemporâneas de descarbonização. Em consequência, o debate sobre a reestruturação do setor não se restringe ao aumento da produtividade, mas envolve também a necessidade de processos mais controláveis, menos intensivos em perdas e mais compatíveis com objetivos de sustentabilidade, industrialização e inovação.

Tomados em conjunto, esses entraves indicam que as dificuldades da construção civil não se restringem a falhas pontuais de gestão ou desempenho, mas refletem limitações mais profundas na forma como o setor organiza sua produção. A persistência simultânea de baixa produtividade, elevados riscos ocupacionais e forte pressão ambiental evidencia a necessidade de modelos construtivos mais integrados, previsíveis e eficientes, capazes de reduzir perdas, melhorar a coordenação entre etapas e responder de modo mais consistente às exigências contemporâneas de desempenho e sustentabilidade.

Diante deste cenário, a construção modular vem sendo reconhecida como uma estratégia promissora para reestruturar a lógica produtiva da construção (Bertram *et al.*, 2019; Khan *et al.*, 2023). Ao transferir parte significativa das atividades do canteiro para ambientes fabris controlados, a abordagem favorece, segundo Wuni e Shen (2019) e Parracho *et al.* (2025), maior padronização, melhor controle dimensional, execução paralela de etapas, redução de perdas e maior previsibilidade do processo construtivo.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DA CONSTRUÇÃO MODULAR

A construção modular constitui uma das expressões mais avançadas da industrialização da construção, ao deslocar parte significativa das atividades tradicionalmente realizadas no canteiro para ambientes fabris controlados (Wuni; Shen, 2019; Khan *et al.*, 2023). Nessa lógica, a edificação passa a ser concebida a partir da fabricação prévia de unidades construtivas em ambiente industrial, posteriormente transportadas e integradas no local definitivo da obra (Wuni; Shen, 2019).

Em seus níveis mais elevados de integração, esses sistemas envolvem módulos pré-acabados e fabricados com alto valor agregado, caracterizando formas volumétricas de pré-fabricação (Pan; Hon, 2018). Nessa perspectiva, a construção modular pode ser compreendida como uma estratégia de produção *off-site* orientada

à padronização, à repetibilidade e à integração entre projeto, fabricação, transporte e montagem.

Embora o campo da construção industrializada abranja diferentes arranjos produtivos, esta tese adota uma compreensão mais rigorosa da construção modular, alinhada a sistemas compostos por módulos em sentido estrito, isto é, unidades volumétricas pré-fabricadas, transportáveis e destinadas à incorporação na edificação final.

Assim, esta tese não adota uma noção ampliada e indistinta de construção modular. Ao contrário, delimita seu objeto às unidades tridimensionais dotadas de identidade espacial, construtiva e funcional própria, excluindo componentes isolados, painéis e sistemas bidimensionais que, embora possam integrar estratégias de pré-fabricação, não configuram módulos em sentido estrito. Essa delimitação é coerente com a posição teórica adotada por Pasello, Almeida e Moura (2025), segundo a qual o termo modular deve ser reservado a sistemas baseados em módulos volumétricos, evitando sua aplicação genérica a qualquer forma de industrialização ou pré-fabricação.

A crescente atenção dedicada à construção modular decorre, em grande medida, de suas vantagens potenciais em relação ao modelo convencional. Ainda que essas vantagens já fossem reconhecidas em estudos anteriores, como os de Lawson, Ogden e Bergin (2012), revisões mais recentes reiteram que a construção modular pode contribuir para a redução do tempo global da obra, a paralelização entre fabricação e preparação do canteiro, a melhoria do controle de qualidade, a redução de perdas, o aumento da previsibilidade do cronograma e a maior racionalização do processo produtivo (Wuni; Shen, 2019; Lim et al., 2022; Zohourian *et al.*, 2025).

Para além dos ganhos de prazo e produtividade, Khan *et al.* (2023) e Parracho *et al.* (2025) destacam benefícios ambientais e operacionais, como menor geração de resíduos, uso mais racional de materiais, menor perturbação no entorno, condições mais seguras de execução e maior integração entre projeto, fabricação e planejamento.

Além disso, a construção modular vem sendo associada a uma agenda mais ampla de transformação produtiva da indústria da construção. Segundo Bertram et al. (2019), embora sua adoção ainda não seja dominante em muitos contextos, há indícios robustos de potencial expansão em larga escala no setor.

Esse interesse se explica pelo fato de que a industrialização da construção,

conforme assinalam Han et al. (2023), busca aumentar a eficácia no uso dos recursos disponíveis, melhorar a qualidade do produto, ampliar a eficiência do negócio, elevar a satisfação do cliente, controlar melhor os prazos de execução e reduzir desperdícios. Nessa perspectiva, a construção modular não se resume a uma alternativa técnica de execução, mas se apresenta como uma estratégia de reorganização do sistema produtivo da construção.

Essas vantagens, no entanto, não decorrem automaticamente da adoção do sistema. Diversos autores destacam que a construção modular continua sujeita a barreiras, riscos e incertezas específicos. Segundo Li *et al.* (2016) e Wuni *et al.* (2019), sistemas modularizados requerem soluções próprias de projeto, fabricação, transporte, armazenamento e instalação, o que faz com que diferentes segmentos da cadeia estejam expostos a novas formas de vulnerabilidade.

Para Ferdous et al. (2019) e Wuni e Shen (2020), embora os benefícios potenciais da modularização sejam amplamente reconhecidos, sua difusão permanece mais lenta do que o esperado justamente em razão das exigências técnicas, logísticas e gerenciais que ela introduz.

Sob essa perspectiva, a industrialização não elimina a complexidade da construção, ela a redistribui ao longo da cadeia. Conforme discutem Hsu, Aurisicchio e Angeloudis (2019), a adoção da construção modular altera a própria configuração da cadeia de suprimentos e impõe novas exigências ao sistema logístico, que deixa de lidar apenas com o transporte de insumos e passa a coordenar produção, estoque, entrega e montagem de unidades finalizadas.

Nessa lógica, o deslocamento da produção para a fábrica amplia a relevância de etapas intermediárias que passam a influenciar diretamente o desempenho global do empreendimento. Entre essas etapas, tornam-se especialmente sensíveis as interfaces entre fabricação, logística e montagem (Hsu; Aurisicchio; Angeloudis, 2019; Khan *et al.*, 2023).

1.2 O TRANSPORTE COMO ETAPA CRÍTICA DA CONSTRUÇÃO MODULAR

No sistema da construção modular, o transporte constitui o elo entre a produção em ambiente fabril e a montagem no canteiro. É nessa passagem que o módulo, já configurado como unidade tridimensional com elevado grau de completude, deixa o ambiente relativamente controlado da fábrica e passa a enfrentar restrições

geométricas, exigências regulatórias, limitações de acesso, condições variáveis das vias públicas e dos acessos ao local de montagem e incertezas operacionais. Por essa razão, o transporte não representa apenas uma mudança de localização, mas uma etapa técnica capaz de influenciar a integridade do módulo, a continuidade da operação e o desempenho global do empreendimento (Hsu; Aurisicchio; Angeloudis, 2019; Song; Choi; Cho, 2024).

Conforme argumentam Hsu, Aurisicchio e Angeloudis (2019), a lógica modular impõe desafios logísticos distintos daqueles observados na construção convencional, pois a cadeia deixa de movimentar apenas insumos e passa a coordenar unidades finalizadas, volumosas e sensíveis. Essa criticidade decorre, inicialmente, das características físicas dos módulos volumétricos. Segundo Bertram et al. (2019), a industrialização transfere atividades para a planta fabril, mas amplia a dependência de soluções logísticas compatíveis com a movimentação de unidades de grandes dimensões. Nessas condições, o transporte exige veículos apropriados, sistemas de apoio e retenção, planejamento detalhado da rota e compatibilização prévia entre a geometria da carga e as restrições da infraestrutura viária disponível.

O elevado grau de acabamento dos módulos amplia essa vulnerabilidade. Quando o módulo já incorpora estrutura, vedação, instalações, esquadrias, revestimentos e outros componentes finalizados, anomalias durante o trajeto podem gerar danos físicos, perdas funcionais, retrabalho e custos adicionais. Além disso, seu comportamento durante o deslocamento é influenciado por carregamentos dinâmicos associados às características do veículo, à categoria do módulo, à rugosidade da via e à velocidade de deslocamento. Wu e Li (2022) demonstram que essas solicitações podem gerar respostas dinâmicas significativas, induzir danos a componentes, agravar efeitos por fadiga em percursos longos, produzir desperdício material e acarretar atrasos de cronograma.

A geometria da carga também tem papel decisivo. Módulos largos, altos ou longos frequentemente extrapolam limites usuais de circulação e, por isso, podem demandar autorizações especiais, escolta, restrições de horário e definição criteriosa de trajetos. Incompatibilidades com a infraestrutura existente, como altura livre insuficiente, estreitamentos, curvas fechadas, obstáculos laterais ou limitações de capacidade de pontes, podem inviabilizar o percurso ou impor manobras mais complexas. Em contextos urbanos e congestionados, a volumetria e a delicadeza dos módulos agravam os desafios de transporte e estoque, tornando a operação mais

sensível a perturbações logísticas (Hsu; Aurisicchio; Angeloudis, 2019).

Condições ambientais, humanas e organizacionais ampliam ainda mais essa complexidade. Fatores como vento lateral, chuva, baixa visibilidade, pistas escorregadias, aclives acentuados e trechos com pavimentação precária podem alterar de forma significativa o perfil de risco da operação. A isso somam-se qualificação da equipe, experiência da transportadora, consistência do planejamento, confiabilidade das informações operacionais e conformidade com as exigências regulatórias. Segundo Khan et al. (2023), os riscos associados ao transporte modular distribuem-se entre categorias ligadas à implementação, ao cronograma, à supply chain, à segurança e ao desempenho estrutural, reforçando o caráter multidimensional dessa etapa.

Os impactos de uma falha no transporte ultrapassam o dano imediato ao módulo. Atrasos, avarias, interrupções ou incompatibilidades operacionais podem comprometer cronogramas sincronizados, ampliar custos, gerar retrabalho e desorganizar a articulação entre fábrica e obra (Hsu; Aurisicchio; Angeloudis, 2019; Khan et al., 2023). Em situações mais graves, podem resultar em acidentes com vítimas, danos à infraestrutura pública, conflitos contratuais e prejuízos reputacionais.

A etapa do transporte retroage sobre decisões tomadas ainda na definição do produto. Dimensões, peso, interfaces estruturais, pontos de içamento, sistema de apoio e grau de acabamento não podem ser estabelecidos exclusivamente a partir de critérios fabris ou arquitetônicos, pois sua compatibilidade com as condições logísticas reais é decisiva para a viabilidade do sistema. O transporte, portanto, deve ser compreendido como dimensão constitutiva da solução modular, e não como operação acessória.

1.3 LACUNAS NA GESTÃO DE RISCOS EM OPERAÇÕES DE TRANSPORTE MODULAR

Embora a literatura sobre construção modular tenha avançado de forma consistente em temas como industrialização, desempenho, produtividade e sustentabilidade, a gestão de riscos aplicada especificamente ao transporte de módulos volumétricos ainda apresenta lacunas relevantes.

Em muitos estudos, a logística aparece como parte de discussões mais amplas sobre a cadeia modular, sem receber aprofundamento equivalente ao dedicado à fabricação ou à montagem. Wuni, Shen e Hwang (2020) mostram que a literatura

sobre riscos em construção modular cresceu de forma contínua nas últimas décadas, contudo, Khan et al. (2023) observam que essa evolução ainda não se traduziu, de modo suficiente, em abordagens abrangentes e analiticamente estruturadas para todas as etapas do processo, especialmente quando se consideram os riscos específicos do transporte e da logística modular.

Na prática profissional, a avaliação dos riscos do transporte modular costuma apoiar-se em experiência acumulada, listas de verificação, inspeções pontuais e julgamentos predominantemente qualitativos, padrão compatível com a predominância de abordagens qualitativas e classificatórias ainda observada na literatura sobre riscos em construção modular (Wuni; Shen; Hwang, 2020; Khan et al., 2023).

Ainda que esse repertório tenha utilidade operacional, tende a apresentar baixa padronização, pouca replicabilidade e forte dependência da experiência de agentes específicos. Em consequência, a análise de riscos frequentemente permanece vinculada a procedimentos empíricos e avaliações genéricas, com limitada capacidade de responder, de forma estruturada, às particularidades de cada operação.

Essa limitação torna-se especialmente relevante porque os riscos associados à cadeia de suprimentos da construção modular são interdependentes e ainda carecem de identificação e alocação plenamente consolidadas (Wuni; Shen, 2019). No caso do transporte, essa interdependência é agravada pela combinação de variáveis operacionais que se alteram a cada cenário, como dimensões do módulo, características da rota, condições climáticas, restrições normativas, dispositivos de retenção, composição da equipe e janela operacional.

A literatura recente mostra que os riscos da construção modular vêm sendo estudados sob diferentes perspectivas. Wuni, Shen e Hwang (2020) sintetizam trabalhos voltados ao mapeamento, à categorização e à priorização de riscos em múltiplas fases do processo modular. De modo semelhante, Khan et al. (2023) identificam fatores críticos distribuídos por diferentes etapas e atributos de projetos em construção modular volumétrica, reforçando que o tema já alcançou importante maturidade descritiva. Em conjunto, essas contribuições ajudaram a consolidar o assunto no campo da engenharia e da gestão da construção.

Apesar desse avanço, permanece uma limitação recorrente: grande parte dos estudos identifica, agrupa ou hierarquiza riscos em nível relativamente genérico, sem

incorporar de modo suficiente as condições operacionais específicas de cada nova operação. Em outras palavras, a literatura avançou no reconhecimento dos riscos da construção modular, mas ainda são escassos os modelos capazes de ajustar a criticidade desses riscos às condições concretas de cada cenário de transporte. A revisão de Khan et al. (2023), por exemplo, oferece um quadro abrangente de fatores críticos, mas não se propõe a transformá-los em instrumento analítico sensível às variações contextuais de cada operação.

Métodos tradicionais de análise de riscos, como matrizes qualitativas, classificações genéricas por probabilidade e impacto e listas amplas de verificação, podem funcionar como instrumentos preliminares, mas revelam limitações diante da complexidade do transporte modular, especialmente quando a criticidade dos eventos depende da interação entre múltiplas variáveis contextuais e operacionais (Hsu; Aurisicchio; Angeloudis, 2019; Wuni; Shen; Hwang, 2020; Khan et al., 2023).

Conforme argumentam Hsu, Aurisicchio e Angeloudis (2019), a logística da construção modular difere daquela observada na construção convencional porque a coordenação entre fabricação, estoque, entrega e montagem depende de sistemas mais sensíveis ao tempo, ao espaço e às incertezas. Nesse contexto, alterações aparentemente pontuais, como mudanças na geometria da carga, na rota, na qualidade da via, nas condições climáticas, nos dispositivos de retenção ou na experiência da equipe, podem modificar substancialmente o perfil de risco da operação.

Além disso, há carência de abordagens efetivamente adaptativas e sistemáticas. Cada operação de transporte modular apresenta configuração singular, mas muitas práticas ainda se apoiam em protocolos genéricos e pouco sensíveis ao contexto. Hsu, Aurisicchio e Angeloudis (2019) sustentam que modelos logísticos concebidos para a construção *in situ* não são diretamente transferíveis para a construção modular, dada a necessidade de coordenação mais fina, menor tolerância a atrasos e exposição a incertezas específicas.

Do ponto de vista científico e profissional, essa lacuna evidencia a necessidade de um artefato que não apenas identifique ou hierarquize riscos, mas que avalie sua criticidade de forma adaptativa, sistemática e sensível às condições concretas de cada operação. Em síntese, embora a literatura e a prática profissional já reconheçam a relevância dos riscos associados ao transporte modular, ainda permanecem escassos modelos analíticos capazes de integrar múltiplas variáveis operacionais, eventos

indesejados, níveis de criticidade e possibilidades de mitigação em uma estrutura aplicável ao apoio à decisão.

Assim, o problema central não está apenas em reconhecer quais riscos existem, mas em compreender como sua criticidade se altera em função das características específicas de cada operação. É precisamente nessa lacuna que a presente tese se posiciona, ao propor um modelo preditivo orientado à identificação, avaliação e priorização de riscos no transporte de módulos volumétricos.

1.4 PROBLEMA DE PESQUISA

Considerando a crescente adoção da construção modular, a centralidade do transporte de módulos para a viabilidade do sistema e as limitações das abordagens atualmente empregadas para a gestão de riscos nessa etapa, esta tese parte do seguinte problema de pesquisa:

Como desenvolver e avaliar um modelo preditivo, sistemático e adaptável que, com base em variáveis específicas da operação, apoie a tomada de decisão no transporte de módulos, identificando, avaliando e priorizando riscos para orientar medidas preventivas?

A partir dessa questão central, desdobram-se perguntas complementares que orientam o desenvolvimento da pesquisa: quais variáveis operacionais condicionam a criticidade dos riscos no transporte de módulos? Como essas variáveis podem ser associadas a eventos de risco? De que modo a criticidade pode ser calculada e priorizada de forma adaptável ao contexto de cada operação? Como os resultados da análise podem subsidiar a definição de medidas preventivas?

A formulação do problema deriva da lacuna identificada na literatura: embora os riscos associados ao transporte modular sejam reconhecidos como relevantes, sua criticidade ainda é frequentemente tratada de modo genérico, sem adequada incorporação das variáveis operacionais que diferenciam uma operação da outra. Essa limitação é especialmente relevante porque classificações genéricas tendem a capturar de forma limitada a variação da criticidade em operações sujeitas a diferentes combinações de carga, rota, ambiente, equipamentos, equipe, planejamento e restrições normativas.

Assim, a pesquisa assume como pressuposto que um modelo preditivo, sistemático e adaptável, estruturado com base em variáveis específicas da operação,

pode oferecer uma leitura mais consistente da criticidade dos riscos do que abordagens genéricas e predominantemente qualitativas. Ao relacionar condições operacionais, riscos prioritários e medidas preventivas, o modelo busca transformar a análise de riscos em suporte efetivo à tomada de decisão, aproximando o conhecimento técnico das exigências concretas de cada operação.

1.5 OBJETIVO GERAL E OBJETIVOS ESPECÍFICOS

A definição dos objetivos desta pesquisa decorre diretamente do problema formulado e da necessidade de construir uma resposta simultaneamente rigorosa do ponto de vista metodológico e útil em termos operacionais para a avaliação e a priorização preventiva de riscos no transporte de módulos.

O objetivo geral da tese consiste em desenvolver e avaliar um modelo preditivo, sistemático e adaptável de apoio à tomada de decisão para a avaliação e a priorização preventiva de riscos no transporte de módulos volumétricos na construção modular, capaz de identificar, avaliar e priorizar eventos de risco com base em variáveis específicas da operação e subsidiar a definição de medidas preventivas e mitigadoras.

Para viabilizar esse propósito, estabelecem-se os seguintes objetivos específicos:

- a) compreender o transporte de módulos volumétricos como etapa crítica da construção modular, considerando suas interfaces com fabricação, deslocamento rodoviário, carregamento, descarregamento e posicionamento das unidades;
- b) caracterizar os principais eventos de risco associados ao transporte rodoviário e às operações de içamento de módulos, distinguindo fatores condicionantes, eventos potenciais e consequências operacionais;
- c) estabelecer um conjunto de variáveis operacionais capaz de representar as condições específicas dos cenários de transporte modular;
- d) compreender como as variáveis operacionais se relacionam com eventos de risco e contribuem para a variação da criticidade em diferentes contextos;
- e) formular critérios analíticos para o cálculo e a priorização da criticidade dos riscos, de modo a apoiar decisões preventivas antes da execução da operação;
- f) consolidar uma estrutura preditiva de apoio à decisão capaz de relacionar variáveis operacionais, eventos de risco, níveis de criticidade e medidas preventivas ou mitigadoras;

g) examinar em que medida o modelo representa cenários operacionais distintos e oferece suporte útil à tomada de decisão preventiva.

1.6 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

Toda investigação científica requer delimitações claras para assegurar sua viabilidade metodológica e preservar a coerência entre problema, objetivos e procedimentos analíticos. Nesta tese, o escopo concentra-se na gestão de riscos associada ao transporte de módulos na construção modular, tomando essa etapa como contexto central para o desenvolvimento e a avaliação do artefato proposto.

Do ponto de vista conceitual, a pesquisa adota o termo módulo em sentido estrito, referindo-se a unidades tridimensionais, pré-fabricadas, transportáveis e destinadas à incorporação na edificação final. Assim, não integram o escopo da tese componentes lineares, painéis, elementos bidimensionais ou soluções pré-fabricadas que não configurem módulos em sentido rigoroso. Essa delimitação decorre das especificidades geométricas, estruturais, logísticas e operacionais dos módulos, especialmente por serem deslocados como unidades de grandes dimensões e elevado grau de completude.

Do ponto de vista operacional, a pesquisa concentra-se no transporte de módulos, aqui compreendido em sentido ampliado como a cadeia de movimentação que conecta a produção industrializada à incorporação das unidades na edificação final. O eixo principal da investigação é o transporte rodoviário, não abrangendo, como foco principal, operações predominantemente ferroviárias, hidroviárias, marítimas ou aéreas. No entanto, o desenvolvimento da pesquisa evidenciou que a análise da criticidade do transporte modular não poderia desconsiderar as operações de içamento, uma vez que deslocamento rodoviário, descarga, movimentação vertical e posicionamento integram uma cadeia física contínua de estabilidade, coordenação e segurança.

O estudo não se expande para todas as etapas da construção modular, como projeto, fabricação, montagem em sentido amplo, operação ou manutenção. Também não tem como foco riscos financeiros, contratuais, comerciais, orçamentários, jurídico-administrativos ou estratégicos. A pesquisa concentra-se em riscos práticos da operação, isto é, aqueles capazes de afetar diretamente a segurança, a integridade do módulo, a continuidade do transporte, a execução do içamento e a tomada de

decisão preventiva. Fatores organizacionais são considerados apenas quando interferem diretamente na operação, como qualificação da equipe, comunicação entre agentes, experiência da transportadora, consistência do planejamento e confiabilidade das informações operacionais.

Por fim, o artefato não pretende substituir o julgamento técnico de especialistas, as verificações normativas ou os procedimentos legais exigidos em operações com cargas especiais e equipamentos de içamento. Sua finalidade é ampliar a consistência, a transparência e a rastreabilidade da análise de riscos, oferecendo suporte estruturado à decisão sem eliminar a necessidade de validação técnica, experiência profissional e conformidade regulatória.

1.7 ESTRATÉGIA DA PESQUISA

Considerando a natureza aplicada do problema investigado e o objetivo de desenvolver uma solução analítica para apoiar a antecipação de riscos no transporte rodoviário de módulos volumétricos, esta tese adota uma estratégia de pesquisa orientada à solução. Essa escolha se aproxima da *Design Science Research* (DSR), que, segundo vom Brocke, Hevner e Maedche (2020), busca responder a problemas reais por meio do desenvolvimento de artefatos metodologicamente fundamentados.

No caso desta tese, isso significa que a investigação não foi concebida apenas para descrever os riscos presentes no transporte modular, mas para transformá-los em uma estrutura analítica capaz de apoiar sua leitura e priorização em diferentes cenários operacionais. Nessa direção, Gregor e Zwikael (2024) observam que a DSR se mostra especialmente pertinente quando o desafio da pesquisa está em articular rigor acadêmico e utilidade prática, isto é, quando o conhecimento produzido precisa resultar também em uma solução aplicável.

A estratégia adotada parte da identificação de uma lacuna concreta no contexto investigado e avança para a definição dos requisitos da solução proposta, sua modelagem conceitual e sua posterior avaliação. Esse encadeamento é coerente com o que Goecks *et al.* (2021) descrevem como uma das contribuições centrais da DSR: transformar problemas ainda pouco resolvidos em artefatos com utilidade clara e aderência ao contexto. Além disso, como o artefato desenvolvido nesta tese corresponde a um modelo preditivo de apoio à decisão, e não a um produto físico, torna-se especialmente importante considerar também sua utilidade, adequação e

capacidade de resposta ao problema que motivou sua construção, como destacam Mdletshe *et al.* (2023).

Outro aspecto relevante é que o desenvolvimento desse tipo de solução exige não apenas formalização analítica, mas também compreensão cuidadosa do contexto em que o problema se manifesta. Nesse ponto, Fathullah *et al.* (2025) mostram que abordagens qualitativas podem ser integradas à DSR quando a construção do artefato depende da interpretação situada do fenômeno e do desenho progressivo da solução. Isso se aplica diretamente a esta tese, uma vez que a estrutura do modelo proposto depende da articulação entre literatura, variáveis operacionais e leitura contextual das situações de transporte.

Assim, a estratégia da pesquisa expressa a lógica geral que organiza a tese: parte-se de um problema concreto e complexo, identificam-se suas exigências analíticas e desenvolve-se uma solução que busca ser, ao mesmo tempo, tecnicamente aplicável e cientificamente justificável. Apresenta-se aqui apenas a lógica geral que estrutura a investigação, reservando-se ao Capítulo 3 o detalhamento da abordagem metodológica, do desenvolvimento do artefato e de sua avaliação.

1.8 CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA

As contribuições desta tese podem ser compreendidas em quatro dimensões complementares: teórica, metodológica, tecnológica e prática. Todas se articulam em torno de um mesmo problema: a necessidade de apoiar, de forma mais sistemática, contextualizada e operacionalmente aplicável, a gestão de riscos no transporte de módulos na construção modular. Em termos gerais, a pesquisa propõe uma estrutura analítica capaz de interpretar a criticidade dos riscos não como atributo fixo ou universal, mas como resultado da combinação entre condições específicas da operação, características dos módulos, restrições logísticas e exigências de segurança.

Do ponto de vista teórico, a tese busca contribuir ao tratar o transporte modular não apenas como etapa logística acessória, mas como objeto analítico específico, cuja criticidade decorre da interação entre fatores geométricos, infraestruturais, ambientais, normativos, técnicos e organizacionais. Essa perspectiva desloca a análise de uma lógica predominantemente classificatória para uma abordagem relacional e contextual, mais compatível com a variabilidade das operações reais.

Em termos metodológicos, a pesquisa contribui ao mobilizar a DSR como estrutura para o desenvolvimento progressivo de um artefato analítico voltado à gestão de riscos no transporte modular. Essa contribuição está associada à articulação entre identificação de riscos, definição de variáveis operacionais, formulação de critérios de criticidade e ciclos sucessivos de avaliação e refinamento.

A contribuição tecnológica reside na proposição de uma arquitetura analítica determinística capaz de relacionar variáveis operacionais, eventos de risco, níveis de criticidade e medidas preventivas. Ao tornar explícitas essas relações, o artefato organiza conhecimento frequentemente empírico e fragmentado em uma estrutura interpretável, rastreável e potencialmente replicável.

No plano prático, a tese oferece uma ferramenta de apoio à tomada de decisão para empresas de construção modular, transportadoras especializadas, operadores logísticos, equipes de planejamento e profissionais responsáveis pela segurança operacional. Ao permitir a identificação prévia de riscos prioritários e a definição de respostas preventivas compatíveis com as condições reais da operação, o artefato aproxima análise de riscos, planejamento logístico e decisão operacional.

1.9 ESTRUTURA DA TESE

Além deste capítulo introdutório, a tese está organizada em sete capítulos, dispostos de modo a acompanhar progressivamente o percurso de fundamentação teórica, desenvolvimento metodológico, avaliação empírica, refinamento analítico, discussão dos resultados e consolidação das conclusões. Essa organização reflete não apenas a sequência expositiva do trabalho, mas também o amadurecimento do artefato desenvolvido, desde sua formulação inicial até sua versão refinada.

O Capítulo 2 apresenta a revisão da literatura e estabelece a base conceitual da pesquisa. Nele, são discutidos os fundamentos da construção modular, os módulos como objeto específico de análise, o transporte como etapa técnica crítica e os principais conceitos relacionados à gestão de riscos e à modelagem analítica. Esse capítulo oferece o suporte teórico necessário à formulação do problema, à definição das variáveis de análise e à construção do artefato.

O Capítulo 3 expõe a estratégia metodológica da pesquisa. São apresentados o enquadramento do estudo na perspectiva da DSR, a lógica do processo investigativo, os procedimentos utilizados para a identificação do problema e para a

definição dos requisitos da solução, bem como as etapas de desenvolvimento do artefato e a estratégia estabelecida para sua avaliação.

O Capítulo 4 apresenta o primeiro ciclo de avaliação exploratória do artefato, realizado a partir de uma aplicação em contexto empírico em Portugal. São descritos o contexto da operação analisada, a empresa parceira, os procedimentos de aplicação do modelo, os resultados obtidos, a apreciação do especialista e a comparação entre as respostas do artefato e as evidências observadas em campo. Esse ciclo ocupa posição central no amadurecimento da pesquisa, pois permite explicitar os limites e as potencialidades da primeira versão da solução.

O Capítulo 5 é dedicado ao refinamento do artefato com base nos achados do primeiro ciclo de avaliação. Nesse momento, são discutidos os ajustes realizados nas variáveis, nos critérios de criticidade, na lógica de processamento e na forma de apresentação dos resultados. É também nesse capítulo que a arquitetura inicialmente integrada do modelo é refinada em dois domínios analíticos específicos, transporte rodoviário e içamento, como resposta à necessidade de maior precisão e aderência às particularidades de cada contexto operacional.

O Capítulo 6 apresenta o segundo ciclo de avaliação, desenvolvido a partir da aplicação da solução refinada em contexto brasileiro. O capítulo descreve o novo caso analisado, os procedimentos adotados, os resultados obtidos e a comparação entre os ciclos de avaliação, com o objetivo de verificar evidências de aprimoramento do artefato e maior consistência da solução após seu refinamento.

O Capítulo 7 reúne a discussão dos resultados, articulando os achados empíricos e analíticos da pesquisa com a literatura revisada. Nesse capítulo, são examinadas as contribuições científicas, metodológicas, tecnológicas e práticas da tese, bem como suas limitações e o potencial de integração futura com abordagens baseadas em inteligência artificial.

Por fim, o Capítulo 8 apresenta as conclusões da tese, retomando o problema de pesquisa, os objetivos propostos e os principais resultados alcançados. Além de sintetizar as contribuições do estudo, esse capítulo explicita as implicações da pesquisa para o campo da construção modular e aponta possibilidades de aprofundamento em investigações futuras.

A Figura 1 apresenta de maneira ilustrada a estrutura geral da tese e a articulação entre seus capítulos.

Figura 1 - Estrutura geral da tese



Fonte: Elaborado pelo autor.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo estabelece a base conceitual e analítica que sustenta a compreensão do transporte de módulos como etapa crítica da construção modular e dá suporte à proposição do artefato desenvolvido nesta tese. Não se trata de uma revisão orientada à reunião ampla e indistinta de temas associados à construção modular, mas de uma construção teórica organizada em função do problema de pesquisa.

Para isto, a revisão foi organizada como uma sequência argumentativa. Parte-se da construção modular como lógica produtiva industrializada, avança-se para a delimitação dos módulos volumétricos como objeto específico de análise, aprofunda-se a discussão sobre o transporte como dimensão técnica crítica do sistema e, por fim, examinam-se os fundamentos da gestão de riscos e as abordagens analíticas pertinentes ao tratamento do problema investigado.

2.1 A CONSTRUÇÃO MODULAR

A construção modular insere-se no conjunto de estratégias voltadas à industrialização da construção, distinguindo-se pela transferência de parte significativa da produção para ambientes fabris controlados e pela maior integração entre projeto, fabricação, transporte e montagem. A seção reúne a base conceitual necessária para compreender a lógica produtiva da construção modular e delimita o foco analítico nos módulos volumétricos.

2.1.1 Fundamentos e Lógica Produtiva da Construção Modular

A construção modular pode ser compreendida como uma das expressões mais avançadas da industrialização da construção, na medida em que desloca parte significativa das atividades tradicionalmente realizadas no canteiro para ambientes fabris controlados e reorganiza o processo construtivo a partir de princípios de padronização, repetibilidade, antecipação de decisões e coordenação entre etapas (Wuni; Shen; Hwang, 2020).

Nessa perspectiva, a edificação deixa de ser produzida exclusivamente por operações fragmentadas e sequenciais executadas in loco e passa a resultar de um

sistema produtivo mais integrado, em que projeto, fabricação, logística e montagem se articulam de forma interdependente.

Essa leitura é coerente com o modo como a literatura recente tem tratado a construção modular. Abdelmageed e Zayed (2020), ao revisarem criticamente a produção científica sobre o tema, identificam um campo de investigação estruturado em torno de diferentes dimensões, incluindo projeto, operações construtivas, sustentabilidade, aspectos gerenciais e tecnologias da informação.

Essa diversidade temática permite compreender a construção modular não apenas como uma técnica baseada no uso de elementos pré-fabricados, mas como um arranjo produtivo sistêmico, cujo desempenho depende da coordenação entre agentes, fluxos de informação e decisões ao longo de diferentes fases do processo construtivo.

Nesse contexto, a produção *off-site* assume papel central. Ao transferir parcela expressiva da execução para a fábrica, a construção modular cria condições mais favoráveis ao controle da qualidade, à padronização de procedimentos, à repetição produtiva e à redução de variabilidades típicas do ambiente de obra. De acordo com Zohourian et al. (2025), essa característica tende a favorecer ganhos de eficiência, segurança, produtividade, redução de retrabalhos e diminuição do tempo de execução quando comparada aos métodos convencionais.

Tais ganhos, contudo, não decorrem automaticamente da simples mudança de local de produção. Conforme os mesmos autores, a construção modular também demanda planejamento mais detalhado, maior definição prévia do projeto e maior capacidade de coordenação entre fabricação, transporte, montagem e condicionantes logísticas.

Sob essa ótica, a industrialização da construção não elimina a complexidade do processo construtivo, ela a reconfigura. Parte das incertezas, ajustes improvisados e decisões tardias que, na construção convencional, costumam ser absorvidos no canteiro passa a exigir tratamento antecipado, com maior rigor na definição de interfaces, na sequência de atividades e no fluxo de trabalho.

Essa compreensão é compartilhada por Olawumi et al. (2022), que descrevem a construção modular como um processo estruturado em fases articuladas de fabricação prévia, transporte e instalação em obra. Essa formulação é particularmente relevante porque evidencia que a eficiência da modularização não pode ser atribuída exclusivamente ao ambiente fabril, mas ao funcionamento coordenado de toda a

cadeia produtiva.

A literatura também indica que essa reorganização produtiva tem caminhado junto com o avanço da digitalização no setor. Olawumi et al. (2022) mostram que ferramentas como BIM, simulação, algoritmos de otimização, sistemas de rastreamento e compartilhamento em tempo real de informações vêm sendo aplicadas em diferentes etapas da construção modular. Tais tecnologias evidenciam a necessidade de integrar informações entre projeto, fabricação, transporte e montagem, de modo que as decisões tomadas em uma fase possam ser compreendidas e coordenadas nas demais.

Parracho et al. (2025) observam também que a CM tem sido cada vez mais vinculada ao contexto da Construção 4.0, no qual prefabricação, modularização e tecnologias digitais se articulam para promover processos mais integrados, controláveis e eficientes. Os autores ainda destacam a aproximação entre construção modular e os princípios de *Design for Manufacture and Assembly* (DfMA), o que reforça a importância de um projeto mais detalhado desde as etapas iniciais, com maior compatibilização entre disciplinas e melhor coordenação entre projeto, fabricação e montagem.

Essa aproximação com o DfMA é relevante porque evidencia uma característica central da lógica produtiva modular: a menor margem para improvisações ao longo da obra. Quando o projeto passa a considerar, desde o início, as condições de fabricação, transporte e montagem, muitas decisões que antes poderiam ser ajustadas no canteiro precisam ser antecipadas.

Isso exige maior clareza na definição das interfaces, maior cuidado na compatibilização entre disciplinas e melhor controle da sequência produtiva. Assim, a racionalização do processo construtivo não resulta apenas da pré-fabricação, mas da articulação entre padronização, planejamento e coordenação.

Essa lógica, no entanto, também traz algumas contrapartidas. Conforme Zohourian et al. (2025), a maior padronização e a produção em ambiente fabril tendem a reduzir a flexibilidade para alterações posteriores, sobretudo depois que a fabricação é iniciada. Mudanças tardias podem se tornar mais difíceis, custosas ou até inviáveis. Por isso, a construção modular exige maior disciplina de coordenação e menor tolerância a decisões de última hora, diferenciando-se de modelos construtivos mais dependentes de ajustes realizados diretamente em campo.

A construção modular, portanto, não se define apenas pelo uso de elementos

pré-fabricados. Ela se caracteriza, sobretudo, pela organização de um sistema produtivo industrializado, integrado e coordenado. Pasello, Almeida e Moura (2025) associam essa abordagem à busca por maior produtividade, controle, racionalização e previsibilidade no setor da construção, especialmente diante das limitações dos métodos convencionais. Fabricar fora do canteiro é apenas uma parte do processo. O ponto central está na reorganização da produção construtiva a partir de princípios industriais, com maior controle sobre interfaces, qualidade, sequência de atividades e fluxo de trabalho.

Embora a construção modular compartilhe princípios com outras abordagens off-site, ela se distingue quando a industrialização se concretiza em unidades tridimensionais com elevado grau de acabamento e autonomia funcional. É a partir dessa distinção que a discussão conduz ao recorte adotado nesta tese: módulos, compreendidos como unidades tridimensionais, pré-fabricadas e funcionalmente autônomas, cujas características físicas e operacionais geram implicações logísticas próprias.

2.1.2 Módulos Volumétricos e Implicações Logísticas

Embora a construção modular compartilhe princípios gerais com outras estratégias de industrialização da construção, o termo “módulo” nem sempre é empregado com uniformidade na literatura. Em muitos casos, ele é utilizado para designar tanto unidades tridimensionais completas quanto painéis, componentes lineares, subconjuntos ou elementos bidimensionais produzidos fora do canteiro. Essa oscilação terminológica enfraquece a clareza conceitual do campo e dificulta a delimitação do objeto de análise, sobretudo quando se discutem exigências produtivas, logísticas e operacionais (Pasello; Almeida; Moura, 2025).

Diante disso, esta tese adota uma compreensão mais restritiva do termo módulo. Para Wuni, Shen e Hwang (2020), Ginigaddara et al. (2022) e Zohourian et al. (2025), o módulo, em sentido estrito, deve ser entendido como uma unidade tridimensional, pré-fabricada, funcionalmente autônoma e passível de integração por interfaces padronizadas e reversíveis. Essa definição é relevante porque estabelece critérios mais precisos de classificação.

Nessa perspectiva, a volumetria não constitui um atributo acessório, mas o critério central que permite diferenciar o módulo propriamente dito de outros

elementos industrializados. Pasello, Almeida e Moura (2025) também sustentam que, na construção, o vínculo entre módulo e volume decorre da própria lógica do setor, voltada à produção de unidades espaciais habitáveis, transportáveis e funcionalmente integradas à edificação. O volume, portanto, não apenas define o módulo, mas também sua condição de unidade construtiva autônoma, capaz de ser fabricada, movimentada e conectada a um sistema maior.

Essa delimitação é decisiva para a presente tese. Se o termo módulo for aplicado indistintamente a qualquer elemento pré-fabricado, o problema do transporte tende a ser tratado de forma excessivamente ampla e imprecisa. Por outro lado, quando o módulo é compreendido como uma unidade volumétrica de elevada completude, tornam-se mais evidentes as especificidades materiais, espaciais e operacionais que distinguem sua movimentação das lógicas usuais de transporte de componentes isolados.

Não se trata apenas de deslocar insumos ou elementos construtivos simples, mas de movimentar unidades espaciais maiores, mais pesadas, mais acabadas e mais sensíveis a danos, deformações e incompatibilidades operacionais. Arshad e Zayed (2022) reforçam que a CM depende de uma cadeia de suprimentos complexa, na qual transporte, armazenamento, manuseio e montagem precisam ser tratados de forma integrada.

Hussein e Zayed (2021) também destacam que a natureza volumosa, customizada e sensível dos módulos, somada à limitação de armazenamento nos canteiros, intensifica a necessidade de entregas sincronizadas e de coordenação rigorosa entre fabricação, transporte e montagem. Assim, quanto maior o grau de completude do módulo, maior também a dependência de planejamento logístico articulado entre as diferentes etapas da operação.

Do ponto de vista do risco, essa condição torna o deslocamento uma dimensão crítica da CM. Ao mapear como os riscos se manifestam nesse sistema, Khan et al. (2023) mostram que eles não se concentram em uma única etapa, mas se distribuem ao longo do projeto e planejamento, da fabricação, do transporte e da montagem em obra.

No entanto, a etapa logística assume papel particularmente sensível, pois é nela que a unidade volumétrica, já dotada de elevado grau de completude física e funcional, precisa ser efetivamente movimentada. Por isso, fatores como atrasos na entrega, restrições de tamanho e peso, inadequação de rotas, exigências regulatórias,

falhas de identificação dos módulos e danos decorrentes do manuseio tornam-se decisivos.

Na CM, segundo Wuni e Shen (2022), existe uma forte interdependência entre projeto, produção, logística e montagem. Dimensões, peso, interfaces, pontos de içamento, grau de acabamento e estratégia de instalação não podem ser definidos apenas por critérios arquitetônicos ou fabris, pois condicionam diretamente o transporte e a execução em obra. Um módulo projetado com largura incompatível com uma passagem estreita na rota, com altura superior aos gabaritos disponíveis ou sem pontos adequados para içamento, por exemplo, pode gerar dificuldades que só aparecerão nas etapas posteriores, mas cuja origem está em decisões tomadas ainda no projeto ou na fabricação.

Hussein et al. (2022) aprofundam essa leitura ao mostrar que decisões sobre tipo e número de caminhões, armazenamento temporário, entregas *just-in-time*, ritmo diário de instalação e capacidade de recebimento em obra afetam simultaneamente a duração, os custos e o próprio desempenho operacional do empreendimento. Essa interdependência é especialmente crítica na CM, em que a fabricação em ambiente controlado costuma ocorrer em paralelo à preparação do canteiro, exigindo sincronização entre conclusão fabril, transporte, chegada à obra e montagem.

Como a estocagem de módulos no canteiro é limitada e a instalação depende de janelas restritas de recebimento e sequências rígidas de içamento, atrasos, avarias ou falhas de compatibilização em uma etapa tendem a produzir efeitos em cascata sobre as demais. O deslocamento deixa de ser uma operação acessória posterior à fabricação e passa a constituir uma dimensão estruturante do próprio sistema produtivo.

Em síntese, esta compreensão do módulo como unidade volumétrica permite delimitar com maior precisão o objeto desta tese, já que a sua movimentação envolve exigências materiais, espaciais e operacionais próprias, decorrentes do peso, das dimensões, do grau de acabamento, das interfaces e da necessidade de integração logística entre fabricação, transporte e montagem.

A partir dessa delimitação, o uso da expressão “módulo volumétrico” torna-se conceitualmente redundante no âmbito desta pesquisa, uma vez que o próprio termo módulo passa a implicar volume. Por essa razão, daqui em diante, esta tese utilizará o termo “módulo” para se referir a essas unidades tridimensionais de elevada completude, cuja movimentação não pode ser tratada como uma etapa meramente

acessória, mas como um problema técnico central da CM. É justamente essa condição que conduz à seção seguinte.

2.2 TRANSPORTE DE MÓDULOS PARA CM

O transporte de módulos constitui uma etapa central da construção modular, pois conecta a produção *off-site* às condições concretas de montagem em obra. Mais do que uma atividade logística intermediária, trata-se de um processo tecnicamente sensível, no qual características da carga, restrições da rota, condições ambientais, exigências operacionais e decisões de coordenação podem afetar diretamente a viabilidade, a segurança e o desempenho do empreendimento. Por essa razão, esta seção examina o transporte modular a partir de três perspectivas complementares: o deslocamento rodoviário dos módulos, as operações de içamento necessárias à sua movimentação e posicionamento e o arranjo de variáveis que condiciona a criticidade dessas operações.

2.2.1 Transporte Rodoviário

Embora a cadeia logística da construção modular possa, em determinados contextos, envolver combinações com modais ferroviário, fluvial ou marítimo, o transporte rodoviário constitui, segundo Hussein *et al.* (2023), o elo mais recorrente entre a fábrica e o canteiro, especialmente pela flexibilidade operacional e pela possibilidade de entrega direta no local de montagem.

Apesar disso, essa etapa está longe de ser simples. Na construção modular, o transporte assume papel particularmente sensível, pois envolve unidades volumosas, altamente acabadas e dependentes de coordenação entre diferentes agentes, recursos e restrições operacionais (Hussein; Zayed, 2021; Arshad; Zayed, 2022; Yang; Pan; Pan, 2022; Wang et al., 2024).

Ao contrário do transporte convencional de insumos ou componentes menores, a movimentação rodoviária de módulos lida com unidades tridimensionais de grandes dimensões, elevado peso e alto grau de completude. Isso impõe exigências específicas de planejamento, compatibilização e controle ao longo de toda a operação. Nessas circunstâncias, o transporte não pode ser tratado apenas como uma etapa intermediária da logística, pois interfere diretamente nos prazos, na

segurança da operação, nos custos e na integridade das unidades transportadas.

Parte importante dessa criticidade decorre das características físicas do próprio módulo. Wang *et al.* (2024), Khan *et al.* (2023) e Arshad e Zayed (2022) mostram que largura, altura, comprimento e peso influenciam a escolha do veículo, a definição da rota, a necessidade de autorizações especiais e a compatibilidade com a infraestrutura viária. À medida que aumentam as dimensões da unidade e o nível de acabamento, também se ampliam as restrições de circulação e a necessidade de coordenação entre fabricante, transportadora e equipe de obra.

Por isso, o transporte rodoviário de módulos se aproxima do universo das cargas especiais. Como observam Wang *et al.* (2024), o êxito da operação depende não apenas da capacidade de deslocamento, mas da compatibilização entre as dimensões do módulo, a capacidade física do veículo e a passabilidade ao longo da rede viária. Nessa compatibilização entram aspectos como distribuição de massa, assimetria da carga, altura total do conjunto transportador, presença de sistemas de apoio ou amortecimento entre módulo e carroceria e travamento de elementos móveis da unidade, fatores que podem alterar de forma significativa a estabilidade do conjunto e a integridade da operação.

Desta forma, o planejamento logístico passa a depender diretamente da relação entre a geometria do módulo e a infraestrutura disponível, uma vez que a circulação de unidades volumétricas pode ser restringida por gabaritos verticais, largura de pistas, raios de curva, capacidade estrutural de pontes, obstáculos laterais, inclinações acentuadas e condições do pavimento.

Em muitos casos, isso demanda estudos prévios de rota, inspeções de campo, definição de janelas operacionais e atendimento a exigências regulatórias específicas. Em outras palavras, a logística rodoviária da construção modular exige leitura integrada entre atributos da carga e condições da malha viária, já que incompatibilidades podem comprometer a fluidez da operação ou exigir soluções compensatórias mais custosas e complexas.

Além dos condicionantes geométricos e estruturais, o transporte rodoviário das unidades volumétricas também sofre influência de condições climáticas adversas. Peng *et al.* (2018) e Valinejadshoubi *et al.* (2022) indicam que chuva, vento e baixa visibilidade podem comprometer a segurança da circulação, afetar a estabilidade do conjunto transportador e reduzir a confiabilidade da operação. Em determinadas situações, isso pode exigir redução de velocidade, reprogramação de horários ou até

suspensão temporária do deslocamento.

Outro ponto relevante diz respeito aos efeitos dinâmicos do transporte. Segundo Wu e Li (2022), acelerações, frenagens, curvas, vibrações e irregularidades do pavimento podem gerar esforços adicionais sobre a unidade transportada, afetando sua estabilidade e sua integridade física. Esse aspecto se torna ainda mais crítico quando o módulo já incorpora elementos sensíveis, como vedações, revestimentos, marcenaria, instalações e acabamentos internos.

Nesses casos, deformações, impactos ou oscilações excessivas podem resultar em danos visíveis ou ocultos, com reflexos na qualidade final do produto e na necessidade de retrabalho em obra. O transporte, portanto, não afeta apenas a movimentação do módulo, mas também sua condição de entrega, sua aptidão para a montagem e seu desempenho futuro.

Wu e Li (2022) aprofundam essa discussão ao demonstrar que o transporte rodoviário submete os módulos a carregamentos dinâmicos capazes de provocar respostas estruturais relevantes e danos acumulados ao longo do trajeto. Segundo os autores, esses carregamentos variam de acordo com o tipo de veículo, a categoria do módulo, buracos e rugosidades da via e a velocidade de deslocamento. Isso mostra que a severidade da operação não decorre de um único fator, mas da combinação entre diferentes condições de transporte.

Os autores também argumentam que o módulo não deve ser tratado como um corpo rígido indiferente ao transporte, pois a interação dinâmica entre veículo e módulo influencia a resposta do conjunto. Sob esse ponto de vista, o transporte rodoviário não representa apenas um desafio geométrico e logístico, mas também uma condição mecânica de solicitação que pode comprometer a integridade da unidade transportada.

Os achados de Song, Choi e Cho (2024) caminham na mesma direção. Em estudo de caso com uma habitação modular volumétrica pré-acabada, os autores mostram que a operação de transporte é sensível não apenas ao deslocamento em rodovia, mas também às condições específicas do trajeto e às manobras locais. Variações de inclinação e rolagem do módulo estiveram associadas principalmente a curvas, irregularidades da via e transições abruptas de nível, como a subida e descida de meio-fio no acesso ao local de implantação.

Os autores também registraram deslocamento de objetos no interior da unidade durante o transporte em via pública, reforçando que os efeitos da operação podem

atingir não só a estabilidade global do módulo, mas também seus componentes e elementos internos já instalados. Esses resultados sugerem que a criticidade do transporte depende não apenas da distância percorrida, mas também da qualidade do trajeto, das condições de manobra e da configuração do sistema de apoio utilizado.

Song, Choi e Cho (2024), por sua vez, mostram que pequenas descontinuidades do percurso e interferências locais podem gerar efeitos desproporcionais sobre o comportamento do módulo. Isso reforça a necessidade de preparação prévia da operação e de atenção às condições específicas de acesso ao canteiro. Em consequência, a compatibilização entre módulo, veículo e rota precisa ser compreendida também em termos dinâmicos, e não apenas dimensionais ou regulatórios.

O transporte rodoviário de módulos também não deve ser analisado isoladamente das demais etapas da cadeia logística. Hussein *et al.* (2022) mostram que, mesmo quando a rodovia é a alternativa mais direta e flexível, o desempenho da operação depende da articulação com a capacidade de recebimento no canteiro, com a eventual necessidade de armazenamento temporário e com o ritmo diário de instalação.

Decisões sobre número de caminhões, horários de despacho, estratégia de abastecimento e janelas de entrega afetam simultaneamente duração, custos e desempenho operacional do empreendimento. Na mesma linha, Wang *et al.* (2024) argumentam que o transporte de módulos constitui um dos principais entraves à adoção mais ampla da CM, justamente porque envolve unidades volumosas e altamente acabadas cuja entrega precisa ser planejada não apenas em termos de custo, mas também de pontualidade.

Entregas antecipadas podem gerar armazenagem temporária, dupla movimentação e congestionamento no canteiro, enquanto entregas tardias comprometem a sequência executiva e ampliam perdas operacionais. Além disso, os autores mostram que a compatibilidade entre módulo e veículo envolve simultaneamente restrições de peso e de comprimento útil da carreta, reforçando a necessidade de coordenação entre capacidade dos veículos, rotas disponíveis e demanda real da obra.

Yang, Pan e Pan (2022) apontam que a logística da CM deve ser compreendida como um sistema integrado de fabricação, armazenamento e transporte, diretamente condicionado pelo ritmo de instalação em obra. Segundo os autores, variabilidade de

produção, limitações de armazenamento em fábrica, eventual necessidade de depósitos intermediários e flutuações na demanda do canteiro afetam a programação das entregas e a estabilidade do fluxo logístico.

Isso mostra que o transporte rodoviário de módulos não pode ser planejado apenas a partir do trajeto entre origem e destino. Ele precisa ser compatibilizado com a capacidade de estocagem, com a sequência de instalação e com as incertezas do processo produtivo. O transporte, portanto, deixa de ser apenas uma questão de mobilidade da carga e passa a integrar uma lógica mais ampla de abastecimento da obra.

A criticidade da operação também varia conforme as condições da jornada e a janela operacional adotada. Deslocamentos noturnos, saídas de madrugada, coincidência da entrega com períodos de pico e necessidade de pernoite no trajeto tendem a alterar a exposição da operação à fadiga, ao congestionamento, à baixa visibilidade, à indisponibilidade de apoio e a restrições urbanas.

Da mesma forma, fatores de segurança patrimonial e operacional, como histórico de acidentes na rota, necessidade de escolta, exposição a áreas de maior risco de roubo e presença de sistemas de rastreamento, podem influenciar a confiabilidade da entrega e as medidas de controle exigidas. Ainda que esses elementos nem sempre apareçam com destaque na literatura técnica, eles fazem parte do contexto real da operação e afetam diretamente seu planejamento e sua execução.

A confiabilidade do transporte rodoviário também depende de atributos organizacionais da empresa responsável pela operação. Experiência prévia com cargas especiais, histórico de acidentes, regularidade da empresa e capacidade de coordenação entre motorista, transportadora e equipe de obra influenciam, segundo Wuni e Shen (2020), diretamente a robustez do planejamento e a resposta a imprevistos.

Em determinadas situações, a complexidade da operação pode ser ampliada por condicionantes logísticos complementares, como uso de mais de um modal, transporte sequencial de múltiplos módulos ou passagem por fronteiras e controles aduaneiros, fatores que introduzem novas exigências de coordenação e tendem a aumentar a variabilidade do processo, conforme indicam Arshad e Zayed (2022) e Hussein *et al.* (2022).

Diante disso, o transporte modular exige planejamento rigoroso e medidas

específicas de controle operacional. A definição do tipo de veículo, do sistema de apoio e amarração, da velocidade compatível, da rota mais segura, das condições de tráfego e das eventuais restrições de horário torna-se parte central da operação.

Também são relevantes a experiência da transportadora, a confiabilidade das informações de projeto, a precisão quanto às dimensões e ao peso da unidade e a capacidade de antecipar interferências ao longo do trajeto. Em operações dessa natureza, falhas de compatibilização ou de planejamento não resultam apenas em atrasos, mas podem comprometer a segurança da circulação, a integridade do módulo e a continuidade da sequência produtiva entre fábrica e canteiro, como indicam Arshad e Zayed (2022), Hussein e Zayed (2021) e Wang *et al.* (2024).

Desse modo, o transporte rodoviário pode ser compreendido como uma etapa técnica crítica da construção modular, na qual se concentram exigências geométricas, dinâmicas, logísticas, ambientais, operacionais e regulatórias que não aparecem com a mesma intensidade em sistemas baseados em componentes menores ou em produção predominantemente *in situ*.

Sua relevância decorre do fato de que o módulo, ao sair da fábrica como unidade tridimensional de elevado grau de completude, passa a depender de uma operação de deslocamento altamente controlada para preservar sua integridade e viabilizar sua instalação posterior. O desempenho do transporte, portanto, não constitui uma variável acessória do sistema modular, mas um de seus condicionantes operacionais centrais.

Entretanto, o transporte rodoviário não ocorre de forma isolada, mas em articulação com operações de içamento que viabilizam tanto o carregamento do módulo na origem quanto sua retirada do veículo e seu posicionamento no destino. No canteiro, essa etapa assume relevância particular, pois a unidade precisa ser descarregada, movimentada verticalmente e instalada com precisão no local definitivo de montagem.

Isso significa que a cadeia física de movimentação do módulo envolve operações complementares, porém tecnicamente distintas, nas quais exigências de estabilidade, segurança e precisão se renovam sob outras condições operacionais. É justamente nesse ponto que a discussão sobre o transporte rodoviário conduz à análise das operações de içamento, tratadas na subseção seguinte.

2.2.2 Operações de Içamento

As operações de içamento integram a lógica de movimentação dos módulos ao longo da cadeia física de produção, transferência e instalação, assumindo funções distintas conforme o contexto operacional em que a unidade se encontra. Na construção modular, essa etapa assume relevância particular, já que o guindaste deixa de ser apenas um equipamento de apoio e passa a ocupar papel central na instalação das unidades volumétricas.

Do ponto de vista do planejamento, o içamento exige decisões que ultrapassam a simples escolha do equipamento. Em empreendimentos modulares, a definição do guindaste, das condições de operação, dos procedimentos de segurança e da sequência de instalação interfere diretamente no desempenho da obra e na integridade das unidades movimentadas. Por isso, embora o içamento se articule ao transporte rodoviário dentro de uma mesma cadeia de movimentação, ele constitui uma etapa com exigências próprias de estabilidade, controle e precisão, especialmente quando comparado às operações usuais da construção convencional (Hussein; Zayed, 2021; Mohandes et al., 2022; Ali et al., 2024).

Boa parte da criticidade do içamento começa nas características do próprio módulo. Como observam Mohandes *et al.* (2022), unidades grandes, pesadas e pré-acabadas impõem desafios específicos às operações com guindastes, justamente porque qualquer falha pode comprometer componentes de elevado valor agregado.

Zhu (2022) reforça essa leitura ao mostrar que, em projetos modulares mais complexos, o içamento de módulos pesados e volumosos exige controle rigoroso do percurso da carga, sobretudo em ambientes congestionados. Nesse contexto, diferenças de peso, maior comprimento, assimetrias de massa e geometrias irregulares tendem a alterar o comportamento do módulo suspenso, afetando sua estabilidade, sua tendência à rotação e a dificuldade de controle da manobra.

A confiabilidade do içamento também depende da capacidade técnica da empresa responsável e dos agentes diretamente envolvidos na operação. Em sistemas modulares, a segurança não está associada apenas ao equipamento utilizado, mas também à proficiência do operador, à experiência da equipe, à manutenção dos equipamentos, às práticas de segurança adotadas e à capacidade de tomar decisões diante de restrições simultâneas de carga, local e execução.

Nesse sentido, experiência acumulada em cargas especiais, certificações,

conformidade regulatória e domínio de procedimentos específicos deixam de ser aspectos periféricos e passam a influenciar diretamente a robustez do planejamento e a resposta a imprevistos (Hussein; Zayed, 2021; Mohandes et al., 2022; Ali et al., 2024).

Um aspecto central é a estabilidade do equipamento durante a manobra. O uso de estabilizadores, o tipo de superfície de apoio, a capacidade de suporte do solo e a presença de elementos auxiliares para distribuir a carga podem alterar significativamente o comportamento do guindaste. Em operações modulares, essa condição torna-se ainda mais sensível porque o posicionamento do equipamento precisa atender, ao mesmo tempo, a restrições de alcance, raio de operação, segurança, acessibilidade e suporte físico.

Por isso, o apoio sobre pavimentos rígidos ou superfícies sensíveis, bem como a necessidade de elementos intermediários, como almofadas de madeira, não deve ser tratado como detalhe operacional secundário, mas como parte da própria segurança estrutural e funcional do içamento (Hussein; Zayed, 2021; Guo et al., 2022; Mohandes et al., 2022).

Outro fator decisivo da operação está na forma como o módulo é ligado ao guindaste. A escolha do arranjo de amarração, o uso de cintas, lingas ou laços, a existência de pontos superiores de içamento previamente projetados e o emprego de dispositivos auxiliares para orientar a carga influenciam a distribuição dos esforços e o controle da manobra.

O controle da carga depende, portanto, da articulação entre forma de pega, método de amarração, trajetória prevista, raio de operação, altura de elevação e interferências do entorno. Ainda que a literatura nem sempre detalhe cada técnica específica de amarração com o mesmo grau de profundidade, ela evidencia que o içamento seguro requer compatibilidade entre o equipamento, o percurso da carga e as condições físicas do canteiro.

Assim, cintas, cabos ou conjuntos de içamento, pontos superiores de ancoragem, cordas-guia e dispositivos auxiliares não devem ser entendidos isoladamente, mas como elementos de uma mesma lógica de controle da manobra, voltada a reduzir oscilações, evitar colisões e garantir maior previsibilidade ao deslocamento suspenso do módulo (Hussein; Zayed, 2021; Zhu, 2022; Guo et al., 2022).

As condições ambientais também influenciam diretamente a criticidade do

içamento. Vento, chuva, névoa, baixa visibilidade e extremos térmicos podem comprometer a estabilidade da carga, dificultar a comunicação entre os agentes e reduzir a margem de controle da manobra. Em operações com módulos, essa influência é ampliada pelo volume, pela área exposta e pelo grau de acabamento da unidade içada. Por isso, a avaliação meteorológica não deve ser tratada apenas como uma verificação preliminar, mas como uma condição operacional capaz de impor restrições, aumentar a incerteza e, em determinados casos, justificar a reprogramação do içamento (Hussein; Zayed, 2021; Mohandes et al., 2022; Ali et al., 2024).

O local de operação e a escolha da posição do guindaste também são determinantes para a viabilidade do içamento. Hussein e Zayed (2021) mostram que a posição do maquinário e o ambiente do entorno estão entre as decisões centrais do planejamento dessas operações. Mohandes *et al.* (2022) destacam obstáculos, canteiros congestionados, linhas aéreas e condições do terreno como fatores relevantes para a segurança da manobra. Guo *et al.* (2022) acrescentam que a localização viável do guindaste deve satisfazer simultaneamente restrições ambientais, operacionais e de segurança, incluindo áreas inacessíveis, edificações e distâncias mínimas de afastamento.

Já Zhu (2022) observa que canteiros dinâmicos e congestionados tornam o içamento especialmente sensível a colisões e interferências no percurso da carga. Assim, aspectos como a definição do ponto de instalação do equipamento, sua localização dentro ou fora do terreno, a possibilidade de interferir no tráfego, a proximidade de redes aéreas, a inclinação do solo e a presença de obstáculos, como postes, vegetação, galhos ou edificações, influenciam diretamente a viabilidade da operação.

Diante disso, o planejamento operacional passa a ocupar lugar central no içamento. Isolamento da área, controle da circulação de pessoas, definição prévia da sequência de movimentos e existência de procedimentos claros para interromper a operação em caso de instabilidade são medidas que reduzem improvisação e aumentam a segurança. Mohandes *et al.* (2022) relacionam a segurança do içamento na CM às práticas de gestão do canteiro e ao controle das condições de execução.

Hussein e Zayed (2021) também mostram que o sequenciamento das tarefas com guindaste integra o núcleo do planejamento operacional em sistemas modulares. Zhu (2022) acrescenta que a operação não deve depender apenas do julgamento momentâneo do operador, sobretudo em situações de visibilidade limitada ou pontos-

cegos, mas requer planejamento prévio da trajetória e da sequência dos movimentos. Guo *et al.* (2022) também mostram que o posicionamento do guindaste deve considerar não apenas a viabilidade da manobra, mas sua eficiência, com redução do tempo de içamento e da necessidade de reposicionamento do equipamento. O içamento seguro não resulta, portanto, apenas de um bom guindaste ou de uma carga bem preparada, mas de uma operação planejada com antecedência e controlada ao longo de sua execução.

A experiência da equipe de apoio e a qualidade da comunicação durante a operação também fazem diferença. Em operações com módulos, o controle da carga em solo, a sinalização correta e a coordenação entre o operador do guindaste com a equipe são fundamentais para reduzir oscilações, evitar colisões e garantir o posicionamento preciso.

Mohandes *et al.* (2022) destacam a proficiência do operador e do sinaleiro como fatores relevantes para a segurança das operações com guindaste na CM, e Ali *et al.* (2024) igualmente reforça a importância da segurança operacional e do controle dos agentes envolvidos. Zhu (2022) acrescenta que a dependência excessiva do operador, sem apoio adequado em solo, amplia a exposição a erros, principalmente em contextos complexos e congestionados. Nesse sentido, a presença de equipe mínima de apoio e a clareza da comunicação operacional devem ser tratadas como condicionantes efetivos da segurança e da eficiência do içamento.

A operação pode se tornar ainda mais complexa quando o içamento se repete para vários módulos. A execução sequencial de múltiplas elevações aumenta a pressão sobre o tempo, a coordenação das equipes, a continuidade das tarefas e o reposicionamento do equipamento.

Quando a operação envolve vários módulos, o içamento deixa de ser apenas uma manobra pontual e passa a depender de uma lógica sequencial de produção. A programação das tarefas, a ordem de instalação, a redução de movimentos redundantes e a minimização de reposicionamentos do guindaste tornam-se decisivas para manter a continuidade da operação e evitar perda de eficiência.

Içar vários módulos em sequência, portanto, não significa apenas repetir uma mesma ação, mas administrar uma complexidade crescente, na qual tempo, equipe, equipamento, trajetória da carga e condições do canteiro precisam permanecer coordenados ao longo de todo o processo (Hussein; Zayed, 2021; Zhu, 2022; Guo *et al.*, 2022).

Em síntese, as operações de içamento em construção modular devem ser entendidas como operações complexas, cuja criticidade não decorre de um único fator isolado, mas da combinação entre características da carga, capacidade técnica da empresa, estabilidade do guindaste, método de amarração, condições ambientais, layout do local, coordenação da equipe e sequência operacional.

2.2.3 Assinatura Operacional da Criticidade

A análise do transporte rodoviário e das operações de içamento sugere que a criticidade do transporte modular não pode ser atribuída a um único fator isolado. Em vez disso, ela emerge da combinação entre variáveis físicas, logísticas, ambientais, organizacionais e temporais que se articulam ao longo da movimentação dos módulos.

Essa leitura encontra respaldo em Arshad e Zayed (2022), ao mostrarem que o desempenho da cadeia de suprimentos da construção modular integrada depende da interação entre múltiplos fatores operacionais, incluindo restrições de transporte, limitações de armazenagem, condições de montagem e fragilidades logísticas.

Embora o deslocamento rodoviário e o içamento tenham sido discutidos separadamente por razões analíticas, na prática eles integram uma mesma cadeia física, na qual transporte, transferência, elevação e posicionamento final se encadeiam de forma contínua.

Nesta tese, entende-se que o conjunto das características específicas de cada transporte na CM conforma uma espécie de assinatura operacional da criticidade. Essa assinatura corresponde à configuração particular de fatores que permite distinguir uma operação de outra, não apenas pela presença isolada de determinadas variáveis, mas pelo modo como elas se combinam em um cenário concreto.

Assim, duas operações podem envolver módulos de dimensões semelhantes, mas apresentar níveis distintos de criticidade se uma delas ocorrer em rota estreita, com restrições de manobra, previsão de vento e canteiro congestionado, enquanto a outra for realizada em rota compatível, com área livre para recebimento e equipe previamente coordenada.

Nesse sentido, a assinatura operacional permite compreender que o cenário deve ser analisado em conjunto, considerando a interação entre características da carga, condições da rota, ambiente de execução, recursos disponíveis, equipe,

planejamento e exigências de sincronização entre as etapas.

O termo é utilizado como uma categoria interpretativa da própria pesquisa, derivada das discussões sobre interdependência logística, incertezas contextuais e coordenação entre fabricação, transporte, armazenagem, içamento e montagem.

Essa interpretação dialoga com Hsu, Angeloudis e Aurisicchio (2018), que tratam a logística modular como um problema integrado de otimização envolvendo fabricação, armazenagem e montagem. Também se aproxima de Yang et al. (2021), ao mostrarem que as incertezas da logística em edifícios modulares de grande altura são multifacetadas, interconectadas e dependentes do contexto. Portanto, o termo “assinatura operacional” usado nesta tese, não deve ser entendido como um atributo fixo da carga ou da rota, mas como a configuração situada de fatores que define o nível de exigência, vulnerabilidade e complexidade de cada transporte modular.

Essa ideia ajuda a explicar por que operações aparentemente simples podem se tornar críticas. Um trajeto curto, por exemplo, tende a sugerir uma condição menos complexa de transporte. No entanto, se esse deslocamento ocorrer em área urbana densa, com curvas de raio reduzido, interferência no tráfego, módulo assimétrico e restrição espacial para posicionamento do guindaste, a operação pode apresentar criticidade elevada.

Nesses casos, a pequena distância percorrida não elimina a vulnerabilidade do transporte, pois a dificuldade principal não está na extensão da rota, mas na combinação entre carga, espaço disponível, ambiente e controle da manobra. Essa interpretação é coerente com Yang et al. (2021), que identificam que as incertezas logísticas não atuam de forma isolada, mas se combinam em diferentes áreas da cadeia e afetam probabilidades e impactos de modo situado.

Em sentido inverso, uma operação de maior distância pode apresentar criticidade relativamente menor quando executada sob condições ambientais favoráveis, com carga bem distribuída sobre o veículo, sem assimetrias dimensionais relevantes, rota compatível, planejamento adequado e coordenação eficiente entre os agentes.

Um transporte intermunicipal ou interestadual, por exemplo, pode ser longo em extensão, mas operacionalmente mais controlável se a rota tiver gabaritos compatíveis, pontos de parada previstos, acompanhamento adequado, ausência de restrições severas de acesso e canteiro preparado para o recebimento.

Nesse caso, a distância continua sendo uma variável relevante, mas seu efeito

sobre a criticidade é mediado por outros fatores da operação. Essa leitura evita uma interpretação linear do risco, na qual uma variável isolada seria suficiente para determinar o nível de criticidade. Ao contrário, como indicam Arshad e Zayed (2022), a cadeia logística da construção modular é sensível justamente às interações entre fatores operacionais, informacionais e organizacionais.

As características do módulo constituem um primeiro grupo de condicionantes dessa assinatura operacional. Peso, dimensões, comprimento, assimetria geométrica, distribuição de massa e grau de acabamento influenciam diretamente o comportamento da carga durante o transporte e o içamento.

No caso das operações com guindaste, Mohandes et al. (2022) associam unidades grandes, pesadas e pré-acabadas a desafios específicos de segurança, enquanto Zhu, Zhang e Pan (2022) destacam que o içamento de módulos pesados em projetos modulares de grande altura exige planejamento de trajetórias, controle de colisões e consideração de características próprias dos módulos. Desta forma, a carga transportada não pode ser compreendida apenas como um volume a deslocar, mas como uma unidade construtiva sensível, acabada e condicionada por propriedades físicas que afetam sua estabilidade, seu manuseio e sua vulnerabilidade a danos.

A rota, a infraestrutura disponível e o ambiente de execução formam um segundo conjunto de condicionantes. Acessos estreitos, limitações geométricas, obstáculos, restrições de altura e peso, áreas urbanas congestionadas, layout do canteiro e condições de posicionamento do guindaste interferem diretamente na viabilidade material da operação.

Um módulo pode, por exemplo, ser tecnicamente transportável em termos de peso, mas encontrar limitações práticas em passagens estreitas, curvas fechadas, galhos, postes, redes aéreas ou áreas de descarga insuficientes. Arshad e Zayed (2022) destacam que restrições de transporte relacionadas às dimensões dos módulos, limitações de armazenagem e canteiros congestionados estão entre os fatores que tornam a cadeia da construção modular particularmente sensível a perturbações.

Do mesmo modo, Yang, Pan e Pan (2022) tratam a logística off-site como um problema de programação integrada entre fabricação, transporte e armazenagem, sujeito a restrições específicas de cada projeto e à necessidade de sincronização entre os agentes da cadeia.

As condições ambientais também participam dessa composição de criticidade.

Vento, chuva, baixa visibilidade, névoa e extremos térmicos podem reduzir a previsibilidade da operação, dificultar a comunicação entre os agentes e comprometer a estabilidade da carga, especialmente durante o içamento. Essa dimensão ambiental é compatível com a classificação de Yang et al. (2021), que incluem o ambiente entre as áreas relevantes de incerteza na logística modular.

Em operações com módulos, essa influência tende a ser ampliada pelo volume da unidade, por sua área lateral exposta e pelo elevado grau de acabamento. Uma rajada de vento que teria efeito limitado sobre um componente pequeno pode se tornar mais relevante quando incide sobre uma unidade volumosa e pré-acabada suspensa por guindaste, aumentando oscilações e reduzindo a margem de controle da equipe.

Além das variáveis físicas, espaciais e ambientais, há condicionantes de natureza técnica e operacional. A compatibilidade entre módulo, veículo e equipamento de içamento, a configuração dos sistemas de apoio, o método de amarração, a trajetória da carga, o raio de operação e o controle da manobra afetam diretamente a estabilidade e a segurança da movimentação.

Como visto anteriormente, Hussein e Zayed (2021) mostram que as operações com guindaste ocupam posição central na etapa de instalação da construção modular, pois qualquer interrupção nessa fase pode comprometer os ganhos obtidos nas etapas anteriores de produção e transporte. Zhu, Zhang e Pan (2022), por sua vez, reforçam que o içamento de módulos em contextos complexos depende de planejamento de trajetória e simulação, sobretudo quando há canteiros congestionados, módulos pesados e dependência excessiva do julgamento humano.

A dimensão organizacional também é decisiva. Experiência dos agentes envolvidos, capacidade técnica das empresas, coordenação entre equipes, qualidade da comunicação e maturidade do planejamento interferem na robustez da execução e na capacidade de resposta a imprevistos.

Arshad e Zayed (2022) mostram que a cadeia da construção modular é intensiva em informação e depende de fluxo informacional eficiente, compartilhamento de conhecimento e transparência entre os agentes. Esse aspecto também aparece em Yang, Pan e Pan (2022), ao indicarem que a sincronização da cadeia e a capacidade de resposta dos fornecedores são fundamentais para melhorar o desempenho da logística off-site. Assim, a criticidade da operação não está apenas na carga ou no ambiente físico, mas também na forma como informações, decisões e responsabilidades circulam entre os agentes envolvidos.

Uma equipe experiente, com comunicação clara entre motorista, operador de guindaste, sinaleiro e responsáveis pelo canteiro, tende a responder melhor a imprevistos do que uma equipe que atua de forma fragmentada ou sem procedimentos previamente definidos.

Nesse arranjo, a pontualidade assume papel central. No transporte modular, não basta que a carga alcance o destino, é necessário que sua chegada ocorra em consonância com as condições previstas de recebimento, armazenagem temporária, içamento e instalação. Yang, Pan e Pan (2022) mostram que a programação logística em edifícios modulares deve considerar simultaneamente tempo de conclusão, custos, utilização da capacidade de armazenagem e estabilidade do processo produtivo.

Essa abordagem ajuda a compreender por que entregas antecipadas podem gerar demanda não planejada por armazenagem temporária, dupla movimentação e ocupação indevida de áreas operacionais, enquanto entregas tardias podem comprometer a sequência de montagem, ampliar tempos ociosos e produzir efeitos em cascata sobre as etapas subsequentes. Por exemplo, um módulo que chega antes da liberação do guindaste pode exigir espera em local inadequado ou movimentação adicional, por outro lado, um atraso pode deixar equipe, equipamento e área de montagem ociosos, afetando o cronograma da obra.

Dessa forma, a assinatura operacional da criticidade no transporte modular pode ser entendida como o resultado da combinação entre variáveis físicas, espaciais, ambientais, técnicas, organizacionais e temporais que não atuam de forma independente e nem mantêm o mesmo peso em todos os contextos. O que define o perfil de cada operação é justamente a maneira como essas variáveis se sobrepõem, interagem e, em certos casos, produzem efeitos acumulados sobre o desempenho global da cadeia.

Por isso, leituras excessivamente lineares ou genéricas tendem a ser insuficientes para explicar a criticidade do transporte modular. A operação precisa ser analisada como uma configuração situada de fatores que se combinam de modo específico em cada caso, exigindo instrumentos capazes de reconhecer interações, sobreposições e prioridades. É esse caráter combinatório que justifica, na seção seguinte, uma discussão mais específica sobre gestão de riscos e métodos de avaliação aplicados a esse tipo de operação.

2.3 RISCOS NO TRANSPORTE DE MÓDULOS

Se o capítulo anterior teve como objetivo compreender a natureza específica das variáveis envolvidas na movimentação de módulos, com atenção às suas exigências e condicionantes, neste capítulo o foco recai sobre os riscos que emergem desses deslocamentos. A questão deixa de ser: como a operação se configura? E passa a ser: quais eventos podem comprometer seu desempenho, sua segurança e a integridade da carga? Essa mudança de enfoque é relevante porque o risco não corresponde apenas ao dano consumado, mas à possibilidade de ocorrência de eventos capazes de afetar os objetivos da operação (Zou; Zhang; Wang, 2007; Islam; Nepal; Skitmore, 2017).

Por isso, a discussão inicia-se pelos conceitos fundamentais de risco, já que, antes de examinar os eventos mais recorrentes no transporte modular, é necessário delimitar com clareza o que se entende por risco e como ele se distingue de noções correlatas, como perigo, causa, evento e consequência. Essa delimitação é relevante porque muitos dos elementos observados na prática operacional não constituem o risco propriamente dito, mas condições que favorecem sua ocorrência ou ampliam seus efeitos, como assinala Shishehgarkhaneh *et al.* (2024).

A seção inicia-se pela discussão dos conceitos fundamentais de risco, que fornecem a base teórica para a análise posterior. Na sequência, o texto desdobra-se em riscos mais específicos relacionados ao transporte rodoviário e ao içamento, em consonância com o recorte adotado nesta pesquisa. Essa organização decorre da delimitação analítica do estudo, voltada às operações diretamente associadas à movimentação dos módulos. Busca-se, assim, compreender quais riscos têm sido identificados na literatura e como eles podem subsidiar a estruturação do banco de dados do modelo preditivo.

2.3.1 Conceitos Fundamentais de Risco

Antes de examinar os principais riscos associados ao transporte rodoviário e às operações de içamento de módulos, é necessário esclarecer o que se entende por risco. No campo da construção, e especialmente em operações complexas, o risco não corresponde simplesmente ao dano já ocorrido, mas ao efeito da incerteza sobre os objetivos da operação, podendo comprometer dimensões como segurança, prazo,

integridade da carga, continuidade da atividade e desempenho operacional. Essa compreensão aproxima-se à ISO 31073:2022, segundo a qual o risco é normalmente expresso em termos de fontes de risco, eventos potenciais, consequências e possibilidade de ocorrência (International Organization for Standardization, 2022).

Para tornar essa distinção mais clara, pode-se compreender os conceitos em sequência. O perigo corresponde a uma condição com potencial de dano, como uma curva estreita, vento intenso ou falha de estabilização do equipamento. A partir desse perigo, pode surgir um evento potencial, como uma colisão, queda, oscilação excessiva ou perda de controle da carga. Caso esse evento ocorra, ele pode produzir consequências, como avarias no módulo, atrasos, retrabalho ou acidentes. O risco, por sua vez, não corresponde ao evento em si, mas à incerteza de que esse evento ocorra e afete os objetivos da operação. Por isso, risco não deve ser confundido com o perigo, com o evento já ocorrido ou com o dano consumado (International Organization for Standardization, 2022).

Em uma operação de transporte modular, por exemplo, uma rodovia estreita, com curvas acentuadas e obstáculos laterais, pode representar uma condição com potencial de dano à operação (perigo). A possibilidade de o módulo colidir lateralmente com um obstáculo fixo corresponde ao cenário de incerteza a ser analisado preventivamente (risco). Caso essa colisão ocorra, tem-se a materialização da ocorrência associada ao perigo (evento indesejado). A avaria da carga, a interrupção da viagem, a necessidade de retrabalho e o atraso na entrega correspondem aos efeitos produzidos por esse evento (consequências).

De modo semelhante, em uma operação de içamento, ventos intensos, falhas na estabilização do equipamento ou interferências aéreas podem representar condições perigosas (perigo). A possibilidade de oscilação excessiva da carga, perda de controle da manobra ou colisão durante o içamento configura o risco a ser avaliado (risco). A ocorrência concreta da oscilação, da colisão ou da perda de controle caracteriza o evento indesejado (evento indesejado) e os danos ao módulo, ao equipamento, ao cronograma ou à segurança da equipe representam seus efeitos diretos ou indiretos (consequências).

Dessa forma, a análise de riscos não se limita à constatação posterior do dano, mas busca antecipar eventos antes que eles se materializem. Essa distinção permite reconhecer fontes, perigos e condições que aumentam a exposição da operação a falhas, acidentes, perdas ou atrasos. No contexto da construção, essa organização é

coerente com a necessidade de identificar, avaliar, analisar e priorizar riscos de forma estruturada, considerando não apenas eventos isolados, mas também seus fatores condicionantes, seus efeitos potenciais e suas interdependências (Baghalzadeh Shishehgarkhaneh et al., 2024).

Em uma situação de transporte rodoviário, por exemplo, a combinação entre amarração inadequada, pavimento irregular e frenagem brusca pode constituir o conjunto causal. O deslocamento da carga durante o trajeto caracteriza o evento e o dano estrutural ao módulo, somado ao atraso na entrega, constitui a consequência. Em uma situação de içamento, o uso inadequado dos acessórios de elevação, associado a vento forte e falha de comunicação entre os trabalhadores, pode favorecer a perda de estabilidade da carga, gerando riscos de impacto, avaria ou acidente.

Essa distinção é especialmente relevante porque muitos elementos observados em uma operação não são, em si, os riscos propriamente ditos, mas fatores que contribuem para sua formação. Vento, excesso de velocidade, assimetria da carga, falhas de comunicação, restrições geométricas da rota ou ausência de planejamento detalhado não correspondem necessariamente ao evento indesejado, eles constituem condições que podem aumentar a possibilidade de ocorrência de eventos críticos ou agravar suas consequências. De acordo com Shishehgarkhaneh *et al.* (2024), interpretações mais robustas do risco exigem justamente essa leitura relacional, que articula fatores antecedentes, eventos e efeitos, em vez de apenas listar ocorrências adversas de forma fragmentada.

Além da relação entre causas, evento e consequências, a análise de riscos também envolve componentes como possibilidade de ocorrência, severidade, exposição e vulnerabilidade. Embora muitas abordagens se apoiem sobretudo na combinação entre probabilidade e impacto, Taroun (2017) ressalta que essa formulação nem sempre é suficiente para apreender a complexidade dos projetos construtivos, uma vez que fatores como detectabilidade, capacidade de gerenciamento e vulnerabilidade do sistema também influenciam a criticidade do risco.

Nesse sentido, a noção de criticidade torna-se especialmente útil. A criticidade não se refere apenas à existência de um risco, mas ao seu peso relativo dentro da operação. Um evento pode ser considerado mais crítico quando reúne alta severidade, maior possibilidade de ocorrência ou baixa capacidade de controle.

De acordo com Taroun (2017), essa compreensão ampliada é importante

porque eventos com consequências semelhantes podem assumir níveis distintos de relevância conforme as condições em que emergem e a capacidade da equipe de detectá-los, preveni-los ou mitigá-los.

Por exemplo, a vibração excessiva do módulo durante um trecho curto e bem monitorado pode representar um risco relevante, mas de criticidade moderada. Já a possibilidade de tombamento em curva fechada, sob chuva e com visibilidade reduzida, tende a assumir criticidade mais elevada em razão da severidade potencial e da combinação desfavorável de fatores operacionais.

Outro aspecto relevante refere-se aos limites de uma leitura estritamente probabilística do risco. Em operações construtivas pouco repetitivas, como o transporte de módulos, as condições singulares de cada operação dificultam estimativas robustas baseadas apenas em frequência histórica.

Segundo Islam, Nepal e Skitmore (2017), nesses contextos a análise de riscos costuma depender da articulação entre dados objetivos, julgamento especializado e apreciações contextuais, o que explica a recorrente combinação entre parâmetros quantitativos e qualitativos nos métodos de avaliação.

Embora incertos, os riscos não são imprevisíveis, mas passíveis de avaliação, minimização, monitoramento e controle. Como os recursos para prevenção e resposta são limitados, a gestão de riscos exige distinguir, entre as numerosas incertezas presentes na operação, aquelas que assumem maior criticidade e, por isso, devem ser priorizadas.

Desta forma, compreender o risco implica reconhecer que ele não se resume ao acidente consumado, nem pode ser reduzido a uma abstração genérica. Zou, Zhang e Wang (2007), Wuni *et al.* (2020) e Shishehgarkhaneh *et al.* (2024) convergem ao indicar que o risco deve ser interpretado à luz dos objetivos do empreendimento, das incertezas que cercam sua realização e dos processos de identificação, análise, priorização e tratamento que orientam sua gestão.

No transporte e no içamento de módulos, essa base conceitual é particularmente importante porque permite passar da simples descrição das condições operacionais para uma interpretação analítica mais precisa daquilo que pode comprometer a segurança, a integridade da carga e o desempenho da atividade.

Com essa base conceitual estabelecida, torna-se possível avançar para a identificação dos principais riscos associados ao transporte rodoviário e às operações de içamento, bem como para a análise dos métodos utilizados para avaliá-los e

priorizá-los.

2.3.2 Principais Riscos Operacionais no Transporte Rodoviário de Módulos

A literatura sobre o transporte rodoviário de módulos evidencia a recorrência de elementos associados a riscos operacionais ligados à integridade da carga, à estabilidade do veículo, às condições da rota, à regularidade da operação e à coordenação logística. Trata-se de uma etapa particularmente sensível, pois reúne solicitações capazes de afetar o comportamento estrutural dos módulos e vulnerabilidades logísticas que comprometem a previsibilidade e o controle da operação (Khan et al., 2023; Wu et al., 2026; Zaalouk; Moon; Han, 2023).

Para evitar um excesso de granularidade na análise dos riscos associados ao transporte rodoviário de módulos, os eventos identificados na literatura foram agrupados em eixos analíticos capazes de orientar a estruturação posterior do modelo. Essa organização não assume a existência de uma taxonomia única e consolidada na literatura, mas busca sistematizar os principais domínios de vulnerabilidade observados nas operações de transporte modular: (i) estabilidade e integridade da carga, (ii) segurança e estabilidade do conjunto transportador, (iii) condições da rota, (iv) segurança patrimonial e regularidade regulatória e documental e (v) falhas técnicas, comunicacionais e de coordenação operacional.

O primeiro eixo analítico, referente à estabilidade e à integridade da carga, encontra respaldo em estudos que analisam o comportamento dos módulos sob solicitações dinâmicas do transporte. Wu et al. (2026) evidenciam que as vibrações induzidas pelo deslocamento podem produzir respostas estruturais significativas nos módulos, especialmente em situações de interação dinâmica entre veículo e módulo, demandando critérios específicos de transportabilidade e avaliação de dano.

Song, Choi e Cho (2024), ao examinarem um módulo em condição real de movimentação, monitoraram variações de inclinação, rolagem, deformação e impacto ao longo das etapas de içamento, transporte e descarregamento. Embora não tenham sido registrados impactos acima do limiar do sensor, os resultados evidenciaram oscilações durante o transporte e indicaram que a movimentação real pode submeter o módulo a solicitações relevantes para sua estabilidade e integridade (Wu et al., 2026; Song; Choi; Cho, 2024).

Tais evidências sugerem que eventos como deslocamento, queda, impacto ou

perda de estabilidade da carga podem resultar não apenas de ocorrências extremas, mas também de solicitações sucessivas e acumuladas, associadas a vibrações, frenagens, oscilações e falhas de apoio. Nessa leitura, danos visíveis e ocultos à carga devem ser compreendidos como potenciais consequências.

O segundo eixo analítico refere-se à segurança e à estabilidade do conjunto transportador. Em operações com módulos, o porte da carga, o peso elevado, as dimensões transportáveis e as condições de movimentação tornam o conjunto sensível a acelerações, desacelerações, irregularidades da via, inclinações e rolagens durante o transporte. Nesse contexto, eventos como perda de estabilidade, perda de controle do conjunto transportador, acidentes de trânsito ou tombamento não devem ser interpretados como ocorrências isoladas, mas como manifestações possíveis de uma operação em que carga, veículo, rota e condução interagem de modo permanente (Song; Choi; Cho, 2024).

O terceiro eixo envolve as condições da rota. No transporte rodoviário de módulos, as características do percurso não constituem apenas um pano de fundo logístico, mas funcionam como condicionantes diretos da viabilidade, da segurança e da previsibilidade da operação. Lee e Lee (2021), ao proporem uma estrutura baseada em BIM, GIS e digital twin para simulação logística em construção modular, mostram que a definição de rotas pode envolver restrições como altura, largura, peso, declividade, raio de giro, limites de velocidade, tráfego, regulações e áreas de risco.

No estudo de caso apresentado pelos autores, a simulação identificou restrições de altura em pontes, largura de vias, capacidade de carga de pontes, declividades acentuadas, curvas com raio insuficiente e limites específicos de velocidade para caminhões com módulos. Nesse sentido, limitações de altura, largura e raio de curva, declividades acentuadas, restrições de peso, interferências superiores, congestionamentos e interrupções viárias não devem ser compreendidas como eventos indesejados em si, mas como fontes de risco, perigos ou fatores condicionantes. Esses elementos ampliam a exposição da operação a desvios, colisões, interrupções, perda de controle, atrasos e danos à carga.

O quarto eixo compreende a segurança patrimonial e a regularidade regulatória-documental. Ainda que não trate especificamente do transporte modular, Liang et al. (2022) ajudam a sustentar esse eixo ao analisarem o roubo de carga como um risco relevante nas cadeias de transporte e suprimento, associado a fatores como tipo de carga, localização, região, modo de atuação e condições operacionais. Essa

aproximação é pertinente porque o transporte rodoviário de módulos também envolve cargas de grande porte, alto valor agregado, difícil substituição imediata e forte dependência de planejamento, rastreamento, paradas controladas e coordenação entre agentes.

No campo regulatório-documental, Lee e Lee (2021) complementam essa leitura ao mostrar que o transporte de módulos pode exigir permissões específicas, veículos de escolta, limites de velocidade, regras de tráfego e restrições associadas à rota. Assim, roubo e vandalismo podem ser compreendidos como eventos indesejados ligados à segurança patrimonial, falhas documentais, ausência de permissões e infrações correspondem a condições de não conformidade e multas, retenções, atrasos ou impedimentos operacionais representam possíveis consequências dessas falhas.

O quinto eixo refere-se às falhas técnicas, comunicacionais e de coordenação operacional. Em sistemas modulares, essas falhas são relevantes porque o transporte depende de informações consistentes, planejamento logístico e articulação entre fábrica, transportadora, canteiro e demais agentes envolvidos. Khan et al. (2023), Wuni et al. (2020) e Zhou et al. (2023), destacam a importância da coordenação entre os participantes e mostram que falhas de comunicação, informações inconsistentes, atrasos e danos podem se propagar ao longo da cadeia.

Zaalouk, Moon e Han (2023) reforçam que a CM exige integração entre produção, logística, transporte, armazenamento e montagem. Wang et al. (2024), por sua vez, evidenciam que a sincronização das entregas é decisiva, sobretudo em estratégias *just-in-time*, nas quais atrasos ou entregas antecipadas podem gerar armazenagem improvisada, retrabalho, congestionamento no canteiro e reprogramações.

Portanto, falhas de comunicação, falhas técnicas, planejamento inadequado de rota, falhas de coordenação logística e interferências externas sobre decisões operacionais devem ser compreendidas como elementos centrais na formação dos riscos do transporte modular. Algumas configuram eventos de falha, como uma pane mecânica ou a perda de comunicação durante a operação, outras atuam como causas ou fatores condicionantes, como informações inconsistentes, planejamento insuficiente ou pressão por entregas incompatíveis com a capacidade de recepção do canteiro.

Desse modo, a literatura permite sustentar que o transporte rodoviário de

módulos está exposto a um conjunto articulado de riscos operacionais relacionados à estabilidade e à integridade da carga, à segurança do conjunto transportador, às condições da rota, à segurança patrimonial e à regularidade regulatória-documental, bem como à coordenação técnica e logística da operação.

O Quadro 1 sintetiza esses eixos analíticos e os principais elementos associados ao risco em cada um deles, distinguindo eventos indesejados, fontes de risco, perigos, fatores condicionantes e consequências recorrentes. Com isso, a base teórica adotada nesta pesquisa não decorre de uma enumeração arbitrária, mas de uma sistematização analítica construída a partir de recorrências identificadas na literatura.

Quadro 1 - Eixos analíticos dos riscos operacionais no transporte rodoviário de módulos

Eixo analítico	Riscos operacionais associados	Sentido analítico na pesquisa	Referências de apoio
Estabilidade e integridade da carga	Risco de deslocamento da carga; risco de queda da carga; risco de impacto durante o transporte; risco de dano visível ou oculto ao módulo; risco de deformações, fissuras ou perda de integridade da carga.	Expressa riscos associados ao comportamento do módulo sob solicitações dinâmicas do transporte, especialmente vibrações, oscilações, frenagens, acelerações, impactos e falhas de apoio.	Wu et al. (2026); Song, Choi e Cho (2024).
Segurança e estabilidade do conjunto transportador	Risco de perda de controle do conjunto transportador; risco de instabilidade em curvas, aclives, declives ou trechos irregulares; risco de acidente de trânsito; risco de tombamento do veículo.	Reúne riscos relacionados à interação entre carga, veículo, condução e condições do percurso, especialmente em operações com cargas de grande porte, peso elevado e maior sensibilidade a acelerações, desacelerações, inclinações, rolagens e irregularidades da via.	Song, Choi e Cho (2024); Wu et al. (2026).
Condições da rota	Risco de colisão por restrições de altura, largura ou raio de curva; risco de impedimento de passagem por incompatibilidade da rota; risco de atraso por congestionamentos, acidentes ou interrupções viárias; risco de perda de controle em trechos com declividade, curvas críticas ou limitações operacionais.	Representa riscos derivados das características físicas, geométricas, regulatórias e operacionais do percurso, que podem comprometer a viabilidade, a segurança e a previsibilidade do transporte.	Khan et al. (2023); Lee e Lee (2021).
Segurança patrimonial e regularidade regulatória-documental	Risco de roubo da carga; risco de vandalismo; risco de furto de equipamentos auxiliares; risco de multa; risco de retenção da carga; risco de impedimento operacional por	Agrupar riscos que podem comprometer a proteção patrimonial da carga, a conformidade regulatória da operação e a continuidade segura do transporte,	Liang et al. (2022); Lee e Lee (2021).

	ausência de permissões, falhas documentais ou infrações regulatórias.	especialmente em operações com cargas especiais, de alto valor, grande porte e difícil substituição imediata.	
Falhas técnicas, comunicacionais e de coordenação operacional	Risco de perda de comunicação entre agentes; risco de decisão logística baseada em informação inconsistente; risco de planejamento inadequado da rota; risco de falha de coordenação logística; risco de entrega antecipada ou atrasada; risco de reprogramações em cascata, armazenagem improvisada ou retrabalho decorrentes de falhas de sincronização.	Reúne riscos associados a inconsistências de informação, falhas de articulação entre agentes, deficiências de planejamento, descontinuidade logística e pressões externas que afetam a fluidez, a previsibilidade e o controle da operação.	Khan et al. (2023); Wuni et al. (2020); Zhou et al. (2023); Zaalouk, Moon e Han (2023); Wang et al. (2024).

Fonte: Elaborado pelo autor.

2.3.3 Principais Riscos Operacionais no Içamento de Módulos

A literatura sobre içamento de sistemas construtivos modulares evidencia a recorrência de riscos operacionais relacionados à estabilidade do equipamento, ao comportamento da carga suspensa, às interferências do ambiente de operação, às falhas técnicas e às limitações humanas e organizacionais envolvidas na execução. Trata-se de uma etapa particularmente sensível, pois combina módulos de grande porte, equipamentos de alta capacidade, canteiros espacialmente restritos, necessidade de coordenação entre diferentes agentes e elevado potencial de dano quando ocorrem falhas durante a operação (Khan et al., 2023; Hussein; Zayed, 2020; Ali et al., 2024; Shi et al., 2026).

Para evitar uma análise excessivamente fragmentada dos riscos associados ao içamento de módulos, os riscos identificados na literatura foram agrupados em eixos analíticos capazes de orientar a estruturação posterior do modelo. Assim como na seção dedicada ao transporte rodoviário, adotou-se aqui a mesma lógica de levantamento e sistematização analítica, sem assumir a existência de uma taxonomia única e consolidada na literatura.

O objetivo é organizar os principais domínios de vulnerabilidade observados nas operações de içamento: (i) estabilidade do equipamento de içamento, (ii) estabilidade e integridade da carga suspensa, (iii) colisões e interferências no ambiente de operação, (iv) falhas técnicas e manutenção do sistema de içamento, (v) fatores humanos, capacitação e inspeção e (vi) comunicação, sinalização e

coordenação em campo.

O primeiro eixo refere-se à estabilidade do equipamento de içamento. Em operações com módulos, o guindaste ou equipamento equivalente opera sob condições sensíveis à configuração adotada, ao raio de operação, às condições de apoio, à capacidade de carga e às interferências presentes no entorno. Ao sistematizarem a literatura sobre segurança de operações com guias em construção modular, Khan et al. (2023), Hussein e Zayed (2020) e Ali et al. (2024) mostram que a instalação de módulos de grande porte e peso elevado exige operações sucessivas de içamento, nas quais ações inseguras, instabilidade do equipamento, falhas de controle e condições externas podem resultar em acidentes graves.

Riscos como perda de estabilidade, tombamento ou colapso do equipamento dificilmente decorrem de um único fator isolado. Em geral, eles resultam da combinação entre a configuração do equipamento, as características da carga, as condições de apoio, o raio de operação, a trajetória prevista e as interferências presentes no ambiente de içamento.

O segundo eixo envolve a estabilidade e a integridade da carga suspensa. Durante o içamento, o módulo deixa de se comportar apenas como carga transportada e passa a depender diretamente das condições de suspensão, amarração, equilíbrio, movimentação e posicionamento. Shi et al. (2026) mostram que os acidentes no içamento de componentes pré-fabricados decorrem da interação entre múltiplos fatores e estão associados a etapas críticas da operação, como movimentação da grua, amarração, posicionamento e desengate dos componentes.

Wang et al. (2022), de modo complementar, também destacam a importância da fixação adequada, do uso de dispositivos específicos de içamento, do equilíbrio da carga, do controle por cordas de tração, da supervisão e da verificação dos equipamentos durante a operação. Nessa perspectiva, riscos de instabilidade, oscilação, queda, impacto, desalinhamento e dano ao módulo podem resultar de falhas sucessivas ou combinadas ao longo do içamento.

O terceiro eixo compreende as colisões e interferências no ambiente de operação. No içamento de módulos, o percurso da carga suspensa ocorre em um espaço limitado, no qual podem existir obstáculos fixos, equipamentos móveis, estruturas em execução, trabalhadores e zonas de circulação. Essa condição torna o controle da trajetória da carga especialmente relevante, pois as operações com guias na construção modular envolvem módulos de grande porte, equipamentos de elevada

capacidade e maior exposição a colisões, impactos e falhas de controle no entorno operacional (Ali; Zayed; Hussein, 2024).

Jiang e Ding (2024), de modo complementar, mostram que comportamentos inseguros de içamento, como içamento inclinado, frenagem brusca e descarregamento súbito, demandam monitoramento específico, pois podem alterar a resposta dinâmica da grua e comprometer o controle da operação. Nesse contexto, riscos de colisão com obstáculos fixos, colisão com equipamentos ou elementos móveis, impacto contra estruturas em execução e exposição de trabalhadores à zona de movimentação da carga devem ser compreendidos como riscos associados à interação entre equipamento, carga e ambiente operacional.

O quarto eixo diz respeito às falhas técnicas e à manutenção do sistema de içamento. A segurança da operação depende da confiabilidade do equipamento, dos dispositivos de içamento, dos sistemas de amarração e dos procedimentos de verificação antes e durante a execução. Deficiências de manutenção, desgaste de componentes, mau funcionamento de sistemas mecânicos ou ausência de monitoramento adequado ampliam a vulnerabilidade técnica da operação. Assim, as deficiências de manutenção devem ser compreendidas como fatores que elevam a exposição ao risco, enquanto as falhas mecânicas representam a materialização técnica dessa vulnerabilidade durante o içamento (Khan et al., 2023; Ali; Zayed; Hussein, 2024; Xu; Zhou, 2025)

O quinto eixo refere-se aos fatores humanos, à capacitação e à inspeção. Operações de içamento dependem de decisões rápidas, execução precisa, conhecimento técnico e verificação prévia das condições de segurança. Wang et al. (2022) mostram que as premissas para comportamentos inseguros, os comportamentos inseguros e a supervisão insegura exercem papel relevante na configuração dos riscos em operações de içamento de edifícios pré-fabricados.

Para Shi et al. (2026), falhas de treinamento, falhas na observação do estado da grua e insuficiências nos planos de emergência estão entre os fatores que mais contribuem para acidentes no içamento de componentes pré-fabricados. Essa leitura permite compreender riscos como erro operacional, inspeção insuficiente, supervisão inadequada, falhas de capacitação e decisões operacionais inadequadas como elementos centrais da segurança no içamento, especialmente em operações complexas, com cargas volumosas e baixa margem para improvisação.

O sexto eixo concentra-se na comunicação, na sinalização e na coordenação

em campo. O sucesso do processo depende da articulação entre operador, sinaleiro, equipe de apoio, responsáveis técnicos e demais agentes presentes no canteiro. Dessa forma, riscos de falha de comunicação, sinalização deficiente, interpretação incorreta de comandos, descoordenação entre agentes e exposição física da equipe não devem ser tratados, segundo Wang et al. (2022), como aspectos acessórios, mas como riscos diretamente ligados ao controle operacional do içamento.

O Quadro 2 sintetiza esses eixos analíticos e os principais riscos operacionais associados a cada um deles, indicando o sentido analítico assumido na pesquisa. Com isso, a base teórica adotada nesta etapa não decorre de uma enumeração arbitrária de ocorrências, mas de uma sistematização construída a partir de recorrências identificadas na literatura recente sobre içamento, guias, componentes pré-fabricados e construção modular.

Quadro 2 - Eixos analíticos dos riscos operacionais no içamento de módulos

Eixo analítico	Riscos operacionais associados	Sentido analítico na pesquisa	Referências de apoio
Estabilidade do equipamento de içamento	Risco de perda de estabilidade do equipamento; risco de tombamento do guindaste; risco de colapso estrutural do equipamento; risco de instabilidade por raio de operação inadequado, apoio insuficiente ou configuração operacional incompatível.	Expressa riscos associados ao comportamento do equipamento de içamento diante da combinação entre capacidade de carga, raio de operação, condições de apoio, configuração adotada, trajetória prevista e interferências presentes no ambiente operacional.	Khan et al. (2023); Hussein e Zayed (2020); Ali, Zayed e Hussein (2024); Shi et al. (2026).
Estabilidade e integridade da carga suspensa	Risco de instabilidade da carga; risco de oscilação excessiva; risco de queda da carga; risco de impacto durante a movimentação; risco de desalinhamento no posicionamento; risco de dano ao módulo durante o içamento.	Reúne riscos relacionados ao comportamento do módulo enquanto carga suspensa, considerando condições de amarração, equilíbrio, suspensão, movimentação, controle por dispositivos auxiliares e posicionamento final.	Shi et al. (2026); Wang et al. (2022).
Colisões e interferências no ambiente de operação	Risco de colisão com obstáculos fixos; risco de colisão com equipamentos ou elementos móveis; risco de impacto com estruturas em execução; risco de interferência na trajetória da carga; risco de exposição de trabalhadores à zona de movimentação do módulo.	Representa riscos derivados da interação entre equipamento, carga suspensa e ambiente operacional, especialmente em canteiros com restrições espaciais, circulação de trabalhadores, presença de estruturas próximas e necessidade de controle da trajetória da carga.	Ali, Zayed e Hussein (2024); Jiang e Ding (2024).
Falhas técnicas e manutenção	Risco de falha mecânica do equipamento; risco de falha em dispositivos de içamento;	Agrupar riscos associados à confiabilidade técnica do sistema de içamento,	Khan et al. (2023); Ali, Zayed e

do sistema de içamento	risco de falha em sistemas de amarração; risco de desgaste ou degradação de componentes; risco de mau funcionamento por manutenção insuficiente; risco de ausência de monitoramento técnico adequado.	compreendendo equipamento, acessórios, dispositivos de amarração, componentes mecânicos, procedimentos de verificação e condições de manutenção antes e durante a operação.	Hussein (2024); Xu e Zhou (2025).
Fatores humanos, capacitação e inspeção	Risco de erro operacional; risco de decisão operacional inadequada; risco de inspeção insuficiente; risco de supervisão inadequada; risco de falha de capacitação; risco de execução insegura de procedimentos.	Expressa riscos associados à atuação humana na operação de içamento, considerando conhecimento técnico, treinamento, supervisão, inspeção prévia, comportamento seguro e capacidade de tomada de decisão em operações complexas e com baixa margem para improvisação.	Wang et al. (2022); Shi et al. (2026).
Comunicação, sinalização e coordenação em campo	Risco de falha de comunicação; risco de sinalização deficiente; risco de interpretação incorreta de comandos; risco de descoordenação entre operador, sinaleiro e equipe de apoio; risco de exposição física da equipe durante a operação.	Reúne riscos ligados ao controle operacional do içamento, especialmente à articulação entre operador, equipe de apoio, responsáveis técnicos e demais agentes presentes no canteiro.	Wang et al. (2022).

Fonte: Elaborado pelo autor com base na literatura revisada.

2.4 MODELAGEM ANALÍTICA DE RISCOS NO TRANSPORTE DE MÓDULOS

A identificação dos riscos presentes no transporte de módulos constitui um passo importante, mas não suficiente para os propósitos desta tese. Além de reconhecer os eventos que podem comprometer a operação, é necessário discutir como esses riscos podem ser organizados e tratados de forma analítica. Essa discussão se torna ainda mais necessária quando se considera que os recursos para prevenção, monitoramento e mitigação são limitados, o que exige não apenas identificar os riscos, mas também estabelecer critérios para sua priorização.

No transporte de módulos, essa exigência é particularmente relevante, pois a criticidade dos riscos varia conforme as condições específicas de cada operação, como características da carga, tipo de trajeto, condições ambientais, recursos disponíveis e decisões logísticas. Nesse contexto, a modelagem analítica ganha importância por oferecer uma base mais sistemática para estruturar, relacionar e priorizar riscos de modo compatível com a variabilidade do ambiente operacional.

Com base nisso, esta seção discute a modelagem analítica de riscos no transporte de módulos, destacando tanto as limitações das abordagens tradicionais de avaliação quanto o potencial de uma estrutura analítica mais aderente às especificidades da operação. Busca-se compreender de que forma os riscos identificados na literatura podem ser sistematizados, comparados e priorizados, de modo a subsidiar a construção de um modelo preditivo coerente com a complexidade e a variabilidade do contexto operacional.

2.4.1 Métodos Tradicionais de Avaliação de Riscos e suas Limitações

A avaliação de riscos na construção sempre teve um problema prático de partida: é preciso decidir o que merece mais atenção primeiro. Em um empreendimento real, não é possível tratar todos os riscos ao mesmo tempo, com a mesma profundidade e com o mesmo nível de recurso. Por isso, os métodos tradicionais de avaliação de riscos ganharam espaço justamente por ajudarem a organizar esse primeiro esforço de leitura do problema.

Em termos gerais, eles servem para identificar perigos, estimar sua relevância e apoiar a priorização de ações preventivas. Segundo Kumi, Jeong e Jeong (2024), durante muito tempo esse trabalho foi conduzido predominantemente por abordagens qualitativas baseadas em julgamento especialista e experiência prévia, valorizadas por sua praticidade, mas limitadas em objetividade e sensibilidade analítica.

Quando se observa a evolução desse campo, percebe-se que os métodos tradicionais não formam um bloco único. Islam *et al.* (2017) mostram que eles podem ser agrupados, de forma ampla, em métodos de indexação, métodos matriciais e métodos probabilísticos. Os métodos de indexação são os mais simples: transformam percepções de risco em escores ou índices, geralmente com base em opinião especializada. Já os métodos matriciais organizam a análise por cruzamento de critérios, como probabilidade e impacto. Os probabilísticos, por sua vez, buscam representar o risco com maior formalização matemática. Essa classificação é útil porque revela um ponto importante: quanto mais simples o método, maior costuma ser sua facilidade de aplicação e quanto mais sofisticado, maior é a sua exigência em dados, hipóteses e estrutura analítica.

É justamente por isso que esses métodos continuam presentes na prática. Eles ajudam a transformar preocupações dispersas em categorias analisáveis e permitem

que gestores e equipes tenham, ao menos, uma base inicial para discutir prioridades.

Em uma operação logística, isso pode significar, por exemplo, diferenciar aquilo que é apenas um incômodo operacional daquilo que pode interromper a atividade, gerar dano relevante ou produzir acidente grave. Kumi, Jeong e Jeong (2024) observam que métodos quantitativos podem oferecer resultados mais objetivos e confiáveis quando apoiados em dados adequados. Ainda assim, os próprios autores reconhecem que sua utilidade depende muito da qualidade da base informacional e do desenho metodológico adotado.

O problema começa quando se espera desses métodos uma capacidade explicativa maior do que eles realmente podem oferecer. Em muitas abordagens tradicionais, o risco é tratado como se pudesse ser reduzido a uma pontuação fixa ou a uma combinação relativamente estável entre poucos fatores. Em operações reais, no entanto, o que torna uma situação crítica nem sempre é um fator isolado, mas a combinação entre eles.

No transporte rodoviário de módulos, por exemplo, uma rota com geometria desfavorável pode ser administrável em condições climáticas normais, mas tornar-se muito mais crítica quando se soma à baixa visibilidade, à pressão por prazo e à necessidade de cumprir uma janela rígida de entrega. Kumi, Jeong e Jeong (2024) reforçam esse diagnóstico ao apontarem que muitos modelos têm dificuldade para representar interações complexas, relações não lineares e mudanças rápidas nas condições operacionais.

Há também um limite menos visível, mas igualmente importante: Muitos métodos tradicionais trabalham com pressupostos que nem sempre correspondem à realidade da construção. Para Kumi, Jeong e Jeong (2024), várias abordagens quantitativas assumem, ainda que implicitamente, relações lineares, independência entre variáveis e relativa estabilidade das condições ao longo do tempo. Isso ajuda a tornar a modelagem possível, mas pode distorcer a leitura de contextos em que o ambiente muda rapidamente, a equipe se reconfigura, o espaço é restrito e a interação entre fatores técnicos e humanos é intensa. Em outras palavras, o método pode parecer robusto em tese e, ainda assim, permanecer apenas parcialmente aderente à prática.

Outro ponto crítico é a dependência persistente de julgamento subjetivo, mesmo quando a abordagem se apresenta como quantitativa. Lu *et al.* (2021) mostram que muitas abordagens tradicionais de avaliação de riscos na construção

continuam se apoiando em listas de verificação, sistemas de gestão de riscos e procedimentos manuais frequentemente aplicados apenas depois da etapa de projeto.

Os autores também observam que índices como probabilidade, consequência e exposição costumam ser definidos a partir de entrevistas com especialistas e questionários. Isso significa que, mesmo quando a avaliação termina em números, esses números nem sempre nascem de medições objetivas. Muitas vezes, continuam traduzindo percepções humanas, com todos os vieses e diferenças de experiência que isso implica.

Esse aspecto ajuda a explicar por que métodos tradicionais podem funcionar bem como ponto de partida, mas não necessariamente como resposta suficiente para operações mais complexas. Um checklist, por exemplo, pode ser útil para verificar se determinada condição foi observada ou não. Uma matriz de risco, por sua vez, pode ajudar no julgamento de que um evento é alto, médio ou baixo. Mas, quando se pretende compreender por que duas operações aparentemente semelhantes apresentam criticidades distintas, essas ferramentas tendem a oferecer respostas limitadas.

Em uma operação de içamento, por exemplo, não basta saber que existe risco de queda da carga. O que realmente importa é compreender como esse risco se altera em função do porte do módulo, da estabilidade do equipamento, da qualidade da sinalização, da presença de interferências no entorno e da capacidade de coordenação da equipe.

A literatura mostra que parte da evolução metodológica recente nasceu justamente da tentativa de enfrentar essas insuficiências. Islam *et al.* (2017) discutem, por exemplo, versões híbridas de métodos já consolidados, como o Processo Analítico Hierárquico e a análise de modos de falha e efeitos. Em termos simples, isso revela um movimento importante: os métodos tradicionais não desapareceram, mas passaram a ser adaptados porque, sozinhos, já não permitiam explicar adequadamente ambientes marcados por incerteza, dependência entre variáveis e informação incompleta.

As limitações desses métodos ficam ainda mais claras quando se observa seu uso do ponto de vista da gestão. Shishehgarkhaneh *et al.* (2024) mostram que abordagens como estudos de caso, visitas de campo, revisões sistemáticas, oficinas de discussão, análises estatísticas e o próprio Processo Analítico Hierárquico continuam fortemente presentes na gestão de riscos da cadeia de suprimentos da

construção. No entanto, os autores observam que tais métodos podem apresentar dificuldades de generalização entre projetos, baixa aderência ao ritmo acelerado de decisão exigido pela obra, problemas de comunicação entre múltiplos participantes e pouca adaptação ao caráter dinâmico da construção. Isso significa que, um método pode ser metodologicamente sólido e ainda assim, pouco compatível com a velocidade, a pressão e a instabilidade do ambiente em que a decisão precisa ser tomada.

No caso desta pesquisa, essa discussão é relevante porque tanto o transporte rodoviário de módulos quanto as operações de içamento envolvem riscos que não se explicam adequadamente por classificações estáticas e genéricas. Em ambos os casos, a criticidade não decorre apenas da existência abstrata de um evento potencial, mas da forma como diferentes variáveis operacionais se combinam em cada situação concreta.

Uma rota estreita, por exemplo, não tem o mesmo significado em todas as operações, o mesmo se aplica para incidência de vento, raio de içamento, falha de comunicação ou atraso logístico. Métodos tradicionais podem identificar esses fatores e oferecer uma ordenação preliminar, mas tendem a perder capacidade explicativa quando se busca compreender como a criticidade varia de acordo com a configuração específica da operação.

Kumi, Jeong e Jeong (2024) apontam limitações persistentes relacionadas à qualidade dos dados, aos pressupostos metodológicos e à dificuldade de captar a complexidade dos ambientes construtivos. A questão central não é, portanto, descartar os métodos tradicionais, mas reconhecer com precisão o alcance de sua contribuição e os pontos em que deixam de ser suficientes. Eles continuam relevantes para a identificação inicial de riscos, a organização de categorias, o apoio à discussão entre especialistas e a definição de prioridades gerais. Sua limitação aparece quando se pretende, com essas mesmas ferramentas, representar operações altamente variáveis, interdependentes e sensíveis ao contexto.

É justamente nesse intervalo entre utilidade prática e limitação analítica que se insere a presente pesquisa, ao propor uma forma de avaliação mais aderente às condições reais, dinâmicas e combinatórias do transporte rodoviário de módulos e das operações de içamento.

2.4.2 Contribuições da Automação Analítica

A automação analítica pode ser compreendida como uma estratégia para ampliar a capacidade de leitura, organização e priorização dos riscos em operações de transporte modular. Sua contribuição não está em substituir o julgamento técnico, mas em oferecer uma estrutura mais sistemática para converter informações operacionais dispersas em uma leitura organizada do cenário de risco. Nesse sentido, métodos quantitativos e técnicas baseadas em dados podem fortalecer o apoio à decisão na segurança da construção, desde que sejam considerados seus limites quanto à qualidade dos dados, aos pressupostos metodológicos e à aderência ao contexto real de aplicação (Kumi; Jeong; Jeong, 2024).

No transporte rodoviário de módulos e nas operações de içamento, o gestor lida simultaneamente com variáveis técnicas, logísticas, ambientais e humanas. Essas variáveis raramente atuam de forma isolada. Ao contrário, combinam-se em configurações específicas, produzindo cenários com diferentes níveis de criticidade. Islam et al. (2017) destacam que os riscos em projetos complexos tendem a ser interdependentes e marcados por incertezas, o que ajuda a explicar a busca por métodos capazes de representar relações entre fatores, e não apenas eventos tratados de modo isolado.

Uma primeira contribuição desse tipo de abordagem está na sistematização das relações de risco. Em vez de trabalhar apenas com listas genéricas ou classificações fixas, torna-se possível organizar o conhecimento em regras que vinculam determinadas condições operacionais à ativação de riscos específicos. A automação analítica não elimina a base técnica construída por especialistas, mas permite organizá-la em uma estrutura mais explícita, na qual as relações entre variáveis, condições e riscos podem ser verificadas, revisadas e aplicadas de modo mais consistente, especialmente diante de abordagens que ainda dependem de listas, procedimentos manuais e índices definidos por avaliação especializada (LU et al., 2021).

A segunda contribuição está na priorização. Em operações reais, não é possível tratar todos os riscos com o mesmo grau de atenção, ao mesmo tempo e com os mesmos recursos. Por isso, a utilidade do apoio à decisão depende da capacidade de distinguir quais riscos se tornam mais relevantes em cada cenário. Kumi, Jeong e Jeong (2024) observam que métodos quantitativos podem contribuir

para avaliações mais objetivas quando apoiados em dados adequados, enquanto Islam et al. (2017) mostram que, em contextos complexos, incertos e com dados limitados, a avaliação ainda depende de julgamento técnico e interpretação contextual. Nesse sentido, a automação analítica não elimina a experiência do especialista, mas contribui para tornar o processo de priorização mais consistente, comparável e aderente às condições específicas da operação.

Uma terceira contribuição refere-se à rastreabilidade da análise. Em muitos casos, o problema não está apenas no resultado, mas na dificuldade de compreender por que determinado risco foi considerado mais relevante do que outro. Ao explicitar as variáveis consideradas, as relações estabelecidas e os critérios de cálculo adotados, a automação analítica torna o processo mais transparente.

Essa característica é especialmente importante em operações com múltiplos agentes, nas quais decisões precisam ser justificadas, comunicadas e revisadas com clareza. Shishehgarkhaneh et al. (2024) reforçam essa preocupação ao discutirem dificuldades de comunicação, coordenação e adaptação dos métodos de gestão de riscos ao ritmo dinâmico da construção. Assim, quando a equipe consegue compreender por que certos riscos ganharam mais peso em um cenário específico, o apoio à decisão se torna mais defensável e operacionalmente útil.

No contexto desta tese, a automação analítica é compreendida como uma base estruturada para apoiar a interpretação e a priorização dos riscos no transporte de módulos na CM. Ao organizar variáveis, regras de associação, eventos de risco e critérios de criticidade dentro de uma estrutura lógica, ela permite construir uma leitura mais aderente às condições concretas da operação. É a partir dessa compreensão que se torna possível avançar para a síntese crítica da literatura revisada, explicitando suas implicações para o desenvolvimento do modelo preditivo proposto nesta pesquisa.

2.5 SÍNTESE CRÍTICA DA LITERATURA E IMPLICAÇÕES PARA O DESENVOLVIMENTO DO MODELO PREDITIVO

A revisão desenvolvida neste capítulo permitiu consolidar a base conceitual e analítica necessária ao desenvolvimento do modelo preditivo proposto nesta tese. Ao longo das seções anteriores, a construção modular foi compreendida como um sistema produtivo industrializado e interdependente, no qual o transporte dos módulos

deixa de ser uma etapa acessória e passa a constituir uma dimensão crítica para a continuidade entre fabricação, deslocamento, içamento e montagem.

A principal síntese extraída da literatura é que a criticidade do transporte modular não decorre de fatores isolados, mas da combinação situada entre características da carga, condições da rota, ambiente operacional, equipamentos, planejamento, comunicação e coordenação entre agentes. Por isso, o problema investigado exige uma estrutura capaz de relacionar variáveis operacionais e eventos de risco de forma contextualizada, transparente e útil ao apoio à decisão preventiva. O Quadro 3 sintetiza os principais achados da revisão e explicita suas implicações para o desenvolvimento do modelo.

Quadro 3 - Síntese crítica da literatura e requisitos para o modelo preditivo

Eixo analítico	Achado central da literatura	Lacuna analítica	Requisito para o modelo
Construção modular	A construção modular depende da articulação entre projeto, fabricação, transporte e montagem.	O transporte nem sempre é tratado como parte estruturante do sistema.	Considerar o transporte como dimensão constitutiva integrante da lógica produtiva modular.
Módulos	Unidades tridimensionais e de elevada completude impõem exigências logísticas próprias.	Abordagens genéricas não captam adequadamente suas especificidades.	Incorporar variáveis específicas da carga modular volumétrica.
Transporte modular	O transporte concentra exigências geométricas, logísticas, ambientais e operacionais.	Sua criticidade nem sempre é convertida em apoio analítico à decisão.	Tratar o transporte como problema técnico e decisório.
Criticidade operacional	A criticidade resulta da combinação contextual de múltiplas variáveis.	Leituras lineares ou isoladas são insuficientes.	Permitir análise contextualizada / relacional dos cenários operacionais.
Compreensão do risco	O risco envolve causas, eventos e consequências, e não apenas danos consumados.	Enumerações simples não explicam sua dinâmica.	Estruturar os riscos de forma analítica e relacional.
Métodos de avaliação	Métodos tradicionais seguem úteis para identificação e priorização inicial.	Têm aderência limitada a contextos dinâmicos e interdependentes.	Superar classificações fixas e leituras excessivamente genéricas.

Fonte: elaborado pelo autor com base na literatura revisada.

3 PERCURSO METODOLÓGICO DA PESQUISA

Este capítulo apresenta a estratégia metodológica que orienta o desenvolvimento da tese, explicitando o percurso adotado para transformar o problema de pesquisa em uma solução analítica aplicável ao transporte de módulos na CM. Mais do que descrever procedimentos de forma isolada, busca-se demonstrar a coerência entre a natureza da pesquisa, a abordagem metodológica adotada, os procedimentos e instrumentos mobilizados, a definição dos requisitos do artefato, a construção de sua primeira versão e a estratégia de aplicação, refinamento e avaliação do modelo.

Nessa perspectiva, a metodologia não é tratada apenas como etapa formal da investigação, mas como estrutura que organiza a passagem entre fundamentação teórica, construção da solução proposta, aplicação em contextos operacionais e exame crítico de sua utilidade.

3.1 ABORDAGEM METODOLÓGICA DA PESQUISA

A seguinte seção apresenta o enquadramento metodológico da tese, partindo da caracterização da natureza da pesquisa para justificar a adoção da DSR. O objetivo é situar essa escolha metodológica em função da natureza aplicada do estudo e da necessidade de desenvolver uma solução analítica voltada ao problema investigado.

3.1.1 Natureza da Pesquisa e Justificativa da Adoção do Método

Esta tese caracteriza-se como uma pesquisa aplicada, pois parte de um problema concreto da construção modular e busca desenvolver uma solução com finalidade prática para enfrentá-lo. No caso investigado, esse problema envolve a necessidade de estruturar um artefato analítico capaz de apoiar a identificação, a interpretação e a priorização dos riscos associados ao transporte de módulos em diferentes cenários operacionais. A pesquisa está, portanto, orientada à produção de conhecimento útil, articulando compreensão teórica, modelagem analítica e aplicabilidade prática.

Do ponto de vista da abordagem, a pesquisa é predominantemente qualitativa, com estruturação analítica. A dimensão qualitativa manifesta-se na interpretação da

literatura, na compreensão do problema prático, na identificação de variáveis relevantes, na leitura dos cenários operacionais e na avaliação do artefato por especialistas. A dimensão analítica, por sua vez, aparece na conversão dessa compreensão em uma estrutura lógica capaz de relacionar condições operacionais, eventos de risco, níveis de criticidade e medidas de mitigação. Assim, a pesquisa não permanece apenas no plano interpretativo, mas transforma a leitura do fenômeno em uma arquitetura de apoio à decisão.

Esse enquadramento justifica a adoção da DSR, especialmente porque a tese não se restringe à análise de um fenômeno, mas avança para a construção, aplicação e avaliação de uma solução. Como destacam vom Brocke, Hevner e Maedche (2020), a DSR orienta-se à criação de artefatos capazes de resolver problemas relevantes e gerar conhecimento aplicável.

No mesmo sentido, Gregor e Zwikael (2024) ressaltam que essa abordagem é adequada a pesquisas que buscam equilibrar rigor acadêmico e relevância prática. No contexto desta tese, isso significa que o objetivo não é apenas compreender os riscos do transporte de módulos, mas desenvolver um modelo preditivo capaz de organizá-los analiticamente e apoiar sua priorização em situações operacionais distintas.

A pertinência da DSR também decorre da lacuna identificada na revisão de literatura. Embora os riscos do transporte modular sejam reconhecidos como relevantes, ainda há necessidade de estruturas analíticas mais aderentes à variabilidade operacional dessas atividades. Nesse sentido, a DSR permite transformar uma lacuna teórica e prática em um artefato com utilidade clara, conforme também observado por Goecks et al. (2021) em pesquisas orientadas à proposição de soluções aplicáveis. Essa escolha metodológica é particularmente adequada porque o artefato proposto não corresponde a um produto físico, mas a um modelo de apoio à decisão, cuja validade depende de sua coerência interna, de sua aderência ao contexto e de sua utilidade para a prática.

Além disso, o desenvolvimento do artefato exige a integração entre compreensão contextual e formalização analítica. Fathullah et al. (2025) mostram que métodos qualitativos podem ser incorporados à DSR quando a construção da solução demanda interpretação situacional, desenho progressivo e interação com contextos reais de aplicação. De modo complementar, Mdletshe et al. (2023) reforçam que a avaliação é uma etapa crítica em estudos de DSR, pois permite examinar a utilidade,

a adequação e a capacidade de resposta do artefato ao problema que motivou sua criação.

Por essa razão, o modelo desenvolvido nesta tese foi concebido como uma solução progressivamente estruturada, submetida a ciclos de aplicação, análise crítica e aprimoramento. Essa organização favorece a rastreabilidade das decisões assumidas ao longo do desenvolvimento do artefato e a replicabilidade do percurso metodológico em estudos futuros.

3.1.2 Procedimentos e Instrumentos Mobilizados na Pesquisa

O desenvolvimento da pesquisa mobilizou diferentes procedimentos e instrumentos de coleta, produção e sistematização de dados. Como o objetivo central consistiu no desenvolvimento e na avaliação de um artefato analítico, os dados utilizados não se restringiram a informações obtidas em campo, mas envolveram também conhecimento produzido a partir da literatura, registros operacionais, formulários estruturados e entrevistas com especialistas.

A revisão da literatura constituiu o primeiro procedimento mobilizado, com o objetivo de fundamentar teoricamente o problema investigado, identificar lacunas no tratamento dos riscos associados ao transporte de módulos e subsidiar a construção inicial do banco de dados do artefato. Nessa etapa, foram extraídos da literatura os primeiros riscos operacionais associados ao transporte rodoviário e ao içamento de módulos, bem como variáveis de contexto, fatores condicionantes e medidas de mitigação recorrentes. Esse levantamento inicial permitiu coletar uma primeira base de dados para o modelo, posteriormente refinado.

Além da revisão teórica, a pesquisa incorporou um estudo de campo voltado à observação de situações reais de transporte e içamento de módulos. Nessa etapa, foram identificados e registrados riscos operacionais observados diretamente durante a operação, permitindo complementar a base inicial extraída da literatura com evidências empíricas provenientes da prática.

De forma complementar, também foram consultados documentos e informações operacionais associados ao mesmo estudo de campo, disponibilizados pela empresa. Esses materiais auxiliaram na compreensão do contexto analisado, especialmente quanto às características da carga, às condições de transporte, às restrições do trajeto, aos procedimentos de içamento e às condições do local de

operação. Assim, o estudo de campo não se limitou à observação direta, mas articulou observação, registros descritivos e informações operacionais complementares para aproximar o desenvolvimento do modelo da realidade prática.

Também foram utilizados formulários estruturados, que constituíram o principal meio de coleta padronizada das informações inseridas no artefato. Por meio deles, as condições reais de cada cenário analisado foram convertidas em variáveis operacionais do modelo, permitindo que dados relativos à carga, à rota, ao ambiente, aos recursos disponíveis, às restrições físicas, à qualificação das equipes e ao planejamento fossem incorporados ao processamento analítico. Dessa forma, os formulários não exerceram apenas uma função descritiva, mas atuaram como interface entre a realidade operacional observada e a lógica de funcionamento do artefato.

No segundo ciclo de avaliação, os formulários desempenharam ainda outra função relevante, uma vez que foram preenchidos pela própria empresa participante, sem intermediação direta do pesquisador. Esse procedimento permitiu observar não apenas a capacidade do instrumento de coletar informações operacionais, mas também sua inteligibilidade e sua viabilidade de uso por agentes externos à pesquisa, já que os dados foram registrados diretamente por quem participou do contexto analisado. A padronização das respostas também contribuiu para a rastreabilidade entre as informações fornecidas, as variáveis ativadas e os resultados produzidos pelo modelo.

As entrevistas semiestruturadas com especialistas foram utilizadas como instrumento de avaliação crítica do artefato. Elas permitiram examinar a coerência dos resultados gerados, a aderência do modelo à realidade operacional, a clareza das informações apresentadas e a utilidade das recomendações produzidas. A escolha por entrevistas semiestruturadas justificou-se pela necessidade de combinar orientação metodológica prévia com abertura para que os especialistas apresentassem percepções, críticas e sugestões a partir de sua experiência profissional.

As entrevistas foram gravadas, mediante consentimento dos participantes. Posteriormente os dados foram analisados pelo pesquisador, permitindo sistematizar as contribuições dos especialistas e utilizá-las como insumo para a avaliação e o refinamento do modelo. O **Quadro 4** sintetiza os principais procedimentos e instrumentos de coleta de dados adotados na pesquisa, destacando o tipo de dado

produzido ou mobilizado e sua função no desenvolvimento do artefato.

Quadro 4 - Procedimentos e instrumentos de coleta de dados adotados na pesquisa

Procedimento ou instrumento	Tipo de dado produzido ou mobilizado	Função no desenvolvimento do artefato
Revisão da literatura	Conceitos, lacunas, riscos operacionais, variáveis de contexto, fatores condicionantes e medidas de mitigação identificados na literatura.	Fundamentou o problema de pesquisa, permitiu a extração inicial dos riscos e orientou a definição dos requisitos e da estrutura inicial do artefato.
Estudo de campo	Riscos operacionais e vulnerabilidades observados diretamente em situação real de transporte e içamento de módulos.	Complementou a base inicial extraída da literatura com evidências empíricas provenientes da prática e aproximou o modelo da realidade operacional.
Análise documental	Dados complementares sobre características da carga, condições de transporte, restrições do trajeto, procedimentos de içamento e condições do local de operação.	Auxiliaram na contextualização do caso analisado e na compreensão das condições práticas que influenciaram a aplicação do artefato.
Formulários estruturados	Dados padronizados sobre carga, rota, ambiente, recursos disponíveis, restrições físicas, qualificação das equipes e planejamento operacional.	Converteram as condições reais dos cenários analisados em variáveis de entrada do modelo, permitindo a ativação dos riscos e o processamento da criticidade.
	Dados informados diretamente pela empresa participante no segundo ciclo de avaliação, sem intermediação do pesquisador.	Permitiram observar a inteligibilidade do instrumento e sua viabilidade de uso por agentes externos à pesquisa, reforçando a função do formulário como interface entre o usuário e o artefato.
Entrevistas semiestruturadas com dois especialistas	Percepções, críticas e sugestões sobre coerência, utilidade, clareza e aplicabilidade do artefato, registradas por meio de entrevistas gravadas e posteriormente analisadas pelo pesquisador.	Subsidiaram a avaliação crítica e o refinamento progressivo do modelo ao longo dos ciclos da pesquisa.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como observado no Quadro 4, os procedimentos e instrumentos adotados cumpriram funções complementares no percurso metodológico da pesquisa. A literatura forneceu a base conceitual e analítica para a extração inicial dos riscos e para a estruturação do artefato, o estudo de campo por observação e os documentos operacionais complementares aproximaram o modelo da realidade prática, os formulários estruturados viabilizaram a entrada padronizada de dados no modelo e as entrevistas semiestruturadas permitiram avaliar criticamente sua coerência, utilidade e aplicabilidade.

Dessa forma, a combinação desses procedimentos e instrumentos reforça a natureza aplicada e iterativa da pesquisa, ao mesmo tempo em que sustenta a rastreabilidade entre o problema investigado, os dados mobilizados, a construção do artefato, sua aplicação e sua avaliação. Essa organização metodológica é particularmente importante em uma investigação orientada pela DSR, pois evidencia que o artefato não foi desenvolvido a partir de uma única fonte de informação, mas por meio da articulação progressiva entre conhecimento científico, evidências operacionais e avaliação especializada.

3.1.3 Etapas de Desenvolvimento do Artefato

Com base na abordagem metodológica adotada, o desenvolvimento e a avaliação do artefato foram organizados em seis etapas articuladas, definidas de modo a explicitar o percurso de construção, aplicação, aprimoramento e avaliação da solução proposta. Essa organização buscou tornar claros os insumos mobilizados em cada fase, as decisões assumidas ao longo do processo e os resultados produzidos, favorecendo a rastreabilidade do desenvolvimento do modelo e a replicabilidade do percurso metodológico em estudos futuros. Além disso, permitiu representar com maior fidelidade o caráter iterativo do estudo, uma vez que o modelo não foi concebido em versão única e definitiva, mas desenvolvido progressivamente, a partir de sucessivos ciclos de estruturação, aplicação, revisão e reaplicação.

A primeira etapa correspondeu à identificação e delimitação do problema prático. Nessa fase, foi realizada a revisão de literatura que fundamenta o Capítulo 2, com o objetivo de compreender a lógica produtiva da construção modular, as especificidades dos módulos, a criticidade do transporte, os principais riscos operacionais associados ao transporte rodoviário e ao içamento, bem como os limites

das abordagens tradicionais de avaliação. Essa etapa teve a função de esclarecer por que o transporte de módulos constitui um problema analítico específico e por que a literatura ainda não oferece uma estrutura suficientemente aderente à variabilidade operacional dessas atividades.

A segunda etapa consistiu na definição dos requisitos do artefato. A partir da lacuna identificada na literatura, o problema foi traduzido em exigências concretas para o modelo a ser desenvolvido. Nessa fase, definiu-se que a solução deveria considerar o transporte como parte constitutiva da lógica produtiva modular, incorporar variáveis operacionais relacionadas ao transporte e ao içamento, relacionar condições de contexto e eventos de risco, permitir uma leitura contextualizada da criticidade e oferecer base estruturada para a priorização preventiva. Essa etapa foi importante porque transformou uma lacuna teórica e prática em critérios objetivos de desenvolvimento.

A terceira etapa correspondeu à construção da primeira versão do artefato. Nessa fase, foi definida a arquitetura inicial do modelo preditivo, assim como sua lógica geral de funcionamento. Também foram estruturados os primeiros conjuntos de variáveis, o banco de riscos e o procedimento de análise da criticidade. A composição inicial do banco de riscos apoiou-se na revisão de literatura, na análise documental e nos registros obtidos no estudo de campo, de modo a aproximar a estrutura do modelo das condições observadas em operações reais. O objetivo, nesse momento, foi transformar os requisitos anteriormente estabelecidos em uma primeira configuração operacional do artefato, suficientemente consistente para permitir sua aplicação inicial.

A quarta etapa envolveu a primeira aplicação e avaliação exploratória do modelo. Essa aplicação permitiu observar o comportamento da primeira versão do artefato diante de um cenário real de transporte modular. Nessa etapa, os formulários de entrada do modelo foram preenchidos pelo responsável técnico da empresa participante, com auxílio do pesquisador, o que possibilitou esclarecer dúvidas durante o registro das informações operacionais e acompanhar a forma como os dados eram interpretados e convertidos em entradas do modelo.

Mais do que produzir resultados finais, essa etapa teve como finalidade verificar a coerência entre as informações inseridas, as variáveis ativadas e os resultados gerados, bem como analisar a adequação das variáveis selecionadas, a clareza da estrutura proposta e a utilidade analítica das saídas produzidas. Em termos

metodológicos, funcionou como um momento de aprendizagem sobre o próprio artefato.

A quinta etapa consistiu no refinamento do modelo. Com base nas evidências obtidas na aplicação anterior, foram realizados ajustes na estrutura do artefato, incluindo revisões na arquitetura do sistema, no conjunto de variáveis consideradas, na lógica de derivação das variáveis secundárias, na organização do banco de riscos e no processamento da criticidade. Essa etapa foi decisiva para elevar a consistência analítica do modelo e aproximá-lo mais das exigências do problema investigado, ainda que sua reaplicação posterior tenha permitido identificar limitações remanescentes e novas possibilidades de aprimoramento.

A sexta etapa correspondeu à segunda aplicação e à avaliação crítica da versão refinada do artefato. Diferentemente da primeira aplicação, essa etapa buscou examinar em que medida os ajustes realizados alteraram o funcionamento do modelo, considerando sua coerência interna, sua capacidade de leitura dos cenários operacionais e sua utilidade para a priorização dos riscos. A avaliação, entretanto, não teve como finalidade validar definitivamente o artefato, mas submetê-lo a uma nova apreciação crítica, capaz de evidenciar avanços, limitações remanescentes e pontos ainda passíveis de aprimoramento.

Nesse sentido, a avaliação considerou a aderência do artefato ao problema investigado, sua capacidade de representar a variabilidade das condições operacionais e seu potencial de apoio à tomada de decisão. As observações do especialista participante foram particularmente importantes nesse processo, pois indicaram problemas ainda presentes na versão refinada do modelo e permitiram convertê-los em diretrizes para um próximo ciclo de desenvolvimento. Assim, essa etapa não foi concebida como encerramento definitivo do artefato, mas como a consolidação de um percurso iterativo em que o modelo foi construído, aplicado, avaliado, refinado e reaplicado, permanecendo aberto a novos aperfeiçoamentos.

A Figura 2 sintetiza as etapas acima descritas, reunindo suas denominações, finalidades principais e resultados produzidos. Ao explicitar esse encadeamento, busca-se tornar claro o percurso metodológico de desenvolvimento e avaliação do artefato, favorecendo sua compreensão, análise e eventual replicação em estudos futuros.

Figura 2 - Etapas de desenvolvimento, avaliação e refinamento do artefato



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2 REQUISITOS PARA A CONSTRUÇÃO DO ARTEFATO

As operações de transporte na CM exigem decisões prévias em contextos marcados por elevada variabilidade operacional. Na prática, a dificuldade não está apenas em reconhecer a existência de riscos potencialmente críticos, mas em determinar, antes da execução, quais deles podem se tornar mais relevantes em cada operação, a partir das condições efetivamente presentes. Alterações em aspectos como rota, restrições geométricas, condições climáticas, características da carga, configuração do equipamento ou interferências no local podem modificar significativamente a criticidade esperada da operação, o que reduz a utilidade de avaliações genéricas ou pouco sensíveis ao contexto.

A partir do problema de pesquisa apresentado no Capítulo 1 e das lacunas identificadas na revisão de literatura, foram formuladas as premissas que orientaram a definição dos requisitos iniciais do artefato. Essas premissas traduziram condições consideradas relevantes para a construção de uma estrutura analítica capaz de incorporar as especificidades operacionais do transporte rodoviário e do içamento de módulos em uma leitura preventiva da criticidade. Desse modo, os requisitos não

foram definidos como resultados conclusivos da pesquisa, mas como diretrizes iniciais de projeto, posteriormente submetidas à avaliação e ao refinamento ao longo dos ciclos empíricos.

Na primeira versão, partiu-se da premissa de que os riscos associados ao transporte rodoviário e ao içamento poderiam ser reunidos em uma mesma estrutura analítica, por se tratarem de etapas articuladas de um mesmo processo logístico-operacional. Essa escolha orientou a construção inicial do artefato, permitindo organizar variáveis, riscos e critérios de criticidade em uma solução comum. A adequação dessa estrutura, contudo, permaneceu como aspecto a ser verificado nos ciclos de avaliação, especialmente quanto à sua capacidade de representar a complexidade envolvida na movimentação de módulos, desde o deslocamento rodoviário até as operações de elevação e posicionamento.

Também se assumiu como premissa que a utilidade do artefato dependeria de sua capacidade de transformar informações de entrada em resultados analíticos de forma padronizada. Nesse sentido, a estrutura do modelo deveria permitir que as variáveis informadas pelo usuário acionassem regras de associação, critérios de criticidade e saídas de apoio à decisão, reduzindo a dependência de interpretações manuais a cada aplicação. Essa diretriz reforçou a necessidade de organizar o artefato não apenas como uma matriz descritiva de riscos, mas como uma estrutura analítica passível de processamento automatizado.

O Quadro 5 apresenta os requisitos definidos para a construção do artefato, relacionando cada dimensão do problema investigado à premissa correspondente e ao requisito de desenvolvimento dela derivado. Os códigos utilizados não representam ordem de prioridade, servindo apenas como referência analítica.

Quadro 5 - Requisitos para a construção do artefato.

Código	Dimensão do Problema	Premissa	Requisito
R1	Variabilidade das condições operacionais	As operações de transporte e içamento de módulos podem diferir quanto à rota, ao ambiente, às características da carga, aos equipamentos, aos recursos disponíveis e às restrições do local.	Representar, de forma estruturada, as condições operacionais por meio de variáveis de entrada relevantes.
R2	Dependência contextual dos riscos	Determinadas condições operacionais podem favorecer a ocorrência, a relevância ou a intensificação de eventos de risco específicos em cada cenário.	Relacionar variáveis operacionais a eventos de risco por meio de uma lógica de associação estruturada.

R3	Sensibilidade da criticidade ao contexto	A priorização preventiva dos riscos exige considerar a combinação entre diferentes condições operacionais presentes no cenário analisado.	Diferenciar a criticidade dos riscos com base na configuração operacional específica de cada cenário.
R4	Necessidade de priorização preventiva	O planejamento da operação demanda identificar, antes da execução, quais riscos requerem maior atenção, considerando limitações de tempo, recursos e capacidade de resposta.	Produzir saídas que permitam a priorização dos riscos antes da execução da operação.
R5	Exigência de transparência analítica	Para que os resultados do modelo sejam interpretáveis e utilizáveis, é necessário explicitar como os dados de entrada são processados e transformados em resultados.	Assegurar a rastreabilidade entre entradas, processamento e saídas do modelo.
R6	Decomposição do processo de transporte em etapas	O transporte de módulos não constitui uma operação única e homogênea, mas envolve etapas sucessivas, com condições operacionais, movimentos da carga, equipamentos, agentes e restrições específicas.	Estruturar o artefato de modo a permitir a análise do processo de transporte a partir de suas etapas operacionais, relacionando variáveis, riscos e medidas de controle de forma contextualizada.
R7	Funcionamento automatizado do processamento analítico	A utilidade do artefato como apoio à decisão depende de sua capacidade de transformar informações de entrada em resultados analíticos de forma padronizada, reduzindo a necessidade de interpretações manuais a cada aplicação.	Estruturar o artefato de modo que as variáveis de entrada atuem automaticamente os riscos correspondentes, os critérios de criticidade e os resultados de apoio à decisão.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A definição dos requisitos permitiu converter as insuficiências identificadas na literatura e na prática operacional em diretrizes iniciais do artefato. Com isso, a pesquisa avançou de uma etapa predominantemente analítica e diagnóstica para uma etapa propositiva, na qual o problema investigado passou a orientar a construção de uma solução analítica passível de teste, avaliação e refinamento.

É nesse movimento que se insere o item seguinte, dedicado ao desenvolvimento da primeira versão do artefato. Nele, são apresentados a arquitetura inicial da solução, a estruturação de seus componentes e a lógica analítica proposta para articular condições operacionais, ativação de riscos, criticidade e resultados de apoio à decisão.

3.3 CONSTRUÇÃO DA PRIMEIRA VERSÃO DO ARTEFATO

O desenvolvimento do artefato inicial representou a primeira tradução prática da proposta desta pesquisa. Até esse momento, o estudo já havia reunido, por meio da revisão da literatura e da análise técnica do transporte modular, um conjunto

consistente de informações sobre riscos, condicionantes operacionais e limitações das abordagens usuais de avaliação. Faltava, porém, transformar esse repertório em uma estrutura capaz de receber os dados de uma operação concreta, interpretar essas condições e devolver uma leitura organizada do risco. Foi esse o papel da primeira versão do artefato.

Essa versão foi implementada em uma planilha eletrônica, desenvolvida no Microsoft Excel. A escolha teve caráter pragmático: além de permitir rápida prototipagem, a planilha ofereceu um ambiente operacional adequado para estruturar dados de entrada, aplicar fórmulas, automatizar relações entre variáveis e riscos e organizar os resultados analíticos e visuais produzidos pelo modelo. Assim, foi possível reunir, em um único ambiente, as entradas da operação, as regras de associação, a lógica de cálculo e a síntese dos resultados. Mais do que um suporte instrumental, a planilha funcionou como espaço de teste da coerência do modelo, permitindo verificar se as relações propostas entre entrada, processamento e saída se sustentavam do ponto de vista analítico.

Desde o início, o artefato foi estruturado com lógica determinística e baseada em regras. Em outras palavras, ele não foi concebido para estimar probabilidades estatísticas a partir de séries históricas, mas para identificar quais riscos tendem a se tornar mais relevantes diante das características específicas de uma operação. Seu objetivo, portanto, não era prever o futuro em sentido probabilístico estrito, mas construir uma leitura analítica do cenário a partir da relação entre variáveis operacionais, eventos de risco, criticidade e medidas de mitigação.

Esse ponto é importante porque ajuda a distinguir o artefato de uma matriz de risco convencional preenchida manualmente. Em instrumentos usuais, a posição do risco na matriz costuma depender de julgamento direto do avaliador. No modelo aqui proposto, ao contrário, a criticidade não é lançada de forma intuitiva caso a caso. Ela emerge de um encadeamento estruturado: uma condição operacional pode ativar determinados riscos, a recorrência dessas ativações compõe a frequência, a frequência é multiplicada ao impacto e a partir disso, o artefato produz a priorização e suas representações visuais. Essa lógica foi justamente o núcleo experimental desta primeira versão.

3.3.1 Arquitetura do Artefato

A primeira versão do artefato foi estruturada para converter dados do cenário analisado em uma leitura sistemática dos riscos prioritários no transporte modular. Para isso, o modelo foi organizado em cinco camadas principais: entrada de dados, banco de riscos, regras de associação, processamento analítico e síntese dos resultados.

A primeira camada corresponde à entrada de dados. Nela são registradas as condições específicas da operação analisada, variáveis como características da rota, da carga, do ambiente, dos equipamentos, da logística de deslocamento e das interfaces com as etapas de descarga e içamento. Essa camada representa o ponto de partida da análise, pois define o cenário operacional a ser interpretado pelo artefato.

A segunda camada corresponde ao banco de riscos do modelo, isto é, ao conjunto de eventos de risco previamente incorporados ao artefato. Essa camada reúne os riscos considerados na análise, seus respectivos pesos de impacto, as justificativas técnicas associadas e as medidas de mitigação correspondentes. Sua função é delimitar o repertório de riscos que pode ser mobilizado pelo modelo, funcionando como a base de referência para a análise. Em outras palavras, o banco de riscos define quais eventos fazem parte do artefato e quais informações estão associadas a cada um deles.

A terceira camada corresponde às regras de associação. Nela são estabelecidas todas as relações possíveis entre as variáveis operacionais consideradas pelo modelo e os riscos cadastrados na camada anterior. Essas regras não indicam, por si só, quais riscos estarão presentes em um cenário específico; elas definem previamente quais riscos podem estar relacionados a cada condição operacional. Assim, enquanto o banco de riscos delimita o conjunto de eventos considerados pelo artefato, as regras de associação estruturam a lógica relacional que permitirá, na camada seguinte, identificar quais desses riscos serão efetivamente ativados a partir dos dados fornecidos pelo usuário.

A quarta camada corresponde ao processamento analítico do modelo. Nessa etapa, os dados operacionais fornecidos pelo usuário são processados com base nas regras de associação definidas na camada anterior. A partir dessas regras, o artefato identifica quais riscos são ativados no cenário analisado, contabiliza automaticamente

as recorrências de cada entrada e calcula sua criticidade com base na combinação entre frequência de ativação e peso de impacto. Dessa forma, a quarta camada transforma as condições informadas pelo usuário em uma hierarquização dos riscos segundo sua criticidade no cenário avaliado.

A quinta camada corresponde às saídas do modelo. Nela, os riscos identificados e hierarquizados na etapa anterior são organizados em resultados interpretáveis, permitindo visualizar a criticidade do cenário analisado, reconhecer os riscos prioritários e associar esses riscos às respectivas medidas de prevenção. Nesta primeira versão, essa síntese foi apresentada por meio de recursos analíticos e visuais, como o gráfico de bolhas, utilizado para oferecer uma visão global da distribuição dos riscos segundo a criticidade e a matriz preditiva de riscos 5×5, estruturada a partir da lógica das matrizes de risco, usualmente empregadas para posicionar eventos segundo níveis combinados de frequência e impacto. Assim, o resultado do artefato não se limita a uma listagem de riscos, mas oferece uma leitura estruturada para apoiar a tomada de decisão antes da execução da operação.

Essa arquitetura foi implementada em uma planilha eletrônica composta por cinco abas principais: Entradas Operacionais, Banco de Riscos, Regras de Associação, Processamento do Cenário e Síntese dos Resultados. Essas abas materializam operacionalmente as cinco camadas do modelo, convertendo a estrutura conceitual descrita anteriormente em um ambiente funcional e automatizado.

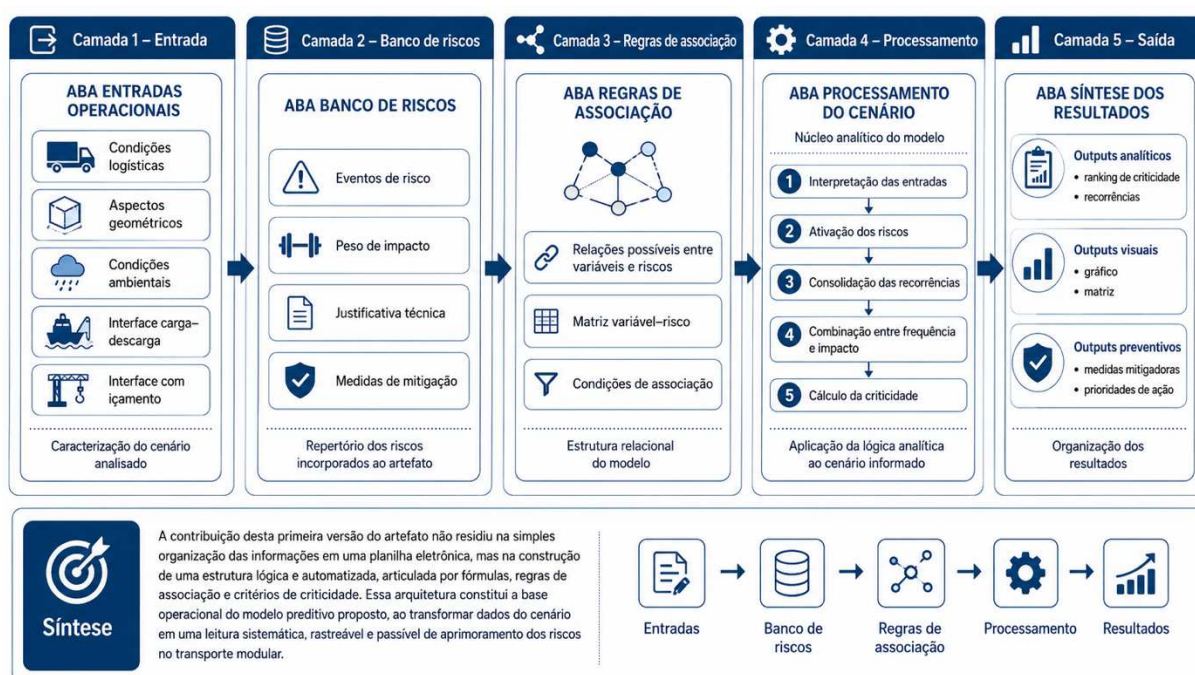
Desse modo, a planilha organiza o percurso analítico do artefato, desde a caracterização do cenário pelo usuário, passando pela base de riscos, pelas regras de associação e pelo processamento da criticidade, até a apresentação dos resultados em saídas interpretáveis. Para facilitar a compreensão desse funcionamento, a Figura 3 apresenta o fluxo lógico da primeira versão do artefato, desde a inserção das condições operacionais até a geração dos resultados analíticos, visuais e orientados à mitigação.

Portanto, a contribuição desta primeira versão do artefato não residiu na disposição das informações em uma planilha eletrônica, mas na construção de uma estrutura lógica e automatizada, articulada por fórmulas, regras de associação e critérios de criticidade. Essa arquitetura constitui a base operacional do modelo preditivo proposto, ao transformar dados do cenário em uma leitura sistemática, rastreável e passível de aprimoramento dos riscos no transporte modular.

Ao articular entrada de dados, banco de riscos, regras de associação,

processamento analítico e síntese dos resultados, essa estrutura também materializa os requisitos definidos para o artefato, especialmente aqueles relacionados à representação das condições operacionais, à associação entre variáveis e riscos, ao cálculo contextual da criticidade e à geração de saídas orientadas à priorização preventiva. Alguns dos principais aspectos dessa estrutura, especialmente as variáveis de entrada, o banco de riscos, as regras de associação e os critérios de cálculo da criticidade, são mais detalhados nas subseções seguintes.

Figura 3 - Fluxo Lógico de Construção do Artefato



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3.2 Variáveis de Entrada do Artefato

A definição das variáveis operacionais constitui o ponto de partida do funcionamento do artefato. Ao estruturá-las como representação formal das condições analisadas, o modelo atende ao requisito R1 (Variabilidade das condições operacionais), pois permite incorporar a variabilidade dos cenários de maneira sistemática ao processo de análise. Na formulação inicial do artefato, buscou-se também atender ao requisito R6 (Decomposição do processo de transporte em etapas), ao reunir, em uma mesma base analítica, variáveis associadas tanto ao transporte rodoviário quanto às operações de içamento, apesar de reconhecer sua

interdependência no contexto logístico da construção modular.

A base analítica do artefato foi construída a partir de 21 variáveis principais, entendidas como atributos capazes de alterar a exposição do transporte modular a diferentes eventos de risco. Essas variáveis foram selecionadas por sua relevância prática e por sua capacidade de representar condições concretas da operação, passíveis de definição prévia ou de verificação relativamente simples durante o planejamento.

Além disso, as variáveis não foram concebidas para representar apenas um contexto geográfico específico. Como a intenção era desenvolver uma estrutura analítica aplicável a diferentes mercados e condições operacionais, o modelo incorporou fatores que podem assumir maior ou menor relevância conforme o local da operação. É o caso, por exemplo, da ocorrência de temperaturas negativas no trajeto, variável que permite considerar cenários em que o gelo na pista pode aumentar a exposição a eventos como derrapagens, perda de controle do veículo ou restrições adicionais à circulação. O Quadro 6 sintetiza as dimensões contempladas por esse conjunto de variáveis.

Quadro 6 – Dimensões operacionais contempladas pelas variáveis de entrada da primeira versão do artefato

Dimensão operacional representada	Variáveis associadas
Planejamento do transporte	Período predominante, escala da operação, distância entre a planta e o local de montagem, tipos modais e passagem por fronteira alfandegária
Condições da rota	Pavimentação do trajeto e predominância de via pedagiada
Características da carga e do veículo	Peso do módulo, excesso de largura do módulo em relação ao caminhão e altura total do veículo carregado
Condições humanas e operacionais	Experiência prévia do motorista, modelo de entrega e número de içamentos por módulo até a entrega
Condições climáticas e ambientais	Previsão de chuva, velocidade do vento no horário da entrega e ocorrência de temperaturas negativas no trajeto
Interfaces com descarga e içamento	Posicionamento do guindaste móvel, local de descarregamento do caminhão, bloqueio de faixa de rolamento e envolvimento de guindaste móvel
Contexto do entorno e uso do módulo	Densidade do entorno e finalidade hospitalar do módulo

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na implementação do artefato, algumas variáveis foram desdobradas em subvariáveis para representar com maior precisão determinadas condições operacionais. Esse desdobramento ocorreu, por exemplo, nas variáveis relacionadas ao posicionamento do guindaste móvel e ao local de descarregamento do caminhão, permitindo distinguir a localização do equipamento ou veículo e sua possível interferência sobre a faixa de rolamento. Dessa forma, embora a estrutura tenha sido concebida a partir de 21 variáveis principais, sua operacionalização incorporou campos complementares para aumentar a sensibilidade da análise.

As variáveis não apenas descrevem o cenário analisado, mas funcionam como elementos de ativação da lógica analítica do artefato. Por exemplo, ao informar que o módulo excede a largura do caminhão ou que o caminhão bloqueará uma faixa de rolamento durante o descarregamento, o usuário fornece ao modelo condições capazes de ativar eventos de risco associados a restrições físicas, interferências viárias e necessidade de medidas preventivas.

3.3.3 Levantamento Complementar de Riscos em Campo e Análise Documental

Embora a revisão de literatura tenha permitido identificar um conjunto expressivo de riscos associados ao transporte de módulos, entendeu-se que a construção da primeira versão do artefato exigia também uma aproximação empírica com uma operação real. Essa decisão decorreu do entendimento de que parte dos riscos envolvidos nesse tipo de operação não se manifesta apenas em formulações gerais, mas em condicionantes concretos relacionados ao trajeto, à geometria viária, à interface com o entorno urbano, ao posicionamento dos equipamentos e à forma como a descarga é viabilizada no destino. Nessa direção, realizou-se um levantamento complementar de riscos, combinando observação em campo e análise documental, com a finalidade de ampliar a aderência empírica do banco inicial de riscos e aproximar a modelagem analítica da realidade operacional observada.

O levantamento foi desenvolvido a partir do acompanhamento de uma operação real em Portugal e da análise de documentos técnicos relacionados ao caso. Essas fontes foram articuladas à revisão de literatura previamente realizada, configurando uma triangulação entre evidências bibliográficas, documentais e observacionais.

A análise documental permitiu identificar condicionantes previamente

registradas, como características da carga, restrições associadas ao transporte, condições do local de entrega, posicionamento dos equipamentos e aspectos relacionados à descarga e ao içamento. Esses elementos foram confrontados com a observação em campo, permitindo refinar a identificação dos riscos sem atribuí-los de forma isolada a uma única fonte de evidência.

Ainda que o procedimento metodológico previsse posteriormente a inserção dos parâmetros operacionais no modelo e a realização de entrevista semiestruturada para apreciação dos resultados, o propósito específico desta etapa foi subsidiar a identificação, o refinamento e a reorganização de riscos associados ao transporte modular. Assim, a operação acompanhada e os documentos analisados não foram mobilizados, nesse momento, para fins de avaliação formal do modelo, mas como insumos empíricos para sua estruturação inicial.

A operação acompanhada revelou um aspecto particularmente importante para a pesquisa: a reduzida extensão do trajeto não implicava, por si só, baixa complexidade operacional. Embora o deslocamento entre origem e destino não fosse elevado, a criticidade da operação concentrava-se no trecho final e, sobretudo, no ponto de chegada (Figura 4).

Nesse contexto, destacaram-se a largura limitada da via, a ausência de vagas de estacionamento, o fluxo local de veículos e a necessidade de bloqueio parcial da circulação em razão da largura do conjunto caminhão/módulo. A parada dos veículos em frente ao lote fazia com que o conjunto avançasse significativamente sobre a faixa de rolamento, dificultando a passagem de veículos de maior porte, como ônibus e caminhões, e ampliando o potencial de colisões, manobras críticas e interferências no tráfego local.

Além das restrições de circulação, o levantamento evidenciou riscos relevantes relacionados à estabilidade da carga e à operação com guindaste. Um dos aspectos mais sensíveis foi a assimetria da carga, percebida tanto no içamento realizado na fábrica quanto na descarga no destino. Essa condição revelou desafios importantes de equilíbrio do módulo, de posicionamento do contrapeso e de estabilização do equipamento, tornando a operação mais suscetível a oscilações, desalinhamentos e perda de controle durante a movimentação.

No ponto de entrega, esse quadro era agravado pelo fato de o guindaste precisar ser posicionado fora dos limites do terreno, realizando o içamento dos módulos por sobre o muro, em uma situação espacialmente restrita e sensível do

ponto de vista da estabilidade operacional.

Figura 4 - Estudo de caso



Fonte: Acervo do autor (2025)

Outro risco relevante dizia respeito à compatibilização geométrica entre os módulos transportados e a base previamente executada no local. A incompatibilidade entre as medidas do módulo e a base de apoio dificultou significativamente o posicionamento da unidade no momento da descarga, tornando a operação mais lenta, exigindo maior precisão de manobra e elevando a sensibilidade a erros de alinhamento e reposicionamento.

Esse achado foi importante porque revelou que a criticidade do transporte modular não se encerra no deslocamento do módulo até o destino, mas se prolonga até a etapa final de entrega, quando a interface entre carga, equipamento e condições locais pode comprometer a fluidez e a segurança da operação.

Por outro lado, as condições meteorológicas verificadas no dia acompanhado não se configuraram como fator agravante da operação. Não houve chuva, vento

significativo ou comprometimento perceptível da visibilidade. Esse aspecto é relevante porque permite compreender que, naquele caso, a complexidade operacional não decorreu de uma superposição generalizada de fatores adversos, mas principalmente das restrições espaciais, da geometria da via, da estabilidade da carga, do posicionamento dos equipamentos e da compatibilização física entre módulo e local de entrega.

A comparação entre os riscos levantados na literatura, os elementos identificados na análise documental e aqueles observados em campo mostrou que a principal contribuição empírica dessa etapa não consistiu apenas na adição de itens isolados, mas, sobretudo, no detalhamento operacional de famílias de risco que, até então, apareciam de forma dispersa ou excessivamente genérica.

Isso se mostrou particularmente importante nos riscos associados à etapa final do transporte, envolvendo a chegada ao destino, a limitação geométrica da via, as interferências na circulação, a estabilidade da carga, a operação com guindaste em espaço restrito e a compatibilização dimensional entre módulo e base local.

Desse modo, o levantamento complementar, apoiado na triangulação entre literatura, análise documental e observação em campo, não teve caráter meramente ilustrativo. Sua função, no âmbito do desenvolvimento do artefato, foi alimentar empiricamente a versão inicial do modelo, permitindo incorporar condicionantes operacionais e refinar categorias de risco cuja formulação exclusivamente bibliográfica poderia ser insuficiente.

Em consequência, o banco de riscos resultante passou a refletir de forma mais consistente a articulação entre deslocamento, chegada, descarga e restrições locais, oferecendo base mais robusta para a estruturação das regras de associação e para o cálculo de criticidade apresentados nas subseções seguintes. Os detalhes operacionais do caso acompanhado, bem como sua posterior inserção no artefato e a apreciação dos resultados por especialista, são apresentados no Capítulo 4, no âmbito do primeiro ciclo de avaliação exploratória realizado em Portugal.

3.3.4 O Banco de Riscos

O banco de riscos constituiu a base de conhecimento responsável por reunir, organizar e qualificar os eventos considerados pelo modelo. Diferentemente de uma listagem genérica de ocorrências indesejadas, esse banco foi estruturado como um

cadastro analítico, no qual cada risco passou a ser descrito por elementos capazes de orientar sua interpretação e sua posterior utilização no processo de avaliação. Para cada evento, foram registrados a descrição do risco, o peso de impacto atribuído, a justificativa técnica dessa graduação e um conjunto de medidas preventivas ou mitigadoras associadas.

Como tratado na seção anterior, os riscos cadastrados no banco foram derivados da articulação entre: revisão da literatura, observação em campo e análise documental. Nesta etapa, esse conjunto de informações foi convertido em uma estrutura operacional, na qual cada evento de risco passou a ser individualizado, graduado quanto ao impacto e acompanhado de justificativas técnicas e medidas preventivas ou mitigadoras. Assim, o foco deixou de ser apenas a identificação dos riscos e passou a ser sua organização em uma base utilizável pelo artefato.

A graduação de impacto atribuída a cada evento foi definida com base na gravidade potencial de suas consequências, caso o risco se materializasse. Essa graduação não teve a função de representar a probabilidade de ocorrência, mas a severidade dos possíveis efeitos sobre a operação. Para isso, foram considerados dois critérios principais: a repercussão potencial sobre o cronograma e a existência de danos colaterais associados. Esses danos foram compreendidos de forma ampla, incluindo impactos sobre a carga, a segurança das pessoas envolvidas ou de terceiros, os equipamentos, a continuidade logística, os custos da operação e eventuais responsabilidades técnicas ou legais.

A escala adotada foi ordinal, composta por cinco níveis de impacto, variando de 1, correspondente a impacto muito baixo, até 5, correspondente a impacto muito alto, conforme sintetizado no Quadro 7. No nível 1, foram enquadrados eventos com baixa possibilidade de comprometer o cronograma e sem danos colaterais relevantes. O nível 2 correspondeu a riscos com possibilidade de repercussão sobre o prazo, ainda sem danos colaterais associados. O nível 3 foi atribuído a situações com baixa possibilidade de impacto no cronograma, mas acompanhadas de danos colaterais. O nível 4 representou eventos com potencial de afetar o prazo e produzir danos colaterais. Por fim, o nível 5 foi reservado aos riscos com maior potencial de comprometer o cronograma e gerar danos colaterais relevantes.

Essa escala forneceu uma base comum para comparar eventos de naturezas distintas, como danos à carga, falhas de amarração, tombamentos, colisões, interferências climáticas, atrasos logísticos e falhas durante o içamento. Com isso,

tornou-se possível diferenciar riscos com efeitos predominantemente operacionais daqueles capazes de comprometer a segurança, a integridade dos módulos, os custos, a continuidade da operação e o cumprimento do cronograma.

Quadro 7 - Critérios de graduação do impacto dos riscos cadastrados

Peso	Classificação do impacto	Critério de enquadramento
1	Muito baixo	Possibilidade remota de atraso do cronograma, sem danos colaterais.
2	Baixo	Possibilidade de atraso do cronograma, sem danos colaterais.
3	Médio	Possibilidade remota de atraso do cronograma, com danos colaterais.
4	Alto	Possibilidade de atraso do cronograma, com danos colaterais.
5	Muito alto	Atraso do cronograma com danos colaterais relevantes.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Um exemplo dessa lógica é o risco de queda da carga por amarração inadequada, associado ao transporte rodoviário. Esse evento recebeu peso de impacto 5, pois a falha na amarração pode resultar na queda da carga durante o deslocamento, causando acidentes graves, danos materiais significativos, interrupções no cronograma e possíveis repercussões legais. A classificação como impacto muito alto decorre, portanto, da combinação entre dano colateral relevante, ameaça à segurança, perda potencial da carga e comprometimento direto da continuidade operacional.

Para esse risco, o banco registrou medidas preventivas compatíveis com sua gravidade, como o desenvolvimento de um plano técnico de amarração com base no peso, nas dimensões e nas características do módulo, a utilização de normas técnicas aplicáveis à amarração de cargas, o emprego de dispositivos de fixação adequados, a substituição de equipamentos desgastados ou danificados, a fixação da carga em múltiplos pontos, o uso de proteções nas bordas do módulo, a inspeção periódica das amarrações durante o trajeto e a capacitação da equipe responsável pela fixação e verificação da carga.

Outro exemplo, agora de içamento, é o risco de dano oculto e reparável à carga por vibração no içamento. Esse evento recebeu peso de impacto 3, pois danos não

identificados imediatamente podem gerar atrasos moderados para inspeção e reparo. Nesse caso, o enquadramento como impacto médio se justifica porque o evento pode produzir danos colaterais e exigir intervenção corretiva, mas não implica, necessariamente, perda integral da carga, acidente grave ou paralisação definitiva da operação.

As medidas associadas a esse risco incluíram o monitoramento contínuo da carga durante o içamento com sensores de tensão e oscilação, a verificação prévia da integridade estrutural, o uso de guindastes ou equipamentos com controle eletrônico de precisão, a adoção de sistemas de amortecimento em pontos de apoio, a manutenção frequente de cabos e equipamentos de içamento e o planejamento da operação com simulações prévias, especialmente em situações envolvendo cargas críticas.

Esses exemplos mostram que o banco de riscos não se limitava ao registro nominal dos eventos, pois cada item cadastrado incorporava uma interpretação técnica de sua gravidade, uma justificativa para o impacto atribuído e um conjunto de respostas preventivas ou mitigadoras coerentes com sua natureza. Embora as justificativas técnicas não tenham sido concebidas, nessa primeira versão, como saídas diretamente apresentadas ao usuário, elas cumpriram uma função metodológica importante: documentar os critérios utilizados na graduação dos impactos e preservar a rastreabilidade do cadastro.

Dessa forma, a estrutura risco–impacto–justificativa–medidas preventivas conferiu maior transparência interna ao modelo, permitindo que o artefato reunisse não apenas informações para identificação dos riscos, mas também subsídios para sua qualificação, verificação e refinamento em etapas posteriores da pesquisa.

3.3.5 Regras de Associação

A terceira camada da arquitetura do artefato correspondeu às regras de associação. Nessa camada, foram estabelecidas as relações possíveis entre as variáveis operacionais consideradas pelo modelo e os riscos previamente organizados no banco de riscos. Diferentemente da camada anterior, dedicada ao cadastro e à qualificação dos eventos, as regras de associação não têm a função de atribuir impacto aos riscos nem de calcular sua criticidade. Sua finalidade era estruturar, de forma antecipada, quais riscos poderiam estar relacionados a cada condição

operacional.

Essa distinção é importante porque separa dois momentos do funcionamento do artefato. O banco de riscos delimitava o conjunto de eventos considerados pelo modelo, com seus respectivos impactos, justificativas e medidas preventivas. As regras de associação, por sua vez, definiam a lógica relacional que permitiria, na camada seguinte, identificar quais desses riscos seriam efetivamente ativados a partir dos dados fornecidos pelo usuário. Assim, essa terceira camada não indicava, por si só, que determinado risco estaria presente em uma operação específica, mas estabelecia previamente todas as relações possíveis entre condições operacionais e eventos de risco.

A estrutura adotada seguiu uma lógica do tipo variável–condição–risco. Cada variável operacional foi desdobrada em condições de resposta e, para cada condição, foram associados os riscos considerados compatíveis com aquela situação. Desse modo, a regra não afirmava que determinado evento necessariamente ocorreria, mas indicava que, diante daquela condição, o risco deveria ser considerado potencialmente pertinente pelo modelo. Essa organização permitiu transformar o banco de riscos em uma estrutura relacional capaz de responder às particularidades de cada operação.

Um exemplo dessa lógica pode ser observado na variável referente às restrições de largura da carga. Essa variável foi organizada a partir de duas condições principais: a carga não ultrapassa a largura do veículo ou a carga ultrapassa a largura do veículo. Quando a condição considerada corresponde à ultrapassagem da largura do veículo, a regra de associação relaciona essa situação a diferentes eventos de risco, como colisão por largura ou comprimento excessivo, distribuição desigual do peso da carga transportada, tombamento do veículo em curvas, tombamento em aclives ou declives, passagem estreita, raios de curva inadequados e atraso na entrega dos módulos decorrente de falhas no transporte.

A mesma condição também pode se relacionar a riscos vinculados à descarga e ao içamento. No caso de módulos mais largos, por exemplo, podem ser associados riscos como colisão com estruturas, colisão com veículos, colisão com pessoas, queda da carga por fixação inadequada, oscilação por vento repentino, pontos cegos e falhas de comunicação entre o operador e a equipe de apoio. Esse exemplo evidencia que uma única condição operacional pode repercutir sobre diferentes momentos da operação, não se limitando ao deslocamento rodoviário.

As justificativas registradas nessa camada tem uma função específica. Elas explicavam por que determinada condição operacional poderia favorecer ou tornar pertinente determinado risco. No caso da largura excessiva da carga, a associação com colisões decorre do aumento da área ocupada pelo conjunto transportado e da maior dificuldade de manobra. A relação com tombamentos está ligada à possível alteração da estabilidade do veículo, especialmente em curvas, aclives ou declives. Já a associação com riscos de içamento se justifica porque módulos mais largos podem ampliar a superfície exposta ao vento, reduzir a margem de movimentação no canteiro, gerar pontos cegos e dificultar a comunicação entre os envolvidos na operação.

Essa justificativa difere daquela apresentada no cadastro de riscos. No banco de riscos, a justificativa explicava a severidade atribuída ao impacto de cada evento. Nas regras de associação, a justificativa explicava a coerência da relação entre uma condição operacional e um risco potencial. Essa separação reforçou a rastreabilidade do artefato, pois permitiu verificar tanto a razão pela qual um risco recebeu determinado peso de impacto quanto o motivo pelo qual ele foi associado a uma condição específica da operação.

Outro aspecto relevante dessa camada é que um mesmo risco poderia estar relacionado a diferentes condições de resposta pertencentes a variáveis operacionais distintas. O risco de tombamento em curvas, por exemplo, poderia ser associado à condição de a carga ultrapassar a largura do veículo, mas também a outras condições registradas no modelo, como existência de curvas fechadas no trajeto, geometria desfavorável da rota, baixa aderência dos pneus na faixa de rolamento ou condições climáticas adversas.

Da mesma forma, riscos de colisão poderiam ser associados a diferentes condições operacionais, como excesso de largura da carga, restrições de altura, baixa visibilidade, passagem estreita ou interferências no local de descarga. Essa característica permitiu representar que muitos eventos de risco não são favorecidos por uma única condição isolada, mas podem tornar-se pertinentes em diferentes configurações operacionais.

Ao mesmo tempo, uma mesma variável poderia conter condições de resposta associadas a riscos de diferentes naturezas. No caso da variável referente às restrições de largura da carga, por exemplo, a condição “ultrapassa a largura do veículo” não se relacionava apenas a riscos geométricos de passagem, mas também

a riscos de estabilidade, danos à carga, dificuldades de manobra, atrasos logísticos e interferências durante o içamento. Essa amplitude foi importante para que o modelo não reduzisse uma condição operacional a uma consequência direta e isolada, mas reconhecesse os efeitos encadeados que determinadas características da operação podem produzir em diferentes momentos do transporte e da movimentação dos módulos.

Portanto, a camada de regras de associação constituiu o núcleo relacional do artefato. Sua função foi organizar, de maneira estruturada e verificável, as relações possíveis entre condições operacionais e eventos de risco. Essa camada ainda não processava o cenário nem calculava a criticidade dos riscos. Ela estruturava previamente o campo de relações que seria utilizado na etapa seguinte, quando os dados informados pelo usuário passariam a ativar riscos específicos e a subsidiar o cálculo da criticidade correspondente.

3.3.6 Processamento Analítico do Modelo

A quarta camada da arquitetura do artefato correspondeu ao processamento analítico do modelo. Enquanto a camada anterior estruturava as relações possíveis entre condições operacionais e eventos de risco, esta camada tinha a função de aplicar essas relações ao cenário informado pelo usuário. Assim, as regras de associação deixavam de operar apenas como uma base relacional previamente construída e passavam a ser confrontadas com os dados concretos da operação analisada.

O processamento iniciava-se a partir das informações inseridas na camada de entrada. Cada resposta fornecida pelo usuário era interpretada como uma condição operacional específica. Em seguida, o modelo verificava, na camada de regras de associação, quais riscos estavam relacionados às condições identificadas. Quando havia correspondência entre uma condição informada e uma regra previamente cadastrada, o risco associado era ativado. Quando essa correspondência não ocorria, o risco permanecia inativo para aquele vínculo específico.

Essa lógica permitiu transformar os dados de entrada em uma leitura contextualizada dos riscos. O modelo não considerava todos os eventos cadastrados no banco como igualmente relevantes para qualquer operação. Ao contrário, apenas os riscos relacionados às condições efetivamente presentes no cenário passavam a

compor a análise. Desse modo, o processamento analítico funcionava como uma etapa de filtragem e interpretação: partia do universo de riscos previamente cadastrados e identificava, dentro dele, os eventos pertinentes à operação em estudo.

Um exemplo pode ser retomado a partir da variável referente às restrições de largura da carga. Na camada de regras de associação, a condição “ultrapassa a largura do veículo” havia sido previamente relacionada a diferentes riscos potenciais. Na camada de processamento, essa relação somente era considerada quando o usuário informava que a carga, de fato, ultrapassava a largura do veículo. Nesse caso, os riscos associados a essa condição eram ativados no cenário. Caso a carga não ultrapassasse a largura do veículo, esses vínculos específicos não eram acionados.

A ativação dos riscos foi tratada de forma acumulativa. Isso significa que um mesmo evento poderia ser acionado mais de uma vez quando estivesse associado a diferentes condições presentes no cenário. O risco de tombamento em curvas, por exemplo, poderia ser ativado pela condição de largura excessiva da carga, mas também por outras condições informadas, como presença de curvas fechadas, geometria desfavorável da rota ou condições climáticas adversas. Essa recorrência indicava que diferentes aspectos da operação apontavam para a pertinência do mesmo risco.

Para representar essa recorrência, o modelo utilizou uma frequência de ativação. Essa frequência não foi entendida como probabilidade estatística de ocorrência, pois o artefato não se baseava em séries históricas de acidentes ou falhas. Sua função era indicar quantas vezes determinado risco havia sido acionado pelas condições presentes no cenário analisado. Em outros termos, a frequência expressava o grau de aderência do risco à configuração operacional informada. A partir dessa contagem, cada risco ativado passou a apresentar uma frequência bruta, correspondente ao número de vínculos acionados no cenário.

Em seguida, o modelo recuperava, no banco de riscos, o peso de impacto previamente atribuído a cada evento ativado. Esse impacto não era recalculado na camada de processamento, ele já havia sido definido na etapa de estruturação do banco de riscos, com base na gravidade potencial das consequências do evento. Assim, o processamento analítico combinava dois elementos distintos: a frequência, derivada das condições operacionais do cenário e o impacto, derivado da qualificação técnica do risco no banco.

A criticidade foi calculada a partir da combinação entre esses dois elementos.

Enquanto a frequência indicava a força contextual de ativação do risco, o impacto representava sua severidade potencial. Desse modo, a criticidade não correspondia a um atributo fixo do evento, mas a uma medida resultante da relação entre o risco cadastrado e as condições específicas da operação analisada.

A lógica de cálculo adotada na primeira versão do artefato pode ser representada pela seguinte expressão:

$$C = F \cdot I$$

Em que:

C corresponde à criticidade do risco;

F corresponde à frequência de ativação do risco no cenário projetado;

I corresponde ao impacto atribuído ao risco no banco de riscos.

Essa formulação permitiu diferenciar riscos que, embora tivessem o mesmo impacto cadastrado, apresentavam níveis distintos de aderência ao cenário. Um risco de impacto elevado poderia apresentar criticidade menor caso fosse ativado por poucas condições. Da mesma forma, um risco de impacto intermediário poderia alcançar maior relevância quando acionado por diferentes condições operacionais simultaneamente. Com isso, a priorização não se apoiava apenas na severidade abstrata dos eventos, mas também na sua relação com o contexto específico da operação.

É importante destacar que, nessa primeira versão do artefato, a criticidade foi calculada exclusivamente pela combinação entre frequência normalizada e impacto. Não foram incorporados, nesse estágio, fatores adicionais de majoração sistêmica ou ponderações por famílias de risco. Essa opção manteve o processamento inicial mais simples e permitiu avaliar a consistência da lógica central do modelo antes de introduzir camadas posteriores de refinamento.

O resultado do processamento analítico foi a geração de um conjunto de riscos ativados, cada um acompanhado de sua frequência normalizada, impacto e criticidade calculada. Essa etapa preparava os dados para a camada seguinte, responsável pela síntese e apresentação dos resultados ao usuário. Portanto, o processamento analítico não se limitava a identificar quais riscos estavam relacionados ao cenário; ele organizava esses riscos segundo uma medida comparável de relevância, permitindo que a análise avançasse da identificação para a priorização.

Assim, a quarta camada constituiu o núcleo de cálculo da primeira versão do artefato. Sua função foi transformar os dados operacionais fornecidos pelo usuário em uma leitura analítica dos riscos pertinentes ao cenário. Ao combinar ativação contextual, frequência normalizada e impacto, o modelo passou a diferenciar os eventos segundo sua criticidade, oferecendo uma base estruturada para apoiar a tomada de decisão preventiva antes da execução da operação.

3.3.7 Estrutura de Apresentação dos Resultados do Artefato

A quinta camada da arquitetura do artefato correspondeu à síntese e apresentação dos resultados. Depois de ativados os eventos de risco e calculada a criticidade na camada de processamento analítico, o modelo passou a organizar suas principais saídas em formatos capazes de apoiar a interpretação do cenário e a tomada de decisão. Nesse momento, os resultados deixaram de aparecer apenas como registros internos do processamento e passaram a assumir formas visuais e textuais voltadas à leitura operacional da situação analisada.

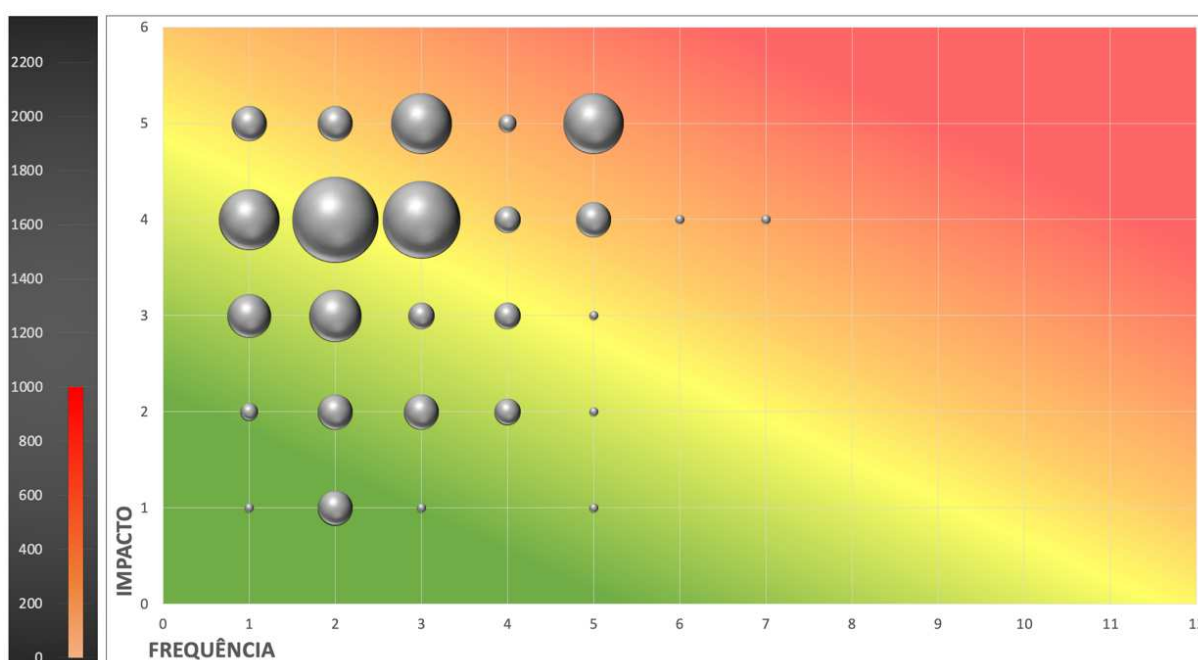
A principal saída visual da primeira versão do artefato consistiu em um gráfico de bolhas disposto sobre uma matriz cromática de criticidade, apresentado na Figura 5. Nesse gráfico, a frequência de ativação dos riscos foi representada no eixo horizontal, enquanto o impacto foi representado no eixo vertical. O plano de fundo em degradê cromático, variando das regiões de menor criticidade para as de maior criticidade, permitiu identificar visualmente a posição relativa dos eventos no plano frequência-impacto (Figura 5). Assim, áreas próximas ao canto inferior esquerdo indicavam combinações menos críticas, enquanto regiões deslocadas para o canto superior direito correspondiam a situações mais severas. Em termos práticos, esse gráfico respondia à seguinte pergunta: qual é o panorama geral dos riscos da operação?

O tamanho das bolhas representava a quantidade de riscos que compartilhavam a mesma combinação entre frequência de ativação e impacto, isto é, a mesma posição analítica no gráfico. Bolhas maiores indicavam maior concentração de eventos em determinado ponto do plano frequência-impacto. Esse recurso permitia perceber não apenas a posição dos riscos, mas também a existência de acúmulos em determinadas faixas de criticidade. A presença de bolhas maiores em áreas mais críticas constituía, portanto, um sinal de atenção, pois indicava a

concentração de múltiplos eventos em regiões de maior severidade analítica.

Ao lado do gráfico, o artefato também apresentava uma régua de criticidade, igualmente indicada na Figura 5, concebida como uma síntese visual da criticidade global do cenário analisado. Enquanto o gráfico de bolhas mostrava a distribuição dos riscos ativados no plano frequência–impacto, a régua oferecia uma leitura agregada da operação. Sua função era responder a uma questão complementar: quão crítica é a operação como um todo?

Figura 5 - Representação da Distribuição dos Riscos no Plano Frequência-impacto, acompanhada da Régua de Criticidade Global do Cenário Analisado



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como complemento a essa leitura panorâmica, o artefato também gerava uma matriz preditiva de riscos 5×5 , apresentada na Figura 6. Trata-se de uma representação visual baseada na combinação entre frequência de ativação e impacto, adaptada à natureza determinística do modelo. Diferentemente das matrizes tradicionais de risco, essa matriz não representava probabilidades estatísticas de ocorrência, mas a recorrência com que os riscos eram ativados pelas condições presentes no cenário analisado, combinada aos impactos previamente cadastrados no banco de riscos. Sua função era destacar, de forma direta, os eventos que mereciam atenção prioritária. Em outras palavras, a matriz 5×5 respondia à seguinte pergunta: quais riscos devem ser priorizados antes da execução da operação?

Figura 6 - Matriz preditiva de riscos 5 × 5 para priorização dos eventos mais críticos no cenário analisado.

		MATRIZ PREDITIVA DE RISCOS DE TRANSPORTE				
		IMPACTO				
		MUITO BAIXO	BAIXO	MÉDIO	ALTO	MUITO ALTO
FREQÜÊNCIA	MUITO PROVÁVEL	COLISÃO COM VEGETAÇÃO	COLISÃO POR LARGURA / COMPRIMENTO EXCESSIVO	COLISÃO COM VEÍCULOS	QUEDA DA CARGA POR ERRO DE MOVIMENTAÇÃO	PASSAGEM ESTREITA
	PROVÁVEL	OCIAÇÃO DE CARGA POR VENTO REPENTINO	RAIOS DE CURVA DE PASSAGEM INADEQUADOS	DANO IRREVERSÍVEL À CARGA NO TRANSPORTE	COLISÃO COM ESTRUTURAS	COLISÃO COM PESSOAS
	POSSÍVEL	FALHA DO OPERADOR DE GUINDASTE	PONTOS CEGOS	DISTRIBUIÇÃO DESIGUAL DO PESO DA CARGA TRANSPORTADA	ROUBO / VANDALISMO DA CARGA EM PARADAS NÃO PROGRAMADAS	TOMBAMENTO EM CURVAS
	IMPROVÁVEL	CAPOTAMENTO DO GUINDASTE POR SOLO INSTÁVEL	QUEDA DA CARGA POR FALHA DE EQUIPAMENTO	VEÍCULOS DE TRANSPORTE INADEQUADOS	TOMBAMENTO EM ACÍLVES / DECLIVES	DESCARGA POR CONTATO COM A REDE ELÉTRICA
	RARO	PONTOS OCOS E RUPTURAS NA SUPERFÍCIE DA ESTRADA	CAPOTAMENTO DO GUINDASTE POR SOBRECARGA	QUEDA DA CARGA POR FIXAÇÃO INADEQUADA	DANO IRREVERSÍVEL À CARGA NO IÇAMENTO	DANO VISÍVEL E REPARÁVEL À CARGA POR IMPACTO NO TRAJETO

LEGENDA			
CRÍTICO	ALTO	MÉDIO	BAIXO

Fonte: Elaborado pelo autor.

Além das saídas visuais, o modelo produzia uma lista ranqueada de riscos, organizada a partir do valor de criticidade calculado para cada evento ativado. Essa ordenação permitia identificar, entre todos os riscos pertinentes ao cenário, aqueles que demandavam maior atenção gerencial. O ranking aprofundava a leitura oferecida pelo gráfico e pela matriz, pois individualizava os eventos prioritários e permitia ao usuário reconhecer quais riscos deveriam orientar as ações preventivas da operação.

Uma vez identificados os riscos prioritários, o artefato recuperava, na camada de banco de riscos, as medidas preventivas ou mitigadoras associadas a cada evento. Esse mecanismo conferia ao modelo uma dimensão não apenas diagnóstica e analítica, mas também prescritiva. Em vez de se limitar a indicar quais riscos eram mais críticos, o artefato associava cada evento priorizado a um conjunto de ações previamente cadastradas. Com isso, a pergunta respondida pelo modelo deixava de ser apenas “o que é mais crítico?” e passava a incluir também: “o que pode ser feito diante disso?”.

Um exemplo dessa lógica é o risco de colisão com veículos, que poderia ser ativado por diferentes condições do cenário, como transporte em período noturno ou bloqueio de faixa pelo guindaste móvel. Quando esse evento alcançava criticidade elevada, o modelo recuperava medidas como implantação de plano de tráfego, uso

de barreiras físicas temporárias, instalação de luzes de alerta e alarmes sonoros em guindastes e veículos, além da restrição da circulação de veículos na área operacional durante o içamento. Outro exemplo é o risco de gelo na superfície da via, associado à ocorrência de temperaturas negativas no trajeto. Quando priorizado, o artefato retornava medidas como uso de pneus apropriados para superfícies geladas, aplicação de materiais antiderrapantes em pontos críticos da rota, redução da velocidade, capacitação dos motoristas para condução em superfícies congeladas e inspeções prévias do trajeto.

Em síntese, a primeira versão do artefato apresentava uma natureza simultaneamente diagnóstica, analítica e prescritiva. Diagnóstica, porque identificava os eventos de risco ativados no cenário; analítica, porque os organizava segundo frequência de ativação, impacto e criticidade; e prescritiva, porque vinculava os riscos priorizados a medidas preliminares de prevenção ou mitigação. Em conjunto, o gráfico de bolhas, a régua de criticidade, a matriz preditiva 5×5 e o ranking de riscos tornavam visível a proposta central do artefato: oferecer uma leitura estruturada, contextualizada e operacionalmente útil dos riscos associados ao transporte de módulos.

As saídas do artefato consolidaram o processo analítico desenvolvido nas camadas anteriores. Ao organizar os riscos em diferentes formas de representação, o modelo materializou o requisito de priorização preventiva, permitindo identificar os eventos mais críticos antes da execução da operação. Paralelamente, ao explicitar a relação entre entradas, regras de associação, processamento e resultados, a estrutura de apresentação contribuiu para a transparência e a interpretabilidade da análise.

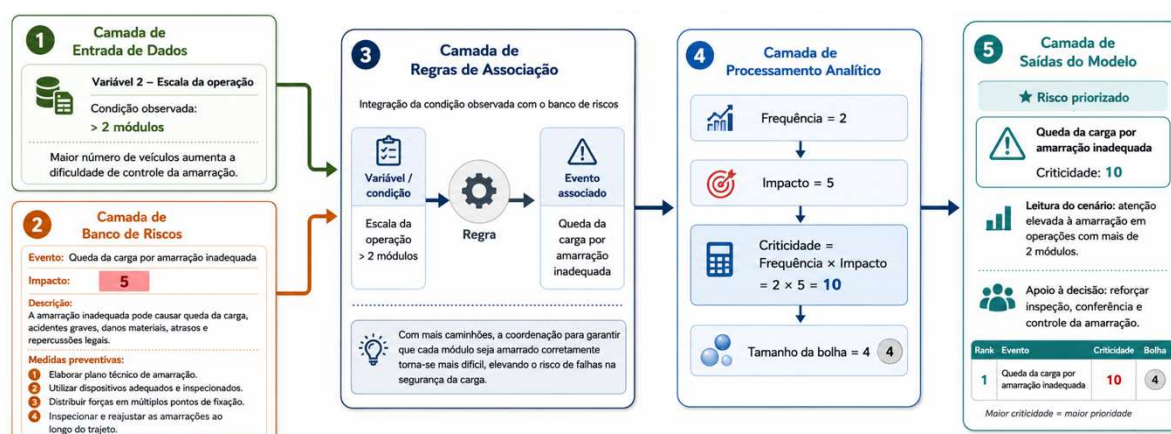
3.3.8 Fluxo de Dados

A Figura 7 evidencia o fluxo de dados que percorre as diferentes camadas do artefato, demonstrando como as informações operacionais inseridas pelo usuário são progressivamente interpretadas, associadas, processadas e convertidas em resultados analíticos. Esse fluxo tem início na camada de entrada de dados, onde cada variável registra uma condição específica da operação. A depender da resposta atribuída a essa variável, o dado é conduzido à camada de regras de associação, que verifica quais riscos são ativados por aquela condição operacional.

Em seguida, os riscos identificados são vinculados ao banco de riscos, de onde são recuperadas suas informações técnicas, como código, descrição, impacto, justificativa e medidas de mitigação. Dessa forma, o dado inicial não permanece isolado, mas passa a integrar uma cadeia analítica que conecta condição operacional, risco associado, impacto atribuído e resposta preventiva sugerida.

Na sequência, esse conjunto de informações é encaminhado à camada de processamento analítico, responsável por organizar os riscos ativados e calcular sua criticidade conforme a lógica definida pelo modelo. Os resultados processados são então direcionados à camada de saídas, onde são apresentados de forma sintética e visual, permitindo ao usuário compreender quais riscos demandam maior atenção no planejamento da operação. Assim, o diagrama explicita a lógica de circulação da informação no artefato: cada resultado produzido deriva de um percurso rastreável dos dados, desde a entrada operacional até a síntese final dos riscos.

Figura 7 - Fluxo de dados do artefato



Fonte: Elaborado pelo autor.

Entretanto, é importante destacar que essa representação corresponde a uma dissecação parcial do funcionamento do artefato, e não à simulação integral de um cenário operacional. Como apenas um risco é isolado para fins explicativos, os resultados tendem a apresentar distorções em relação ao comportamento real do modelo, pois não há o conjunto global de riscos ativados no cenário para permitir a comparação relativa da criticidade. Assim, a Figura 7 deve ser interpretada como um recurso de explicação do fluxo de dados e da lógica interna do modelo, e não como uma demonstração completa da priorização de riscos em uma operação.

3.4 ESTRATÉGIA E PROCEDIMENTOS DE AVALIAÇÃO DO ARTEFATO

A avaliação do artefato ocupa papel central nesta pesquisa, pois é por meio dela que se examina se a solução proposta, de fato, responde ao problema que motivou seu desenvolvimento. Em uma abordagem orientada pelo método DSR, não basta construir um artefato conceitualmente coerente. É necessário também verificar se ele funciona de maneira consistente, se representa adequadamente o problema investigado e se produz resultados úteis para a prática. Por essa razão, a avaliação não foi tratada nesta tese como uma etapa isolada e posterior, mas como parte do próprio processo de desenvolvimento do modelo.

Essa opção é coerente com a lógica iterativa do DSR. Em vez de assumir que o artefato nasce pronto e apenas precisa ser testado ao final, parte-se do entendimento de que sua utilidade e sua consistência se tornam mais evidentes à medida que ele é aplicado, observado, ajustado e reaplicado. A avaliação, nesse sentido, não teve função apenas confirmatória, mas também formativa, contribuindo para o amadurecimento progressivo da solução.

Com base nisso, a estratégia de avaliação adotada nesta tese foi organizada em torno de três dimensões complementares: coerência analítica, capacidade de representação dos cenários operacionais e utilidade para apoio à decisão.

A primeira dimensão refere-se à coerência analítica do artefato. O que se buscou examinar, nesse caso, foi se a lógica interna do modelo se mantinha consistente ao longo de suas diferentes etapas. Isso envolveu verificar se as variáveis operacionais estavam adequadamente relacionadas às regras de associação, se os eventos de risco ativados eram compatíveis com as condições do cenário, se o cálculo da criticidade produzia resultados coerentes com a lógica proposta e se os resultados gerados guardavam correspondência com as entradas fornecidas. Em outras palavras, interessava verificar se o artefato se sustentava como estrutura analítica.

A segunda dimensão diz respeito à capacidade de representação dos cenários operacionais. Como o modelo foi concebido para lidar com a variabilidade própria do transporte de módulos, tornou-se necessário avaliar se o conjunto de variáveis adotado era capaz de descrever diferentes configurações de operação de forma suficientemente sensível. Assim, essa dimensão buscou examinar se o artefato reagia de maneira coerente a alterações no contexto analisado, produzindo mudanças compatíveis na ativação dos riscos e na criticidade resultante. O ponto central aqui

não era apenas saber se o modelo gerava resultados, mas se esses resultados variavam de forma plausível quando o cenário se modificava.

A terceira dimensão envolve a utilidade do artefato para apoio à decisão. Mais do que organizar riscos em uma estrutura analítica, o modelo foi concebido para auxiliar a priorização preventiva e oferecer suporte à interpretação do cenário antes da execução da operação. Por isso, tornou-se importante avaliar se as saídas produzidas pelo modelo, como o gráfico de bolhas, a régua de criticidade, a matriz preditiva 5×5 , o ranking de riscos e as diretrizes de mitigação, eram capazes de oferecer uma leitura clara, inteligível e útil para o planejamento operacional.

A operacionalização dessa avaliação ocorreu por meio de duas aplicações sucessivas do artefato, intercaladas por um processo de refinamento. A primeira aplicação teve caráter exploratório e permitiu observar o comportamento inicial do modelo diante de uma operação real de transporte modular. Nessa fase, o interesse recaiu sobre aspectos como inteligibilidade da arquitetura, adequação das variáveis selecionadas, consistência das regras de associação e coerência geral dos resultados produzidos.

Com base nas evidências obtidas nessa primeira aplicação, procedeu-se ao refinamento do artefato. Esse processo envolveu ajustes na arquitetura do modelo, revisão das variáveis consideradas, aprimoramento do banco de riscos, reorganização das regras de associação e ajustes na forma de cálculo e apresentação dos resultados. O objetivo dessa etapa não foi simplesmente corrigir o modelo, mas aumentar sua aderência ao problema investigado e melhorar sua capacidade de leitura analítica dos cenários operacionais.

Na sequência, foi realizada uma segunda aplicação do artefato já refinado. Diferentemente da primeira, essa nova aplicação teve caráter mais propriamente avaliativo, pois permitiu examinar o desempenho do modelo após os ajustes realizados. Nesse momento, buscou-se verificar se o artefato apresentava maior coerência interna, melhor capacidade de representação do contexto operacional e maior utilidade para a priorização dos riscos.

A avaliação empírica do artefato foi realizada em duas operações distintas, sendo a primeira conduzida em Portugal e a segunda no Brasil. A adoção de casos inseridos em mercados diferentes permitiu ampliar a heterogeneidade contextual da avaliação, reduzindo a dependência da análise em relação a práticas e condicionantes estritamente locais. Com isso, buscou-se observar o comportamento do artefato em

contextos operacionais não coincidentes, o que torna mais consistente a apreciação de sua utilidade e de sua lógica analítica.

Cada uma dessas aplicações foi acompanhada por uma entrevista semiestruturada com um especialista diretamente vinculado à respectiva operação. Essas entrevistas integraram a estratégia de avaliação do artefato porque permitiram complementar a observação do comportamento do modelo com a percepção de profissionais experientes, inseridos no contexto real de decisão. Seu objetivo foi examinar a coerência da lógica analítica, a adequação das variáveis adotadas e a utilidade dos resultados gerados como apoio à decisão. A opção por entrevistas semiestruturadas mostrou-se adequada por permitir, ao mesmo tempo, manter certa comparação entre os dois casos e abrir espaço para observações qualitativas mais aprofundadas. Os resultados dessas entrevistas serão apresentados e discutidos nas seções específicas de avaliação.

A avaliação final do artefato resulta, portanto, da análise integrada dessas diferentes frentes: as aplicações sucessivas do modelo, o processo de refinamento e a escuta qualificada de especialistas. Em vez de se apoiar em uma validação única e pontual, a estratégia adotada permitiu observar o artefato em diferentes estágios de maturidade e em contextos operacionais distintos, o que torna a apreciação de suas potencialidades e limitações mais robusta.

Por fim, é importante destacar que a avaliação realizada nesta tese combina uma dimensão analítica, voltada à coerência interna do modelo, com uma dimensão empírica qualitativa, ancorada em sua aplicação e na apreciação de especialistas. Não se trata, portanto, de uma validação estatística ou de uma verificação em larga escala, mas de uma estratégia compatível com o estágio de desenvolvimento do artefato e com os objetivos da pesquisa. Nessa condição, ela oferece base suficiente para examinar a utilidade da solução proposta, sua capacidade de apoiar a interpretação preventiva dos riscos e os limites que ainda permanecem. Os resultados dessa avaliação serão apresentados e discutidos nos capítulos seguintes.

4 PRIMEIRO CICLO DE AVALIAÇÃO EXPLORATÓRIA - PORTUGAL

A oportunidade de realização deste primeiro ciclo de avaliação exploratória surgiu no âmbito do Programa Institucional de Doutorado Sanduíche no Exterior (PDSE), financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), o que viabilizou o desenvolvimento de parte desta pesquisa em Portugal durante o período de setembro de 2024 a fevereiro de 2025. Nesse intervalo, as atividades foram conduzidas sob supervisão do Professor Ricardo M. S. F. Almeida, no Instituto Politécnico de Viseu (IPV), onde foram aprofundados aspectos teóricos, metodológicos e empíricos da investigação, incluindo o acompanhamento de uma operação real de transporte modular e a aplicação inicial do artefato.

Foi esse contexto acadêmico e institucional que se tornou possível realizar o primeiro teste da versão inicial do modelo em uma situação concreta de prática. Mais do que buscar uma validação conclusiva do artefato, esta etapa teve como objetivo examinar seu comportamento inicial diante de uma operação real, observando em que medida os riscos indicados pelo modelo dialogavam com as condições efetivamente verificadas em campo e com a percepção do especialista participante. A interação com a empresa parceira e com o participante da pesquisa observou os procedimentos éticos previstos no estudo, vinculado ao CAAE 85966325.9.0000.5231, cuja notificação para inclusão de instituição coparticipante foi aprovada pelo Comitê de Ética em Pesquisa da Universidade Estadual de Londrina, sob o Parecer nº 7.638.843. Além disso, a empresa parceira apresentou formalmente sua concordância com a participação na pesquisa.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO CONTEXTO OPERACIONAL

O primeiro ciclo de avaliação exploratória foi conduzido com base em uma operação real de transporte modular acompanhada junto à uma empresa de construção portuguesa. Realizada em 12 de fevereiro de 2025, a operação envolveu o transporte de quatro módulos entre a Rua de Cidres, do nº 1510 ao nº 407, no município de Matosinhos, Portugal.

O objetivo da operação era transportar o conjunto de módulos que formava uma residência unifamiliar organizada em dois níveis, com ambientes de estar, jantar, cozinha, lavabo e área de serviço no pavimento inferior e duas suítes no pavimento

superior. Tratava-se, portanto, de um sistema modular de elevada completude, composto por unidades volumétricas.

O carregamento do primeiro módulo na indústria (Figura 8), teve início às 08h18, houve pausa para almoço entre 12h00 e 13h30, e o último módulo foi posicionado em seu local definitivo às 15h41, marcando o encerramento do processo. Embora o trajeto entre origem e destino fosse relativamente curto, cerca de 4 km, com duração estimada de 7 minutos, a operação mostrou que a complexidade do transporte não estava propriamente na distância percorrida, mas nas condições concretas encontradas ao longo da execução e, sobretudo, no ponto de entrega.

Figura 8 - Carregamento do módulo na unidade industrial



Fonte: Acervo do autor (2025)

O percurso era integralmente urbano, uma vez que a indústria de origem e o local de destino estavam situados na mesma cidade. Além disso, o trajeto não envolvia passagem sob viadutos nem travessia sobre pontes, o que indica que as principais restrições da operação não estavam associadas a gabaritos verticais ou limitações

estruturais da rota, mas à dinâmica viária local e às condições de chegada ao destino. Esse aspecto é importante porque mostra que, mesmo em deslocamentos intraurbanos curtos e sem obstáculos estruturais mais evidentes, o transporte modular pode apresentar elevada sensibilidade operacional.

As características dos módulos ajudam a explicar essa sensibilidade. Os documentos técnicos indicavam unidades com dimensões expressivas, incluindo peças com até 7,53 m de comprimento, larguras de até 3,90 m e alturas de 2,80 m e 3,05 m. Em contexto urbano, cargas com esse porte exigem atenção não apenas durante o deslocamento, mas também nas manobras finais, no posicionamento do conjunto transportador e no controle da descarga no destino.

No ponto de chegada, a operação apresentava um conjunto de restrições que a tornava particularmente pertinente para este primeiro ciclo de avaliação. A via era estreita (Figura 11), não havia vagas disponíveis para apoio da entrega e a largura do conjunto caminhão/módulo exigia o bloqueio parcial da circulação. Na prática, os veículos precisaram parar em frente ao lote avançando de forma significativa sobre a faixa de rolamento, o que dificultava a circulação de veículos maiores, como ônibus e caminhões, e ampliava a exposição da operação a interferências, manobras críticas e potenciais colisões no entorno imediato.

Em razão dessas interferências, houve necessidade de apoio policial em momento posterior, a fim de organizar o fluxo de veículos e dar suporte à condução da entrega. Assim, a criticidade do transporte se concentrava menos no deslocamento entre origem e destino e mais nas restrições geométricas e operacionais do trecho final.

A configuração logística mobilizada também contribui para caracterizar a complexidade da operação. O transporte foi realizado por um caminhão com plataforma rebaixada de 82 cm de altura, com três eixos e giro independente, tracionado por um cavalo mecânico de três eixos. A operação contou ainda com dois carros batedores e com um guindaste tipo Munk de quatro eixos, com capacidade máxima de carga de 25 toneladas, amplitude de 31 m e capacidade de 1,6 tonelada na condição crítica observada.

Para a fixação e acomodação dos módulos durante o transporte rodoviário, foram utilizadas cintas de amarração de poliéster com 5 cm de largura, tensionadas por meio de presilhas. Entre os módulos e a plataforma de carga, foram posicionadas quatro placas de 22 × 27 cm, confeccionadas com retalhos de pneu, atuando como

elementos de apoio e amortecimento para reduzir o contato direto, absorver parte das vibrações e minimizar possíveis atritos durante o trajeto.

Na operação de içamento realizada com guindaste tipo Munck, foram acionados os quatro estabilizadores do veículo. As sapatas dos estabilizadores foram apoiadas sobre um conjunto de elementos auxiliares (Figura 9), formado por almofadas de poliéster (40 x 40 cm) e pranchas de madeira (60 x 60 cm), utilizados para distribuir melhor as cargas transmitidas ao pavimento e reduzir a concentração de esforços pontuais. Esses apoios contribuíram para a estabilidade do equipamento durante a manobra e ajudam a caracterizar as condições materiais e operacionais em que o içamento foi executado.

Figura 9 - Elementos auxiliares de apoio utilizados sob a sapata do estabilizador do guindaste tipo Munck



Fonte: Acervo do autor (2025)

Além das limitações viárias, a configuração da entrega também impunha desafios relevantes. O guindaste precisou ser posicionado fora dos limites do terreno, realizando o içamento dos módulos por sobre o muro (Figura 10). A isso se somavam

a assimetria da carga, os desafios de equilíbrio observados durante a movimentação e as dificuldades de posicionamento do contrapeso.

A comunicação entre os participantes do transporte era realizada por ligações de celular, o que evidencia uma coordenação funcional, porém dependente de interação direta e sincronização contínua entre os envolvidos. Também se verificou incompatibilidade entre as dimensões de pelo menos um módulo e a base previamente executada no local, o que tornou o posicionamento final mais lento, mais delicado e mais suscetível a desalinhamentos e reposicionamentos sucessivos.

Figura 10 - Içamento do módulo com guindaste posicionado fora do terreno, sobrepondo o muro de divisa.



Fonte: Acervo do autor (2025)

Outro aspecto relevante foi a necessidade de utilizar área de armazenagem temporária no terreno, uma vez que um dos módulos foi entregue em sequenciamento incorreto. Embora essa situação não tenha impedido a continuidade da operação, ela introduziu uma exigência logística adicional, ao demandar acomodação provisória da unidade até que sua posição correta pudesse ser compatibilizada com a ordem

prevista. Esse episódio reforça que a etapa final do transporte não depende apenas da chegada física da carga ao destino, mas também da coordenação adequada entre entrega, espaço disponível e sequência operacional.

As condições meteorológicas observadas ao longo da operação não se configuraram como fator crítico. No período acompanhado, registraram-se temperatura aproximada de 15 °C, ausência de chuva, céu com poucas nuvens, umidade relativa em torno de 78% e vento de cerca de 10 km/h. Ainda que esses dados fossem relevantes para a leitura do contexto, eles não se mostraram suficientemente severos para agravar de forma decisiva a operação.

Isso é relevante, porque indica que a criticidade observada não decorreu de uma combinação excepcional de fatores adversos, mas principalmente das restrições espaciais, geométricas e operacionais concentradas no trecho final do transporte e no ponto de entrega. Por se tratar de uma operação realizada em contexto urbano português, a análise também permitiu observar condicionantes associados à circulação em malhas viárias consolidadas, nas quais restrições de largura, raios de manobra e acessibilidade local podem exercer influência significativa sobre a execução do transporte.

Dessa forma, a operação acompanhada mostrou-se especialmente adequada para este primeiro ciclo de avaliação exploratória. Seu interesse analítico não estava em representar um transporte longo ou extraordinário, mas em condensar, em uma situação real, um conjunto de condicionantes capazes de tensionar a etapa final do transporte modular. Foi justamente essa combinação entre trajeto curto, caráter urbano e elevada complexidade local que tornou a operação pertinente para examinar, de forma inicial, a capacidade do modelo de refletir riscos efetivamente presentes na prática.

4.2 VARIÁVEIS OPERACIONAIS INSERIDAS NO MODELO

Enquanto a seção anterior apresentou a operação em sua materialidade concreta, esta subseção concentra-se nas variáveis operacionais que foram efetivamente convertidas em entradas do modelo. Essa distinção é importante porque nem todos os elementos observados no acompanhamento de campo foram formalizados como entradas do artefato. Parte deles teve função predominantemente descritiva, contribuindo para a caracterização mais ampla da operação, ao passo que

outra parte foi traduzida em variáveis compatíveis com a lógica analítica da primeira versão do modelo.

A seleção dessas variáveis não teve por objetivo reproduzir integralmente todos os aspectos observados na operação, mas formalizar aqueles elementos que, de acordo com a estrutura analítica do artefato, apresentavam maior capacidade de influenciar a ativação e a priorização dos riscos. Assim, a escolha das entradas baseou-se em critérios de compatibilidade com a lógica interna do modelo, relevância para o cenário de risco, observabilidade empírica e comparabilidade entre operações.

Desse modo, foram priorizadas condições operacionais passíveis de registro objetivo e com potencial efetivo de alterar a leitura preditiva do transporte, enquanto outros elementos observados em campo, embora relevantes para a compreensão qualitativa da operação, permaneceram como informações contextuais, e não como entradas formais do artefato.

Como revelado no Quadro 8, as variáveis selecionadas descrevem uma operação diurna, de curta distância, realizada por um único modal, em trajeto totalmente pavimentado, sem passagem por fronteira alfandegária e sem predominância de vias pedagiadas. Ao mesmo tempo, também formalizam condições diretamente relacionadas à entrega, como a largura excedente da carga em relação ao caminhão, a realização de dois içamentos por módulo, o posicionamento do guindaste fora do terreno, o descarregamento do caminhão também fora do terreno, o bloqueio de faixa de rolamento pelo caminhão (Figura 11) e a baixa densidade do entorno. No plano ambiental, foram inseridas variáveis referentes à ausência de chuva prevista, à faixa de vento observada e à inexistência de temperaturas negativas no trajeto.

As variáveis selecionadas constituíram a base da primeira aplicação do modelo. O propósito, como visto, não era espelhar integralmente a operação em toda a sua riqueza descritiva, mas operar com um conjunto de variáveis padronizáveis, observáveis e comparáveis, capaz de discriminar cenários de risco de forma consistente. A conversão indiscriminada de todos os detalhes observados em campo em entradas comprometeria essa coerência analítica e reduziria a capacidade de reaplicação do modelo. Foi, portanto, a partir desse conjunto delimitado de entradas que o artefato processou o cenário operacional estudado e gerou os resultados analisados na subseção seguinte.

Quadro 8 - Variáveis operacionais inseridas no modelo

Código	Descrição	Valor inserido
V1	Período predominante da operação	Diurno
V2	Escala da operação	> 2 módulos
V3	Distância entre a planta e o local de entrega	≤ 100 km
V4	Tipo modal empregado	1 tipo modal
V5	Passagem por fronteira alfandegária	Não
V6	Pavimentação do trajeto	Totalmente pavimentada
V7	Predominância de vias pedagiadas	Não
V8	Peso do módulo	< 15 ton
V9	Excedência da largura da carga em relação ao caminhão	Sim
V10	Altura total do veículo carregado	Até 4 m
V11	Experiência prévia do motorista com carga modular	Sim
V12	Número de içamentos por módulo até a entrega	2 içamentos
V13	Previsão de chuva no horário da entrega	Não
V14	Velocidade do vento no horário da entrega	0–19 km/h
V15	Finalidade hospitalar do módulo	Não
V16	Ocorrência de temperaturas negativas no trajeto	Não
V17	Modelo de entrega	Montagem direta
V18A	Posicionamento do guindaste móvel	Fora do terreno
V18B	Bloqueio de faixa de rolamento pelo guindaste móvel	Não
V19A	Local de descarregamento do caminhão	Fora do terreno
V19B	Bloqueio de faixa de rolamento pelo caminhão	Sim
V20	Densidade do entorno	Baixa
V21	Uso de guindaste móvel na operação	Sim

Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 11 - Interferência na faixa de rolamento provocada pelo caminhão de transporte modular em trecho urbano.



Fonte: Acervo do autor (2025)

4.3 RESULTADOS GERADOS PELA APLICAÇÃO DO MODELO

A aplicação da primeira versão do modelo à operação acompanhada em Portugal gerou um conjunto de resultados analíticos voltados à leitura da criticidade do transporte, à priorização dos riscos mais sensíveis ao cenário observado e à proposição de medidas de mitigação compatíveis com esses resultados. Em vez de se limitar a uma listagem de eventos de risco, o artefato produziu uma saída estruturada em diferentes níveis de leitura, permitindo tanto uma visão sintética da exposição global da operação quanto uma análise mais detalhada dos riscos priorizados.

No relatório da operação, esses resultados foram organizados em três planos complementares. O primeiro corresponde à criticidade operacional total, apresentada por meio da comparação entre um cenário menos favorável, o cenário operacional projetado para a operação analisada e um cenário mais favorável. O segundo

corresponde à matriz preditiva de riscos, que limita a exposição detalhada aos 25 riscos mais significativos. O terceiro reúne as medidas de mitigação associadas aos riscos priorizados, reforçando o caráter aplicado do modelo e sua utilidade como instrumento de apoio à decisão.

4.3.1 A Criticidade Operacional Global

A primeira saída gerada pelo modelo consistiu na leitura da criticidade operacional global da operação analisada. Para isso, o relatório apresentou três cenários comparativos: um cenário projetado menos favorável, um cenário correspondente às condições efetivamente observadas e um cenário projetado mais favorável. Essa organização permitiu situar a operação portuguesa em uma escala comparativa de exposição ao risco, evitando que sua criticidade fosse interpretada apenas como um valor isolado. A comparação visual entre esses três cenários pode ser observada na Figura 12.

No cenário menos favorável, a criticidade total atingiu 2.330 pontos, representando a condição de maior exposição dentro da simulação realizada pelo modelo. No cenário correspondente à operação analisada, esse valor foi reduzido para 1.000 pontos, enquanto, no cenário mais favorável, a criticidade caiu para 284 pontos. Esses valores não devem ser interpretados como medidas absolutas de risco, mas como índices comparativos produzidos pelo artefato para indicar a posição relativa da operação entre condições mais ou menos críticas.

A comparação entre os três cenários mostra que a operação não foi interpretada pelo modelo como uma condição extrema de criticidade, mas também não correspondeu ao cenário de menor exposição possível. O valor de 1.000 pontos posicionou-se entre os dois cenários de referência, indicando uma condição intermediária de risco operacional. Em termos práticos, isso significa que a operação apresentava controles e condições favoráveis suficientes para afastá-la de uma situação crítica, mas ainda mantinha fatores de atenção, como restrições de chegada, interferências viárias e exigências de içamento em espaço limitado.

Figura 12 - Comparação dos cenários de criticidade operacional: (a) menos favorável, (b) projetado, (c) mais favorável.

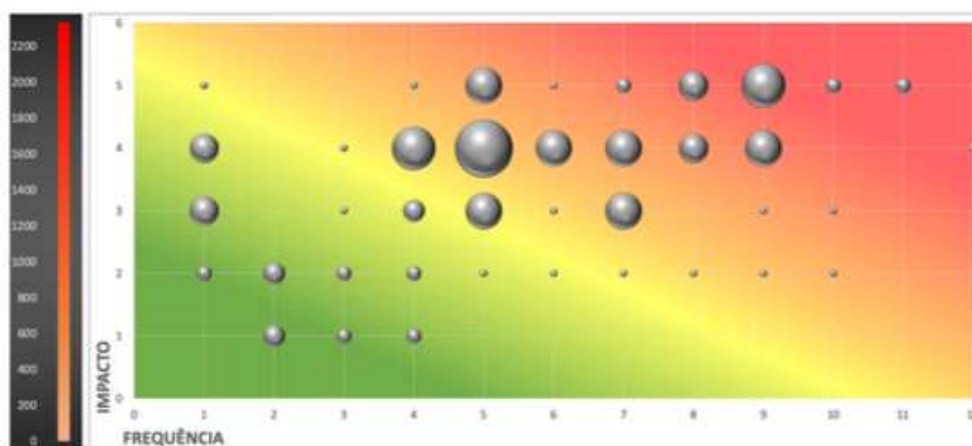


Figura 2- Cenário Operacional Menos Favorável

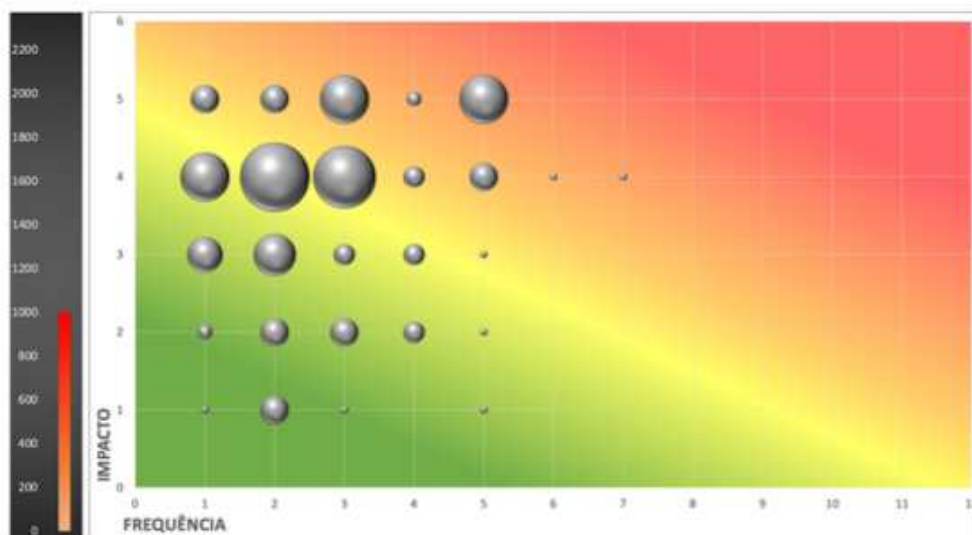


Figura 3- Cenário Operacional Projetado

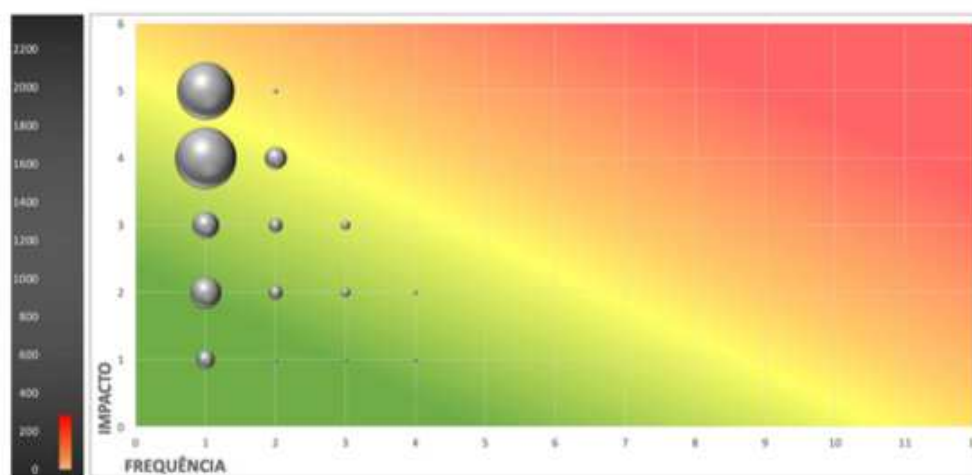


Figura 4- Cenário Operacional Mais Favorável

Fonte: Elaborado pelo Autor

Por outro lado, a operação ainda se distanciava do cenário mais favorável, no qual as restrições de acesso, interferência no tráfego, limitações espaciais e exigências de controle da manobra seriam substancialmente reduzidas. Assim, o valor de 1.000 pontos funciona menos como número absoluto e mais como indicador sintético da posição relativa da operação dentro do intervalo de criticidade simulado pelo modelo.

A representação gráfica adotada no relatório também contribui para essa interpretação. O eixo horizontal indica a frequência de ativação dos eventos de risco, o eixo vertical expressa a severidade do impacto e o tamanho das bolhas representa a repetição de riscos com a mesma combinação analítica. Assim, quanto mais à direita e acima se posiciona um risco, maior sua criticidade. No cenário correspondente à operação analisada, a distribuição das bolhas indica redução em relação ao cenário menos favorável, embora ainda preserve concentrações em zonas que demandam atenção gerencial, como mostra a Figura 12.

4.3.2 Riscos Prioritários Identificados pela Matriz Preditiva

Além da leitura global da criticidade operacional, a aplicação do modelo gerou uma matriz preditiva voltada à priorização dos riscos mais relevantes da operação. A adoção de uma matriz 5×5 justifica-se por se tratar de uma estrutura amplamente utilizada em processos de análise e gestão de riscos, especialmente por permitir a representação combinada entre níveis de ocorrência e severidade do impacto.

No contexto desta pesquisa, entretanto, essa estrutura não foi empregada como uma estimativa probabilística absoluta, mas como um recurso analítico para organizar, comparar e hierarquizar os riscos ativados pelas condições específicas da operação analisada.

Embora o banco de dados do artefato fosse mais amplo, o relatório limitou a exposição detalhada aos 25 riscos mais significativos, dispostos na matriz segundo seus níveis relativos de ocorrência condicionada e impacto. Essa organização permitiu destacar os eventos de risco que, diante do cenário analisado, exigiam maior atenção gerencial e poderiam orientar medidas preventivas mais direcionadas. A síntese gráfica dessa priorização é apresentada na Figura 13.

Figura 13 - Matriz preditiva de riscos da operação analisada

		MATRIZ PREDITIVA DE RISCOS DE TRANSPORTE				
		IMPACTO				
		MUITO BAIXO	BAIXO	MÉDIO	ALTO	MUITO ALTO
FREQUÊNCIA	MUITO PROVÁVEL	COLISÃO COM VEGETAÇÃO	COLISÃO POR LARGURA / COMPRIMENTO EXCESSIVO	COLISÃO COM VEÍCULOS	QUEDA DA CARGA POR ERRO DE MOVIMENTAÇÃO	PASSAGEM ESTREITA
	PROVÁVEL	OCILAÇÃO DE CARGA POR VENTO REPENTINO	RAIOS DE CURVA DE PASSAGEM INADEQUADOS	DANO IRREVERSÍVEL À CARGA NO TRANSPORTE	COLISÃO COM ESTRUTURAS	COLISÃO COM PESSOAS
	POSSÍVEL	FALHA DO OPERADOR DE GUINDASTE	PONTOS CEGOS	DISTRIBUIÇÃO DESIGUAL DO PESO DA CARGA TRANSPORTADA	ROUBO / VANDALISMO DA CARGA EM PARADAS NÃO PROGRAMADAS	TOMBAMENTO EM CURVAS
	IMPROVÁVEL	CAPOTAMENTO DO GUINDASTE POR SOLO INSTÁVEL	QUEDA DA CARGA POR FALHA DE EQUIPAMENTO	VEÍCULOS DE TRANSPORTE INADEQUADOS	TOMBAMENTO EM ACÍLVES / DECLIVES	DESCARGA POR CONTATO COM A REDE ELÉTRICA
	RARO	PONTOS OCOS E RUPTURAS NA SUPERFÍCIE DA ESTRADA	CAPOTAMENTO DO GUINDASTE POR SOBRECARGA	QUEDA DA CARGA POR FIXAÇÃO INADEQUADA	DANO IRREVERSÍVEL À CARGA NO IÇAMENTO	DANO VISÍVEL E REPARÁVEL À CARGA POR IMPACTO NO TRAJETO

LEGENDA			
CRÍTICO	ALTO	MÉDIO	BAIXO

Fonte: Elaborado pelo Autor

No conjunto priorizado, o risco de passagem estreita apareceu como o mais crítico. O relatório o descreve como a possibilidade de colisões, atrasos ou danos decorrentes da circulação e da parada do veículo em rotas com restrições físicas de largura e altura, sobretudo quando as dimensões da carga ou do veículo se aproximam dos limites seguros do trajeto. No cenário analisado, esse risco foi classificado como crítico, com fator de impacto 4 e frequência 7, o que dialoga diretamente com a configuração observada na operação portuguesa.

Também entre os riscos classificados como críticos estiveram a queda da carga por erro de movimentação e a colisão com pessoas, ambos com fator de impacto 5 (máximo) e frequência 5 (máximo). No primeiro caso, o relatório associa o risco a falhas humanas, técnicas ou organizacionais nas etapas de movimentação da carga, incluindo imprecisões operacionais, cálculos inadequados de centro de gravidade e falhas de comunicação.

No segundo, a ênfase recai sobre a possibilidade de impacto ou atropelamento de trabalhadores e terceiros durante as operações de movimentação, especialmente em situações com circulação inadequada de pessoas, sinalização insuficiente ou baixa coordenação entre os envolvidos. Esses resultados mostram que a criticidade da operação não se restringia à integridade da carga, mas alcançava também a

segurança do entorno e das equipes mobilizadas.

Logo abaixo desse primeiro grupo, a matriz destacou riscos classificados como altos, entre eles colisão com veículos, colisão com estruturas, tombamento em curvas, colisão por largura/comprimento excessivo, dano irreversível à carga no transporte, roubo ou vandalismo da carga em paradas não programadas e descarga por contato com a rede elétrica. Em conjunto, esses riscos mostram que o modelo captou não apenas vulnerabilidades associadas à circulação do conjunto transportador, mas também fragilidades relacionadas à geometria da carga, à interação com o espaço urbano, à estabilidade operacional e à exposição a interferências externas. A distribuição desses riscos na matriz pode ser visualizada na Figura 13.

A síntese final do relatório ajuda a interpretar essa priorização ao agrupar os principais riscos em quatro núcleos de vulnerabilidade: as dimensões da carga, em especial sua largura excedente, o bloqueio de faixas de rolamento durante o descarregamento, a complexidade do içamento, agravada pelo uso de guindaste móvel fora do terreno e por dois içamentos por módulo e a vulnerabilidade a roubo ou vandalismo, mesmo em operação de curta distância. Essa leitura mostra que o modelo não apenas listou eventos isolados, mas identificou padrões de criticidade coerentes com as condições operacionais já descritas nas subseções anteriores.

4.3.3 Medidas de Mitigação Associadas aos Riscos Prioritários

Além de identificar e hierarquizar os principais riscos da operação, a aplicação do modelo também gerou um conjunto de medidas preventivas e de mitigação compatíveis com o cenário analisado. Essas medidas foram concentradas, sobretudo, nos riscos classificados como críticos e altos na matriz preditiva, representados, respectivamente, pelas faixas vermelha e laranja. Essa delimitação foi implementada porque, em operações reais, não é viável tratar todos os riscos com o mesmo nível de profundidade, especialmente diante de restrições de tempo, recursos, equipe e capacidade operacional.

Por isto, o artefato não se limita a produzir uma leitura diagnóstica da criticidade, mas avança no sentido de apoiar a tomada de decisão ao indicar ações direcionadas ao tratamento antecipado dos riscos que demandam maior atenção gerencial. No relatório enviado para a empresa, essas medidas aparecem tanto de

forma específica, associadas a cada risco priorizado, quanto de forma sintética, na conclusão geral do documento.

No caso do risco de passagem estreita, as medidas propostas concentraram-se principalmente no levantamento prévio das dimensões das passagens, na comparação entre o gabarito do trajeto e as dimensões do veículo e da carga, no uso de escoltas técnicas e na articulação com órgãos locais para sinalização, redirecionamento do tráfego e eventual interdição temporária da via. Essas recomendações são coerentes com a configuração da operação observada, marcada por via estreita, parada do caminhão em faixa de rolamento e forte interferência na circulação local.

Para o risco de queda da carga por erro de movimentação, o relatório destacou a necessidade de operadores experientes, sistemas de comunicação claros entre os participantes da operação e planejamento prévio da trajetória de movimentação. De modo semelhante, no risco de colisão com pessoas, as recomendações enfatizaram delimitação de áreas de acesso restrito, sinalização visível, dispositivos de alerta e presença de supervisão em operações críticas. Em conjunto, essas medidas mostram que parte importante da mitigação depende da qualificação da equipe, da comunicação operacional e do controle do entorno imediato.

No grupo dos riscos classificados como altos, as propostas de mitigação mantiveram essa lógica de articulação entre planejamento, controle espacial e segurança operacional. Para colisão com veículos e colisão com estruturas, o relatório recomendou, entre outras ações, definição de planos de tráfego, instalação de barreiras físicas temporárias, uso de sistemas de monitoramento e emprego de sinalizadores treinados. Já para tombamento em curvas e colisão por largura/comprimento excessivo, as recomendações se concentraram no planejamento prévio da rota, no estabelecimento de limites específicos de velocidade, no uso de escolta especializada e na escolha de trajetos mais compatíveis com as dimensões da carga. Também foram indicadas medidas voltadas à proteção da integridade do módulo, como contratação de seguro adequado, inspeção detalhada dos equipamentos e monitoramento em tempo real do transporte.

Já os riscos ligados à segurança patrimonial e à interação com infraestruturas sensíveis, o relatório propôs medidas específicas para roubo ou vandalismo da carga em paradas não programadas e para descarga por contato com a rede elétrica. No primeiro caso, destacaram-se o rastreamento em tempo real, a seleção de pontos

seguros de parada, o uso de sistemas de comunicação bidirecional e a eventual articulação com autoridades policiais.

No segundo, foram sugeridos mapeamento prévio das redes elétricas, manutenção de distâncias seguras, possível desenergização temporária e uso de barreiras e sinalização de alerta. Essas recomendações reforçam que o modelo reconheceu não apenas vulnerabilidades ligadas à circulação e ao içamento, mas também ameaças associadas à proteção da carga e à segurança da equipe em ambiente urbano.

A síntese final do relatório organiza essas recomendações em quatro eixos principais: planejamento detalhado da rota, reforço da segurança da carga, gestão do tráfego durante o descarregamento e treinamento específico para operações com guindaste móvel. Em termos analíticos, isso mostra que as medidas de mitigação não foram apresentadas como providências dispersas, mas como respostas diretamente relacionadas aos núcleos de criticidade identificados na operação: dimensões da carga, bloqueio de faixa de rolamento, complexidade do içamento e vulnerabilidade a interferências externas.

Em síntese, as medidas propostas pelo modelo reforçam o caráter aplicado do artefato. Ao associar cada risco prioritário a ações específicas de prevenção e controle, o sistema passa a oferecer não apenas um diagnóstico das vulnerabilidades da operação, mas também uma orientação prática para sua prevenção.

4.4 APRECIÇÃO DO ESPECIALISTA DA EMPRESA PORTUGUESA

A entrevista com o especialista permitiu examinar a primeira aplicação do modelo não apenas em termos de coerência analítica, mas também sob a ótica de sua utilidade prática no contexto operacional da empresa. De modo geral, a lógica do artefato foi considerada pertinente e promissora, ainda que em estágio inicial de desenvolvimento. Na transcrição, o especialista afirma que o modelo estava “correto” e que se tratava de algo a ser continuamente aperfeiçoado, o que reforça o caráter exploratório deste primeiro ciclo de avaliação e afasta qualquer pretensão de validação conclusiva nesta etapa.

No que se refere ao conteúdo dos resultados, houve concordância com parte relevante dos riscos priorizados pelo modelo. Em especial, foram considerados coerentes os riscos ligados à passagem estreita e à queda da carga por erro de

movimentação, o que dialoga com a configuração da operação observada, marcada por via urbana restrita, bloqueio parcial da faixa de rolamento e descarregamento realizado com guindaste móvel posicionado fora do terreno. O próprio relatório associava o cenário analisado a esse tipo de vulnerabilidade ao destacar a largura excedente da carga, o bloqueio de faixa pelo caminhão e a complexidade do içamento com guindaste fora do terreno.

No entanto, a apreciação do especialista revelou também divergências importantes quanto ao peso atribuído a alguns riscos. O ponto mais sensível dizia respeito à assimetria da carga, considerada por ele uma das maiores dificuldades reais da operação. No seu entendimento, a presença de uma escada em um dos módulos alterava significativamente o comportamento do módulo durante os içamentos, aumentando a instabilidade e a sensibilidade do centro de gravidade. Por essa razão, o especialista não concordou com a classificação desse aspecto como risco apenas médio, entendendo que, naquele contexto específico, ele deveria ser tratado como crítico.

Também houve discordância em relação à ênfase atribuída a colisão com pessoas como risco crítico e a tombamento em curvas como risco alto, uma vez que o trajeto realizado era muito curto e predominantemente urbano. Essas observações mostram que a entrevista não teve caráter meramente confirmatório: ela também funcionou como mecanismo de recalibração da criticidade atribuída pelo modelo a determinados eventos.

Outro resultado importante da apreciação foi a sugestão de incluir novas variáveis, com potencial para aperfeiçoar a capacidade explicativa do artefato. Entre elas, destacou-se a inclinação da via ou do terreno, apontada pelo especialista como “extremamente importante”, inclusive para o transporte, em razão de sua influência direta na estabilização da grua. Na entrevista, ele observa que essa condição deveria ser incorporada ao modelo e explica que, em rua inclinada, a necessidade de calçar a grua com peças de madeiras tende a elevar significativamente o risco.

Também foram sugeridos refinamentos ligados ao centro de massa da carga e ao modo de içamento, especialmente no que se refere ao tipo de amarração, ao tipo de contato entre o cabo e o módulo, assim como ao material empregado no içamento. Segundo o especialista, a existência de pontos de içamento previstos no próprio módulo constitui uma melhoria concebida para a segurança da operação, ao passo que soluções menos controladas podem ampliar o risco de desequilíbrio e

tombamento. Essa observação é coerente com o próprio relatório, que associa a queda da carga a erros de movimentação, cálculos inadequados de centro de gravidade e falhas na interface entre carga e equipamento de içamento.

No entanto, a crítica mais contundente do especialista, concentrou-se na forma de apresentação dos resultados. Na sua percepção, as saídas produzidas, como o gráfico de bolhas e o conjunto ampliado de riscos e recomendações mostravam-se confusas e pouco úteis no contexto prático da operação. Essa observação tornou-se ainda mais relevante diante do fato de a primeira aplicação ter gerado 61 medidas de mitigação, número considerado por ele excessivo e de difícil implementação operacional.

Trata-se de uma observação particularmente relevante, na medida em que, o relatório organiza a saída em diferentes camadas analíticas, incluindo três cenários comparativos de criticidade, matriz preditiva com 25 riscos mais significativos e um conjunto extenso de medidas de mitigação. Na leitura do especialista, porém, esse formato ainda não favorecia a tomada de decisão em campo. Em vez disso, haveria maior utilidade em uma apresentação mais simples e direta, capaz de indicar com precisão o que exige ação imediata, quais riscos realmente fazem diferença na operação e quais seriam as medidas de mitigação prioritárias.

Em síntese, conforme revela o Quadro 9, a apreciação do especialista confirmou que a primeira versão do modelo possuía coerência analítica e capacidade inicial de representar riscos importantes da operação, mas também evidenciou limitações significativas. De um lado, apontou a necessidade de incorporar ou recalibrar variáveis diretamente relacionadas à inclinação, ao centro de massa da carga e ao modo de içamento. De outro, mostrou que a utilidade prática do artefato dependia de uma saída mais enxuta, objetiva e orientada à ação. Esses achados foram decisivos para o refinamento posterior do modelo, pois indicaram que sua evolução deveria ocorrer simultaneamente em duas frentes: na qualidade analítica das entradas e na clareza operacional dos resultados.

Quadro 9 - Síntese da apreciação do especialista sobre a primeira aplicação do modelo

Eixo de apreciação	Observação do especialista	Implicação para o refinamento do artefato
Lógica geral do modelo	A lógica foi considerada coerente e promissora, mas ainda em desenvolvimento	Manter a estrutura geral do artefato, com aperfeiçoamento progressivo
Riscos considerados aderentes à operação	Concordância com riscos como passagem estreita e queda da carga por erro de movimentação	Reforça a aderência inicial do modelo às condições reais da operação
Assimetria da carga	Foi apontada como uma das maiores dificuldades reais da operação e deveria receber criticidade mais alta	Reavaliar critérios ligados ao centro de massa e ao equilíbrio da carga
Riscos supervalorizados	Colisão com pessoas como risco crítico e tombamento em curvas como risco alto foram considerados pouco coerentes com o caso analisado	Ajustar a sensibilidade do modelo às especificidades do contexto operacional
Variáveis ausentes ou insuficientes	Inclusão de inclinação da via/terreno, centro de massa, tipo de amarração, tipo de cabo e pontos de içamento do módulo	Ampliar a capacidade de absorção do modelo em operações de içamento e descarregamento
Forma de apresentação dos resultados	Resultados percebidos como confusos e pouco úteis para a prática, especialmente gráficos e listas extensas	Simplificar a saída do modelo e destacar apenas o que exige ação imediata
Volume de recomendações	Excesso de medidas dificulta a implementação prática	Priorizar recomendações e direcionar o modelo para ações mais viáveis e impactantes

Fonte: Elaborado pelo Autor

4.5 LIMITAÇÕES DO PRIMEIRO CICLO DE AVALIAÇÃO

Embora o primeiro ciclo de avaliação tenha sido importante para examinar a aderência inicial do modelo a uma operação real de transporte modular, algumas limitações precisam ser reconhecidas. Em primeiro lugar, trata-se de uma avaliação de caráter exploratório, desenvolvida a partir de uma única operação, realizada em um contexto específico e com participação de uma única empresa. Por essa razão, os resultados obtidos não devem ser interpretados como evidência de validação ampla do artefato, mas como uma verificação inicial de sua capacidade de representar riscos em uma situação concreta.

Além disso, este primeiro ciclo não foi inteiramente independente do processo

de desenvolvimento do modelo. A operação portuguesa também desempenhou papel relevante na consolidação empírica da primeira versão do artefato, especialmente no refinamento do banco de riscos e na compreensão das condições operacionais do transporte. Assim, embora a aplicação do modelo e a apreciação do especialista tenham produzido evidências importantes, esse ciclo ainda deve ser compreendido como um momento de aproximação entre desenvolvimento e avaliação, e não como uma validação externa em sentido estrito.

Outra limitação relevante decorre do fato de que o preenchimento das variáveis operacionais foi realizado pelo pesquisador, com base nas informações levantadas na operação acompanhada, e não diretamente pelo especialista ou por um usuário final da empresa. Desse modo, a apreciação obtida concentrou-se nos resultados produzidos pelo modelo especialmente na coerência dos riscos, na criticidade atribuída e na utilidade prática de suas saídas, sem contemplar de forma direta a experiência de uso associada à etapa de inserção dos dados. Em consequência, permanecem em aberto aspectos tais como: clareza das variáveis, facilidade de preenchimento, tempo de alimentação do artefato e grau de autonomia de usuários operacionais na utilização do modelo.

Em síntese, as limitações identificadas neste primeiro ciclo não invalidam os resultados obtidos, mas delimitam seu alcance e, sobretudo, fornecem base objetiva para o refinamento posterior do artefato. Mais do que confirmar definitivamente a adequação da primeira versão do modelo, a avaliação exploratória em Portugal permitiu explicitar lacunas nas variáveis de entrada, na calibração da criticidade, na usabilidade da etapa de alimentação dos dados e na clareza dos resultados, criando condições concretas para a evolução do artefato nas etapas seguintes.

5 REFINAMENTO DO ARTEFATO

O primeiro ciclo de avaliação foi importante não apenas para testar o funcionamento inicial do artefato, mas, principalmente, para mostrar com mais clareza onde o modelo ainda precisava evoluir. A aplicação da primeira versão evidenciou que a proposta já possuía coerência analítica e conseguia representar riscos relevantes da operação, mas também revelou limitações relacionadas à calibração de alguns eventos, à ausência ou insuficiência de certas variáveis e à complexidade de como os resultados eram apresentados ao usuário. Em outras palavras, o ciclo português não serviu apenas para observar o desempenho do modelo. Ele também forneceu diretrizes para orientar seu amadurecimento.

Nesse sentido, o refinamento realizado após essa primeira aplicação não deve ser entendido como um simples ajuste pontual. O que ocorreu foi uma revisão mais ampla e completa da lógica do artefato. Algumas mudanças afetaram diretamente seu escopo. Outras alteraram sua lógica interna de funcionamento, especialmente no modo como as variáveis ativam riscos, como a criticidade é calculada e como os resultados são organizados para apoiar a decisão. O objetivo central desse processo foi tornar o modelo mais aderente às operações reais, mais preciso do ponto de vista analítico e mais útil do ponto de vista prático.

De forma geral, o refinamento ocorreu em cinco frentes principais. A primeira foi a redefinição do escopo do artefato, com a separação entre o modelo de içamento e o modelo de transporte rodoviário. A segunda foi a reorganização das entradas em variáveis primárias e secundárias, com derivação automatizada de parte das condições operacionais. A terceira foi a consolidação de uma lógica binária de ativação dos riscos. A quarta foi a revisão do cálculo da criticidade, que passou a considerar frequência normalizada, impacto e majoração sistêmica. Por fim, a quinta frente consistiu na introdução de uma leitura por agrupamentos de risco, associada a uma lógica de priorização inspirada no princípio de Pareto. Em conjunto, essas alterações resultaram em uma versão mais madura do modelo, que passou a embasar o segundo ciclo de avaliação.

5.1 PREMISSAS DO REFINAMENTO

As premissas que orientaram o refinamento do artefato derivaram diretamente das evidências produzidas no primeiro ciclo. A apreciação do especialista mostrou que a lógica geral do modelo era promissora, mas ainda carecia de aperfeiçoamentos. Também deixou claro que a utilidade prática do artefato dependia de dois avanços simultâneos: de um lado, melhorar a qualidade analítica das entradas, de outro, simplificar e tornar mais objetiva a forma de apresentação dos resultados. Além disso, o capítulo de limitações reconheceu que a primeira avaliação teve caráter exploratório, foi realizada em uma única operação e não testou diretamente a experiência de preenchimento por parte de um usuário final, o que reforçou a necessidade de evoluir o modelo antes de submetê-lo a uma nova aplicação.

Também se tornou evidente que, em operações complexas, não basta ao modelo apenas listar riscos. Uma saída excessivamente longa, com muitos eventos destacados e muitas medidas de mitigação, pode até demonstrar abrangência, mas não necessariamente ajuda na prática. As informações necessárias ao especialista e ao gestor são sobretudo: o que exige atenção imediata, onde está o principal foco de vulnerabilidade da operação e quais frentes merecem prioridade de ação. Assim, o refinamento passou a ser guiado por uma preocupação central, ou seja, fazer com que o artefato deixasse de ser apenas uma ferramenta de enumeração de riscos e passasse a funcionar, de fato, como instrumento de priorização analítica.

Com base nisso, o processo de refinamento foi conduzido com três objetivos principais. O primeiro foi o de aumentar a aderência do modelo às especificidades de cada operação. O segundo foi o de tornar mais clara e rastreável a relação entre condições operacionais e riscos ativados. Finalmente, o terceiro foi melhorar a leitura dos resultados, de modo que eles indicassem, com maior precisão, onde concentrar a atenção gerencial e quais frentes mereciam prioridade de mitigação.

5.2 REDEFINIÇÃO DO ESCOPO DO ARTEFATO

Uma das mudanças mais importantes foi o desdobramento do artefato, originalmente voltado à etapa de transporte, em dois modelos independentes: um destinado às operações de içamento e outro ao transporte rodoviário. Essa separação foi considerada metodologicamente viável porque o içamento e o transporte rodoviário

não ocorrem simultaneamente, mas correspondem a fases sequenciais da operação de transporte dos módulos. Desse modo, cada fase pôde ser analisada como uma unidade operacional específica, com variáveis, riscos e critérios de priorização próprios. A decisão decorreu, portanto, do entendimento de que, embora ambas as atividades façam parte do deslocamento dos módulos na CM, elas envolvem condicionantes, agentes, vulnerabilidades e decisões operacionais bastante distintas.

Na versão anterior, o modelo ainda reunia, sob uma mesma estrutura, aspectos ligados ao deslocamento horizontal do módulo e aspectos ligados à sua movimentação vertical por guindaste. Essa configuração tendia a produzir sobreposições e a enfraquecer a precisão da análise. Um risco associado ao trajeto rodoviário, como tombamento em curva, por exemplo, não deve ser lido com o mesmo peso em uma análise centrada no içamento. Da mesma forma, variáveis diretamente ligadas à assimetria da carga, ao tipo de amarração, ao contato entre o sistema de içamento e o módulo, à configuração dos estabilizadores e à existência de pontos próprios de içamento têm importância decisiva no içamento, mas não ocupam o mesmo papel em uma leitura focada na rota.

A separação dos modelos respondeu, portanto, à necessidade de aumentar a especificidade analítica do artefato. Cada versão passou a operar com variáveis, bancos de risco, agrupamentos e saídas específicas. No modelo de içamento, isso permitiu aprofundar a análise de fatores como geometria da carga, distribuição de peso, comportamento assimétrico, método de amarração, interface entre cabo e módulo, existência de pontos previstos de içamento, estabilização do equipamento, interferências no entorno e composição da equipe. Já no modelo de transporte rodoviário, tornou-se possível concentrar a leitura em elementos como rota, pavimentação, restrições físicas, condições climáticas, segurança viária, qualificação da transportadora e logística complementar.

Essa mudança também respondeu, ainda que de forma indireta, a uma crítica importante feita no primeiro ciclo: a de que alguns riscos estavam superdimensionados em razão do contexto analisado. Ao especializar o artefato em transporte rodoviário e içamento, reduziu-se o risco de sobreposição entre situações operacionais distintas e aumentou-se a sensibilidade do modelo às particularidades de cada caso. Assim, o refinamento não foi apenas formal, mas representou uma redefinição substancial do escopo do artefato.

5.3 ESTRUTURA DE VARIÁVEIS E DERIVAÇÃO AUTOMATIZADA

Outro refinamento central consistiu na reorganização das entradas do artefato em dois níveis: variáveis primárias e variáveis secundárias. As variáveis primárias correspondem às informações fornecidas diretamente pelo usuário, enquanto as variáveis secundárias passam a ser derivadas a partir dessas respostas iniciais por meio de uma lógica automatizada de interpretação. Essa mudança foi importante porque permitiu reduzir o número de perguntas feitas ao usuário, evitar redundâncias e tornar o artefato mais simples de utilizar.

Na prática, essa reorganização alterou a forma como os dados são coletados e processados. Em vez de exigir que o usuário responda manualmente a uma longa lista de perguntas, o modelo passa a solicitar um conjunto mais enxuto de informações centrais e, a partir delas, deriva outras condições analiticamente relevantes. Isso reduz o esforço de preenchimento sem comprometer a abrangência da leitura de risco.

No modelo de transporte rodoviário, esse refinamento se mostra de forma bastante clara. Ao informar, por exemplo, a origem e o local de entrega dos módulos, o artefato pode derivar automaticamente condições como a distância estimada da operação, a existência de trechos não pavimentados, a predominância de rodovias pedagiadas, a presença de desníveis relevantes, curvas acentuadas, travessia por áreas urbanas densas, trechos com maior histórico de acidentes e zonas com maior risco de roubo. De forma semelhante, a data e o horário da operação permitem derivar informações relacionadas ao período de circulação, à possibilidade de tráfego mais intenso e a condicionantes associadas ao momento da viagem.

No modelo de içamento, a mesma lógica aparece com outro conteúdo. Em vez de solicitar que o usuário descreva separadamente todas as situações derivadas da operação, o artefato parte de informações primárias sobre a carga, o método de içamento, o local e o equipamento para inferir condições secundárias ligadas à assimetria da peça, ao apoio do guindaste, à inclinação do terreno, à interface entre a carga e o sistema de içamento e à estabilidade da manobra.

Esse refinamento é especialmente relevante porque responde a uma limitação prática importante. Um modelo com muitas perguntas diretas pode até ser analiticamente completo, mas tende a se tornar cansativo, repetitivo e pouco aderente ao ritmo real da operação. Ao reorganizar as entradas em variáveis primárias e secundárias e apoiar a derivação destas últimas por uma lógica automatizada, o

artefato consegue manter profundidade analítica sem transformar o preenchimento em uma etapa excessivamente onerosa.

Em termos metodológicos, essa mudança também fortalece a inteligência do modelo. O artefato deixa de depender apenas de respostas literais e passa a interpretar parte do cenário operacional a partir de relações derivadas. Assim, um conjunto relativamente enxuto de informações primárias é convertido em um quadro analítico mais amplo, que depois alimenta a ativação binária dos riscos, os agrupamentos de criticidade e os alertas sistêmicos do modelo.

5.4 LÓGICA BINÁRIA DE ATIVAÇÃO DE RISCOS

Outro avanço relevante do refinamento foi a consolidação da lógica binária de ativação dos riscos. Na versão refinada, cada variável passou a se relacionar com o banco de riscos por meio de um sistema em que a condição operacional é representada pelo valor 1, quando presente, ou pelo valor 0, quando ausente. Essa estrutura permitiu transformar condições observáveis da operação em entradas analíticas objetivas, reduzindo ambiguidades na identificação dos riscos ativados.

Essa alteração tornou o funcionamento do modelo mais claro e rastreável. Ao invés de depender de uma leitura difusa das condições operacionais, o artefato passou a explicitar de que maneira cada variável interfere na ativação dos eventos de risco. Na prática, isso permite compreender não apenas que determinado risco foi identificado, mas também quais condições contribuíram para a sua ativação.

É importante observar, contudo, que a lógica binária adotada não implica uma leitura linear ou simplificada dos riscos. A relação entre variáveis e eventos permanece múltipla: uma mesma variável pode ativar diferentes riscos, enquanto um mesmo risco pode ser ativado por diferentes combinações de variáveis. No caso do içamento, por exemplo, a assimetria da carga pode se relacionar com riscos de oscilação, instabilidade ou desequilíbrio durante a manobra. Da mesma forma, o deslocamento da carga pode resultar da combinação entre amarração inadequada, interface desfavorável entre cabo e módulo, ausência de pontos apropriados de içamento e comportamento assimétrico da peça.

No transporte rodoviário, a mesma lógica se aplica às condições da rota e do deslocamento. A presença de trecho não pavimentado, longa distância, áreas críticas de circulação ou regiões com maior exposição a roubo pode ativar, simultaneamente,

riscos ligados a avarias, atrasos operacionais, perda de estabilidade e vulnerabilidade patrimonial. Assim, embora cada entrada seja registrada de forma binária, os resultados produzidos pelo modelo decorrem da articulação entre múltiplas condições, tornando a análise mais compatível com a complexidade das operações reais.

A estrutura refinada também amplia a rastreabilidade interna do modelo, permitindo uma leitura em duplo sentido. De um lado, é possível partir das variáveis operacionais inseridas pelo usuário e identificar quais riscos são ativados no cenário projetado. De outro, ao observar os riscos mais críticos, torna-se possível retornar às variáveis que contribuíram para sua ativação, identificando quais condições operacionais exerceram maior peso na configuração do cenário analisado. Essa leitura bidirecional é relevante porque desloca o modelo de uma simples listagem de riscos para uma estrutura explicativa, capaz de indicar não apenas quais eventos demandam atenção, mas também quais fatores operacionais estão associados à sua emergência.

Essa mudança foi especialmente importante porque, no primeiro ciclo de avaliação, a assimetria da carga apareceu como um ponto sensível. O especialista destacou que esse fator representava uma das maiores dificuldades reais da operação e que, naquele caso, deveria ter recebido maior criticidade. Ao reorganizar a lógica de ativação e fortalecer a relação entre variáveis e riscos, o refinamento permitiu que aspectos ligados ao centro de massa da carga, ao comportamento assimétrico do módulo e à estabilidade durante a manobra passassem a influenciar de maneira mais direta o resultado analítico.

Além de aprimorar a rastreabilidade da análise, a padronização binária também amplia o potencial de automação do artefato. Ao converter condições operacionais em entradas estruturadas, representadas por valores 0 ou 1, o modelo passa a operar com uma linguagem compatível com rotinas computacionais, formulários inteligentes, bancos de dados relacionais e painéis de controle. Essa estrutura também cria uma base formal para futuras integrações com sistemas digitais mais avançados, incluindo, em desenvolvimentos futuros, aplicações apoiadas por inteligência artificial. Nesse sentido, a lógica binária não apenas organiza a análise realizada nesta pesquisa, mas também favorece a evolução do artefato para soluções mais automatizadas, escaláveis e adaptativas.

5.5 NOVO CÁLCULO DA CRITICIDADE: FREQUÊNCIA NORMALIZADA E MAJORAÇÃO SISTÊMICA

A consolidação da lógica de ativação exigiu também uma revisão do modo como a criticidade era calculada. Um ponto importante identificado ao longo do amadurecimento do modelo foi que a simples contagem bruta das ativações podia gerar distorções, especialmente em situações nas quais nem todas as variáveis tivessem sido coletadas. Nesses casos, a operação poderia parecer menos crítica, não porque os riscos fossem menores, mas porque havia menor disponibilidade de informação.

Para enfrentar esse problema, o modelo passou a trabalhar com a noção de frequência normalizada. Em vez de considerar apenas quantas ativações um risco recebeu em termos absolutos, o cálculo passou a considerar a proporção dessas ativações em relação ao conjunto de variáveis efetivamente observadas e aplicáveis ao cenário analisado. Com isso, a frequência de ativação deixa de ser expressa como uma contagem bruta e passa a ser representada por um valor normalizado entre 0 e 1. Nesse intervalo, valores próximos de 0 indicam baixa ativação relativa do risco, enquanto valores próximos de 1 indicam que o risco foi ativado por grande parte das condições consideradas no cenário.

Em termos operacionais, a frequência normalizada pode ser compreendida como a razão entre o número de ativações associadas a determinado risco e o número de variáveis observadas e aplicáveis à análise. Esse ajuste reduz a possibilidade de que variáveis não coletadas produzam uma falsa sensação de segurança, uma vez que a criticidade passa a ser calculada com base no universo real de informações disponíveis, e não sobre um conjunto ideal ou incompleto de dados.

Considere-se, por exemplo, duas operações semelhantes. Na primeira, quase todas as variáveis relevantes foram preenchidas. Na segunda, parte delas não pôde ser observada. Se o modelo trabalhasse apenas com contagem bruta, a segunda operação tenderia a parecer menos crítica, quando, na verdade, ela apenas possuiria menor disponibilidade de dados. A normalização corrige esse problema, pois ajusta a frequência ao conjunto de informações efetivamente consideradas. Assim, uma operação com menos dados disponíveis não é automaticamente interpretada como menos arriscada apenas por apresentar menor número absoluto de ativações.

Com esse refinamento, a criticidade C passou a ser definida pela multiplicação entre frequência normalizada (F_n), impacto (I) e majoração sistêmica (MS), quando

acionada. Em termos sintéticos, a lógica do cálculo pode ser expressa da seguinte forma:

$$C = F_n \cdot I \cdot M_s$$

Em que:

C corresponde à criticidade do risco;

F_n corresponde à frequência normalizada de ativação do risco no cenário;

I corresponde ao impacto atribuído ao risco no banco de riscos;

M_s corresponde ao coeficiente de majoração sistêmica, aplicado quando determinadas combinações de condições operacionais ampliam a criticidade do risco. Na ausência dessas condições, o coeficiente assume valor neutro, igual a 1.

Essa formulação tornou o modelo mais robusto. A frequência normalizada expressa a intensidade relativa de ativação do risco, o impacto representa a gravidade potencial do evento e a majoração sistêmica permite captar situações em que a combinação entre fatores torna o cenário mais severo do que a leitura isolada de cada variável indicaria.

A introdução da majoração sistêmica constitui um refinamento relevante porque muitas situações críticas não decorrem de um único fator, mas da combinação de condições desfavoráveis. No modelo refinado, essa majoração não surge de forma vaga ou subjetiva. Ela decorre da ativação de grupos sistêmicos previamente definidos, isto é, de combinações específicas de condições que, quando presentes simultaneamente, elevam o patamar de criticidade dos riscos associados. Em outras palavras, o modelo reconhece que determinados arranjos operacionais produzem um agravamento adicional que não seria adequadamente captado apenas pela contagem simples das ativações.

Um exemplo ajuda a compreender essa lógica. Uma carga assimétrica, por si só, já exige atenção. No entanto, quando essa condição se soma às variáveis: inclinação do terreno; amarração pouco adequada e a interferências espaciais, o cenário deixa de representar apenas a soma de fatores independentes e passa a indicar uma configuração mais crítica do sistema como um todo. No transporte rodoviário, algo semelhante ocorre quando as variáveis: distância elevada; trecho não pavimentado; histórico de acidentes e área de maior risco patrimonial se combinam em uma mesma rota. É justamente esse agravamento combinado que a majoração sistêmica busca representar.

Essa mudança também dialoga com as evidências do primeiro ciclo, no qual o especialista destacou a importância de variáveis como inclinação da via ou do terreno, centro de massa da carga, modo de içamento, tipo de contato entre o cabo e o módulo e soluções previstas para içamento seguro. O refinamento respondeu a esse ponto ao fortalecer a sensibilidade do modelo para a interação entre essas condições, tornando a criticidade mais compatível com a complexidade real da operação.

5.6 PRIORIZAÇÃO POR AGRUPAMENTOS DE RISCO

Outro refinamento importante foi a introdução da leitura por agrupamentos de risco. Até então, o modelo trabalhava predominantemente com o ordenamento individual dos eventos. Embora essa leitura continue sendo importante, ficou claro que, em situações com muitos riscos ativados, a simples listagem de eventos não era suficiente para orientar a ação prática.

Esse problema apareceu de forma muito evidente no primeiro ciclo. O especialista considerou os dados produzidos pelo modelo na primeira versão confusos e pouco úteis no contexto operacional, sobretudo porque o relatório apresentava diferentes camadas de análise, muitos riscos priorizados e um conjunto muito amplo de medidas de mitigação. Naquele caso, a aplicação havia produzido um volume elevado de recomendações, entendido como excessivo e pouco viável do ponto de vista prático.

Com o objetivo de responder a essa dificuldade que o modelo passou a organizar os resultados também por agrupamentos. Ao invés de considerar apenas riscos isolados, a nova estrutura permite identificar quais conjuntos concentram maior parcela da criticidade total da operação. Isso oferece uma leitura mais gerencial e ajuda a evitar dispersão. Nesse sentido, a priorização por agrupamentos passou a substituir, como principal eixo de síntese dos resultados, as representações anteriores baseadas em gráficos de bolha e matrizes 5x5. Embora esses recursos permitissem visualizar relações entre frequência, impacto e criticidade de modo granular, eles também ampliavam a complexidade das saídas e dificultavam a transformação da análise em decisões operacionais objetivas.

Um exemplo ajuda a compreender o ganho. Em uma determinada operação de transporte rodoviário, vários riscos podem estar ativos ao mesmo tempo, tais como: dano à carga por vibração, atraso por congestionamento, bloqueio de rota,

vulnerabilidade a roubo e instabilidade em trechos críticos. No entanto, quando esses eventos são agregados, pode-se perceber que a maior parte da criticidade está concentrada, por exemplo, em agrupamentos ligados à infraestrutura da rota, à segurança patrimonial e às condições logísticas da operação. Nesse caso, o gestor deixa de fixar o olhar apenas para uma lista longa de eventos e passa a enxergar com mais clareza quais frentes merecem prioridade. No içamento, a mesma lógica permite perceber se a criticidade está mais concentrada em fatores ligados à carga, ao posicionamento do equipamento, ao entorno ou à equipe.

A essa leitura por agrupamentos foi associada uma lógica inspirada no princípio de Pareto. O objetivo não é reproduzir mecanicamente a proporção 80/20, mas utilizar o princípio como apoio metodológico à priorização dos resultados, destacando os agrupamentos que concentram, de forma desproporcional, a criticidade da operação. No modelo refinado, a priorização passou a considerar como foco analítico os agrupamentos que atingem ou superam o limiar de 20% da criticidade total, permitindo evidenciar aqueles com maior contribuição relativa para o cenário analisado.

Essa mudança foi implementada com o intuito de aumentar a utilidade prática do artefato. O modelo deixa de ser apenas uma ferramenta teórica, que apresentava cenários de riscos e passa a apoiar a definição de foco. Em termos operacionais, isso é essencial, porque tempo, equipe e recursos de mitigação são limitados. Nem tudo pode ser enfrentado ao mesmo tempo. Por isso, saber quais agrupamentos concentram a maior criticidade é mais útil do que simplesmente contar com uma listagem extensa de problemas ou múltiplas visualizações analíticas de difícil tradução prática.

Ao mesmo tempo, é importante fazer uma distinção. O refinamento melhorou de forma clara a priorização dos riscos e dos agrupamentos de risco. Isso, por si só, já contribui para tornar mais objetiva a seleção das medidas mitigatórias. No entanto, a efetiva simplificação final das recomendações ainda depende da forma como o modelo será aplicado e interpretado em contexto real. Em outras palavras, o artefato passou a indicar melhor onde agir primeiro, mas a verificação de quão enxuta e operacional essa saída se torna na prática foi deixada, em parte, para o segundo ciclo de avaliação.

5.7 SÍNTESE DO ARTEFATO REFINADO

O refinamento realizado após o primeiro ciclo de avaliação resultou em uma nova versão do artefato, concebida para ser mais coerente com as especificidades operacionais do transporte modular e mais adequada às necessidades de uso identificadas na avaliação inicial. As mudanças promovidas atingiram pontos centrais de sua lógica de funcionamento. O escopo foi redefinido por meio da separação entre içamento e transporte rodoviário. As entradas foram revisadas e passaram a ser organizadas em variáveis primárias e secundárias, com derivação automatizada de parte das condições analíticas. A ativação dos riscos passou a operar com uma lógica binária mais clara e rastreável. O cálculo da criticidade foi reformulado com base em frequência normalizada, impacto e majoração sistêmica. E os resultados passaram a ser interpretados também por agrupamentos, de modo a favorecer a identificação dos focos de risco mais relevantes.

Além disso, os outputs do modelo foram simplificados. Elementos de apresentação que, na primeira versão, ainda ocupavam papel de destaque, como o gráfico de criticidade em bolhas e a matriz preditiva, deixaram de compor a saída principal do artefato, uma vez que sua utilidade prática foi considerada limitada no contexto da operação analisada. Em seu lugar, o modelo passou a priorizar uma apresentação mais objetiva, voltada à identificação dos riscos mais críticos, dos agrupamentos prioritários e das medidas mitigatórias com maior potencial de implementação.

Com esses ajustes, espera-se que o artefato refinado apresente maior precisão analítica e maior utilidade prática em relação à versão inicial. Mais do que simplesmente listar riscos, a nova estrutura foi concebida para oferecer uma leitura mais organizada do cenário operacional, capaz de apoiar tanto a identificação quanto a priorização dos problemas mais críticos. Esse movimento é compatível com a lógica da DSR, na medida em que o artefato evoluiu a partir das evidências produzidas em sua própria aplicação e incorporou mudanças orientadas pela prática.

Para fins de síntese, a versão refinada do artefato passou a se organizar em abas com funções complementares, estruturadas de modo a conduzir o processamento desde a entrada dos dados até a priorização final dos riscos e das medidas mitigatórias, conforme apresentado na Figura 14.

Figura 14 - Arquitetura funcional da versão refinada do artefato.



Fonte: Elaborado pelo Autor

6 SEGUNDO CICLO DE AVALIAÇÃO – BRASIL

Este capítulo apresenta o segundo ciclo de avaliação do artefato, desenvolvido no contexto brasileiro a partir de uma operação real de transporte e movimentação de módulo pré-fabricado. Sua realização foi viabilizada pela colaboração de uma empresa de construção modular, sediada em Novo Hamburgo/RS, que possibilitou o acesso às informações operacionais necessárias à alimentação do modelo, bem como à apreciação técnica dos resultados produzidos.

Ressalta-se, ainda, que esta etapa da pesquisa foi conduzida em conformidade com os procedimentos éticos aplicáveis, no âmbito do estudo vinculado ao CAAE 85966325.9.0000.5231, cuja notificação para inclusão de instituição coparticipante foi previamente aprovada pelo Comitê de Ética em Pesquisa da Universidade Estadual de Londrina, sob o Parecer nº 7.638.843. Ademais, a empresa parceira manifestou formalmente sua concordância com a participação na pesquisa.

Com base nesse enquadramento, o capítulo examina o desempenho da versão refinada do artefato em uma nova realidade empírica, buscando verificar sua capacidade adaptativa, sua coerência técnica e sua aderência ao contexto operacional analisado.

6.1 CARACTERIZAÇÃO DO CONTEXTO OPERACIONAL

O segundo ciclo de avaliação foi realizado a partir de uma operação brasileira de transporte e movimentação de um módulo pré-fabricado, analisada após o refinamento da versão inicial do artefato. Diferentemente do primeiro ciclo, que teve caráter mais exploratório e ocorreu em um recorte operacional mais restrito, o caso brasileiro submeteu o modelo a um cenário empírico mais amplo, composto por três etapas principais: içamento na fábrica, transporte rodoviário de longa distância e içamento no local de entrega.

A operação consistiu no deslocamento de um módulo pré-fabricado entre Novo Hamburgo/RS e Angra dos Reis/RJ, com percurso estimado em aproximadamente 1.400 km. O módulo correspondia a uma unidade habitacional compacta, concebida como quarto para hospedagem de curta duração. Possuía 2,66 m de altura, 3,00 m de largura, 6,08 m de comprimento e peso aproximado de 3 toneladas. Considerando seu volume aproximado de 48,5 m³, a carga apresentava densidade volumétrica de

cerca de 62 kg/m³, além de área lateral projetada próxima de 18 m². Essas características indicavam uma carga leve e volumétrica, com maior sensibilidade a oscilações, esforços laterais, vento e movimentações angulares durante as etapas de içamento e transporte.

O primeiro içamento estava previsto para o dia 21 de outubro de 2025, às 8h, na fábrica localizada em Lomba Grande, Novo Hamburgo/RS. Essa etapa tinha como finalidade posicionar o módulo sobre o caminhão truck plataforma de três eixos, para o início do deslocamento rodoviário, programado para as 10h do mesmo dia. O içamento seria realizado com guindaste tipo Munck, equipado com quatro estabilizadores apoiados sobre pranchas de madeira maciça, em área plana, firme, isolada e situada dentro dos limites do terreno. A equipe operacional era composta por duas a quatro pessoas, com comunicação visual direta entre operador e equipe de solo.

As condições meteorológicas previstas para o içamento na fábrica indicavam céu limpo, vento médio de 12 km/h e rajadas ocasionais de até 39 km/h. Esse dado é relevante porque o módulo, embora relativamente leve, apresentava grande superfície lateral exposta, o que poderia aumentar sua suscetibilidade a balanços pendulares e instabilidades angulares. Além disso, a carga apresentava leve assimetria de peso, exigindo balanceamento das cintas e teste de pré-levantamento para verificação do equilíbrio antes da movimentação completa.

A configuração de amarração também constitui aspecto importante do contexto operacional. O módulo não possuía pontos de içamento dedicados, como alças ou olhais, de modo que as cintas têxteis de poliéster atuavam diretamente sob sua base estrutural. Também não estava previsto o uso de uma viga de distribuição de carga e cordas-guia para controle angular. Essa condição tornava a estabilidade da carga mais dependente do correto posicionamento das cintas, da distribuição dos esforços, da sincronia entre operador e equipe de solo e da resposta da equipe diante de possíveis oscilações durante a elevação.

Após o carregamento, o módulo seria transportado em caminhão truck plataforma, sem cobertura e sem manta de amortecimento entre a carga e a carroceria. A fixação seria realizada por cintas de poliéster, sem elementos redundantes de contenção, tais como, correntes ou cabos de aço secundários. Embora as partes móveis do módulo, como portas, janelas, armários e luminárias, estivessem travadas, a ausência de cobertura e de amortecimento ampliava a

exposição da unidade às condições ambientais e à transmissão direta de vibrações ao longo do percurso.

O deslocamento rodoviário, previsto para ocorrer entre os dias 21 e 22 de outubro de 2025, envolvia um trajeto de aproximadamente 1.400 km, com cerca de 75% do percurso em rodovias duplicadas e 25% em trechos serranos e acessos urbanos. O itinerário incluía segmentos da BR-116, BR-376 e BR-101, com presença de declividades superiores a 5%, curvas de raio inferior a 60 m e possibilidade de rajadas laterais entre 30 e 40 km/h em regiões de serra. Embora mais de 50% do percurso ocorresse em rodovias pedagiadas e com boa conservação superficial, a geometria crítica de alguns trechos exigia maior controle de velocidade, tração, estabilidade lateral e comportamento da carga sobre a plataforma.

A largura do módulo, de 3,00 m, excedia a largura da carroceria, estimada em 2,45 m, o que reforçava sua condição de carga especial e aumentava a sensibilidade a ventos laterais, deslocamentos relativos e esforços de torção. Além disso, a relação massa/área de aproximadamente 187 kg/m² indicava baixa inércia frente à área exposta, favorecendo um comportamento aerodinâmico do tipo “efeito vela” em situações de vento lateral mais intenso. A umidade relativa elevada prevista em regiões montanhosas também poderia reduzir o coeficiente de atrito entre o módulo e a plataforma, especialmente em caso de condensação sobre superfícies metálicas de fixação.

O içamento final estava previsto para o dia 22 de outubro de 2025, às 8h, no Condomínio Reserva das Aroeiras, em Cunhambebe, Angra dos Reis/RJ. Assim como na origem, a movimentação seria realizada com guindaste tipo Munck, com quatro estabilizadores apoiados sobre pranchas de madeira maciça. O equipamento operaria dentro dos limites do terreno, em área plana, firme, nivelada e sem declividade acentuada, sem interferências externas significativas, tais como vegetação, tráfego ou postes próximos. As condições meteorológicas previstas para essa etapa eram estáveis, sem vento forte, chuva ou neblina.

Apesar das condições ambientais mais favoráveis no destino, a etapa de entrega mantinha características operacionais sensíveis. A carga continuava apresentando baixa densidade volumétrica, assimetria de peso, ausência de pontos de içamento dedicados e amarração por cintas têxteis em configuração simples. Também não havia previsão de uso de vigas de distribuição de carga e cordas-guia para controle de rotação. Além disso, embora a área estivesse isolada com fitas de

segurança, não havia plano formal de interrupção em caso de oscilação excessiva, o que tornava a operação dependente da coordenação visual e da comunicação direta entre operador e equipe de solo.

Conforme ilustra a Figura 15, o módulo analisado não correspondia a uma carga estrutural genérica, mas a uma unidade pré-fabricada já com elementos de fechamento e acabamento incorporados, transportada em prancha aberta e estabilizada por cintas externas. Essa condição ampliava a relevância da análise de risco, uma vez que vibrações, esforços concentrados, intempéries, oscilações e impactos poderiam afetar não apenas a integridade estrutural da carga, mas também componentes já instalados no módulo.

Figura 15 - Módulo transportado em caminhão truck plataforma durante a operação analisada no segundo ciclo de avaliação.



Fonte: Acervo do autor (2025)

Dessa forma, o segundo ciclo reuniu um conjunto de condições operacionais mais amplo e heterogêneo que o primeiro teste. A operação combinou içamentos em origem e destino, transporte rodoviário de longa distância, exposição a trechos serranos e urbanos, variações meteorológicas, ausência de cobertura, ausência de amortecimento, fixação por cintas, falta de pontos dedicados de içamento e inexistência de dispositivos auxiliares de controle angular. Esse conjunto de

características constituiu a base empírica para a aplicação do modelo no caso brasileiro, permitindo analisar sua resposta diante de uma operação multifásica e logisticamente mais complexa.

6.2 INSERÇÃO DAS VARIÁVEIS OPERACIONAIS NO MODELO

A inserção das variáveis operacionais no segundo ciclo foi realizada por meio de dois formulários estruturados no Google Forms, elaborados a partir das variáveis primárias do artefato: um voltado às operações de içamento e outro ao transporte rodoviário. Os instrumentos foram encaminhados ao especialista responsável pela operação, que realizou o preenchimento de forma autônoma, sem necessidade de mediação direta do pesquisador.

Este processo permitiu verificar, não apenas a pertinência das variáveis selecionadas, mas também a viabilidade do instrumento de coleta e sua adequação ao contexto operacional analisado. Para evitar uma descrição excessivamente fragmentada das respostas, as variáveis são apresentadas no Quadro 10 de maneira sintética, agrupadas por etapa da operação e por tipo de informação considerada pelo modelo.

Quadro 10 - Síntese dos grupos de variáveis operacionais inseridos no modelo

Etapa	Síntese das variáveis inseridas	Condição registrada no caso
Içamento na origem	Carga, equipamento e apoio	Módulo de 2,66 × 3,00 × 6,08 m, com peso aproximado de 3 t, formato assimétrico, distribuição desigual de peso e ausência de pontos dedicados de içamento. A movimentação foi prevista com guindaste tipo Munck, dotado de quatro estabilizadores apoiados em pranchas de madeira maciça.
Içamento na origem	Amarração, controle e segurança operacional	A carga foi prevista para ser envolvida por cintas têxteis de poliéster, sem uso de cordas-guia e sem plano formal de parada de emergência. A operação contava com equipe de 2 a 4 pessoas, área isolada e ausência de interferências locais relevantes, como trânsito, fios, postes ou vegetação próxima.
Içamento na origem	Condições ambientais e operacionais	As condições informadas indicavam ausência de chuva, neblina, temperaturas críticas e rajadas de vento acima de 20 km/h durante o içamento, além de local sem inclinação

		acentuada.
Transporte rodoviário	Carga, veículo, fixação e proteção	O módulo foi transportado em caminhão truck plataforma, com fixação por cintas de poliéster, sem sistema de amortecimento entre módulo e carroceria, sem cobertura por lona e sem escolta ou veículo batedor. As partes móveis, como janelas, portas, armários e luminárias, encontravam-se travadas.
Transporte rodoviário	Rota, jornada e logística	O percurso entre Novo Hamburgo/RS e Angra dos Reis/RJ foi estimado em aproximadamente 1.400 km, com saída às 10h, previsão de pernoite e paradas intermediárias. A rota envolveu rodovias duplicadas, trechos serranos, acessos urbanos, curvas acentuadas e declividades superiores a 5%.
Transporte rodoviário	Condições ambientais, segurança e empresa responsável	A análise considerou rajadas laterais entre 30 e 40 km/h em trechos de serra, passagem por áreas urbanas e segmentos com maior exposição a congestionamentos, acidentes e risco de roubo. Também foram consideradas informações cadastrais da transportadora, como CNPJ ativo, tempo de mercado inferior a 5 anos e ausência de registros de acidentes graves nos últimos 5 anos.
Içamento no destino	Carga, equipamento e implantação	O içamento de entrega envolveu o mesmo módulo, com assimetria de peso e sem pontos dedicados de içamento. O guindaste tipo Munck foi previsto dentro dos limites do terreno, em local sem declividade acentuada, com quatro estabilizadores apoiados em pranchas de madeira maciça e espaço disponível para descarregamento emergencial.
Içamento no destino	Amarração, controle e condições do local	A movimentação foi prevista com cintas de poliéster envolvendo a carga, sem uso de cordas-guia e sem plano formal de parada de emergência. A operação contava com equipe de 2 a 4 pessoas, área isolada, ausência de interferência no trânsito local, ausência de fios ou postes próximos e ausência de vegetação densa na área de içamento.
Içamento no destino	Condições ambientais e operacionais	As condições registradas indicavam ausência de chuva, neblina, temperaturas críticas e rajadas de vento acima de 20 km/h durante o içamento, configurando um contexto ambiental estável para a etapa de entrega.

Fonte: Elaborado pelo Autor

No formulário de içamento, foram reunidas variáveis relacionadas às características geométricas e físicas da carga, ao tipo de equipamento empregado, à configuração dos estabilizadores, à forma de amarração, à composição da equipe, às

condições de isolamento da área, às interferências no entorno e às condições ambientais previstas para a operação. As entradas indicaram, entre outros aspectos, a presença de assimetria de peso, o uso de guindaste tipo Munck com quatro estabilizadores apoiados em pranchas de madeira maciça, a inexistência de pontos dedicados de içamento, o emprego de cintas de poliéster envolvendo a carga e a ausência de cabos-guia e de plano formal de parada de emergência.

No formulário de transporte, por sua vez, foram inseridas variáveis relativas ao veículo, ao sistema de fixação da carga, à existência ou não de amortecimento entre módulo e carroceria, à cobertura da carga, à presença de escolta, à ocorrência de paradas intermediárias e às condições gerais do deslocamento.

Assim, a alimentação do modelo no segundo ciclo não se limitou a uma descrição genérica do caso, mas resultou da combinação entre respostas estruturadas fornecidas por um agente do campo e o processamento analítico do artefato sobre essas entradas.

6.3 RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO MODELO

A aplicação do artefato no segundo ciclo permitiu observar variações na criticidade dos riscos ao longo da operação brasileira. Os resultados não apontaram um padrão único para todo o processo, mas diferenças entre o içamento na fábrica, o transporte rodoviário e o içamento na entrega. Cada etapa apresentou uma configuração própria de riscos ativados, frequências normalizadas, impactos e níveis de criticidade.

6.3.1 Resultados do Içamento na Fábrica

No içamento realizado na fábrica, em Novo Hamburgo/RS, o artefato identificou como riscos prioritários a “instabilidade da carga” e as “colisões dinâmicas”. Os índices de criticidade calculados pelo modelo para esses grupos foram, respectivamente, 2,38 e 2,52. Esses valores não correspondem a uma unidade física, mas a escores analíticos de priorização dos riscos no cenário avaliado.

Em termos proporcionais, os riscos de instabilidade da carga e colisões dinâmicas representaram, respectivamente, 11,6% e 12,3% da criticidade total calculada para a etapa. Em conjunto, esses dois riscos somaram 23,9%, configurando

o principal núcleo de vulnerabilidade identificado no içamento realizado na fábrica. Esse percentual indica que quase um quarto da criticidade total concentrou-se em apenas dois grupos de risco, enquanto os 76,1% restantes distribuíram-se entre os demais eventos ativados pelo modelo, com menor peso individual. Assim, o resultado não significa que os demais riscos sejam irrelevantes, mas que a instabilidade da carga e as colisões dinâmicas assumiram prioridade relativa dentro da leitura global da operação.

Essa priorização pode ser relacionada às características técnicas da operação. Como descrito anteriormente, o módulo apresentava baixa densidade volumétrica, ampla área lateral projetada e leve assimetria de peso. Essa combinação tornava a carga particularmente sensível a deslocamentos angulares, oscilações pendulares, esforços laterais, microcorreções do guindaste e ação do vento.

A configuração do içamento também contribuiu para a ativação dos riscos prioritários. A amarração foi prevista com cintas têxteis de poliéster em configuração simples, sem cordas-guia para controle angular e sem viga de balanceamento ou distribuição de carga. O módulo também não possuía pontos dedicados de içamento, fazendo com que as cintas atuassem diretamente sob sua base estrutural. Essa condição aumentava a dependência do correto posicionamento das cintas, da distribuição dos esforços e da coordenação entre operador e equipe de solo.

As condições ambientais reforçaram essa leitura. Embora a operação ocorresse em área plana, firme, isolada e dentro dos limites do terreno, o relatório registrou vento médio de 12 km/h e rajadas ocasionais de até 39 km/h. Esse valor superava o limite operacional de referência indicado no próprio relatório e exigia monitoramento contínuo da velocidade do vento, com suspensão da operação em caso de rajadas superiores a 30 km/h ou inclinação excessiva da carga. Nessas condições, a criticidade do içamento não decorria apenas do ato de erguer o módulo, mas do comportamento dinâmico de uma carga leve, volumétrica e assimétrica submetida a perturbações aerodinâmicas.

As medidas de mitigação propostas pelo modelo concentraram-se, portanto, no fortalecimento do controle angular da carga e na redução da imprevisibilidade da movimentação. Entre as recomendações mais relevantes, destacaram-se o uso de duas cordas-guia em extremidades opostas do módulo, a realização de pré-levantamento de 10 a 15 cm, o ajuste da tensão e do posicionamento das cintas, o monitoramento contínuo da velocidade do vento, a definição de critérios objetivos de

parada imediata, o uso de protetores de quina ou mantas de borracha e o reforço da comunicação entre operador e equipe de solo.

O relatório também indicou medidas complementares voltadas à organização da manobra, como a marcação do centro de gravidade do módulo, a definição de um único responsável pelos comandos, a confirmação prévia do sinal de parada, a verificação dos estabilizadores após aplicação de carga e a demarcação da trajetória de içamento com folga em relação a obstáculos, estabilizadores e estruturas próximas. Em conjunto, essas medidas buscavam reduzir oscilações pendulares, rotações não controladas, impactos laterais e esforços concentrados sobre a estrutura do módulo.

Em termos analíticos, essa etapa representou o cenário de içamento mais sensível entre os dois avaliados no caso brasileiro. Isso se deveu à combinação entre baixa densidade volumétrica, assimetria de peso, ausência de dispositivos auxiliares de estabilização e presença efetiva de rajadas de vento. Assim, os resultados sugerem que a vulnerabilidade principal do içamento na fábrica esteve associada menos ao peso absoluto da carga e mais à interação entre geometria, amarração, vento e controle angular durante a movimentação suspensa.

6.3.2 Resultados do Transporte Rodoviário

No transporte rodoviário, a hierarquia dos riscos se alterou em relação ao içamento na fábrica. Nessa etapa, o artefato priorizou a queda da carga e o tombamento do veículo. Os índices de criticidade calculados pelo modelo para esses grupos foram, respectivamente, 2,15 e 2,08, correspondendo a 13,4% e 12,9% da criticidade total calculada para o transporte. Em conjunto, esses dois riscos somaram 26,3%, configurando o principal núcleo de vulnerabilidade identificado na operação rodoviária.

Essa mudança de padrão está relacionada às características específicas do deslocamento. O relatório indica que o módulo, embora relativamente leve, apresentava grande área lateral projetada, largura excedente de 3,00 m em relação aos 2,45 m da carroceria e relação massa/área de aproximadamente 187 kg/m². Essa configuração aumentava a suscetibilidade da carga aos efeitos de ventos laterais, deslocamentos progressivos e esforços de torção, especialmente em trechos de maior exposição aerodinâmica.

Além disso, o transporte foi realizado em caminhão truck tipo plataforma, com fixação por cintas de poliéster, sem manta de amortecimento entre o módulo e a carroceria e sem redundância de fixação por correntes, cabos de aço ou travas metálicas auxiliares. Essa condição reduzia o atrito entre a carga e a plataforma, favorecendo a transmissão direta de vibrações, microdeslizamentos e relaxamentos progressivos das cintas ao longo do percurso. Assim, a criticidade da etapa não estava associada apenas à possibilidade de deslocamento da carga, mas à interação entre fixação, vibração, vento lateral e estabilidade dinâmica do conjunto veículo-módulo.

O trajeto também contribuiu para essa configuração de risco. Embora a maior parte do percurso ocorresse em rodovias duplicadas, pedagiadas e com boa conservação superficial, determinados segmentos apresentavam condições geométricas mais críticas, especialmente em trechos serranos e acessos urbanos. A presença de declividades acentuadas, curvas de menor raio e possibilidade de rajadas laterais exigia maior controle de velocidade, tração, frenagem e estabilidade lateral. Assim, a criticidade do transporte não decorria apenas da extensão do deslocamento, mas da combinação entre longa distância, variações geométricas da rota e exposição a condições ambientais capazes de afetar o comportamento dinâmico da carga.

Nesse contexto, a vulnerabilidade principal deslocou-se da carga suspensa, característica das etapas de içamento, para a estabilidade física e dinâmica do conjunto em movimento. A queda da carga foi associada sobretudo à exposição aerodinâmica, à ausência de camada amortecedora, à fixação exclusivamente por cintas têxteis e à necessidade de retensionamento periódico. Já o tombamento do veículo relacionou-se à largura excedente da carga, à elevação do centro de gravidade do conjunto, às curvas de raio reduzido, aos trechos de declividade acentuada e à ação de ventos laterais sobre uma carga leve e volumétrica.

As medidas de mitigação geradas pelo modelo concentraram-se no reforço da fixação, no aumento do atrito entre o módulo e a plataforma e no controle operacional do deslocamento. Entre elas, destacaram-se a inserção de mantas de borracha de alta aderência com espessura mínima de 10 mm, a ampliação dos pontos de amarração, a adoção de amarração cruzada em “X”, o uso de proteções de quina, o reforço das amarrações críticas nos sentidos longitudinal e lateral e o retensionamento periódico das cintas segundo a lógica 25–50–100, ou seja, com inspeção inicial entre 25 e 50 km e novas verificações a cada 100 km ou a cada parada operacional.

O relatório também indicou recomendações voltadas à estabilidade do veículo

e à condução em trechos críticos, como a limitação da velocidade máxima a 60 km/h em serras, curvas fechadas ou sob ventos superiores a 30 km/h, a dupla verificação do sistema de freios e pneus, o controle da pressão lateral dos pneus, o monitoramento das condições de vento, a reprogramação de travessias em trechos expostos para horários de menor incidência de vento e, quando necessário, o uso de veículo de apoio para informar condições locais em serras, cristas e clareiras. Segundo o relatório, a adoção combinada dessas medidas teria potencial para reduzir em até 25% a criticidade global do transporte.

Em termos analíticos, essa etapa foi relevante porque apresentou uma configuração de risco distinta daquela observada nos içamentos. No transporte rodoviário, a criticidade concentrou-se na estabilidade do conjunto veículo-módulo em deslocamento, e não apenas na integridade isolada da carga. Assim, os resultados indicam que a leitura produzida pelo modelo variou conforme a natureza da operação analisada, respondendo às condições específicas de rota, fixação, geometria da carga, exposição ao vento e dinâmica veicular.

6.3.3 Resultados do Içamento na Entrega

No içamento final, realizado em Angra dos Reis/RJ, os riscos prioritários identificados pelo artefato voltaram a ser a instabilidade da carga e as colisões dinâmicas. Os índices de criticidade calculados pelo modelo para esses grupos foram, respectivamente, 1,59 e 1,67, correspondendo a 11,2% e 11,8% da criticidade total calculada para essa etapa. Em conjunto, esses dois riscos somaram 23,0%, configurando o principal núcleo de vulnerabilidade identificado no içamento de entrega.

Diferentemente do cenário observado na fábrica, essa operação ocorreu sob condições meteorológicas mais favoráveis, sem previsão de vento forte, chuva ou neblina. O guindaste tipo Munck operaria dentro dos limites do terreno, em área plana, firme, nivelada e sem interferências externas relevantes. Ainda assim, o modelo manteve a priorização da instabilidade da carga e das colisões dinâmicas em razão da permanência de fatores técnicos associados à configuração do içamento.

Entre esses fatores, destacam-se as características físicas do módulo, sua leve assimetria de peso e a configuração simplificada do içamento. Essas condições aumentavam a dependência do correto posicionamento das cintas, da distribuição dos

esforços, da proteção dos pontos de contato e da coordenação entre operador e equipe de solo.

Essa leitura indica que, mesmo sem o agravante climático observado no içamento da fábrica, o arranjo técnico da operação ainda sustentava um quadro relevante de vulnerabilidade. A instabilidade da carga foi associada principalmente à possibilidade de variações de tração entre as cintas, inclinação lateral progressiva, centro de gravidade descentralizado e movimentos pendulares durante a elevação. Já as colisões dinâmicas foram relacionadas à possibilidade de oscilação e rotação não controladas do módulo, com risco de impacto lateral contra o guindaste, estabilizadores ou obstáculos próximos durante o deslocamento e o posicionamento final.

As medidas de mitigação sugeridas pelo modelo seguiram a lógica de fortalecimento do controle da carga suspensa. Entre as recomendações, destacaram-se o uso de duas cordas-guia fixadas em extremidades opostas do módulo, a realização de pré-levantamento controlado de 10 a 15 cm, o ajuste da tensão e do posicionamento das cintas, o uso de protetores de quina ou mantas de borracha, a marcação do centro de gravidade, a definição de critérios objetivos de parada imediata e o reforço da comunicação entre operador e equipe de solo.

O relatório também recomendou medidas de organização operacional, como a definição de uma única pessoa responsável pelos comandos, a confirmação prévia do sinal de parada, a demarcação da trajetória de içamento com margem mínima em relação a obstáculos e estabilizadores, a dupla verificação dos estabilizadores após aplicação de carga e a priorização de uma janela operacional de menor turbulência. Segundo o modelo, a adoção combinada dessas medidas teria potencial para reduzir em até 28% a criticidade global do içamento.

Embora o cenário de entrega tenha se mostrado menos severo que o içamento inicial, os resultados indicam que as fragilidades relacionadas à geometria da carga, à ausência de mecanismos auxiliares de estabilização e à coordenação operacional permaneceram relevantes. Dessa forma, a criticidade do içamento não dependia exclusivamente da presença de vento, mas também da configuração técnica da operação e da forma como a carga era controlada durante sua movimentação.

6.4 APRECIÇÃO DO ESPECIALISTA DA EMPRESA BRASILEIRA

De modo geral, a avaliação foi positiva. Ao comentar o relatório, ele destaca que a análise revelava “feeling bem apurado” sobre os riscos da operação e reconhece que várias das preocupações apontadas pelo modelo faziam sentido no contexto real da empresa. Esse retorno é relevante porque mostra que os resultados do artefato não foram recebidos como formulações abstratas ou excessivamente distantes do campo, mas como uma leitura tecnicamente plausível da operação.

Um dos pontos de maior convergência entre o modelo e a prática da empresa foi a medida preventiva de pré-levantamento da carga. O especialista confirmou que a equipe já adota esse procedimento, elevando o módulo cerca de 10 a 15 cm para observar seu comportamento e identificar eventuais desbalanceamentos. Quando um lado se desalinha mais que o outro, a carga é baixada novamente e as cintas são reajustadas até que se obtenha melhor nivelamento. Esse dado confirma que uma recomendação central do artefato coincide com um cuidado operacional já reconhecido como necessário em campo.

A entrevista também ajudou a delimitar melhor o campo de aplicabilidade de algumas recomendações. O caso mais evidente é o uso de cabos-guia. Nos relatórios de içamento, o modelo atribuiu importância elevada a esse recurso, sobretudo pela combinação entre amarração simples, ausência de vigas espaçadoras de içamento, instabilidade angular e, no caso da fábrica, rajadas de até 39 km/h.

O especialista não invalidou essa recomendação, mas ponderou que sua utilidade depende diretamente da configuração da operação. Em içamentos baixos, rápidos e com contato manual direto com o módulo, como ocorre com frequência nos carregamentos da fábrica, o controle da carga tende a ser feito pela própria equipe, sem o uso de cordas auxiliares. Por outro lado, em situações de descarregamentos que envolvem desafios como alturas mais elevadas, maior afastamento da equipe ou necessidade de transpor obstáculos, as cordas-guia passam a ter uma função mais evidente, especialmente no controle da orientação e da estabilidade do módulo.

O especialista não elimina, contudo, a recomendação produzida pelo modelo, mas contribui para refiná-la. O ponto central é que essa medida não deve ser aplicada de forma automática a qualquer içamento, mas pode ser parametrizada conforme a escala, a altura, o afastamento da equipe e a geometria efetiva da operação.

Ainda sobre o carregamento em fábrica, o especialista afirma que o içamento

costuma ser extremamente rápido, às vezes restrito ao simples levantamento da carga para que o caminhão entre por baixo. Numa situação assim, não há propriamente um “meio do caminho” em que determinadas medidas intermediárias de contingência se justifiquem.

Essa observação é valiosa porque indica onde o artefato ainda pode ser refinado. Da fala do especialista, surgem novas possibilidades de variáveis como a altura efetiva do içamento, a amplitude real de deslocamento e a presença ou ausência de empilhamento dos módulos.

Outro resultado importante da apreciação diz respeito à usabilidade do artefato. As variáveis primárias foram disponibilizadas ao especialista por meio de dois formulários, preenchidos autonomamente por ele. Segundo seu relato, o preenchimento foi fácil. Embora esse aspecto pareça irrelevante, ele indica que a etapa de entrada de dados já apresenta um grau satisfatório de clareza e inteligibilidade. Em outras palavras, o artefato não depende integralmente da mediação do pesquisador para começar a operar.

No caso do transporte rodoviário, a entrevista mostrou que a empresa já adota algumas medidas preventivas importantes, ainda que nem todas tenham aparecido inicialmente nas recomendações do modelo. O especialista explicou, por exemplo, que são usados protetores de borracha nas quinas do módulo para proteger as cintas, seis cintas de amarração e um reforço em X, concebido para dar mais segurança em situações tais como frenagens bruscas.

Também questionou a importância dos pontos de amarração dedicados no módulo. Mencionou o uso de peças de madeira longitudinais sobre a plataforma do caminhão, que ajudam a ampliar a área de apoio do módulo e a melhorar sua acomodação durante o percurso. Apesar disto, o especialista considerou pertinentes as recomendações geradas pelo modelo, como o aumento do atrito entre o módulo e a plataforma através de placas de borracha e a checagem das amarrações em paradas ao longo da viagem.

A entrevista também ajudou a qualificar a leitura do modelo sobre o risco de tombamento. O especialista reconheceu que o artefato captou corretamente a influência do vento e do chamado “efeito vela” produzido pela área do módulo, relatando inclusive ocorrência de vento em trechos como nos municípios de Torres e Imbituba. No entanto, ponderou que, na prática, o tombamento exclusivamente por vento tende a ser menos frequente do que a perda de estabilidade associada à

condução perigosa associada às curvas no trajeto.

Essa observação não contradiz o modelo, mas denota que o risco resulta da interação entre ambiente físico, geometria da carga e comportamento do condutor. Com isso, a entrevista amplia a compreensão da criticidade ao mostrar que a vulnerabilidade não é apenas estrutural ou climática, mas também decisória.

Outro conjunto de observações do especialista desloca a análise para fatores operacionais e organizacionais que os relatórios, sozinhos, não captam com a mesma nitidez. Ele destacou que, no caso analisado, não houve intercorrências durante o içamento, o transporte ou a entrega do módulo. Também chamou atenção para o fato de que, na prática da empresa, a chuva costuma pesar mais do que o vento na decisão de manter ou adiar um içamento. O episódio relatado de uma carga mantida suspensa durante uma interrupção por chuva foi criticado precisamente porque expunha o equipamento a esforço desnecessário e podia ampliar a instabilidade do conjunto.

Da mesma forma, a distinção feita entre motorista funcionário e motorista proprietário do caminhão evidencia que prudência, pressão de prazo e cultura operacional influenciam diretamente a exposição ao risco. Esses elementos são relevantes porque mostram que a criticidade da operação não decorre apenas da carga e da rota, mas também de condicionantes organizacionais que modulam a tomada de decisão em campo.

Por fim, a entrevista trouxe uma contribuição qualitativa importante ao discutir o uso de ganchos superiores. A fala do especialista brasileiro diverge parcialmente da posição apresentada pelo especialista português, para quem os pontos fixos de içamento incorporados aos módulos representavam uma medida preventiva significativa, por aumentarem a segurança, a previsibilidade e a padronização da operação.

No entanto, essa diferença não deve ser tratada como uma contradição simples, mas como evidência de que a adequação entre ganchos e cintas passantes depende das características do módulo e da própria lógica da operação. No caso analisado, o especialista explicou que a empresa ainda dispõe de ganchos e os utiliza em situações auxiliares, mas deixou de adotá-los como solução principal em módulos maiores, mais pesados ou já equipados com mobiliário instalado.

Na sua avaliação, quando a cinta envolve o módulo por baixo, os esforços tendem a ser distribuídos de forma mais homogênea, reduzindo a concentração de carga em pontos específicos da estrutura e evitando rompimentos. Assim, mais do

que apontar uma resposta única, a entrevista sugere que a escolha entre ganchos e cintas passantes precisa ser compreendida como uma decisão dependente da cultura operacional da empresa, com associações de risco distintas.

6.5 AVANÇOS E LIMITAÇÕES DO SEGUNDO CICLO DE AVALIAÇÃO

Um avanço importante evidenciado no segundo ciclo de avaliação foi a consolidação de uma lógica analítica comum, porém desdobrada em estruturas específicas de aplicação: uma voltada ao transporte rodoviário e outra às operações de içamento. Em ambos os casos, preservou-se a mesma base de funcionamento do artefato, composta pela entrada de variáveis, pelo processamento analítico, pela priorização dos riscos e pela geração de medidas preventivas.

No entanto, os riscos considerados, as relações entre variáveis e eventos indesejados e os mecanismos de vulnerabilidade passaram a ser tratados de forma própria em cada domínio operacional. Esse refinamento mostrou-se necessário porque o movimento horizontal do módulo, característico do transporte rodoviário, mobiliza problemas distintos daqueles associados ao movimento vertical da carga, próprio das operações de içamento.

Esse desdobramento aumentou a precisão analítica do modelo. Em vez de produzir uma leitura única e genérica para toda a operação, o artefato passou a gerar três relatórios específicos: içamento na fábrica, transporte rodoviário e içamento na entrega. Cada relatório apresentou sua própria leitura de criticidade, seus riscos prioritários e suas medidas preventivas correspondentes. Essa organização ampliou a granularidade da análise e reduziu o risco de que recomendações concebidas para uma etapa fossem aplicadas, de forma indistinta, a outra de natureza operacional diferente.

Outro ganho relevante esteve relacionado à utilidade prática das saídas produzidas pelo artefato. As medidas preventivas propostas não permaneceram em um plano genérico, mas foram traduzidas em ações operacionais concretas. Nos içamentos, isso apareceu em recomendações como o uso de cordas-guia, a realização de pré-levantamento, o ajuste das cintas, a definição de critérios de parada imediata e o reforço da comunicação entre operador e equipe.

No transporte rodoviário, as recomendações concentraram-se em ampliar os pontos de amarração, utilizar manta de alto atrito, adotar amarração cruzada em X,

rechegar as cintas ao longo da viagem, limitar a velocidade em trechos críticos e monitorar condições associadas ao vento, aos freios e aos pneus.

Os relatórios também indicaram potenciais internos de redução de criticidade de até 32% no içamento da fábrica, 25% no transporte rodoviário e 28% no içamento da entrega. Esses percentuais reforçam a consistência da lógica preventiva adotada pelo modelo, pois indicam que as medidas sugeridas atuam diretamente sobre os riscos priorizados em cada etapa. No entanto, devem ser compreendidos como estimativas analíticas produzidas pelo próprio artefato, e não como medições empíricas de redução de risco já verificadas em campo.

Apesar dessa utilidade prática, o segundo ciclo também mostrou que algumas recomendações exigem maior calibragem operacional antes de serem aplicadas. A entrevista evidenciou que medidas como o uso de cordas-guia, o pré-levantamento, o reforço da comunicação ou a adoção de dispositivos auxiliares de içamento não devem ser interpretadas como prescrições automáticas, válidas de forma indistinta para qualquer situação.

Sua pertinência depende de parâmetros operacionais mais amplos, como a altura do içamento, a distância entre a equipe e o módulo, a possibilidade de contato manual direto com a carga, a existência de obstáculos, a geometria do local, o tipo de equipamento utilizado e o grau de exposição da operação ao vento. Esses parâmetros funcionam como elementos de calibragem do modelo, pois permitem diferenciar içamentos baixos, simples e diretamente controláveis de operações mais críticas, nas quais a mesma recomendação pode se tornar indispensável.

Além dos avanços observados, o segundo ciclo evidenciou limitações que precisam ser reconhecidas. A primeira delas refere-se à forma de obtenção dos dados e ao possível viés associado à cultura operacional da empresa. Embora as informações tenham sido fornecidas diretamente pela empresa parceira, parte da análise dependeu de dados relatados nos formulários e na entrevista com o especialista.

Essa estratégia permitiu testar a clareza dos instrumentos e a possibilidade de preenchimento autônomo, mas também sujeitou os resultados à memória, à interpretação e aos procedimentos já consolidados. Práticas repetidas ao longo do tempo podem ser percebidas como adequadas ou suficientes, mesmo quando existam alternativas mais seguras ou eficientes. Portanto, a interpretação dos resultados reflete não apenas as condições objetivas da operação, mas também a forma como a

empresa registra, interpreta e valida seus próprios procedimentos.

Outra limitação importante refere-se ao fato de que o segundo ciclo se concentrou na coerência das saídas do modelo e na utilidade percebida pelo especialista, e não na medição empírica dos efeitos das recomendações. O teste permitiu verificar se os riscos priorizados, as medidas preventivas e a forma de apresentação dos resultados faziam sentido diante da experiência técnica da empresa.

No entanto, não houve uma etapa posterior de aplicação controlada dessas recomendações, capaz de medir se elas reduziriam, de fato, danos ao módulo, atrasos, falhas operacionais ou incidentes. Dessa forma, o segundo ciclo deve ser compreendido como uma avaliação qualitativa e formativa do artefato, voltada à sua coerência, aderência prática e potencial de uso, mas não como uma validação definitiva de sua eficácia operacional.

Portanto, diante disto, considera-se que o artefato ainda permanece em estágio de prototipagem acadêmica. O segundo ciclo demonstrou avanços importantes em relação à primeira versão, no entanto, o modelo ainda não pode ser compreendido como uma ferramenta operacional definitiva. Para isso, seriam necessários novos ciclos de aplicação, envolvendo diferentes empresas, tipos de módulo, rotas, equipamentos, condições climáticas e configurações de içamento, além de comparações entre casos e, futuramente, a implementação do modelo em um ambiente digital mais robusto.

7 DISCUSSÃO

Este capítulo interpreta criticamente os resultados alcançados pela tese, deslocando a análise do plano descritivo para o plano argumentativo, com o objetivo de evidenciar o alcance teórico, metodológico e prático do artefato desenvolvido. Mais do que reapresentar os achados obtidos nos ciclos de avaliação, interessa aqui discutir o que eles revelam sobre a natureza da criticidade no transporte de módulos, sobre os limites das abordagens tradicionalmente empregadas para lidar com esse problema e sobre as contribuições efetivamente oferecidas pela pesquisa ao campo da construção modular. Para tanto, a discussão foi estruturada de modo a articular o diálogo com a literatura, a explicitação das contribuições científicas, metodológicas e industriais da tese, o reconhecimento rigoroso de suas limitações e, por fim, a reflexão sobre desdobramentos futuros, com destaque para o potencial de integração do artefato com sistemas de inteligência artificial.

7.1 OS ACHADOS DA TESE À LUZ DA LITERATURA

A principal aproximação entre esta tese e a literatura está no reconhecimento de que o transporte de módulos constitui uma etapa decisiva para o desempenho da construção modular. Desde contribuições mais amplas sobre a industrialização da construção, como as de Goodier e Gibb (2007), até estudos voltados às barreiras, aos fatores críticos e à logística da construção modular, como Pan e Hon (2018), Wuni e Shen (2019), Wuni, Shen e Mahmud (2019), Wuni, Shen e Hwang (2020), Hsu, Angeloudis e Aurisicchio (2018), Hsu, Aurisicchio e Angeloudis (2020), Hwang, Shan e Looi (2018) e Khan et al. (2023, 2024), observa-se a recorrência de um mesmo diagnóstico: a transferência dos módulos da fábrica para o canteiro não representa apenas uma etapa intermediária, mas um momento em que dimensões da carga, planejamento logístico, coordenação entre agentes, restrições operacionais, condições de içamento, atrasos, custos e danos potenciais podem comprometer a eficiência do sistema.

A principal diferença desta tese, contudo, está na forma de compreender essa criticidade. Embora a literatura tenha avançado ao reconhecer o transporte como uma etapa sensível e ao organizar riscos, barreiras e fatores críticos em categorias analíticas, parte dessas abordagens ainda opera em níveis relativamente agregados

de interpretação. O avanço proposto aqui consiste em demonstrar que a criticidade não é um atributo homogêneo, estável ou indiferenciado do transporte modular. Ao contrário, ela se forma de maneira situada, conforme o tipo de movimento da carga, a etapa da operação, as condições da rota, o método de içamento, as restrições do entorno e a combinação entre variáveis técnicas, ambientais, logísticas e organizacionais. Assim, a contribuição da pesquisa está em explicitar quando, onde e por que determinados riscos se tornam prioritários, oferecendo uma leitura mais granular, relacional e explicável da operação.

Os achados desta tese avançam justamente nesse ponto. Ao acompanhar uma operação real, composta por dois içamentos e um transporte rodoviário de longa distância, a pesquisa mostrou que a criticidade não se mantém constante ao longo do processo. Nos içamentos, os riscos dominantes estiveram associados à instabilidade da carga e às colisões dinâmicas, isto é, a mecanismos de vulnerabilidade ligados ao controle angular, ao equilíbrio das cintas, à trajetória da carga suspensa e à coordenação imediata entre equipe, equipamento e entorno.

No transporte rodoviário, por sua vez, a leitura se alterou de modo significativo: passaram a prevalecer riscos ligados à queda da carga e ao tombamento do veículo, deslocando o foco para a estabilidade do conjunto veículo-módulo, para o sistema de fixação, para a geometria da rota e para os efeitos combinados de vento, curvas e declividades. Essa diferença sugere que o transporte modular não deve ser compreendido como uma única etapa contínua e homogênea, mas como uma cadeia de situações operacionais distintas, cada qual marcada por mecanismos próprios de vulnerabilidade.

É nesse ponto que se situa a contribuição analítica da tese. Os resultados indicam que os fatores de risco não possuem o mesmo peso em toda e qualquer situação. Sua influência depende da forma como se combinam, da etapa em que incidem e do tipo de movimento assumido pela carga. Um módulo leve e volumétrico, por exemplo, não é necessariamente crítico por definição. Ele se torna mais vulnerável quando essa condição se articula com ausência de amortecimento, amarração simples, vento lateral, geometria desfavorável da rota ou baixa capacidade de estabilização durante o içamento. Assim, o risco deixa de ser tratado apenas como um evento possível e passa a ser compreendido como uma condição produzida pela interação entre características da carga, variáveis ambientais, decisões operacionais e arranjos logísticos.

A distinção entre movimento vertical e movimento horizontal é central para essa leitura. No içamento, a vulnerabilidade se concentra na carga suspensa, na estabilidade momentânea do conjunto, no controle da trajetória e na interação entre guindaste, cintas, equipe e entorno imediato. No transporte rodoviário, a criticidade se desloca para a interação dinâmica entre carga, veículo, rota e ambiente. Essa diferença mostra que os mecanismos de risco não apenas se acumulam ao longo da cadeia logística, mas se transformam conforme muda o regime operacional da carga. Com isso, a tese reforça a necessidade de distinguir não apenas quais riscos existem, mas em que condições eles tendem a se tornar mais relevantes.

Essa leitura também altera a forma de compreender as medidas de controle. Parte dos estudos sobre transporte e logística na construção modular apresenta respostas preventivas em nível mais geral, como diretrizes de planejamento, melhoria da coordenação, seleção adequada de rotas, capacitação de equipes ou aprimoramento da gestão logística. Essas recomendações são relevantes, especialmente diante dos desafios apontados por Hwang, Shan e Looi (2018), Hsu, Angeloudis e Aurisicchio (2018), Hsu, Aurisicchio e Angeloudis (2020) e Khan et al. (2023). Contudo, os resultados desta tese indicam que a eficácia dessas medidas depende de sua vinculação direta às condições específicas que produzem a vulnerabilidade. Nos içamentos, as respostas mais pertinentes estiveram ligadas ao controle angular, ao pré-levantamento, ao equilíbrio das cintas e à coordenação da equipe. No transporte rodoviário, a ênfase recaiu sobre fixação, atrito, tensionamento, velocidade, freios, pneus e monitoramento das condições de vento.

Desse diálogo com a literatura emerge uma conclusão central: a análise do risco no transporte modular ganha poder explicativo quando deixa de tratar a operação como um bloco único e passa a decompor sua criticidade segundo etapas, movimentos e configurações específicas de vulnerabilidade. Essa passagem, da identificação ampla de riscos para a compreensão situada das condições que os tornam prioritários, sintetiza a principal contribuição analítica da tese.

7.2 CONTRIBUIÇÕES CIENTÍFICAS

A contribuição científica central desta tese está em oferecer uma forma mais precisa de compreender a criticidade no transporte de módulos. Em vez de tratar o risco como um conjunto estável de eventos possíveis, a pesquisa demonstrou que sua

relevância varia conforme a etapa da operação, o tipo de movimento da carga e a interação entre variáveis técnicas, ambientais, logísticas e organizacionais. Essa formulação desloca a compreensão do risco de uma lógica predominantemente estática para uma lógica contextual e explicativa.

As principais contribuições científicas da tese podem ser sintetizadas em quatro dimensões complementares, relacionadas à forma de compreender, estruturar e explicar a criticidade no transporte modular, conforme apresentado no Quadro 11.

Quadro 11 - Síntese das contribuições científicas da tese

Contribuição científica	Formulação sintética	Avanço conceitual produzido
Diferenciação dos domínios operacionais	O transporte modular não é tratado como um bloco analítico único, mas como uma cadeia composta por domínios operacionais distintos, especialmente: içamento (carregamento / descarregamento) e transporte rodoviário.	Demonstra que cada domínio possui mecanismos próprios de vulnerabilidade, relações causais específicas e exigências particulares de mitigação.
Movimento da carga como chave analítica	A distinção entre movimento vertical e movimento horizontal é proposta como chave para interpretar a alteração dos riscos prioritários ao longo da operação.	Transforma uma diferença operacional em categoria analítica para explicar por que a criticidade se desloca entre estabilidade da carga suspensa, no içamento, e estabilidade do conjunto veículo-módulo, no transporte rodoviário.
Risco como condição relacional	A criticidade é compreendida como resultado da combinação entre variáveis técnicas, ambientais, logísticas e organizacionais.	Supera a leitura isolada dos fatores de risco e evidencia que determinados eventos se tornam prioritários apenas em configurações operacionais específicas.
Integração entre variáveis, riscos e mitigação	A tese articula variáveis operacionais, riscos ativados e medidas de mitigação em uma mesma estrutura analítica.	Conecta diagnóstico e resposta preventiva, permitindo interpretar o risco de forma rastreável e aderente ao contexto real da operação.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Há ainda uma implicação científica mais ampla, transversal ao trabalho. Embora a tese tenha como objeto específico o transporte de módulos, a lógica analítica desenvolvida permite ampliar a compreensão do risco em operações logísticas complexas que envolvem cargas volumosas, sensíveis, indivisíveis ou de difícil movimentação. Nesses contextos, assim como no transporte modular, a criticidade não decorre apenas da presença isolada de fatores de risco, mas da interação entre características da carga, tipo de movimento, infraestrutura disponível, condições ambientais e decisões operacionais.

Desse modo, a tese não propõe uma generalização estatística para outros

setores, mas oferece uma base de generalização analítica potencialmente transferível para operações semelhantes. Seu principal avanço científico não se resume, portanto, à identificação de riscos ou ao desenvolvimento de um modelo aplicado, mas à proposição de uma forma mais refinada de organizar e interpretar o problema. Ao demonstrar que a criticidade no transporte modular é variável, relacional e dependente da etapa da operação, a pesquisa amplia a capacidade de compreender esse fenômeno de modo analítico, e não apenas descritivo, ao mesmo tempo em que abre caminho para sua exploração futura em outras operações logísticas complexas que compartilhem condições semelhantes de vulnerabilidade operacional.

7.3 CONTRIBUIÇÕES METODOLÓGICAS

Do ponto de vista metodológico, a tese contribui ao demonstrar que a DSR pode ser empregada de forma consistente para enfrentar um problema real do setor da construção que, embora amplamente reconhecido, ainda carece de instrumentos analíticos mais aderentes à prática. A relevância desse ponto está em mostrar que o método não foi mobilizado apenas como estrutura formal de pesquisa, mas como lógica efetiva de construção, refinamento e avaliação de uma solução voltada ao apoio à decisão em operações complexas. Em vez de permanecer no plano da descrição do problema, a pesquisa avançou para a proposição de um artefato, testado, avaliado e reelaborado em diálogo com evidências teóricas, empíricas e profissionais.

Uma das contribuições metodológicas mais relevantes da pesquisa reside no desdobramento analítico do artefato em dois domínios operacionais específicos, sem perda de sua unidade conceitual. O amadurecimento do modelo não conduziu à fragmentação em soluções independentes, mas à especialização controlada de uma mesma arquitetura metodológica, aplicada ao içamento e ao transporte rodoviário. Em ambos os domínios, preservou-se a lógica central de funcionamento do artefato, baseada na entrada de variáveis operacionais, no processamento analítico das condições de risco, na priorização da criticidade e na geração de medidas de mitigação. O que se modificou foi o conteúdo técnico de cada aplicação: os riscos considerados, as relações entre variáveis e eventos e os mecanismos de vulnerabilidade próprios de cada tipo de movimento da carga. Com isso, a pesquisa demonstra que um artefato pode ganhar precisão sem perder coerência, especializar-se sem se fragmentar e adaptar-se a diferentes contextos operacionais sem romper

sua base metodológica comum.

Esse refinamento teve implicações metodológicas concretas. Ao longo do segundo ciclo, o artefato passou a gerar três relatórios específicos: içamento na fábrica, transporte rodoviário e içamento na entrega, cada um com sua própria leitura de criticidade, seus riscos prioritários e suas recomendações correspondentes. Esse movimento é metodologicamente relevante porque mostra que a precisão da análise não depende apenas da sofisticação interna do modelo, mas também da capacidade de decompor a operação em unidades compatíveis com sua dinâmica real. Em vez de tentar responder à operação como um todo com uma única saída agregada, o artefato ganhou força justamente ao se tornar capaz de diferenciar analiticamente os momentos que compõem a cadeia logística.

Outra contribuição metodológica importante está na articulação entre diferentes procedimentos e instrumentos ao longo do processo de desenvolvimento, aplicação, avaliação e refinamento do artefato. O modelo não foi construído exclusivamente a partir da revisão da literatura, nem avaliado apenas por julgamento abstrato de especialistas. Sua trajetória incorporou revisão teórica, levantamento de riscos em campo, dados operacionais informados por especialistas por meio de formulários estruturados e conhecimento empírico profissional obtido em entrevistas semiestruturadas.

Essa articulação não representa apenas uma descrição do percurso metodológico da pesquisa, já detalhado no Capítulo 3, mas constitui uma contribuição da própria tese. Ela demonstra como diferentes fontes de evidência podem ser combinadas para desenvolver, testar e refinar um artefato voltado a operações complexas, aproximando conhecimento científico, observação empírica, modelagem analítica e realidade operacional. Essa lógica é sintetizada no Quadro 12.

Essa articulação reforça a aderência da pesquisa à lógica iterativa da DSR. O artefato não foi concebido como uma solução fechada, derivada apenas da literatura, nem como um instrumento validado de forma definitiva em um único ciclo. Ao contrário, seu desenvolvimento resultou da incorporação progressiva de evidências teóricas, empíricas, operacionais e profissionais. Nesse sentido, o segundo ciclo de avaliação representa uma etapa avançada de maturação do artefato, mas não encerra seu desenvolvimento. As medidas de refinamento ainda abertas indicam a possibilidade de novos ciclos de teste, ajuste e calibração, em coerência com a própria natureza evolutiva da DSR.

Quadro 12 - Articulação metodológica que sustentou o desenvolvimento e o refinamento do artefato.

Base metodológica mobilizada	Papel no percurso da pesquisa	Contribuição metodológica produzida
Revisão da literatura	Fundamentou o problema de pesquisa e orientou a construção inicial do artefato.	Permitiu transformar conhecimento teórico disperso em categorias operacionais de risco, variáveis de entrada, relações analíticas e medidas de mitigação.
Levantamento de riscos em campo	Aproximou o desenvolvimento do artefato de situações reais de transporte e içamento de módulos.	Evitou que o modelo fosse estruturado apenas por abstração teórica, incorporando vulnerabilidades observadas na prática operacional.
Formulários estruturados preenchidos por especialistas	Alimentaram o artefato nos ciclos de avaliação, a partir de condições operacionais	Testaram a capacidade do modelo de converter informações do contexto real em variáveis de entrada, sem depender exclusivamente da mediação direta do pesquisador.
Entrevistas semiestruturadas com especialistas	Permitiram a avaliação crítica dos resultados e subsidiaram o refinamento do artefato.	Transformaram a avaliação em parte constitutiva do desenvolvimento da solução, agregando conhecimento empírico profissional ao processo de amadurecimento do modelo.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Também merece destaque a forma como a etapa de entrada de dados foi incorporada à avaliação do artefato. O uso de formulários estruturados, preenchidos autonomamente pelo especialista, não foi apenas um detalhe operacional da pesquisa. Ele funcionou como teste metodológico relevante sobre a inteligibilidade do instrumento e sobre a viabilidade inicial de uso externo ao pesquisador. Isso é importante porque artefatos dessa natureza não se sustentam apenas pela coerência de seu processamento analítico. Eles também precisam demonstrar que podem ser alimentados por agentes do campo sem depender integralmente da intermediação acadêmica. Nesse sentido, o preenchimento autônomo e a facilidade relatada pelo especialista configuram uma evidência metodológica significativa de usabilidade.

Há ainda uma contribuição metodológica importante na forma como a pesquisa lidou com o processo de refinamento. O desenvolvimento do artefato não seguiu uma lógica linear de concepção e simples aplicação. Ao contrário, os ciclos de avaliação mostraram que o refinamento do modelo depende da tensão produtiva entre o que a lógica analítica aponta e o que a prática operacional devolve como confirmação, ajuste ou relativização. A apreciação dos especialistas foi particularmente valiosa nesse sentido, porque não serviu apenas para verificar os resultados, mas também para

agregar conhecimento empírico ao processo de amadurecimento do artefato. Isso reforça uma ideia metodologicamente forte: em artefatos voltados a operações complexas, a avaliação não deve ser entendida apenas como etapa de validação, mas como parte constitutiva do próprio desenvolvimento da solução.

Em síntese, a contribuição metodológica desta tese não reside somente em ter aplicado a DSR a um problema do setor da construção. Seu avanço está em mostrar, de maneira concreta, como um artefato pode preservar unidade lógica e, ao mesmo tempo, ganhar precisão por especialização analítica; como pode ser alimentado por diferentes procedimentos e instrumentos de pesquisa; como pode ser refinado por ciclos sucessivos de aplicação e avaliação; e como pode permanecer aberto a novos aprimoramentos sem perder consistência metodológica. Assim, a pesquisa demonstra que, em artefatos voltados a operações complexas, avaliar não significa apenas verificar se uma solução funciona, mas produzir conhecimento para que ela continue evoluindo.

7.4 CONTRIBUIÇÕES PARA INDÚSTRIA

A contribuição mais imediata desta tese para a indústria está em deslocar a gestão do risco de uma postura predominantemente reativa para uma lógica de antecipação operacional. Em muitas situações, os riscos do transporte modular só ganham centralidade quando a operação já está em andamento, quando surgem imprevistos em campo ou, no pior cenário, quando o dano já se materializou. O artefato desenvolvido nesta pesquisa atua antes desse ponto. Seu valor, portanto, não está em prometer eliminação da incerteza, mas em reduzir a opacidade da operação antes de sua execução, oferecendo uma leitura mais organizada das vulnerabilidades que merecem atenção prioritária.

Esse deslocamento tem implicações práticas importantes. No ambiente empresarial, especialmente em operações logísticas mais pressionadas por prazo, custo e disponibilidade de equipe, é comum que o gerenciamento de risco se dilua entre decisões dispersas, checklists genéricos e soluções improvisadas. A tese mostra que esse problema pode ser enfrentado por uma estrutura analítica capaz de organizar previamente a leitura da operação. Em vez de tratar todos os riscos como equivalentes, o artefato contribui para distinguir quais fatores são efetivamente mais críticos em cada etapa e quais medidas de mitigação têm maior aderência ao caso.

Isso representa um ganho concreto para a prática, porque ajuda a transformar o planejamento em uma atividade mais seletiva, menos intuitiva e mais orientada por evidências operacionais.

Outra contribuição importante está na capacidade de diferenciar recomendações conforme a natureza da operação. Essa é uma vantagem particularmente relevante para a indústria, porque uma parte significativa dos problemas em campo decorre justamente da aplicação indistinta de soluções genéricas a situações muito diferentes entre si. A tese mostrou que os içamentos e o transporte rodoviário mobilizam mecanismos distintos de vulnerabilidade.

Ao preservar uma lógica comum de funcionamento do artefato, mas refiná-la em dois campos específicos de aplicação, a pesquisa produziu saídas mais precisas. Isso significa que a empresa não recebe apenas um diagnóstico global da operação, mas leituras específicas para o içamento na fábrica, o transporte rodoviário e o içamento em campo, cada uma com seus riscos prioritários e suas medidas correspondentes. Para a indústria, esse ganho de granularidade é valioso porque aumenta a aderência entre análise e execução.

A contribuição prática do artefato aparece, também, na forma como ele transforma recomendações técnicas em ações operacionais mais objetivas. Nos içamentos, isso significa destacar medidas como pré-levantamento, ajuste de cintas, controle angular, critérios de parada e coordenação da equipe. No transporte rodoviário, significa concentrar atenção em fixação da carga, atrito entre módulo e plataforma, verificação de amarrações, controle de velocidade, monitoramento do vento e checagem das condições do veículo. Esse tipo de saída tem valor industrial porque aproxima o discurso sobre risco da tomada de decisão cotidiana. Em vez de produzir apenas alertas genéricos, o artefato contribui para orientar a preparação prática da operação.

Há ainda um aspecto importante relacionado à comunicação e à padronização interna. Em operações modulares, decisões críticas nem sempre são tomadas por um único agente. Elas envolvem empresa fabricante, transportadora, operador do guindaste, motorista, equipe de apoio e, em alguns casos, o próprio cliente. Ao organizar os riscos prioritários e as medidas correspondentes de forma estruturada, o artefato contribui para criar uma linguagem comum entre os envolvidos. Isso é particularmente relevante para a indústria porque parte importante dos incidentes e improvisações não decorre apenas da presença de risco físico, mas da ausência de

alinhamento operacional entre os atores responsáveis pela execução.

Outro ponto que merece destaque é a usabilidade inicial demonstrada no segundo ciclo. O fato de o especialista ter conseguido preencher autonomamente os formulários de entrada e ter relatado facilidade nesse processo sugere que o artefato começa a apresentar condições reais de apropriação pelo campo profissional. Esse aspecto é estratégico para a indústria. Uma ferramenta de apoio à decisão só se torna útil quando consegue ser compreendida e alimentada por quem opera a realidade que ela pretende analisar. Ainda que a pesquisa não sustente, neste momento, uma adoção ampla e irrestrita do artefato, ela mostra que já existe um grau inicial de viabilidade prática em sua lógica de aplicação.

A tese também oferece uma contribuição indireta, mas importante, ao evidenciar que a criticidade da operação não depende apenas de fatores físicos da carga e da rota. A entrevista do segundo ciclo mostrou, por exemplo, que pressões de prazo, cultura operacional, decisões do motorista e critérios de agendamento podem alterar de forma significativa a exposição ao risco. Para a indústria, esse ponto é especialmente relevante porque amplia o entendimento do problema: gerir risco no transporte modular não é apenas cuidar da amarração, do caminhão ou do guindaste, mas também criar condições organizacionais para que decisões prudentes possam ser tomadas em campo.

Em síntese, a contribuição desta tese para a indústria não está em oferecer uma solução fechada ou um protocolo definitivo para toda e qualquer operação. Seu valor está em introduzir uma racionalidade mais antecipatória, mais seletiva e mais contextualizada para o planejamento do transporte modular. Em um setor no qual a pressão por eficiência frequentemente convive com alta exposição operacional, essa mudança de enfoque já representa, por si só, uma contribuição relevante.

7.5 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Reconhecer as limitações desta pesquisa não significa enfraquecer suas contribuições, mas delimitar com precisão o alcance de seus resultados. Em uma tese de natureza aplicada, que desenvolve e avalia um artefato voltado ao apoio à decisão em operações complexas, a maturidade analítica não está em sugerir que o problema foi inteiramente resolvido, mas em mostrar com clareza o que o estudo efetivamente demonstrou, em que condições isso foi possível e quais aspectos ainda exigem

aprofundamento. Nesse sentido, as limitações aqui apresentadas não invalidam os achados da tese, elas definem o seu campo de validade e indicam, com honestidade intelectual, os pontos em que o artefato ainda demanda ampliação, calibração e novas evidências.

A primeira limitação diz respeito à amplitude empírica da avaliação. Embora os ciclos realizados tenham sido suficientes para desenvolver, refinar e qualificar o artefato, a pesquisa ainda se apoia em número restrito de aplicações e em um conjunto limitado de operações reais. Isso significa que os resultados alcançados não devem ser generalizados de forma automática para toda a diversidade de cenários possíveis no transporte modular. Operações com outras tipologias de módulo, diferentes arranjos de carga, distintas configurações logísticas, variações mais intensas de relevo ou contextos organizacionais diversos podem mobilizar padrões de risco que não foram integralmente captados neste estudo. A robustez do artefato, portanto, foi demonstrada em condições relevantes, mas ainda circunscritas.

Uma segunda limitação está associada à própria natureza contextual do modelo. Como o artefato opera a partir de variáveis específicas de cada operação, a qualidade de suas saídas depende diretamente da qualidade das entradas fornecidas. Isso significa que informações incompletas, imprecisas ou mal interpretadas podem comprometer a consistência da leitura produzida. Em outras palavras, o artefato não elimina a necessidade de julgamento técnico na etapa de alimentação, ele reorganiza essa etapa, tornando-a mais estruturada e inteligível. O fato de os formulários terem sido preenchidos autonomamente pelo especialista e considerados fáceis de responder constitui um avanço importante, mas não elimina a dependência metodológica de entradas bem qualificadas. Essa é uma limitação inerente a modelos contextuais: sua força está na sensibilidade ao caso, mas essa mesma sensibilidade exige atenção à qualidade dos dados informados.

A pesquisa também evidenciou uma limitação mais fina, mas metodologicamente relevante: algumas recomendações do modelo podem aparecer superdimensionadas em operações de baixa complexidade espacial, especialmente em içamentos muito curtos, de pequena amplitude de deslocamento e sem empilhamento. Esse ponto ficou claro na apreciação do especialista no segundo ciclo, ao explicar que determinadas medidas fazem muito sentido em operações mais altas, mais longas ou mais expostas, mas perdem parte de sua pertinência em cenários extremamente rápidos e controlados.

Essa observação não invalida a lógica do artefato, ao contrário, mostra que ele já alcançou um grau de detalhamento suficiente para que seus próprios limites de parametrização se tornem visíveis. Ainda assim, ela indica a necessidade de novas calibrações, capazes de tornar o modelo mais sensível à diferença entre operações apenas formalmente similares, mas espacial e dinamicamente distintas.

Outra limitação importante está no fato de que a avaliação incidiu predominantemente sobre riscos potenciais e coerência preventiva, e não sobre uma base ampla de falhas efetivamente materializadas. Isso é coerente com a proposta da tese, já que o objetivo do artefato é atuar antes da ocorrência do sinistro, apoiando a prevenção e a preparação da operação. No entanto, essa característica também delimita o tipo de validação alcançado. A pesquisa demonstrou que o modelo é plausível, coerente, inteligível e aderente ao campo, mas não confrontou seus resultados com um volume expressivo de ocorrências reais, acidentes documentados ou históricos estatísticos extensos. Isso significa que o artefato foi validado principalmente em sua capacidade analítica e preventiva, e não em um regime de teste massivo baseado em falhas consumadas.

Também merece ser reconhecido o fato de que a pesquisa se desenvolveu em um recorte específico da construção modular, concentrado em módulos e em operações rodoviárias e de içamento associadas a esse tipo de unidade. Essa delimitação foi necessária para dar consistência ao problema e viabilidade ao desenvolvimento do artefato, mas, ao mesmo tempo, limita a extrapolação direta dos achados para outras formas de pré-fabricação, outros sistemas construtivos industrializados ou outras modalidades de transporte. A força da tese está justamente em sua precisão temática. Ainda assim, essa precisão implica reconhecer que o modelo foi concebido e avaliado dentro de um universo técnico relativamente definido.

Há, além disso, uma limitação própria do estágio de maturidade do artefato. Embora os ciclos de avaliação tenham mostrado coerência técnica, utilidade prática e capacidade adaptativa, a pesquisa não sustenta que a solução esteja encerrada ou pronta para aplicação irrestrita em escala ampla. O que os resultados permitem afirmar é que o artefato alcançou um nível promissor de validação, suficiente para demonstrar sua relevância e plausibilidade, mas ainda dependente de novos testes, novos contextos e novas interações com o campo para atingir maior estabilidade. Essa distinção é importante. O valor da tese não está em apresentar uma ferramenta finalizada, mas em demonstrar, com rigor, que ela já possui consistência suficiente

para justificar seu aprofundamento.

Por fim, a própria abertura da pesquisa para futuras integrações, especialmente com sistemas mais automatizados e com inteligência artificial, revela uma limitação atual e, ao mesmo tempo, uma agenda de continuidade. O artefato ainda depende, em parte, de inserção manual de variáveis e de interpretação técnica local. Isso não compromete seu valor atual, mas indica que sua evolução futura poderá ampliar significativamente a capacidade de captura de dados, atualização dinâmica de cenários e refinamento das recomendações. Em outras palavras, algumas das limitações hoje observadas não são sinais de insuficiência do modelo, mas sinais do estágio em que ele se encontra.

Assim, as limitações da pesquisa devem ser compreendidas não como fraquezas que desautorizam suas contribuições, mas como delimitações que tornam sua defesa mais sólida. Ao reconhecer o caráter contextual do artefato, o número ainda restrito de aplicações, a dependência da qualidade das entradas e a necessidade de calibração adicional em certos cenários, a tese explicita com clareza o que já foi demonstrado e o que ainda precisa ser desenvolvido. Essa delimitação, longe de reduzir a força do trabalho, reforça sua consistência e sua maturidade científica.

7.6 POTENCIAL DE INTEGRAÇÃO COM INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

A integração com inteligência artificial representa um dos desdobramentos mais promissores do artefato desenvolvido nesta tese. Essa possibilidade não surge como um acréscimo externo ou oportunista, motivado apenas pela difusão recente do tema, mas como um prolongamento coerente da própria lógica analítica construída ao longo da pesquisa. Como o modelo já opera a partir da relação entre variáveis contextuais, riscos prioritários e medidas de mitigação, ele oferece uma base favorável para futuras camadas de automação, atualização dinâmica e apoio inteligente à decisão. Em outras palavras, a integração com inteligência artificial não significaria romper com a estrutura do artefato, mas ampliar sua capacidade de operar sobre contextos mais complexos, variáveis e sensíveis ao tempo.

Esse potencial torna-se ainda mais evidente quando se observa que o refinamento do artefato foi concebido em torno de uma lógica de ativação binária dos riscos. No modelo desenvolvido, a presença ou ausência de determinadas condições

operacionais aciona conjuntos específicos de vulnerabilidades, estabelecendo uma relação explícita entre variáveis de entrada, ativação de riscos e geração de saídas analíticas. Essa arquitetura foi importante não apenas para organizar o processamento do artefato no estágio atual da pesquisa, mas também porque criou uma base metodologicamente compatível com futuras integrações tecnológicas. A incorporação de inteligência artificial, nesse sentido, poderia apoiar-se em uma estrutura que já trabalha com rastreabilidade, associação entre condições e eventos e diferenciação entre domínios operacionais.

Um primeiro campo de avanço está na coleta e no enriquecimento automático das variáveis de entrada. Na configuração atual, o artefato depende do preenchimento estruturado de formulários e da interpretação técnica das condições da operação. Esse arranjo já representa um avanço importante, sobretudo porque mostrou ser inteligível e viável para o especialista do campo. No entanto, a integração com inteligência artificial poderia reduzir parte da carga manual de preenchimento e ampliar a precisão contextual da análise. Informações como distância da rota, trechos serranos, presença de curvas críticas, perfil altimétrico, previsão de vento, ocorrência de chuva, restrições viárias e condições locais do trajeto poderiam ser captadas ou complementadas automaticamente a partir de bases externas. Para operações longas e territorialmente heterogêneas, como a observada no segundo ciclo, esse ganho seria especialmente relevante.

Além das bases externas, a integração com tecnologias de sensoriamento e *Internet of Things* poderia ampliar a capacidade de captação direta das condições operacionais. Sensores embarcados, como acelerômetros, inclinômetros, dispositivos de GPS e registradores de vibração, poderiam fornecer dados sobre trepidações, inclinação da carga, acelerações bruscas, frenagens, velocidade, paradas não previstas e variações do comportamento dinâmico do conjunto veículo-módulo. Esses dados não substituiriam a análise técnica da operação, mas poderiam enriquecer a leitura do artefato, permitindo que determinadas variáveis deixassem de depender exclusivamente do preenchimento manual e passassem a ser complementadas por informações captadas durante a execução.

Com o auxílio dessas tecnologias, o artefato poderia evoluir de uma lógica predominantemente antecipatória para uma leitura monitorada e responsiva da operação. Isso significa que a análise de risco deixaria de se apoiar apenas nas condições previstas antes da execução e passaria a incorporar sinais captados

durante o próprio deslocamento do módulo. Um sensor instalado na carga, por exemplo, poderia registrar níveis elevados de vibração, aceleração ou inclinação e emitir alertas ao motorista ou à equipe de acompanhamento. A partir desse alerta, poderiam ser adotadas medidas imediatas, como redução da velocidade, parada segura para inspeção, reforço da verificação da carga ou reavaliação do trajeto. Nessa perspectiva, a tecnologia não substituiria o julgamento técnico dos profissionais, mas ampliaria a capacidade do artefato de detectar alterações críticas, atualizar a leitura da operação e apoiar respostas preventivas em tempo oportuno.

Outro desdobramento importante está justamente na possibilidade de atualização dinâmica da criticidade. Na forma atual, o artefato analisa as condições previstas para a operação e organiza, com base nelas, a priorização dos riscos e das medidas de mitigação. Essa lógica já é valiosa porque desloca a gestão do risco para um momento anterior à execução, permitindo antecipar vulnerabilidades antes que a operação ocorra. A integração com inteligência artificial, especialmente quando associada a dados externos e sensores embarcados, poderia acrescentar uma camada responsiva ao modelo, permitindo revisar cenários à medida que novas informações surgissem. Mudanças meteorológicas, alterações de rota, atrasos, paradas não previstas, congestionamentos, restrições emergentes ou padrões anômalos de vibração e inclinação poderiam modificar a leitura dos riscos prioritários ao longo da operação.

A inteligência artificial também poderia contribuir para tornar o artefato mais sensível à experiência acumulada. À medida que novas operações fossem registradas, seria possível identificar padrões recorrentes, refinar ponderações, ajustar relações entre variáveis e aperfeiçoar a pertinência das medidas de mitigação sugeridas. Esse ponto é particularmente importante porque a própria pesquisa mostrou que certas recomendações ganham ou perdem aderência conforme a escala do içamento, a geometria da carga, o perfil da rota e a forma de organização da operação. Um sistema com capacidade de aprendizagem poderia reconhecer essas recorrências com maior rapidez e ajudar a tornar o artefato progressivamente mais preciso, sem abandonar sua base analítica original.

No entanto, é importante tratar essa possibilidade com cautela. A inteligência artificial e as tecnologias de sensoriamento não devem ser vistas como soluções capazes de eliminar a incerteza inerente às operações modulares. O transporte de módulos continuará sendo uma atividade exposta a variáveis físicas, humanas,

logísticas e organizacionais que não podem ser inteiramente absorvidas por sistemas automatizados. O valor dessas tecnologias, nesse contexto, não estaria em substituir a experiência de operadores, motoristas, engenheiros ou gestores, mas em ampliar a capacidade de leitura, organização e atualização das condições de risco com maior velocidade, consistência e amplitude informacional.

Também é necessário reconhecer que essa integração não foi plenamente desenvolvida na presente tese. A pesquisa não apresenta um sistema de inteligência artificial implementado, nem um sistema de sensoriamento embarcado ou *Internet of Things* aplicado ao transporte modular. Também não reivindica um nível de automação que ainda não foi empiricamente demonstrado.

O que este trabalho oferece é uma estrutura analítica compatível com futuras aplicações inteligentes. A lógica binária de ativação dos riscos, a diferenciação entre içamento e transporte rodoviário, a geração de relatórios específicos por etapa e a alimentação estruturada por variáveis criam uma base fértil para esse tipo de evolução. Essa distinção é importante para a honestidade metodológica da pesquisa. A inteligência artificial aparece aqui não como promessa vaga de inovação, mas como desdobramento plausível de uma arquitetura já orientada por relações explícitas entre condições operacionais, ativação de riscos e produção de saídas analíticas.

Assim, o potencial de integração com inteligência artificial deve ser entendido como uma agenda de continuidade coerente com os resultados desta tese. Ele aponta para a possibilidade de tornar o artefato mais dinâmico, mais automatizado, mais sensível ao contexto e mais útil em situações operacionais reais.

Ao mesmo tempo, reforça uma ideia central deste trabalho: a inteligência mais importante para a gestão de riscos no transporte modular não está apenas na tecnologia em si, mas na qualidade da lógica analítica que organiza a interpretação da operação. É justamente por isso que a integração com inteligência artificial, internet das coisas e sistemas de sensoriamento aparece aqui não como um fim em si mesma, mas como um caminho promissor para ampliar o alcance de uma arquitetura que já demonstrou consistência, coerência analítica e valor prático.

Em conjunto, as discussões apresentadas neste capítulo mostram que o valor da tese não está apenas no artefato desenvolvido, mas na lógica analítica que ele consolida. Ao diferenciar domínios operacionais, interpretar a criticidade como condição relacional, articular variáveis, riscos e medidas de mitigação, e reconhecer os limites e possibilidades de evolução do modelo, a pesquisa contribui para uma

compreensão mais precisa, aplicada e metodologicamente consciente do transporte modular. Essa leitura prepara a conclusão da tese, na qual são retomados os objetivos, os principais resultados e os caminhos futuros de desenvolvimento do artefato.

8 CONCLUSÕES

Este capítulo encerra a tese retomando, em perspectiva conclusiva, o percurso construído ao longo da pesquisa e o sentido mais amplo dos resultados alcançados. Sem antecipar integralmente as conclusões que serão detalhadas nas seções seguintes, busca-se aqui reunir os elementos centrais do estudo, explicitar o alcance de suas contribuições e situar seus desdobramentos para o avanço da discussão sobre construção modular e gestão de riscos no transporte de módulos.

8.1 SÍNTESE DOS RESULTADOS

Esta tese partiu de um problema objetivo e ainda pouco estruturado no campo da construção modular: a ausência de instrumentos capazes de interpretar, de forma contextualizada, os riscos envolvidos no transporte de módulos. Embora a literatura já reconheça a criticidade dessa etapa, grande parte das abordagens disponíveis ainda opera com classificações amplas, matrizes relativamente estáticas ou recomendações genéricas, pouco sensíveis à variação concreta das operações. Diante disso, a pesquisa assumiu como propósito central desenvolver e avaliar um artefato capaz de apoiar a identificação, a priorização e a mitigação de riscos no transporte modular, articulando variáveis operacionais, leitura contextual e geração de saídas orientadas à decisão.

Os resultados obtidos permitem afirmar que esse propósito foi alcançado. Ao longo da pesquisa, foi desenvolvido um artefato com base lógica comum, posteriormente refinado até alcançar duas estruturas analíticas específicas: uma voltada ao içamento e outra ao transporte rodoviário. Esse desdobramento não fragmentou o modelo, ao contrário, marcou seu amadurecimento. A manutenção de uma lógica única de funcionamento, combinada à diferenciação entre domínios operacionais distintos, ampliou a precisão da leitura de risco e permitiu respostas mais aderentes à realidade das operações. Em vez de produzir uma interpretação homogênea para toda a cadeia logística, o artefato passou a gerar saídas específicas para o içamento na fábrica, o transporte rodoviário e o içamento em campo, elevando a granularidade da análise e reduzindo o risco de generalizações indevidas.

Os ciclos de avaliação realizados em Portugal e no Brasil foram decisivos para demonstrar essa evolução. O primeiro teve caráter exploratório e permitiu testar a

coerência inicial do artefato, evidenciando tanto seu potencial quanto a necessidade de refinamentos estruturais. O segundo submeteu o modelo a uma operação mais extensa, mais exigente e logisticamente mais complexa, envolvendo dois içamentos e um transporte rodoviário de longa distância. Nesse contexto, o artefato demonstrou capacidade adaptativa ao distinguir padrões distintos de vulnerabilidade conforme a etapa analisada. Nos içamentos, prevaleceram riscos ligados à instabilidade da carga e às colisões dinâmicas. No transporte rodoviário, destacaram-se a queda da carga e o tombamento do veículo. Essa diferenciação confirmou que a criticidade no transporte modular não se distribui de forma homogênea e que sua leitura depende da etapa, do tipo de movimento da carga e da interação entre variáveis específicas.

Também se mostrou decisivo o fato de que os outputs do artefato não permaneceram em um plano abstrato. As medidas de mitigação geradas foram compreensíveis, operacionais e, em boa medida, reconhecidas como pertinentes pelos especialistas consultados. Esse aspecto fortalece a validade do trabalho, porque mostra que a pesquisa não se limitou a organizar um modelo teoricamente coerente, mas produziu uma estrutura com capacidade real de dialogar com a prática. Ao mesmo tempo, a avaliação em campo revelou que algumas recomendações ainda exigem calibragem mais fina, sobretudo em operações muito curtas, de baixa altura e pequena amplitude de deslocamento, nas quais determinadas medidas podem aparecer superdimensionadas. Longe de enfraquecer a tese, essa constatação reforça sua maturidade: o artefato já alcançou um grau de detalhamento suficiente para que seus próprios pontos de ajuste se tornem visíveis.

O principal resultado desta pesquisa, portanto, não está apenas em ter desenvolvido um artefato analítico para o transporte de módulos. Seu avanço decisivo está em demonstrar que a criticidade dessa operação é contextual, relacional e operacionalmente variável. É essa conclusão que atravessa toda a tese: o risco no transporte modular não pode ser adequadamente compreendido por abordagens homogêneas, pois muda de natureza conforme a etapa da operação, o tipo de movimento da carga e o arranjo concreto das condições técnicas, ambientais, logísticas e organizacionais.

8.2 ATENDIMENTO AOS OBJETIVOS

Os objetivos definidos no início da pesquisa foram atendidos de forma coerente,

progressiva e mutuamente articulada. O primeiro deles consistia em compreender o problema e situá-lo teoricamente. Esse objetivo foi alcançado ao demonstrar, com base na literatura, que o transporte de módulos constitui uma etapa crítica da construção modular e que, apesar desse reconhecimento, ainda carece de instrumentos capazes de traduzir essa criticidade em leitura analítica mais precisa e operacionalmente aplicável.

O segundo objetivo consistia em estruturar as bases do artefato. Também nesse ponto a tese alcançou o que se propôs. A pesquisa organizou variáveis operacionais relevantes, articulou-as a um sistema de ativação binária dos riscos e construiu uma lógica de processamento capaz de converter entradas contextuais em priorização de vulnerabilidades e proposição de medidas de mitigação. O resultado não foi apenas uma matriz ampliada de riscos, mas um artefato analítico com capacidade de responder a combinações específicas de condições operacionais, preservando coerência interna e abertura ao refinamento.

O terceiro objetivo dizia respeito à avaliação do desempenho do artefato em situações empíricas reais. Esse objetivo foi igualmente atingido. Os dois ciclos de avaliação permitiram examinar, em contextos distintos, tanto a consistência analítica do modelo quanto sua aderência à prática. O primeiro ciclo foi fundamental para expor limitações e orientar ajustes estruturais. O segundo, mais complexo e multifásico, demonstrou que o artefato era capaz de distinguir leituras de risco conforme a etapa da operação e de produzir saídas reconhecidas como plausíveis e úteis por especialistas do campo. Com isso, a tese não apenas desenvolveu uma solução, mas demonstrou sua viabilidade analítica e sua inteligibilidade prática.

O quarto objetivo consistia em refinar o artefato a partir da avaliação. Esse ponto foi decisivo para a consistência do trabalho. A pesquisa não se limitou a testar uma solução previamente fechada, mas conduziu um processo efetivo de amadurecimento do modelo em resposta às evidências produzidas ao longo do percurso. O artefato final não corresponde, portanto, à sua formulação inicial, mas a uma versão reelaborada pelo confronto entre literatura, aplicação empírica e apreciação especializada. Essa característica é central, porque mostra que a tese não foi apenas demonstrativa, foi genuinamente construtiva.

Por fim, também foi alcançado o objetivo de produzir conhecimento com relevância científica e prática. A tese não apenas respondeu a uma lacuna aplicada do setor, mas o fez oferecendo uma formulação analítica mais refinada para o

problema da criticidade no transporte modular. Ao demonstrar que o risco não é homogêneo, ao distinguir movimento vertical e movimento horizontal da carga e ao conectar variáveis, riscos e mitigação em um mesmo quadro analítico, o trabalho entrega um resultado que ultrapassa o âmbito de um caso específico e se afirma como contribuição ao modo de compreender e organizar o problema.

8.3 IMPLICAÇÕES PARA A CONSTRUÇÃO MODULAR

As implicações desta tese para a construção modular são significativas porque incidem sobre um ponto frequentemente subestimado no discurso sobre industrialização da construção: a distância entre fabricar módulos com qualidade e conseguir transportá-los e movimentá-los com segurança, previsibilidade e controle. A construção modular costuma ser celebrada por sua associação com produtividade, racionalização, padronização e redução de desperdícios. Esta pesquisa mostra, no entanto, que esses ganhos não se realizam de forma automática. Eles dependem, em medida decisiva, da capacidade de gerir adequadamente os riscos que emergem entre a fábrica e o destino final do módulo.

Uma primeira implicação da tese está em recentrar o transporte como dimensão constitutiva e não periférica da racionalidade modular. O transporte não é um intervalo entre produção e montagem. Ele é parte da própria lógica do sistema. Quando essa etapa falha, compromete não apenas a integridade física da carga, mas o encadeamento do processo construtivo, a segurança da operação, a qualidade do produto e a viabilidade econômica do empreendimento. Ao recolocar esse problema no centro da análise, a tese contribui para uma visão mais realista e mais completa da construção modular.

Uma segunda implicação está na necessidade de abandonar abordagens excessivamente genéricas para a gestão do risco. A pesquisa mostrou que não basta reconhecer que o transporte modular é crítico. É preciso compreender como essa criticidade se reorganiza em cada etapa da operação. O içamento em fábrica, o transporte rodoviário e o içamento em campo não podem ser tratados como momentos equivalentes. Eles exigem leituras específicas, prioridades específicas e medidas de mitigação específicas. Em termos práticos, isso significa que o amadurecimento da construção modular passa também pelo amadurecimento de sua inteligência operacional.

A tese também aponta para uma implicação importante no modo de organizar a tomada de decisão. Em muitas operações, o risco ainda é gerido de forma predominantemente reativa, baseada em experiência empírica, julgamento situacional e respostas improvisadas diante de imprevistos. Embora a experiência do campo continue sendo indispensável, esta pesquisa sugere que o setor pode avançar ao incorporar instrumentos de leitura prévia mais estruturados, capazes de reduzir opacidade, organizar prioridades e apoiar o planejamento antes do início da operação. Esse ponto é decisivo para a construção modular, porque quanto mais industrializado é o sistema, menos compatível ele se torna com improvisações sistemáticas em etapas críticas de sua logística.

Há ainda implicações relevantes para a relação entre projeto, produção e transporte. A avaliação com especialistas mostrou que decisões aparentemente locais como presença ou ausência de pontos dedicados de içamento, geometria da cobertura, configuração da base estrutural ou distribuição interna de cargas, afetam diretamente a forma de içar, fixar e transportar o módulo. Isso sugere que a lógica de segurança no transporte modular não começa apenas na operação em campo, ela começa antes, na forma como o módulo é concebido, dimensionado e detalhado. Nesse aspecto, a tese reforça a necessidade de maior integração entre decisões de projeto e exigências logísticas, ampliando a compreensão do que significa, de fato, projetar para modularidade.

Por fim, a pesquisa tem implicações para a própria profissionalização do setor. Ao mostrar que a criticidade da operação depende não apenas de atributos físicos, mas também de variáveis decisórias, organizacionais e humanas, a tese aponta para a necessidade de ampliar o escopo da gestão de risco na construção modular. Não se trata apenas de escolher melhor a cinta, o caminhão ou o guindaste. Trata-se também de reconhecer o peso da cultura operacional, das pressões de prazo, da clareza de comunicação, da prudência do condutor e da estrutura de decisão da empresa. Em outras palavras, a construção modular exige não apenas maior precisão técnica, mas também maior maturidade organizacional.

8.4 RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

As pesquisas futuras podem ampliar esta tese em quatro direções principais. A primeira é a expansão empírica do artefato. Novas aplicações em operações com

diferentes tipologias modulares, distintas escalas de carga, outras condições viárias e contextos empresariais variados serão fundamentais para ampliar a robustez do modelo e refinar sua calibragem. Quanto mais diversa for a base empírica, maior será a capacidade de identificar recorrências, testar estabilidade analítica e ajustar a pertinência das recomendações geradas.

A segunda direção consiste na ampliação do escopo logístico da análise. Esta tese concentrou-se, deliberadamente, no transporte rodoviário e nas operações de içamento associadas a módulos. Esse recorte foi necessário para garantir consistência ao desenvolvimento do artefato. Ainda assim, pesquisas futuras podem explorar a adaptação da lógica proposta para outros modos de deslocamento, como transporte marítimo, ferroviário ou multimodal, bem como para situações de transbordo e armazenamento intermediário. Esse avanço é particularmente relevante para cadeias logísticas mais longas, territorialmente dispersas e operacionalmente mais complexas.

A terceira direção está na aproximação entre projeto e logística. Os resultados da tese mostraram que decisões aparentemente internas ao módulo, como peso, geometria, pontos de içamento, presença de mobiliário e configuração estrutural, afetam diretamente a forma de içar, fixar e transportar a carga. Pesquisas futuras podem aprofundar essa interface e investigar como decisões de projeto podem incorporar, desde a concepção, critérios de transportabilidade, içabilidade e segurança logística. Esse caminho é promissor porque desloca a gestão do risco para montante, tornando-a parte da inteligência do projeto, e não apenas da operação.

A quarta direção, talvez a mais estratégica, está no aprofundamento tecnológico do artefato. A estrutura analítica construída nesta tese já demonstrou compatibilidade com a incorporação de dados dinâmicos, atualização de cenários e futuras integrações com inteligência artificial, especialmente por operar com ativação binária dos riscos e relações explícitas entre variáveis e vulnerabilidades. Pesquisas futuras podem explorar modelos capazes de incorporar automaticamente informações sobre rota, clima, restrições viárias e monitoramento em tempo real, tornando o artefato mais responsivo, mais automatizado e mais sensível ao contexto. Nesse cenário, o avanço não estaria em reconstruir a lógica do modelo, mas em aprofundar uma arquitetura que já se mostrou fértil para esse tipo de evolução.

De modo transversal a essas direções, uma agenda especialmente relevante consiste em incorporar de forma mais sistemática os fatores organizacionais e

decisórios que modulam a exposição ao risco. A experiência empírica desta tese mostrou que prudência do motorista, pressão por prazo, cultura operacional e critérios de agendamento influenciam diretamente a criticidade da operação. Esses fatores, embora reconhecidos qualitativamente, ainda podem ser modelados com maior precisão em versões futuras do artefato. Esse avanço seria importante porque aproximaria ainda mais a análise de risco da complexidade efetiva do campo profissional.

As pesquisas futuras não precisam abandonar a lógica construída nesta tese; precisam aprofundá-la, testá-la sob novas condições e expandir seu alcance analítico e tecnológico. O trabalho realizado aqui oferece uma base conceitual, metodológica e operacional consistente para isso. O desafio, daqui em diante, está em transformar essa base em uma inteligência cada vez mais robusta, sensível ao contexto e capaz de apoiar, com maior precisão, a gestão dos riscos no transporte modular.

8.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao final deste percurso, a tese permite reconhecer uma constatação que ultrapassa o desenvolvimento do artefato em si. A construção modular não é posta à prova apenas na precisão da fábrica ou na eficiência da montagem. Ela também se confirma quando o produto industrial precisa atravessar o território, enfrentar restrições operacionais e chegar íntegro ao seu destino.

A conclusão mais decisiva desta tese, portanto, pode ser formulada de maneira direta: a construção modular não se consolida apenas quando aprende a fabricar melhor, mas quando aprende, com o mesmo rigor, a mover com segurança aquilo que fabrica. É nesse intervalo entre produção e destino, tantas vezes tratado como etapa intermediária, que se joga parte substantiva da viabilidade técnica, logística e organizacional do sistema. Foi precisamente nesse ponto que esta pesquisa procurou intervir.

REFERÊNCIAS

ABDELMAGEED, Sherif; ZAYED, Tarek. A study of literature in modular integrated construction: critical review and future directions. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 277, p. 124044, 2020.

ALI, Ali Hassan; ZAYED, Tarek; HUSSEIN, Mohamed. Crane safety operations in modular integrated construction. **Automation in Construction**, [S. l.], v. 164, p. 105456, 2024.

ALKAISSY, Maryam; ARASHPOUR, Mehrdad; GOLAFSHANI, Emadaldin Mohammadi; HOSSEINI, M. Reza; KHANMOHAMMADI, Sadegh; BAI, Yu; FENG, Haibo. Enhancing construction safety: machine learning-based classification of injury types. **Safety Science**, [S. l.], v. 162, p. 106102, 2023.

ARSHAD, Husnain; ZAYED, Tarek. Critical influencing factors of supply chain management for modular integrated construction. **Automation in Construction**, [S. l.], v. 144, p. 104612, 2022.

BERTRAM, Nick; FUCHS, Steffen; MISCHKE, Jan; PALTER, Robert; STRUBE, Gernot; WOETZEL, Jonathan. **Modular construction: from projects to products**. [S. l.]: McKinsey & Company, jun. 2019.

CHATZIMICHAILIDOU, Mikela; MA, Yue. Using BIM in the safety risk management of modular construction. **Safety Science**, [S. l.], v. 154, p. 105852, 2022.

DING, Long; JI, Jie; KHAN, Faisal. Combining uncertainty reasoning and deterministic modeling for risk analysis of fire-induced domino effects. **Safety Science**, [S. l.], v. 129, p. 104802, 2020.

FATHULLAH, Muhammad Afif; SUBBARAO, Anusuyah; AHMAD, Abdulaziz; MUTHAIYAH, Saravanan. Merging qualitative design methods with design science. **International Journal of Qualitative Methods**, [S. l.], v. 24, 2025.

FERDOUS, Wahid; BAI, Yu; NGO, Tuan Duc; MANALO, Allan; MENDIS, Priyan. New advancements, challenges and opportunities of multi-storey modular buildings – A state-of-the-art review. **Engineering Structures**, [S. l.], v. 183, p. 883-893, 2019.

GINIGADDARA, Buddhini; PERERA, Srinath; FENG, Yingbin; RAHNAMAYIEZEKAVAT, Payam. Development of an offsite construction typology: a Delphi study. **Buildings**, [S. l.], v. 12, n. 1, p. 20, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings12010020>.

GOECKS, Lucas Schmidt; SOUZA, Michele de; LIBRELATO, Tatiane Pereira; TRENTO, Luiz Reni. Design Science Research in practice: review of applications in Industrial Engineering. **Gestão & Produção**, [S. l.], v. 28, n. 4, p. e5811, 2021.

GONDIA, Ahmed; MOUSSA, Ahmed; EZZELDIN, Mohamed; EL-DAKHAKHNI, Wael. Construction safety risk modeling with ensemble learning. **Automation in Construction**, [S. l.], v. 151, p. 104878, 2023.

GREGOR, Shirley; ZWIKAEL, Ofer. Design science research and the co-creation of project management knowledge. **International Journal of Project Management**, [S. l.], v. 42, n. 3, p. 102584, 2024.

GUO, Hongling; ZHOU, Ying; PAN, Zaiyi; ZHANG, Zhitian; YU, Yantao; LI, Yan. Automated selection and localization of mobile cranes in construction planning. **Buildings**, [S. l.], v. 12, n. 5, p. 580, 2022.

HAN, Yanhu; YAN, Xiyu; PIROOZFAR, Poorang. An overall review of research on prefabricated construction supply chain management. **Engineering, Construction and Architectural Management**, [S. l.], v. 30, n. 10, p. 5160-5190, 2023.

HEVNER, Alan R.; MARCH, Salvatore T.; PARK, Jinsoo; RAM, Sudha. Design science in information systems research. **MIS Quarterly**, [S. l.], v. 28, n. 1, p. 75-105, 2004.

HSU, Po-Yi; AURISICCHIO, Marco; ANGELOUDIS, Panagiotis. Risk-averse supply

chain for modular construction projects. **Automation in Construction**, [S. I.], v. 106, p. 102898, 2019.

HUSSEIN, Mohamed; DARKO, Amos; ELTOUKHY, Abdelrahman E. E.; ZAYED, Tarek. Sustainable logistics planning in modular integrated construction using multimethod simulation and Taguchi approach. **Journal of Construction Engineering and Management**, [S. I.], v. 148, n. 6, p. 04022022, 2022.

HUSSEIN, Mohamed; KARAM, Ahmed; ELTOUKHY, Abdelrahman E. E.; DARKO, Amos; ZAYED, Tarek. Optimized multimodal logistics planning of modular integrated construction using hybrid multi-agent and metamodeling. **Automation in Construction**, [S. I.], v. 145, p. 104637, 2023.

HUSSEIN, Mohamed; ZAYED, Tarek. Crane operations and planning in modular integrated construction: mixed review of literature. **Automation in Construction**, [S. I.], v. 122, p. 103466, 2021.

HUSSEIN, Mohamed; ZAYED, Tarek. Critical factors for successful implementation of just-in-time concept in modular integrated construction: a systematic review and meta-analysis. **Journal of Cleaner Production**, [S. I.], v. 284, p. 124716, 2021.

HUSSEIN, Mohamed; ZAYED, Tarek. Crane operations and planning in modular integrated construction: mixed review of literature. **Automation in Construction**. v. 122, art. 103466, 2021.

HUSSEIN, Mohamed; ZAYED, Tarek. Framework for identifying safe transportation routes for modular integrated construction projects. **Journal of Construction Engineering and Management**, [S. I.], v. 149, n. 2, p. 04022167, 2023.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 31073:2022: Risk management — Vocabulary**. Geneva: ISO, 2022.

ISLAM, Muhammad Saiful; NEPAL, Madhav Prasad; SKITMORE, Martin; ATTARZADEH, Meghdad. Current research trends and application areas of fuzzy

and hybrid methods to the risk assessment of construction projects. **Advanced Engineering Informatics**, [S. l.], v. 33, p. 112-131, 2017.

JIANG, W.; DING, L. Unsafe hoisting behavior recognition for tower crane based on transfer learning. **Automation in Construction**, [S. l.], v. 160, p. 105299, 2024.

KHAN, Ayaz Ahmad; YU, Rongrong; LIU, Tingting; GU, Ning; WALSH, James. Volumetric modular construction risks: a comprehensive review and digital-technology-coupled circular mitigation strategies. **Sustainability**, [S. l.], v. 15, n. 8, p. 7019, 2023.

KHAN, M.; GBIENGU, P.; ZHANG, Z.; NNAJI, C.; NAMIAN, M. Modular construction safety risk mitigation. In: **ANNUAL ASSOCIATED SCHOOLS OF CONSTRUCTION INTERNATIONAL CONFERENCE**, 60., 2024. Proceedings [...]. [S. l.]: ASC, 2024. DOI: <https://doi.org/10.29007/ncf3>.

KOULINAS, G. K.; MARHAVILAS, P. K.; DEMESOUKA, O. E.; VAVATSIKOS, A. P.; KOULOURIOTIS, D. E. Risk analysis and assessment in the worksites using the fuzzy-analytical hierarchy process and a quantitative technique: a case study for the Greek construction sector. **Safety Science**, [S. l.], v. 112, p. 96-104, 2019.

KUMI, Louis; JEONG, Jaewook; JEONG, Jaemin. Systematic review of quantitative risk quantification methods in construction accidents. **Buildings**, [S. l.], v. 14, n. 10, p. 3306, 2024.

LAWSON, R. Mark; OGDEN, Ray G.; BERGIN, Rory. Application of modular construction in high-rise buildings. **Journal of Architectural Engineering**, [S. l.], v. 18, n. 2, p. 148-154, 2012.

LEE, Dongmin; LEE, SangHyun. Digital twin for supply chain coordination in modular construction. **Applied Sciences**, v. 11, n. 13, art. 5909, 2021. DOI: [10.3390/app11135909](https://doi.org/10.3390/app11135909).

LIANG, Xinrui; FAN, Shiqi; LUCY, John; YANG, Zaili. Risk analysis of cargo theft

from freight supply chains using a data-driven Bayesian network. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 226, art. 108702, 2022. DOI: 10.1016/j.ress.2022.108702.

LI, Zhengdao Clyde; HONG, Jingke; XUE, Fan; SHEN, Geoffrey Qiping; XU, Xiang; MOK, Michael Ka Yick. Schedule risks in prefabrication housing production in Hong Kong: a social network analysis. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 134, p. 482-494, 2016.

LU, Ying; GONG, Peizhen; TANG, Yuchun; SUN, Shuqi; LI, Qiming. BIM-integrated construction safety risk assessment at the design stage of building projects. **Automation in Construction**, [S. l.], v. 124, p. 103553, 2021.

MARCH, Salvatore T.; SMITH, Gerald F. Design and natural science research on information technology. **Decision Support Systems**, [S. l.], v. 15, n. 4, p. 251-266, 1995.

MDLETSHE, Sibusiso; MOTSHWENENG, Oupa Steven; OLIVEIRA, Marcus; TWALA, Bhakisipho. Design science research application in medical radiation science education: a case study on the evaluation of a developed artifact. **Journal of Medical Imaging and Radiation Sciences**, [S. l.], v. 54, n. 1, p. 206-214, 2023.

MISCHKE, Jan; STOKVIS, Kevin; VERMELTFOORT, Koen; BIEMANS, Birgit. **Delivering on construction productivity is no longer optional**. [S. l.]: McKinsey & Company, 9 ago. 2024.

MOHANDS, Saeed Reza; ABDELMAGEED, Sherif; HEM, Sakda; YOO, Joo Sang; ABHAYAJEEWA, Tharindu; ZAYED, Tarek. Occupational health and safety in modular integrated construction projects: the case of crane operations. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 342, p. 130950, 2022.

MOSTOFI, Fatemeh; TOĞAN, Vedat. Construction safety predictions with multi-head attention graph and sparse accident networks. **Automation in Construction**, [S. l.], v. 156, p. 105102, 2023.

OLAWUMI, Timothy O.; CHAN, Daniel W. M.; OJO, Stephen; YAM, Michael C. H. Automating the modular construction process: a review of digital technologies and future directions with blockchain technology. **Journal of Building Engineering**, [S. l.], v. 46, p. 103720, 2022.

PAN, W.; HON, C. K. Modular integrated construction for high-rise buildings. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Municipal Engineer**, 2018. DOI: 10.1680/jmuen.18.00028.

PARRACHO, Diogo F. R.; NOUR EL-DIN, Mohamed; ESMAEILI, Iraj; FREITAS, Sara S.; RODRIGUES, Leonardo; POÇAS MARTINS, João; CORVACHO, Helena; DELGADO, João M. P. Q.; GUIMARÃES, Ana Sofia. Modular construction in the digital age: a systematic review on smart and sustainable innovations. **Buildings**, [S. l.], v. 15, n. 5, p. 765, 2025.

PASELLO, Bruno J. O.; ALMEIDA, Ricardo M. S. F.; MOURA, Jorge D. M. What does modular mean? A systematic review on definitions, ambiguities, and terminological gaps in construction. **Buildings**, [S. l.], v. 15, n. 17, p. 3017, 2025.

PEFFERS, Ken; TUUNANEN, Tuure; ROTHENBERGER, Marcus A.; CHATTERJEE, Samir. A design science research methodology for information systems research. **Journal of Management Information Systems**, [S. l.], v. 24, n. 3, p. 45-78, 2007.

PENG, Yichuan; JIANG, Yuming; LU, Jian; ZOU, Yajie. Examining the effect of adverse weather on road transportation using weather and traffic sensors. **PLOS ONE**, [S. l.], v. 13, n. 10, p. e0205409, 2018.

POH, Clive Q. X.; UBEYNARAYANA, Chalani Udhyami; GOH, Yang Miang. Safety leading indicators for construction sites: a machine learning approach. **Automation in Construction**, [S. l.], v. 93, p. 375-386, 2018.

SHI, Xiaobo; FU, Kangbo; QIAO, Yaning; SANTOS, João; YUAN, Zhenmin. Accident cause analysis for lifting prefabricated components of assembled buildings based on

hybrid simulation technology from human factor perspective. **Engineering, Construction and Architectural Management**, v. 33, n. 1, p. 578–601, 2026. DOI: 10.1108/ECAM-04-2024-0431.

SHISHEHGARKHANEH, M. Baghalzadeh; MOEHLER, R. C.; FANG, Y.; ABOUTORAB, H.; HIJAZI, A. A. Construction supply chain risk management. **Automation in Construction**, [S. l.], v. 162, p. 105396, 2024.

SONG, Seung Ho; CHOI, Jin Ouk; CHO, Hunhee. Transportation-induced impact on a prefabricated volumetric modular house using trailer bogie: case study. **Journal of Construction Engineering and Management**, [S. l.], v. 150, n. 7, p. 05024007, 2024.

TIAN, Kun; ZHU, Zicheng; MBACHU, Jasper; GHANBARIPOUR, Amir; MOORHEAD, Matthew. Artificial intelligence in risk management within the realm of construction projects: a bibliometric analysis and systematic literature review. **Journal of Innovation & Knowledge**, [S. l.], v. 10, n. 3, p. 100711, 2025.

VALINEJADSHOUBI, Mojtaba; BAGCHI, Ashutosh; MOSELHI, Osama. Damage detection for prefabricated building modules during transportation. **Automation in Construction**, [S. l.], v. 142, p. 104466, 2022.

VAN TAM, N. Unveiling global research trends in construction productivity: a scientometric analysis of twenty-first century research. **Smart Construction and Sustainable Cities**, v. 2, art. 2, 2024. DOI: 10.1007/s44268-024-00025-7.

VOM BROCKE, Jan; HEVNER, Alan; MAEDCHE, Alexander. Introduction to design science research. In: VOM BROCKE, Jan; HEVNER, Alan; MAEDCHE, Alexander (ed.). Design science research: cases. Cham: **Springer**, 2020. p. 1-13.

WANG, J.; GUO, F.; SONG, Y.; LIU, Y.; HU, X.; YUAN, C. Safety risk assessment of prefabricated buildings hoisting construction: based on IHFACS-ISAM-BN. **Buildings**, v. 12, n. 6, art. 811, 2022. DOI: 10.3390/buildings12060811.

WANG, Huiwen; YI, Wen; ZHEN, Lu; CHAN, Albert P. C. Cost-optimized transport planning for prefabricated modules with the implementation of the just-in-time strategy. **Journal of Construction Engineering and Management**, [S. l.], v. 150, n. 8, p. 04024093, 2024.

WU, Y.; LI, Y.; ZHENG, Z.; PAN, W. **Assessing structural behavior of prefabricated volumetric building modules during transportation**. *Thin-Walled Structures*, v. 218, artigo 114165, 2026. DOI: 10.1016/j.tws.2025.114165.

WUNI, Ibrahim Yahaya; SHEN, Geoffrey Qiping. Critical risk factors in the application of modular integrated construction: a systematic review. **International Journal of Construction Management**, [S. l.], 2019.

WUNI, Ibrahim Yahaya; SHEN, Geoffrey Qiping. Barriers to the adoption of modular integrated construction: systematic review and meta-analysis, integrated conceptual framework, and strategies. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 249, p. 119347, 2020.

WUNI, Ibrahim Yahaya; SHEN, Geoffrey Qiping; HWANG, Bon-Gang. Risks of modular integrated construction: a review and future research directions. *Frontiers of Engineering Management*, v. 7, n. 1, p. 63-80, 2020. DOI: 10.1007/s42524-019-0059-7.

WUNI, Ibrahim Yahaya; SHEN, Geoffrey Qiping. Exploring the critical production risk factors for modular integrated construction projects. **Journal of Facilities Management**, [S. l.], v. 21, n. 1, p. 50-68, 2023.

WUNI, Ibrahim Yahaya; SHEN, Geoffrey Qiping. Towards a decision support for modular integrated construction: an integrative review of the primary decision-making actors. **International Journal of Construction Management**, [S. l.], v. 22, n. 5, p. 929-948, 2022.

WUNI, Ibrahim Yahaya; SHEN, Geoffrey Qiping; HWANG, Bon-Gang. Risks of modular integrated construction: a review and future research directions. **Frontiers**

of **Engineering Management**, [S. l.], v. 7, n. 1, p. 63-80, 2020.

WU, Yuhang; LI, Yuanqi. Development of transportation loading spectra for building modules based on a vehicle-module interaction model. **Engineering Structures**, [S. l.], v. 270, p. 114828, 2022.

WU, Yuhang; LI, Yuanqi; ZHENG, Zhenjie; PAN, Wei. Assessing structural behavior of prefabricated volumetric building modules during transportation. **Thin-Walled Structures**, v. 218, Part C, art. 114165, jan. 2026. DOI: 10.1016/j.tws.2025.114165.

XU, Mingze; ZHOU, Hongbo. Quantitative assessment and prediction for tower crane construction safety resilience based on historical database. **Buildings**, [S. l.], v. 15, n. 23, p. 4280, 2025.

YANG, Yi; PAN, Mi; PAN, Wei. Integrated offsite logistics scheduling approach for high-rise modular building projects. **Journal of Construction Engineering and Management**, [S. l.], v. 148, n. 6, p. 04022032, 2022.

ZAALOUK, Ahmed; MOON, Sungkon; HAN, SangHyeok. Operations planning and scheduling in off-site construction supply chain management: scope definition and future directions. **Automation in Construction**, [S. l.], v. 153, p. 104952, 2023.

ZHANG, Jingqi; JIANG, Shaohua. Construction safety decision-making system based on improved integration of case-based reasoning and rule-based reasoning. **Journal of Construction Engineering and Management**, [S. l.], v. 151, n. 9, p. 04025130, 2025.

ZHONG, X.; CHEN, H.; ZHANG, M.; WANG, X.; KANG, X.; CHEN, W. Structural systems for modular integrated construction: Review and comparative analyses. **Advances in Structural Engineering**, v. 28, n. 11, 2025. DOI: 10.1177/13694332251325896.

ZHOU, Jason Xin; HUANG, Lijie; SHEN, Geoffrey Qiping; WU, Hengqin; LUO, Lizi. Modeling stakeholder-associated productivity performance risks in modular

integrated construction projects of Hong Kong: a social network analysis. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 423, p. 138699, 2023.

ZOHOURIAN, Mohammadamin; PAMIDIMUKKALA, Apurva; KERMANSHACHI, Sharareh; ALMASKATI, Deema. Modular construction: a comprehensive review. **Buildings**, [S. l.], v. 15, n. 12, p. 2020, 2025.

ZHU, Aimin; ZHANG, Zhiqian; PAN, Wei. Crane-lift path planning for high-rise modular integrated construction through metaheuristic optimization and virtual prototyping. **Automation in Construction**, [S. l.], v. 141, p. 104434, 2022.

ZOU, Patrick X. W.; ZHANG, Guomin; WANG, Jiayuan. Understanding the key risks in construction projects in China. **International Journal of Project Management**, [S. l.], v. 25, n. 6, p. 601-614, 2007.

APÊNDICES

APÊNDICE A - Entrevista Semiestruturada

Entrevista Semiestruturada – Avaliação do Modelo Preditivo de Riscos na Construção Modular

Introdução

Agradecemos sua participação. O objetivo desta entrevista é avaliar a eficácia do modelo preditivo de riscos de transporte de uma construção modular. Queremos entender sua percepção sobre a precisão do modelo na identificação de riscos críticos, a utilidade das medidas de mitigação sugeridas e sua aplicabilidade prática no dia a dia da empresa. Suas respostas serão fundamentais para aprimorar essa ferramenta.

1. AVALIAÇÃO DA IDENTIFICAÇÃO DE RISCOS:

1.1 Precisão na Identificação de Riscos:

O modelo preditivo conseguiu identificar corretamente os riscos mais críticos de transporte?

Algum risco importante foi omitido ou avaliado como de baixa criticidade?

Houve algum risco crítico apontado pelo modelo que você considera irrelevante ou de baixo impacto?

De um modo geral, você acredita que os riscos revelados pelo modelo preditivo são relevantes para a empresa?

Como você avalia a classificação dos riscos na matriz 5x5 (probabilidade vs. impacto)?

O modelo fez uma avaliação condizente com sua experiência operacional? Você acredita que algo deva ser ajustado?

Comparado aos métodos tradicionais de gestão de riscos, o modelo trouxe novas perspectivas ou insights inesperados?

Alguma ameaça foi identificada que não era considerada previamente na empresa?

Como você avalia a proposta de um “score” geral de criticidade de riscos?

O “score” é pertinente para avaliar os riscos gerais das etapas de transporte e montagem? Você teria algo a acrescentar na escala?

1.2 Aplicação do Modelo na Tomada de Decisão:

Você acredita que o modelo pode ajudar a empresa a priorizar riscos de forma mais eficiente?

A ferramenta traz clareza na definição de quais riscos precisavam de ação imediata?

As informações fornecidas pelo modelo foram fáceis de interpretar e utilizar na prática?

Houve dificuldades na leitura ou entendimento dos resultados?

Alguma sugestão para tornar o modelo mais acessível?

2. AVALIAÇÃO DAS MEDIDAS DE MITIGAÇÃO:

2.1 Eficácia das Soluções Propostas:

As medidas de mitigação sugeridas foram adequadas e viáveis para sua realidade operacional?

Acredita que todas elas podem ser implementadas na empresa?

Alguma solução proposta é inviável ou difícil de aplicar?

Concorda que as sugestões do modelo podem ser eficazes na redução do impacto dos riscos críticos?

2.2 Gaps e Melhorias nas Medidas de Mitigação:

Alguma medida de mitigação importante foi esquecida ou poderia ser aprimorada?

O que poderia ser ajustado para tornar as recomendações mais efetivas?

Se você pudesse modificar ou acrescentar alguma funcionalidade ao modelo, o que seria?

3. APLICABILIDADE PRÁTICA:

O modelo pode ser utilizado ativamente na tomada de decisões durante o transporte?

Em quais momentos ele seria mais útil?

Haveria resistência ou desafios na adoção do modelo pela equipe?

O modelo pode melhorar a gestão de riscos da empresa?

Você acredita que esse modelo pode ser aplicado a outros projetos ou empresas?

Quais seriam os desafios para expandir o uso desse modelo?

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS:

De maneira geral, qual é sua avaliação sobre o modelo de riscos?

Ele pode trazer benefícios claros ou ainda precisa de ajustes?

Os riscos apresentados são muito básicos?

Você recomendaria seu uso para outras empresas do setor?

Existe alguma outra sugestão ou comentário adicional que você gostaria de compartilhar?

ANEXOS

ANEXO A - Relatório Apresentado à Empresa Portuguesa

RELATÓRIO DE ANÁLISE DE RISCOS**Transporte de Estruturas Modulares****Data: 20/02/2025****Elaborado por: Bruno Pasello****Contato: brunopasello@uel.br****Objetivo do Relatório:**

A presente análise de riscos tem como objetivo principal prevenir acidentes operacionais, danos materiais e impactos à imagem corporativa, garantindo que as operações de transporte de estruturas modulares ocorram com segurança, eficiência e conformidade. Na construção modular, onde a logística de grandes módulos exige precisão milimétrica e coordenação multidisciplinar, falhas podem resultar não apenas em perdas financeiras diretas (como reparos, multas ou atrasos), mas também em consequências irreparáveis para a reputação da empresa, como desconfiança de clientes, penalizações legais ou até a perda de contratos futuros. Ao identificar e mitigar riscos críticos — como passagens estreitas, tombamentos, ou bloqueio de vias — este relatório apresenta medidas de mitigação para garantir a integridade da carga, a segurança de colaboradores e terceiros, e a continuidade dos projetos sem interrupções. Além disso, reforça o compromisso da empresa com a excelência operacional e a responsabilidade socioambiental, elementos-chave para a competitividade em um mercado que valoriza práticas sustentáveis e gestão transparente. Em suma, a análise não apenas protege ativos físicos e humanos, mas também preserva a credibilidade da marca, transformando a prevenção de riscos em um diferencial estratégico para o crescimento sustentável do negócio.

Contexto da Operação (Variáveis Operacionais)

A operação de transporte analisada envolve variáveis que, em conjunto, definem um cenário de logística complexa e riscos específicos. O período diurno (V1) favorece a visibilidade, mas exige atenção redobrada em áreas urbanas devido ao tráfego intenso. A escala da operação (>2 módulos, V2) e a distância relativamente curta (≤ 100 km, V3) sugerem uma logística ágil, porém desafiadora devido à necessidade de múltiplas movimentações. O uso de apenas um tipo modal (V4) concentra os riscos em um único meio de transporte, enquanto a carga excedente em largura (V9) e altura (V10) impõe restrições físicas críticas, como passagens por pontes e túneis. A pavimentação total do trajeto (V6) reduz danos à carga, mas não elimina riscos de

VARIÁVEIS RELACIONADAS À ETAPA DE TRANSPORTE DE UM EDIFÍCIO MODULAR	
VARIÁVEL 1	PREDOMINANTEMENTE
	DIURNO
VARIÁVEL 2	ESCALA DA OPERAÇÃO
	> 2 MÓDULOS
VARIÁVEL 3	DISTÂNCIA ENTRE A PLANTA E O LOCAL DE MONTAGEM
	≤ 100 km
VARIÁVEL 4	TIPOS MODAIS
	1 TIPO MODAL
VARIÁVEL 5	PASSAGEM POR FRONTEIRA ALFANDEGÁRIA
	NÃO
VARIÁVEL 6	PAVIMENTAÇÃO DO TRAJETO
	TOTALMENTE PAVIMENTADA
VARIÁVEL 7	VIA PREDOMINANTEMENTE PEDAGIADA
	NÃO
VARIÁVEL 8	PESO DO MÓDULO
	< 15 TON
VARIÁVEL 9	CARGA EXCEDE A LARGURA DO CAMINHÃO
	SIM
VARIÁVEL 10	ALTURA TOTAL DO VEÍCULO CARREGADO
	ATÉ 4 M
VARIÁVEL 11	MOTORISTA JÁ TRANSPORTOU UMA CARGA MODULAR
	SIM
VARIÁVEL 12	NÚMERO DE IÇAMENTOS POR MÓDULO ATÉ A ENTREGA
	2 IÇAMENTOS
VARIÁVEL 13	PREVISÃO DE CHUVA NO HORÁRIO DA ENTREGA
	NÃO
VARIÁVEL 14	VELOCIDADE DO VENTO NO HORÁRIO DA ENTREGA
	0–19 km/h
VARIÁVEL 15	O MÓDULO TEM FINALIDADE HOSPITALAR
	NÃO
VARIÁVEL 16	TEMPERATURAS NEGATIVAS NO TRAJETO
	NÃO
VARIÁVEL 17	O MODELO DE ENTREGA TEM
	MONTAGEM DIRETA
VARIÁVEL 18 A	POSICIONAMENTO DO GUINDASTE MÓVEL
	FORA DO TERRENO
VARIÁVEL 18 B	O GUINDASTE MÓVEL VAI BLOQUEAR ALGUMA FAIXA DE ROLAGEM
	NÃO
VARIÁVEL 19 A	CAMINHÃO SERÁ DESCARREGADO
	FORA DO TERRENO
VARIÁVEL 19 B	O CAMINHÃO VAI BLOQUEAR ALGUMA FAIXA DE ROLAGEM
	SIM
VARIÁVEL 20	DENSIDADE DO ENTORNO
	BAIXA
VARIÁVEL 21	O TRANSPORTE ENVOLVE GUINDASTE MÓVEL
	SIM

colisões em vias estreitas, especialmente com o bloqueio parcial de faixas pelo caminhão (V19B). A experiência do motorista (V11) mitiga erros humanos, mas a dependência de guindaste móvel posicionado fora do terreno (V18A) e a necessidade de múltiplos içamentos (V12) introduzem riscos adicionais, como desequilíbrios ou interferência com redes elétricas. A baixa densidade do entorno (V20) pode facilitar operações, mas também eleva a vulnerabilidade a roubos. Fatores como ausência de chuva (V13), ventos moderados (V14) e temperaturas estáveis (V16) são favoráveis, porém a combinação de montagem direta (V17) e descarregamento fora do terreno (V19A) demanda precisão extrema para evitar atrasos ou danos. Em síntese, a interação dessas variáveis gera um cenário com riscos críticos específicos que demandarão medidas de mitigação direcionadas.

Método de Análise

O modelo preditivo desenvolvido é baseado em um banco de dados abrangente, contendo 113 riscos documentados tanto na literatura especializada quanto provenientes de observações práticas de campo, agrupados em diversas subáreas críticas, como capotamento do guindaste, colisão, queda da carga, contato com a rede elétrica, erros humanos, deslocamento incorreto do guindaste, instabilidade por vento forte, problemas mecânicos/hidráulicos, erro de comunicação entre a equipe, ruídos excessivos e danos à carga. Este banco de dados permite uma análise detalhada e preditiva, fornecendo uma base sólida para a identificação, avaliação e mitigação dos riscos envolvidos nas operações de movimentação de carga. O modelo preditivo filtra esses dados, localizando os riscos que se tornam mais significativos conforme as variáveis operacionais inseridas, como mudanças no ambiente de trabalho, tipo de carga, equipamentos utilizados ou até mesmo a experiência da equipe. Assim, o modelo permite uma análise dinâmica e personalizada, destacando os riscos com maior potencial de impacto e proporcionando uma base mais precisa para a adoção de medidas preventivas e ações corretivas específicas, garantindo maior segurança e eficiência no processo, utilizando como base metodológica uma matriz de criticidade que combina impacto (severidade das consequências) e frequência (probabilidade influenciada por variáveis operacionais). A imagem a seguir apresenta os critérios de impacto adotados no modelo.

IMPACTO				
MUITO BAIXO	BAIXO	MÉDIO	ALTO	MUITO ALTO
POSSIBILIDADE REMOTA DE ATRASO DO CRONOGRAMA, SEM DANOS COLATERAIS	POSSIBILIDADE DE ATRASO DO CRONOGRAMA, SEM DANOS COLATERAIS	POSSIBILIDADE REMOTA DE ATRASO DO CRONOGRAMA, COM DANOS COLATERAIS	POSSIBILIDADE DE ATRASO DO CRONOGRAMA, COM DANOS COLATERAIS	ATRASO DO CRONOGRAMA COM DANOS COLATERAIS
1	2	3	4	5

Figura 16- Critérios Definidores de Impacto

Análise da Criticidade Operacional Total

A análise de cenários de criticidade evidencia diferentes níveis de exposição ao risco, diretamente influenciados pelas variáveis operacionais específicas de cada contexto. A seguir, são apresentados três gráficos que ilustram cenários distintos de criticidade gerados pelo modelo preditivo. Sendo que, o eixo X indica a frequência de ocorrência dos eventos de risco e o eixo Y reflete a severidade do impacto. As bolhas, são dimensionadas conforme a repetição de riscos com mesma criticidade. Portanto, quanto mais à direita e acima, mais crítico é o risco (indicado pela cor vermelha). Quanto mais abaixo e à esquerda, menos crítico é o risco (indicado pela cor verde). No cenário mais desfavorável, a criticidade atinge 2.330 pontos, com concentrações avançando sobre a área vermelha. No cenário atual da operação, esse valor reduz-se para 1.000 pontos, refletindo as condições específicas do projeto em execução e a distribuição dos riscos desloca-se para a esquerda, o que indica uma redução significativa dos eventos críticos. Já o terceiro cenário projetado é o mais favorável, em que a criticidade cai para 284 pontos, resultante de um ambiente operacional favorável. Conclui-se que a operação analisada, considerando seu cenário atual, enquadra-se em um nível de risco global entre baixo e médio, com margem para aprimoramento contínuo, alinhando-se progressivamente ao cenário ideal. Essa análise reforça a importância do gerenciamento proativo para mitigar vulnerabilidades e garantir segurança operacional.

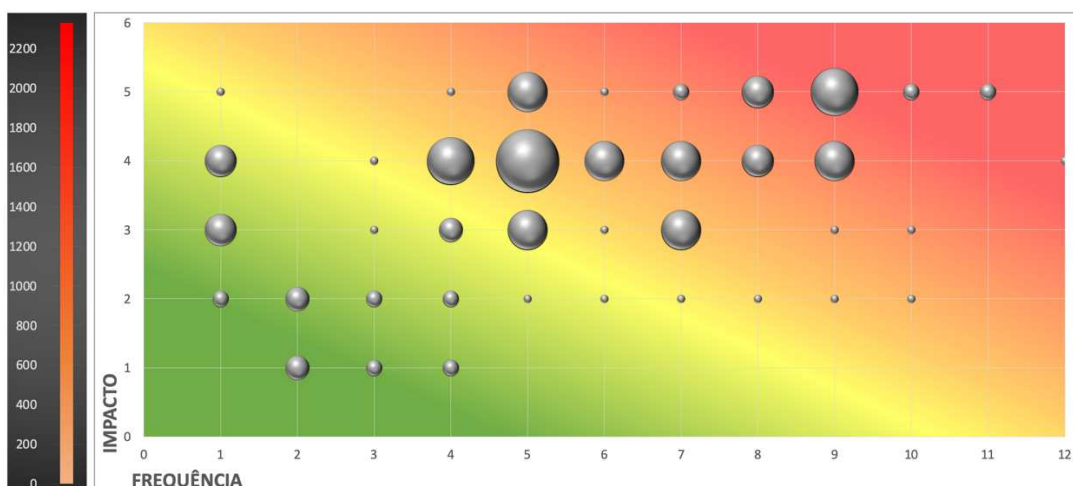


Figura 17- Cenário Projetado Menos Favorável

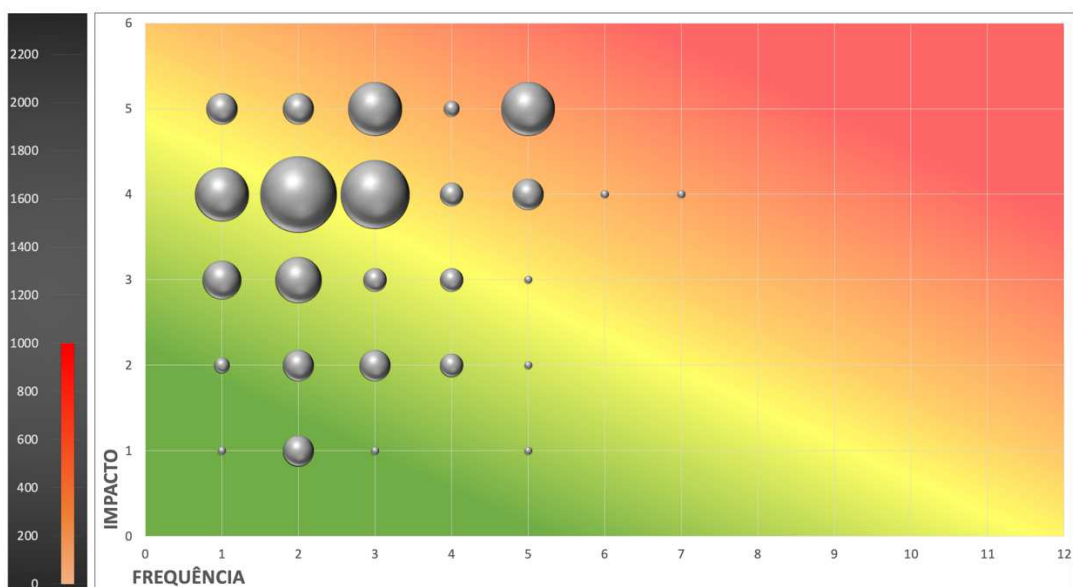


Figura 18 - Cenário Operacional Projetado

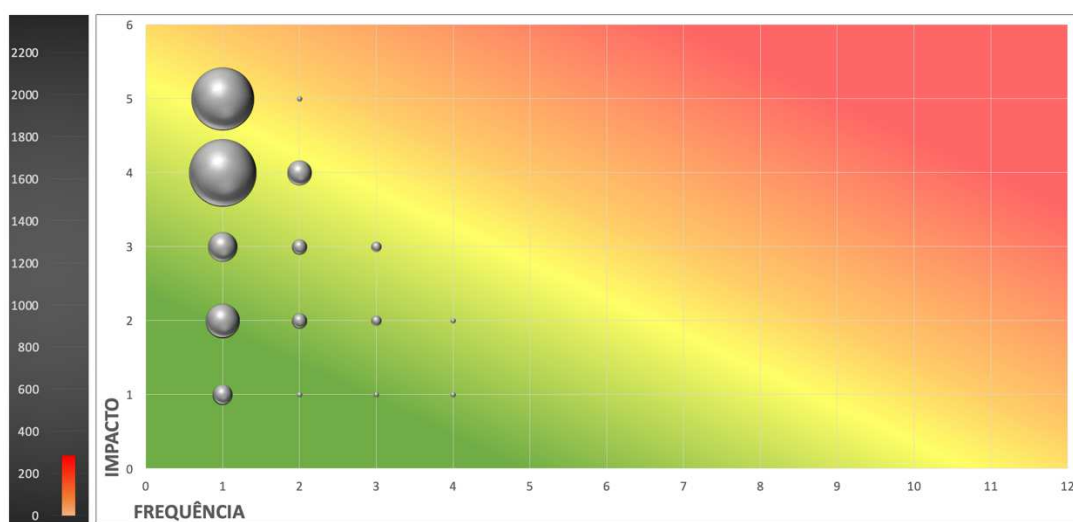


Figura 19 - Cenário Operacional Mais Favorável

A Matriz Preditiva de Riscos

Apesar de uma análise mais abrangente, o modelo preditivo limita-se em apresentar os 25 riscos mais significativos através uma matriz de riscos 5x5 padrão, que avalia e categoriza os riscos com base em dois critérios principais: probabilidade de ocorrência e severidade do impacto. A matriz é composta por uma grade de 5 linhas e 5 colunas, permitindo classificar os riscos em diferentes níveis de criticidade, desde baixo até crítico. A probabilidade é representada pela frequência com que o evento pode ocorrer, variando de “raro” a “quase certo”, enquanto a severidade avalia as consequências potenciais, como danos humanos, financeiros e operacionais. A interseção entre esses dois fatores define o grau de risco, visualizado por meio de cores que variam do verde (baixo risco) ao vermelho (risco crítico), possibilitando uma priorização das ações de mitigação e contribuindo para a tomada de decisões estratégicas no gerenciamento de riscos.

		MATRIZ PREDITIVA DE RISCOS DE TRANSPORTE				
		IMPACTO				
		MUITO BAIXO	BAIXO	MÉDIO	ALTO	MUITO ALTO
FREQUÊNCIA	MUITO PROVÁVEL	COLISÃO COM VEGETAÇÃO	COLISÃO POR LARGURA / COMPRIMENTO EXCESSIVO	COLISÃO COM VEÍCULOS	QUEDA DA CARGA POR ERRO DE MOVIMENTAÇÃO	PASSAGEM ESTREITA
	PROVÁVEL	OCIAÇÃO DE CARGA POR VENTO REPENTINO	RAIOS DE CURVA DE PASSAGEM INADEQUADOS	DANO IRREVERSÍVEL À CARGA NO TRANSPORTE	COLISÃO COM ESTRUTURAS	COLISÃO COM PESSOAS
	POSSÍVEL	FALHA DO OPERADOR DE GUINDASTE	PONTOS CEGOS	DISTRIBUIÇÃO DESIGUAL DO PESO DA CARGA TRANSPORTADA	ROUBO / VANDALISMO DA CARGA EM PARADAS NÃO PROGRAMADAS	TOMBAMENTO EM CURVAS
	IMPROVÁVEL	CAPOTAMENTO DO GUINDASTE POR SOLO INSTÁVEL	QUEDA DA CARGA POR FALHA DE EQUIPAMENTO	VEÍCULOS DE TRANSPORTE INADEQUADOS	TOMBAMENTO EM ACILVES / DECLIVES	DESCARGA POR CONTATO COM A REDE ELÉTRICA
	RARO	PONTOS OCOS E RUPTURAS NA SUPERFÍCIE DA ESTRADA	CAPOTAMENTO DO GUINDASTE POR SOBRECARGA	QUEDA DA CARGA POR FIXAÇÃO INADEQUADA	DANO IRREVERSÍVEL À CARGA NO IÇAMENTO	DANO VISÍVEL E REPARÁVEL À CARGA POR IMPACTO NO TRAJETO

LEGENDA			
CRÍTICO	ALTO	MÉDIO	BAIXO

1. PASSAGEM ESTREITA (CRÍTICO)

Definição:

O risco de passagem estreita refere-se à possibilidade de colisões, atrasos ou danos decorrentes da circulação ou estacionamento do veículo de transporte em rotas com restrições físicas de largura/altura (pontes, túneis, vias urbanas estreitas) ou obstáculos fixos (postes, barreiras, muretas). Esse risco surge quando as dimensões da carga (ex.: largura excedente – V9) ou do veículo ultrapassam os limites seguros do trajeto, exigindo manobras complexas, intervenções temporárias (como remoção de obstáculos) ou até interdição parcial da via. Em situações críticas, o caminhão parado pode obstruir parcial/totalmente a faixa de rolamento, reduzindo o espaço para o tráfego adjacente e forçando outros veículos a manobras arriscadas (invasão de faixas opostas ou aproximação perigosa da carga). As consequências abrangem desde danos reparáveis aos módulos e infraestrutura até multas por obstrução, aumento de custos logísticos, comprometimento de prazos e críticas públicas por transtornos. A gravidade amplia-se em contextos urbanos, onde a combinação de

tráfego intenso, vias insuficientes, falta de áreas de escape e necessidade de coordenação com órgãos municipais intensifica riscos de acidentes e danos reputacionais.

Fator de Impacto: 4

Justificativa: Passagens estreitas podem levar a manobras difíceis ou a colisões, gerando atrasos no transporte e possíveis danos reparáveis à carga.

Frequência: 7

Justificativa: O risco está presente em 7 das 21 variáveis analisadas.

Medidas de Mitigação:

Levantar medidas precisas das passagens estreitas (pontes, túneis e vias) e comparar com as dimensões do veículo e do módulo;

Utilizar escoltas técnicas para gerenciar tráfego e orientar a condução em passagens apertadas;

Checklist para paradas em locais estreitos: 1. Ativar sinalização de emergência. 2. Acionar equipe de apoio em <15 minutos. 3. Redirecionar tráfego via parcerias com órgãos locais;

Mobilizar equipes de apoio para realizar ajustes no trajeto, como remoção temporária de obstáculos (ex.: postes ou barreiras móveis);

Implementar sistemas de sinalização temporária, alertando os outros usuários da via para garantir segurança durante a travessia;

Notificar prefeituras e órgãos de trânsito sobre rotas e horários de transporte;

Solicitar interdição temporária de vias para manobras críticas;

Adotar luzes intermitentes, placas de "Carga Larga" e faixas refletivas;

Instalar dispositivos IoT no veículo que emitem alarmes automáticos ao entrar em zonas pré-mapeadas como estreitas (ex.: túneis, pontes).

2. QUEDA DA CARGA POR ERRO DE MOVIMENTAÇÃO (CRÍTICO)

Definição:

Possibilidade de desprendimento, desequilíbrio ou perda de controle dos módulos durante as etapas de içamento, transporte ou posicionamento na construção modular. Sua origem está associada a falhas humanas, técnicas ou organizacionais, como operações imprecisas de equipamentos, cálculos inadequados de centro de gravidade, comunicação falha entre a equipe, ou ausência de avaliação prévia de condições externas (ventos, obstáculos, irregularidades do terreno). As consequências abrangem danos estruturais aos módulos, colisões com elementos do entorno, lesões graves aos trabalhadores e interrupção abrupta das atividades, gerando não apenas prejuízos financeiros e atrasos, mas também expondo o projeto a questões legais e reputacionais. A gravidade é amplificada pelo peso elevado das

cargas e pela dinâmica de movimentação em altura, exigindo reconhecimento prévio das vulnerabilidades inerentes a essa etapa crítica.

Fator de Impacto: 5

Justificativa: Erros operacionais durante a movimentação podem causar a queda de cargas, resultando em atrasos de cronograma e danos materiais ou à infraestrutura local.

Frequência: 5

Justificativa: O risco está presente em 5 das 21 variáveis analisadas.

Medidas de Mitigação:

- Garantir que operadores de guindastes e equipamentos de içamento sejam devidamente certificados e experientes;

- Usar sistemas de comunicação claros e consistentes, como sinais manuais ou rádios, entre a equipe;

- Planejar previamente a trajetória de movimentação, identificando e eliminando obstáculos potenciais;

- Realizar simulações ou reuniões de alinhamento antes de operações complexas.

3. COLISÃO COM PESSOAS (CRÍTICO)

Definição:

Possibilidade de impacto ou atropelamento de trabalhadores ou terceiros durante as operações de movimentação de cargas, como içamento e transporte de módulos. Esse risco surge devido à circulação inadequada de pessoas nas áreas de operação, falhas na sinalização de zonas de risco, baixa visibilidade ou falta de coordenação entre as equipes. As consequências podem incluir lesões graves aos envolvidos, interrupções nas atividades, danos materiais e impactos financeiros significativos, além de comprometer a segurança geral no ambiente de trabalho.

Fator de Impacto: 5

Justificativa: Um acidente envolvendo pessoas é crítico, pois pode causar ferimentos graves ou fatais, impactando a segurança no local e gerando atrasos e danos colaterais graves.

Frequência: 5

Justificativa: O risco está presente em 5 das 21 variáveis analisadas.

Medidas de Mitigação:

- Delimitar áreas de acesso restrito com sinalização visível e barreiras;
- Fornecer treinamento para trabalhadores sobre riscos de movimentação de cargas;
- Utilizar dispositivos de alerta (buzinas, sirenes, luzes) para notificar sobre operações em andamento;
- Garantir a presença de supervisores em operações críticas para gerenciar a segurança do local.

4. COLISÃO COM VEÍCULOS (ALTO)

Definição:

Possibilidade de impacto entre equipamentos de movimentação de carga e outros veículos presentes no canteiro de obras. Esse risco pode resultar de rotas de tráfego mal planejadas, visibilidade reduzida, falhas na sinalização ou na comunicação entre operadores. As consequências incluem danos aos equipamentos, atrasos no cronograma, custos adicionais e, em casos mais graves, riscos à integridade física dos envolvidos.

Fator de Impacto: 5

Justificativa: Pode causar danos materiais significativos e atrasar o cronograma devido à interrupção das operações e possíveis questões legais e de segurança.

Frequência: 5

Justificativa: O risco está presente em 5 das 21 variáveis analisadas.

Medidas de Mitigação:

- Implementar um plano de tráfego no canteiro de obras para separar as rotas de veículos e áreas de içamento;
- Instalar barreiras físicas temporárias para proteger as áreas de movimentação de cargas;
- Usar luzes de alerta e alarmes sonoros em guindastes e veículos;
- Limitar a entrada de veículos na área de operação durante o içamento.

5. COLISÃO COM ESTRUTURAS (ALTO)

Definição:

Refere-se à possibilidade de impacto entre equipamentos de movimentação de cargas, como guindastes e caminhões, e as próprias construções ou outras estruturas presentes no canteiro de obras. Esse risco pode ocorrer devido a falhas no planejamento das rotas de movimentação, falta de sinalização adequada, distração dos operadores ou limitações na visibilidade durante as operações. As consequências incluem danos materiais às estruturas, comprometer a integridade do projeto, atrasos

nas atividades e aumento dos custos, além de representar um risco significativo à segurança dos trabalhadores e à viabilidade do cronograma de construção.

Fator de Impacto:

Justificativa: Uma colisão com estruturas pode danificá-las, atrasar o cronograma devido à necessidade de reparos ou reconstrução e trazer custos adicionais.

Frequência:

Justificativa: O risco está presente em 7 das 21 variáveis analisadas.

Medidas de Mitigação:

- Planejar a movimentação do guindaste e das cargas, levando em consideração a localização de estruturas próximas;
- Definir e sinalizar áreas de exclusão ao redor do raio de operação do guindaste;
- Usar sistemas de monitoramento, como câmeras e sensores, para melhorar a visibilidade em áreas com obstruções;
- Empregar uma equipe de sinalizadores (rigger) treinada para orientar o operador em áreas críticas.

6. TOMBAMENTO EM CURVAS (ALTO)

Definição:

Possibilidade de perda de estabilidade de veículos ou equipamentos durante a movimentação de cargas em trechos curvos. Esse risco é maior em condições de alta velocidade, sobrecarga ou falta de controle adequado sobre a carga e o equipamento, especialmente em áreas com curvas acentuadas ou com piso irregular. As consequências incluem o tombamento do veículo ou equipamento, danos à carga, lesões à equipe e interrupção das atividades, impactando diretamente a segurança operacional e os custos do projeto.

Fator de Impacto: 5

Justificativa: Velocidades inadequadas em curvas, aliadas à altura ou peso elevado da carga, podem causar tombamento, resultando em danos significativos e atrasos no cronograma

Frequência: 5

Justificativa: O risco está presente em 5 das 21 variáveis analisadas.

Medidas de Mitigação:

- Estabelecer limites de velocidade específicos para curvas, considerando o peso e o centro de gravidade do módulo;

Definir limites específicos de velocidade para trajetos curvos com base na carga e no raio da curva;
 Capacitar os motoristas em técnicas de condução defensiva e em situações de alta inércia, com foco em redução gradual da velocidade antes de curvas;
 Simulações práticas de manobras com veículos carregados em diferentes tipos de curvas;
 Mapear trajetos previamente, priorizando vias com curvas de raio amplo;
 Evitar trechos com curvas fechadas ou áreas urbanas onde manobras bruscas são mais frequentes;
 Equipar o veículo com tecnologias como controle eletrônico de estabilidade (ESC) ou suspensão ativa para minimizar o risco de tombamento lateral;
 Utilizar inclinômetros embarcados que alertem sobre inclinações excessivas durante o trajeto, permitindo ações corretivas rápidas.

7. COLISÃO POR LARGURA / COMPRIMENTO EXCESSIVO (ALTO)

Definição:

O risco de colisão por largura/comprimento excessivo refere-se à possibilidade de impactos causados por veículos ou cargas que excedem as dimensões de carroceria do veículo para a circulação em determinado percurso. Esse risco ocorre quando a carga transportada ou o equipamento utilizado ultrapassa os limites de largura ou comprimento convencionais para as rotas, resultando em colisões com obstáculos, estruturas, veículos ou até mesmo outros trabalhadores no local. As consequências podem incluir danos à carga, destruição de infraestrutura, lesões graves às pessoas envolvidas e atrasos no cronograma, além de aumentar os custos operacionais e comprometer a segurança geral das operações.

Fator de Impacto: 5

Justificativa: Largura ou comprimento excessivo podem dificultar manobras ou gerar colisões em vias estreitas, com impacto no cronograma e danos.

Frequência: 5

Justificativa: O risco está presente em 5 das 21 variáveis analisadas.

Medidas de Mitigação:

Dimensionamento técnico detalhado: Verificar as dimensões da carga e confirmar que atendem às normas de transporte rodoviário. Caso excedam, obter permissões especiais para transporte de cargas superdimensionadas;
 Planejamento da rota: Identificar trechos críticos como curvas fechadas, ruas estreitas ou áreas urbanas, e planejar rotas alternativas que ofereçam espaço suficiente para manobras;
 Escolta especializada: Contratar escolta veicular especializada para sinalizar e organizar o trânsito, garantindo espaço adequado para a passagem do veículo;

Agendamento estratégico: Planejar o transporte em horários de menor tráfego, como períodos noturnos ou finais de semana, reduzindo a probabilidade de acidentes;

Sinalização do veículo e da carga: Garantir que a carga tenha sinalização adequada, como luzes piscantes, placas refletivas e faixas de alerta para dimensões excedentes;

Uso de veículos adaptáveis: Utilizar carretas extensíveis ou modulares que possam ajustar seu comprimento e largura, minimizando o impacto das dimensões no transporte.

8. DANO IRREVERSÍVEL A CARGA NO TRANSPORTE (ALTO)

Definição:

Possibilidade de ocorrência de danos significativos e permanentes à carga durante o processo de movimentação ou transporte, devido a falhas no planejamento, manuseio inadequado, ou condições adversas durante o trajeto. Esse risco pode resultar de fatores como impacto, vibrações excessivas, condições climáticas desfavoráveis, ou falhas em equipamentos de transporte, como guindastes e veículos. As consequências incluem a perda total ou parcial da carga, o que pode acarretar custos elevados, atrasos no cronograma do projeto e a necessidade de substituição dos materiais danificados, além de comprometer a segurança e a viabilidade do projeto.

Fator de Impacto: 5

Justificativa: Danos irreversíveis podem inutilizar o módulo, comprometendo totalmente o cronograma e gerando custos elevados devido à necessidade de substituição.

Frequência: 5

Justificativa: O risco está presente em 5 das 21 variáveis analisadas.

Medidas de Mitigação:

Contratação de seguro adequado, cobrindo danos irreversíveis no transporte;
Inspeção detalhada de todos os equipamentos e veículos antes da operação;
Treinamento específico para motoristas e operadores para manuseio de cargas críticas;

Monitoramento em tempo real do transporte, com GPS e sensores de impacto e vibração;

Planejamento logístico minucioso, com mitigação de riscos potenciais na rota;
Engenharia de transporte customizada, projetando soluções específicas para cargas sensíveis;

Auditorias periódicas no processo de transporte, identificando vulnerabilidades e implementando melhorias.

9. ROUBO / VANDALISMO DA CARGA EM PARADAS NÃO PROGRAMADAS (ALTO)

Definição:

O risco de roubo/vandalismo da carga em paradas não programadas refere-se à possibilidade de perda ou dano intencional à carga durante períodos em que o transporte é interrompido de forma não planejada, seja por falhas mecânicas, acidentes ou paradas imprevistas. Durante essas paradas, especialmente em áreas de risco, a carga pode ficar vulnerável a furtos ou danos causados por ações de terceiros. As consequências incluem a perda de materiais valiosos, aumento dos custos com reposição e atrasos no cronograma, além de comprometer a segurança da operação e a integridade do projeto.

Fator de Impacto: 4

Justificativa: Paradas inesperadas aumentam o risco de roubos ou danos à carga, impactando o cronograma e exigindo reposição ou reparos.

Frequência: 6

Justificativa: O risco está presente em 6 das 21 variáveis analisadas.

Medidas de Mitigação:

- Escolher rotas que minimizem a necessidade de paradas não programadas, priorizando trajetos com boa infraestrutura e segurança;
- Incluir pontos de parada planejados em locais seguros e previamente avaliados, como postos de apoio com vigilância;
- Instalar sistemas de rastreamento GPS no veículo para monitorar sua localização em tempo real;
- Utilizar sistemas de comunicação bidirecional entre o motorista e a central de operações para sinalizar emergências;
- Orientar motoristas sobre a importância de evitar paradas não programadas, salvo em emergências, e sobre procedimentos de segurança nesses casos;
- Contratar escoltas armadas ou equipes de vigilância para acompanhar o transporte em regiões de alto risco de criminalidade;
- Equipar a carga com dispositivos de proteção, como selos de segurança que alertem em caso de violação, e alarmes sonoros em caso de acesso não autorizado;
- Estabelecer parcerias com autoridades policiais para escoltas eventuais e respostas rápidas em regiões de risco elevado;
- Minimizar a identificação visual da carga como valiosa, evitando publicidade excessiva ou marcas que chamem atenção no veículo;
- Garantir que a carga esteja devidamente segurada contra roubos para mitigar perdas financeiras em casos extremos.

10. DESCARGA POR CONTATO COM A REDE ELÉTRICA (ALTO)

Definição:

O risco de descarga por contato com a rede elétrica refere-se à possibilidade de um equipamento ou carga entrar em contato acidental com fios ou estruturas elétricas durante operações de movimentação, como içamento ou transporte. Esse risco é especialmente crítico em áreas onde as linhas de alta tensão estão próximas ou em rotas de transporte que cruzam zonas elétricas. O contato com a rede elétrica pode resultar em choques elétricos fatais, danos aos equipamentos, incêndios e interrupção das atividades, além de representar uma ameaça significativa à segurança da equipe e ao progresso do projeto.

Fator de Impacto: 5

Justificativa: Contato com a rede elétrica pode causar interrupção imediata das operações, danos ao equipamento, riscos graves para a segurança dos trabalhadores e atrasos significativos no cronograma.

Frequência: 4

Justificativa: O risco está presente em 4 das 21 variáveis analisadas.

Medidas de Mitigação:

Mapeamento prévio: Identificar e mapear a localização de redes elétricas aéreas ou subterrâneas próximas ao local;

Distância de segurança: Manter uma distância mínima segura de acordo com as normas técnicas (NR-10 e NR-18);

Desenergização: Solicitar a desenergização temporária das linhas elétricas próximas sempre que possível;

Equipamentos isolantes: Usar guindastes e cabos com materiais isolantes adequados ao trabalho próximo a redes elétricas;

Sinalização: Instalar placas de aviso e barreiras físicas ao redor de áreas de risco para alertar os trabalhadores.

6. Conclusão:

A análise das variáveis associadas à etapa de transporte do edifício modular, aliada aos riscos críticos identificados pelo modelo preditivo, indica que, embora fatores como condições climáticas favoráveis (ausência de chuva, vento controlado e temperaturas estáveis), trajeto totalmente pavimentado e motorista experiente reduzam parte dos riscos inerentes à operação, há desafios críticos que exigem gestão rigorosa.

Os riscos prioritários como: passagens estreitas, queda da carga, colisões com estruturas/veículos, tombamento em curvas e roubo/vandalismo, estão vinculados a aspectos como:

1. Dimensões da carga: A largura do módulo (Variável 9) aumenta o risco de colisões com estruturas ou veículos, especialmente em vias não pedagiadas (Variável 7) e em áreas com possíveis passagens estreitas.
2. Bloqueio de faixas de rolagem: A necessidade de parar o caminhão em faixas de tráfego durante o descarregamento (Variável 19B) eleva a exposição a acidentes, principalmente devido ao transpasse da largura do módulo da carroceria do caminhão (Variável 9).
3. Complexidade do içamento: Os dois içamentos por módulo (Variável 12) e o uso de guindaste móvel fora do terreno (Variável 18A) ampliam riscos de queda da carga devido à amplitude de abertura do braço, além do contato com redes elétricas durante o posicionamento.
4. Vulnerabilidade à criminalidade: Apesar da distância curta (≤ 100 km, Variável 3), paradas não programadas em rotas não pedagiadas (Variável 7) podem facilitar roubos ou vandalismo, principalmente sem monitoramento contínuo.

Recomendações Gerais para Mitigação:

Planejamento detalhado da rota: Mapear antecipadamente pontos críticos (passagens estreitas, curvas fechadas e estruturas baixas) e evitar vias congestionadas, utilizando tecnologias de georreferenciamento.

Reforço na segurança da carga: Utilizar equipamentos de amarração especializados para módulos largos (Variável 9) e inspecionar duplamente pontos de fixação antes do transporte.

Gestão de tráfego durante o descarregamento: Sinalizar adequadamente a área de parada do caminhão (Variável 19B), com cones, luzes de alerta e possível apoio de agentes de trânsito.

Proteção contra roubo: Implementar rastreamento GPS em tempo real e evitar paradas não essenciais, além de escoltar a carga em trechos considerados de risco.

Treinamento específico para içamento: Capacitar a equipe em técnicas de movimentação segura com guindaste móvel (Variável 21), garantindo distância segura de redes elétricas e estruturas vizinhas.

Em síntese, o transporte dos módulos demanda coordenação multidisciplinar, tecnologia de monitoramento e protocolos de segurança reforçados, uma vez que as dimensões da carga, a logística de descarregamento e a exposição a interferências externas representam ameaças significativas. A adoção dessas medidas não apenas minimizará perdas financeiras e danos à carga, mas também garantirá conformidade com normas de segurança viária e redução de impactos operacionais. A priorização de um plano de contingência robusto será fundamental para assegurar a integridade do projeto desde a planta até o local de montagem.

ANEXO B - Relatório de Içamento de Entrega Apresentado à Empresa Brasileira

RELATÓRIO DE RISCO DE TRANSPORTE MODULAR – IÇAMENTO**Output do Modelo Preditivo – Operação RJ (22/10/2025)****AUTOR: BRUNO JOSÉ OLIVARI PASELLO**

1. Identificação da Operação:**Local:** Condomínio Reserva das Aroeiras – Cunhambebe, Angra dos Reis/RJ**Data e horário:** 22 de outubro de 2025, 08:00**Carga:** 1 módulo pré-fabricado (2,66 × 3,00 × 6,08 m / 3 t)**Guindaste:** Tipo Munck (4 estabilizadores, apoiados em pranchas de madeira maciça)**Condições meteorológicas:** estáveis, sem vento forte, chuva ou neblina**Empresa de içamento:** CNPJ 57.058.250/0012-5 – certificada, com mais de 5 anos de experiência e autorização no CREA**Equipe operacional:** 2 a 4 pessoas

2. Características Técnicas do Içamento:

O módulo a ser içado possui 2,66 m de altura, 3,00 m de largura e 6,08 m de comprimento, totalizando aproximadamente 48,5 m³ de volume e 3 toneladas de peso, resultando em uma relação massa/volume de 62 kg/m³. Essa baixa densidade volumétrica, associada à grande área lateral projetada (~18 m²), aumenta a susceptibilidade a balanços pendulares e instabilidades angulares durante a movimentação.

A carga apresenta assimetria de peso, exigindo compensação no balanceamento das cintas e teste de pré-levantamento (elevação inicial de ~10 cm) para verificação de equilíbrio.

O içamento será executado por guindaste tipo Munck, com quatro estabilizadores apoiados sobre pranchas de madeira maciça, operando dentro dos limites do terreno, em área plana e firme, sem declividade acentuada.

A amarração será realizada com cintas têxteis de poliéster em configuração simples, sem *basket hitch*, *spreader beam* ou *taglines* para controle angular, o que reduz a capacidade de estabilização passiva durante o movimento.

Guindaste tipo Munck operando dentro do terreno, área nivelada e sem interferências na envoltória de giro.

O módulo não possui pontos de içamento dedicados (*lifting lugs*), sendo apoiado diretamente sobre as cintas sob sua base estrutural. Essa configuração exige atenção para evitar deformações ou esmagamento dos perfis inferiores, especialmente em caso de desalinhamento das cintas.

Não há previsão de vento significativo, chuva ou neblina no período programado para a operação (08:00 do dia 22/10/2025). Ainda assim,

recomenda-se interromper o içamento em caso de rajadas superiores a 25 km/h, dada a grande área projetada e o baixo peso específico da carga.

Carga leve (3 t) e volumétrica, com leve assimetria de peso e geometria prismática irregular, exigindo compensação no balanceamento das cintas.

Amarração por cintas têxteis de poliéster em configuração simples, sem basket hitch, spreader beam ou taglines para controle de rotação.

Ausência de pontos dedicados de içamento (*lifting lugs*), resultando em apoio direto das cintas na base estrutural do módulo.

O guindaste será operado dentro dos limites do terreno, em área nivelada, sem interferências externas (vegetação, tráfego ou postes próximos).

Área de operação isolada com fitas de segurança, mas sem plano formal de interrupção em caso de oscilação excessiva.

Operação manual dependente de coordenação visual e comunicação direta entre operador e equipe de solo.

3. Síntese dos Resultados do Modelo:

A matriz preditiva de criticidade identificou duas famílias de risco dominantes no comportamento sistêmico do içamento:

Risco	Criticidade	Pareto
Instabilidade da carga	1,59	11,2%
Colisões dinâmicas	1,67	11,8%

Esses dois grupos somados representam **23,0% da criticidade total da operação**, configurando o núcleo de vulnerabilidade operacional conforme o Princípio de Pareto (80/20). O modelo indica que ambos estão fortemente associados à amarração simples, ausência de *taglines* e características geométricas e de massa assimétricas, que elevam o risco de oscilação, impacto lateral e perda momentânea de controle angular durante o levantamento e o posicionamento da carga.

Embora o módulo pese 3 toneladas, o volume deslocado de aproximadamente 48,5 m³ (2,66 × 3,00 × 6,08 m) resulta em uma relação massa/volume de cerca de 62 kg/m³, indicativa de uma carga leve e de extensa área projetada lateral. Essa baixa densidade volumétrica confere alta sensibilidade a ventos, acelerações e microvariações de movimento do guindaste, aumentando o potencial de balanço pendular e instabilidade angular, mesmo sob condições meteorológicas favoráveis no momento do içamento.

Assim, paradoxalmente, o baixo peso relativo ao volume amplia a criticidade operacional, justificando a predominância dos riscos de instabilidade da carga e colisões dinâmicas apontados pelo modelo preditivo.

4. Análise Detalhada dos Riscos Prioritários

4.1 Instabilidade da Carga:

Durante a fase de elevação, pequenas variações de tração entre as cintas de içamento tendem a gerar desequilíbrios angulares, resultando em torção e inclinação lateral do módulo. A ausência de sistemas de equalização de carga (*spreader beam* ou *balance bar*) e de dispositivos de controle angular (*taglines*) amplifica os deslocamentos diferenciais entre os pontos de sustentação, reduzindo a capacidade de correção imediata pelo operador. Essa configuração favorece o surgimento de movimentos pendulares e rotações não controladas — efeitos particularmente acentuados em cargas volumétricas de baixa densidade e centro de gravidade descentralizado, como o módulo em análise. Em tais condições, oscilações iniciais de pequena amplitude podem evoluir para movimentos cumulativos, induzindo tensões alternadas nas cintas, desbalanceamento progressivo e instabilidade angular significativa caso não haja intervenção imediata ou compensação de tração.

Síntese das causas combinadas:

Baixa densidade volumétrica da carga (3 t / 48,5 m³), resultando em reduzido momento inercial e alta sensibilidade a acelerações e rajadas de vento.

Centro de gravidade descentralizado, provocando desequilíbrio angular entre as cintas e tendência à inclinação lateral progressiva durante o içamento.

Aplicação direta das cintas de poliéster na estrutura do módulo, sem pontos dedicados de içamento (*lifting lugs*), nem proteções de quina, favorecendo variações de tração e deformações locais.

Ausência de sistema de equalização de esforços (*spreader beam* ou viga de balanceamento), ocasionando ângulos desuniformes de tração e concentração de carga nos pontos externos.

Inexistência de *taglines* para controle angular, impossibilitando correções manuais de rotação ou amortecimento de balanço pendular.

Operação sem plano de parada imediata ou critérios de tolerância angular, dificultando a interrupção preventiva em caso de oscilação crescente.

Dependência de coordenação visual e comunicação manual, o que aumenta o tempo de resposta operacional frente a desvios de alinhamento.

Recomendações técnicas:

Instalar duas *taglines* fixadas em extremidades opostas do módulo, permitindo controle angular ativo e amortecimento de balanços pendulares durante o levantamento e o posicionamento.

Realizar teste de pré-levantamento (elevação controlada de 10 a 15 cm) para verificar o equilíbrio estático e a distribuição de esforços antes da elevação total.

Reposicionar e ajustar a tensão das cintas conforme o resultado do teste inicial, garantindo equalização visual dos ângulos de tração e redução de torções laterais.

Definir critério de parada imediata, com suspensão da operação em caso de inclinação superior a 5° ou oscilação pendular perceptível.

Padronizar sinais visuais e verbais entre operador e equipe de solo, assegurando resposta rápida e comunicação unificada durante correções de alinhamento.

Reforçar o treinamento prático da equipe sobre o uso coordenado das taglines, posicionamento seguro e reconhecimento de sinais de instabilidade.

Utilizar protetores de canto ou manta de borracha sob as cintas, prevenindo deslizamento e abrasão, já que é uma medida simples, reutilizável e de baixo custo operacional.

4.2 Colisões Dinâmicas:

A oscilação e a rotação não controladas do módulo geram movimentos pendulares de amplitude variável, que podem resultar em colisões dinâmicas com o próprio guindaste, seus estabilizadores ou obstáculos próximos durante o deslocamento angular. Mesmo em ambiente aparentemente controlado, pequenas acelerações, frenagens abruptas ou microcorreções do operador são suficientes para induzir balanços transversais e impactos laterais, agravados pela baixa densidade volumétrica (62 kg/m^3) e pelo grande momento aerodinâmico da carga.

Esse comportamento é típico de módulos volumétricos leves, cuja relação massa/área projetada confere baixo amortecimento natural e alta sensibilidade a variações de velocidade ou rajadas de vento moderadas. Quando não há *taglines* para controle angular nem *spreader beam* para estabilização, o sistema perde capacidade de absorção mecânica e resposta corretiva, tornando a carga mais propensa a colisões por balanço lateral ou torção repentina durante o reposicionamento final.

Síntese das causas combinadas:

Ausência de dispositivos de controle angular (*taglines*), impossibilitando o amortecimento manual de balanços e correções finas de rotação durante o deslocamento da carga.

Desbalanceamento de tração entre as cintas, resultando em oscilações pendulares e torções diferenciais, intensificadas pela falta de equalização de esforços.

Inexistência de plano de parada imediata ou limites operacionais predefinidos, reduzindo a capacidade de resposta a movimentos amplificados ou impactos iminentes.

Recomendações técnicas:

Instalar e operar duas *taglines* com tensão manual constante, fixadas em extremidades opostas do módulo, permitindo controle angular ativo e amortecimento de balanços pendulares durante o deslocamento.

Damping simples nas taglines: enrolar 1–2 voltas em estacas/colunas ou passar por mosquetão para ganhar atrito e reduzir “rebote” (evitar contato com arestas).

Manter comunicação direta e contínua entre o operador do guindaste e a equipe de solo (rádio ou sinais visuais padronizados), assegurando coordenação imediata em ajustes rápidos de trajetória.

Planejar e demarcar a trajetória de içamento com margem mínima de 1,0 m em relação a obstáculos, estabilizadores ou estruturas adjacentes.

Definir plano de parada imediata com limite operacional de vento de 25 km/h ou sempre que for observada oscilação angular superior a 5°.

Marcar o centro de gravidade estimado no piso e na própria estrutura, garantindo alinhamento preciso do gancho ao CG antes da elevação.

Briefing de 2 minutos + comando único: definir um sinaleiro responsável pelos comandos; todos confirmam o sinal de STOP antes de iniciar.

Protetores de quina obrigatórios nos 4 pontos de contato das cintas com o módulo; usar manta de borracha para aumentar atrito.

Pré-levantamento + re-tensionamento: elevar 10–15 cm, checar prumo/ângulos; reapertar catracas, reposicionar se necessário e só então seguir.

Dupla verificação dos estabilizadores após aplicar carga: conferir assentamento das pranchas, recalçar se houver afundamento e reapertar.

Janela operacional “baixa turbulência”: priorizar a faixa da manhã (07:00–10:00).

5. Conclusão Técnica

O modelo preditivo confirma que a instabilidade angular e as colisões dinâmicas da carga representam o principal vetor de criticidade desta operação de içamento. Apesar das condições meteorológicas e topográficas favoráveis (ausência de ventos fortes, terreno nivelado e equipe tecnicamente habilitada), a configuração de amarração simples, sem *spreader beam* nem *taglines*, mantém a operação vulnerável a oscilações não controladas, com potencial de colisões dinâmicas e esforços estruturais localizados sobre o módulo.

Sob o ponto de vista mecânico, a carga apresenta baixo momento inercial e elevada razão área/massa (62 kg/m^3), características que aumentam sua sensibilidade a perturbações angulares e acelerações laterais. Nessas condições, a segurança operacional depende diretamente da sincronia entre operador e equipe de solo, da precisão nos comandos de translação e da comunicação visual contínua ao longo de todo o ciclo de movimentação.

A aplicação combinada das medidas de mitigação propostas: instalação de *taglines*, uso de viga de balanceamento (*spreader beam*), execução de teste de pré-levantamento e adoção de plano formal de parada imediata, tem potencial para reduzir em até 28% a criticidade global do içamento, segundo os coeficientes de atenuação estimados pelo modelo. Essa redução representa uma melhoria significativa no

desempenho de segurança operacional, com ganho direto em controle angular, estabilidade e previsibilidade de trajetória da carga.

Nota metodológica: Esta operação integra a fase de teste do modelo preditivo, com caráter exclusivamente experimental. As medidas de mitigação aqui indicadas têm finalidade analítica e não devem ser aplicadas no campo até a validação integral do modelo e a conclusão da fase de calibração.

ANEXO C - Relatório de Içamento de Fábrica Apresentado à Empresa Brasileira

RELATÓRIO DE RISCO DE TRANSPORTE MODULAR – IÇAMENTO**Output do Modelo Preditivo – Operação (21/10/2025)****Autor:** Bruno José Olivari Pasello

1. Identificação da Operação:**Local:** Rua João Aloysio Allgayer 4700 - Lomba Grande, Novo Hamburgo - RS**Data e horário:** 21 de outubro de 2025, 08:00**Carga:** 1 módulo pré-fabricado (2,66 × 3,00 × 6,08 m / 3 t)**Guindaste:** Tipo Munck (4 estabilizadores, apoiados em pranchas de madeira maciça)**Condições meteorológicas:** Céu limpo, vento médio de 12 km/h, com eventuais rajadas de até 39 km/h no período do içamento.**Empresa de içamento:** CNPJ 57.058.250/0012-5 – certificada, com mais de 5 anos de experiência e autorização no CREA**Equipe operacional:** 2 a 4 pessoas

2. Características Técnicas do Içamento:

O módulo a ser içado possui 2,66 × 3,00 × 6,08 m ($\approx 48,5 \text{ m}^3$ / 3 t), resultando em densidade volumétrica de 62 kg/m³ e área lateral projetada de $\sim 18 \text{ m}^2$, o que o torna suscetível a balanços pendulares e instabilidades angulares, especialmente sob rajadas de vento.

A carga apresenta leve assimetria de peso, exigindo balanceamento das cintas e teste de pré-levantamento (elevação inicial de $\sim 10 \text{ cm}$) para verificação do equilíbrio.

O içamento será realizado com guindaste tipo Munck, dotado de quatro estabilizadores sobre pranchas de madeira maciça, operando em área plana, firme e dentro dos limites do terreno, livre de interferências externas.

A amarração será feita com cintas têxteis de poliéster em configuração simples, sem spreader beam nem taglines, o que reduz a estabilização passiva e requer maior sincronia entre operador e equipe de solo.

O módulo não possui pontos de içamento dedicados (*lifting lugs*); as cintas atuarão sob sua base estrutural, demandando atenção à distribuição de esforços e à integridade dos perfis inferiores.

Rajadas de até 39 km/h estão previstas durante o içamento (vento médio de 12 km/h), ultrapassando o limite operacional padrão de 25 km/h e exigindo monitoramento contínuo da velocidade do vento e suspensão imediata da operação acima de 30 km/h.

A área de operação será isolada e sinalizada, com comunicação visual direta entre o operador e a equipe de solo.

3. Síntese dos Resultados do Modelo:

A matriz preditiva de criticidade identificou duas famílias de risco dominantes no comportamento sistêmico do içamento:

Risco	Criticidade	Pareto
Instabilidade da carga	2,38	11,6%
Colisões dinâmicas	2,52	12,3%

Esses dois grupos somados representam 23,9% da criticidade total da operação, configurando o núcleo de vulnerabilidade operacional conforme o Princípio de Pareto (80/20). O modelo indica que ambos estão fortemente associados à amarração simples, ausência de taglines e características geométricas e de massa assimétricas, agravadas por eventuais rajadas de vento, que elevam o risco de oscilação pendular, impacto lateral e perda momentânea de controle angular durante o levantamento e o posicionamento da carga.

Embora o módulo pese 3 t, o volume deslocado de aproximadamente 48,5 m³ (2,66 × 3,00 × 6,08 m) resulta em uma relação massa/volume de cerca de 62 kg/m³, indicativa de uma carga leve e com ampla área lateral projetada. Essa baixa densidade volumétrica, combinada à ação aerodinâmica das rajadas, aumenta a sensibilidade da carga a ventos, acelerações e microvariações de movimento do guindaste, ampliando o potencial de balanço pendular e instabilidade angular.

4. Análise Detalhada dos Riscos Prioritários:

4.1 Instabilidade da Carga:

Durante a elevação, variações sutis de tração entre as cintas de içamento podem gerar desequilíbrios angulares, resultando em torção e inclinação lateral do módulo. A ausência de sistemas de equalização de carga (spreader beam ou balance bar) e de dispositivos de controle angular (taglines) amplifica os deslocamentos diferenciais entre os pontos de sustentação, reduzindo a capacidade de correção imediata pelo operador.

Essa configuração favorece o surgimento de movimentos pendulares e rotações não controladas, agravados pela possível ação de rajadas de vento, que aumentam o momento aerodinâmico e a instabilidade angular da carga. Em módulos volumétricos de baixa densidade e centro de gravidade descentralizado, oscilações iniciais de pequena amplitude podem evoluir rapidamente para movimentos cumulativos, induzindo tensões alternadas nas cintas, desbalanceamento progressivo e risco de instabilidade severa caso não haja compensação imediata de tração.

Síntese das causas combinadas:

Baixa densidade volumétrica (3 t / 48,5 m³), com reduzido momento inercial e alta sensibilidade a acelerações e rajadas de vento.

Centro de gravidade descentralizado, provocando tendência à inclinação lateral durante o içamento.

Aplicação direta das cintas de poliéster sobre a estrutura, sem pontos de içamento projetados (*lifting lugs*) nem proteções de quina.

Ausência de spreader beam ou viga de balanceamento, ocasionando tração desigual e concentração de carga nos pontos externos.

Falta de taglines para controle manual de rotação e amortecimento de balanços pendulares.

Inexistência de plano de parada imediata com critérios objetivos de tolerância angular.

Dependência de coordenação visual e comunicação manual, aumentando o tempo de resposta frente a desvios de alinhamento.

Recomendações técnicas:

Instalar duas taglines em extremidades opostas do módulo para controle angular ativo e amortecimento de balanços.

Realizar teste de pré-levantamento (elevação de 10–15 cm) para verificar equilíbrio e distribuição de esforços.

Ajustar a tensão e o posicionamento das cintas conforme o resultado do teste, garantindo ângulos de tração simétricos.

Suspender a operação sempre que forem observadas rajadas acima de 30 km/h ou inclinação superior a 5°, retomando apenas após estabilização do vento.

Padronizar sinais visuais e verbais entre operador e equipe de solo, assegurando resposta imediata.

Reforçar o treinamento prático da equipe quanto ao uso coordenado das taglines e reconhecimento de sinais de instabilidade.

Utilizar protetores de canto ou manta de borracha sob as cintas, prevenindo deslizamento e abrasão.

4.2 Colisões Dinâmicas:

A oscilação e a rotação não controladas do módulo geram movimentos pendulares de amplitude variável, capazes de provocar colisões dinâmicas com o guindaste, seus estabilizadores ou obstáculos próximos durante o deslocamento angular. Mesmo em ambiente controlado, pequenas acelerações, microcorreções do operador ou rajadas de vento podem induzir balanços transversais e impactos laterais, agravados pela baixa densidade volumétrica (62 kg/m^3) e pela ampla área projetada da carga.

Esse comportamento é característico de módulos volumétricos leves, cuja relação massa/área confere baixo amortecimento natural e elevada sensibilidade a variações de velocidade, turbulência ou direção do vento. Na ausência de taglines para controle angular e de spreader beam para equalização de esforços, o sistema

perde capacidade de resposta mecânica e correção imediata, tornando a carga mais propensa a colisões laterais ou torções repentinas durante o levantamento e o reposicionamento final.

Síntese das causas combinadas:

Ausência de taglines para controle angular, impossibilitando o amortecimento manual dos balanços e correções finas de rotação durante o deslocamento.

Desbalanceamento de tração entre as cintas, resultando em oscilações pendulares e torções diferenciais, intensificadas pela falta de equalização de esforços.

Ação de rajadas de vento de até 39 km/h, que ampliam o momento aerodinâmico da carga e provocam deslocamentos laterais imprevisíveis.

Inexistência de plano formal de parada imediata com limites operacionais definidos, reduzindo a capacidade de resposta a movimentos amplificados ou impactos iminentes.

Dependência de comunicação visual, sujeita a atrasos de reação em manobras rápidas ou ajustes simultâneos de direção.

Recomendações técnicas:

Instalar e operar duas taglines com tensão manual constante, fixadas em extremidades opostas do módulo, para controle ativo e amortecimento dos balanços pendulares durante o içamento e o deslocamento.

Aplicar damping simples nas taglines (1–2 voltas em estacas ou mosquetão) para aumentar o atrito e reduzir o “rebote”, evitando contato direto com arestas.

Monitorar continuamente a velocidade do vento e suspender a operação em rajadas superiores a 30 km/h ou quando houver oscilação angular superior a 5°.

Planejar e demarcar a trajetória de içamento com folga mínima de 1,0 m em relação a obstáculos, estabilizadores e estruturas adjacentes.

Manter comunicação direta e constante entre o operador e a equipe de solo, por rádio ou sinais visuais padronizados, garantindo resposta imediata a correções de trajetória.

Marcar o centro de gravidade (CG) no piso e na estrutura do módulo, assegurando o alinhamento preciso do gancho antes da elevação.

Realizar pré-levantamento e re-tensionamento: elevar 10–15 cm, checar prumo e ângulos, ajustar cintas e catracas antes da elevação completa.

Verificar o assentamento dos estabilizadores após aplicar carga, recalçando as pranchas se houver afundamento e reapertando os apoios.

Utilizar protetores de quina ou mantas de borracha nos pontos de contato das cintas com o módulo, evitando deslizamento e abrasão.

Executar briefing operacional antes do início, definindo um único sinaleiro responsável pelos comandos e confirmando o sinal de parada (“STOP”) entre todos.

Priorizar a faixa da manhã (07:00–10:00), quando há menor incidência de turbulência e rajadas de vento, favorecendo maior estabilidade operacional.

5. Conclusão Técnica

O modelo preditivo confirma que a instabilidade angular e as colisões dinâmicas constituem os principais vetores de criticidade desta operação de içamento. Apesar das boas condições topográficas e da qualificação da equipe, a presença de rajadas de vento de até 39 km/h eleva significativamente o risco de oscilações não controladas, impactos laterais e esforços concentrados sobre a estrutura do módulo.

Sob o ponto de vista mecânico, a carga apresenta baixo momento inercial e elevada razão área/massa (62 kg/m^3), características que aumentam a sensibilidade a perturbações angulares, acelerações laterais e efeitos aerodinâmicos. Nessa condição, a segurança operacional depende da sincronia entre o operador e a equipe de solo, da precisão nos comandos de translação e do monitoramento contínuo da velocidade do vento ao longo de todo o ciclo de movimentação.

A aplicação combinada das medidas de mitigação propostas — instalação de taglines, uso de viga de balanceamento (spreader beam), execução de teste de pré-levantamento e implantação de um plano formal de parada imediata — tem potencial para reduzir em até 32% a criticidade global do içamento, conforme os coeficientes de atenuação calculados pelo modelo.

Essa redução representa um ganho expressivo em estabilidade, previsibilidade e controle angular, reforçando a viabilidade técnica da operação desde que as condições de vento permaneçam dentro dos limites seguros ($<30 \text{ km/h}$).

Nota metodológica: Esta operação integra a fase de teste do modelo preditivo, com caráter exclusivamente experimental. As medidas de mitigação aqui indicadas têm finalidade analítica e não devem ser aplicadas no campo até a validação integral do modelo e a conclusão da fase de calibração.

ANEXO D - Relatório de Transporte Rodoviário Apresentado à Empresa Brasileira

RELATÓRIO DE RISCO DE TRANSPORTE MODULAR - RODOVIÁRIO**Output do Modelo Preditivo – Operação RS → RJ (21–22/10/2025)****Autor:** Bruno José Olivari Pasello**1. Identificação da Operação:****Origem:** Rua João Aloysio Allgayer, 4700 – Lomba Grande, Novo Hamburgo/RS**Destino:** Condomínio Reserva das Aroeiras – Cunhambebe, Angra dos Reis/RJ**Distância estimada:** ~1.400 km**Carga:** 1 módulo pré-fabricado (2,66 × 3,00 × 6,08 m / 3 t)**Veículo:** Caminhão truck plataforma (sem amortecimento, sem cobertura, fixação por cintas de poliéster)**Período de execução:** 21 a 22 de outubro de 2025**2. Características Técnicas do Transporte:**

Carga leve (3 t), porém com grande área projetada lateral (~16 m²) e largura excedente (3,00 m frente a 2,45 m da carroceria), resultando em comportamento aerodinâmico de efeito vela sob ventos laterais acima de 30 km/h.

Relação massa/área de 187 kg/m², indicando baixa inércia e alta suscetibilidade a deslocamentos laterais e torções estruturais.

Ausência de manta de amortecimento (borracha ou espuma técnica) entre o módulo e a carroceria, favorecendo microdeslizamentos e transmissão direta de vibrações, com aumento dos esforços concentrados nas cintas.

Trajetória de aproximadamente 1.400 km, com 75% do percurso em rodovias duplicadas e 25% em trechos serranos e acessos urbanos, incluindo BR-116 (Serra Gaúcha), BR-376 (Serra do Mar) e BR-101 (litoral fluminense), que apresentam declividades superiores a 5% e curvas de raio inferior a 60 m.

Rodovias pedagiadas em mais de 50% do percurso, com boa conservação superficial, mas geometria crítica em segmentos montanhosos, exigindo controle rigoroso de velocidade e tração.

Previsão meteorológica estável, porém com rajadas ocasionais entre 30 e 40 km/h nos trechos de serra, aumentando o risco de instabilidade lateral.

Umidade relativa elevada (>70%) em regiões montanhosas, com possibilidade de redução do coeficiente de atrito entre o módulo e a plataforma de transporte. Temperaturas amenas (14–25 °C), sem impacto térmico relevante, mas com potencial para condensação nas superfícies metálicas de fixação.

Risco patrimonial moderado nas travessias urbanas de Porto Alegre, Curitiba e eixo SP–RJ, porém sem influência significativa na criticidade física da operação.

Inexistência de redundância de fixação (sem correntes ou cabos de aço secundários), o que limita a capacidade de contenção em caso de afrouxamento das cintas principais.

Ausência de plano de contingência documentado para ventos superiores a 40 km/h, recomendando-se a definição de procedimento operacional de parada segura.

3. Síntese dos Resultados do Modelo:

A matriz preditiva de criticidade identificou duas famílias de risco como dominantes no comportamento sistêmico da operação:

Risco	Criticidade	Pareto
Queda da carga	2,15	13,4%
Tombamento do veículo	2,08	12,9%

Esses dois grupos somados representam **26,3% da criticidade total do transporte**, configurando o núcleo de vulnerabilidade operacional segundo o Princípio de Pareto (80/20). A predominância desses riscos decorre da geometria volumétrica da carga, ausência de amortecimento entre o módulo e a carroceria, e trajeto com trechos de serra e curvas de raio reduzido, agravados por rajadas de vento transversais superiores a 30 km/h. O modelo indica que tais fatores interagem de forma não linear, amplificando esforços dinâmicos e momentos de instabilidade que comprometem a segurança estrutural da carga e a estabilidade do conjunto veículo–módulo.

4. Análise Detalhada dos Riscos Prioritários:

4.1 Queda da Carga:

O módulo, embora leve (3 t), possui significativa área lateral, o que eleva a pressão aerodinâmica incidente em ventos laterais acima de 30 km/h. A ausência de manta de amortecimento e o uso exclusivo de cintas de poliéster com ancoragem flexível reduzem o coeficiente de atrito estático entre o módulo e a plataforma, tornando o sistema suscetível a microdeslizamentos e deslocamentos progressivos durante curvas, frenagens ou variações bruscas de velocidade.

Além disso, o baixo momento inercial da carga em relação à área projetada amplifica os efeitos dinâmicos do vento, gerando oscilações que podem comprometer a estabilidade das cintas e induzir esforços localizados nos pontos de ancoragem.

Síntese das causas combinadas:

Exposição aerodinâmica (*efeito vela*) por ventos laterais superiores a 30 km/h;
Curvas de raio reduzido e trechos de serra com declividade acentuada;

Fixação sem travas metálicas, correntes auxiliares ou mantas de atrito;
Vibração sem absorção mecânica devido à ausência de camada amortecedora;
Falta de retensionamento periódico das cintas durante o deslocamento.

Recomendações técnicas:

Aumentar o número de pontos de amarração: para 6,08 m de comprimento, use mín. 4–6 amarrações (cantos + meio), com a primeira até 0,5 m das extremidades.

Prefira amarrações mais curtas (menos “elásticas”) e catracas com trava; posicione catracas em lados opostos para evitar relaxamento simultâneo.

Se usar cabos/correntes junto com cintas têxteis, separe os circuitos (elasticidades diferentes): use correntes preferencialmente para amarração direta nos pontos estruturais.

Dobre a amarração crítica (duas cintas no mesmo trecho) nos sentidos longitudinal (frenagem) e lateral (curvas).

Inserir protetores de quinas para evitar corte e manter tensão.

Inserir mantas de borracha de alta aderência entre o módulo e a plataforma, com espessura mínima de 10 mm, para aumentar o atrito estático e reduzir vibrações;

Implementar amarração cruzada (em “X”), combinando cintas têxteis e cabos de aço em pontos opostos, de modo a limitar deslocamentos longitudinais e laterais;

Regra 25–50–100: após o início da viagem, realizar a primeira verificação e retensionamento das amarrações entre 25 e 50 km, seguida de inspeções a cada 100 km percorridos ou a cada parada operacional, de modo a compensar relaxamentos térmicos, vibrações e deformações dinâmicas das cintas e catracas.

Reduzir a velocidade máxima operacional para ≤ 60 km/h em trechos de serra, curvas fechadas ou sob ventos acima de 30 km/h;

Avaliar a adoção de travas laterais modulares ou calços estruturais reutilizáveis em futuras operações com cargas volumétricas similares.

4.2 Tombamento do Veículo:

A largura excedente da carga (3,00 m) em relação à carroceria do caminhão (2,45 m), somada à altura de 2,66 m e à assimetria de distribuição de peso, eleva substancialmente o centro de gravidade (CG) do conjunto veículo–módulo, reduzindo a margem de estabilidade lateral. Durante o trajeto pelas serras da BR-376 e BR-101, a combinação de curvas acentuadas, declividades superiores a 5% e rajadas de vento lateral entre 30–40 km/h gera momentos de tombamento significativos, especialmente em cargas leves com grande área projetada lateral.

Mesmo quando adequadamente amarrado (mitigando o risco de queda da carga), o sistema pode sofrer instabilidade lateral total, levando ao tombamento

completo do conjunto, com risco de colapso estrutural do módulo e deformações severas no chassi do veículo. A análise dinâmica indica que a interação entre força centrífuga (curvas), força gravitacional (declives) e pressão aerodinâmica (vento lateral) constitui o cenário crítico mais provável de perda de estabilidade.

Síntese das causas combinadas:

Carga volumétrica e leve → baixo momento inercial e alta sensibilidade ao vento lateral;
Exposição aerodinâmica acentuada devido à largura excedente de 0,55 m em relação à carroceria;
Curvas de raio inferior a 60 m em trechos de serra com declividade positiva;
Rajadas laterais acima de 30 km/h em segmentos expostos;
Ausência de manta de amortecimento entre o módulo e a plataforma, resultando em transferência direta de esforços para o chassi e cintas;
Falta de balanceamento interno da carga, gerando assimetria nos eixos de apoio e redução da resistência lateral efetiva.

Recomendações técnicas:

Quando possível, redistribuir o peso interno do módulo ou adicionar contrapeso baixo no chassi/plataforma (sacos de areia ou blocos metálicos fixados abaixo da linha do assoalho) para baixar o centro de gravidade e aumentar o momento resistente ao tombamento.
Instalar mantas de borracha de alta aderência (coeficiente $\mu \geq 0,8$) sob o módulo para minimizar vibrações e aumentar a fricção estática entre superfícies;
Monitorar em tempo real o veículo (rastreador) e as condições de vento com o objetivo de alertar o motorista ou solicitar a pausa no deslocamento em trecho de serra quando rajadas ultrapassarem 40 km/h;
Limitar automaticamente ou, quando não disponível, implementar alerta automatizado ao atingir a velocidade operacional máxima de 60 km/h em trechos críticos.
Certificar-se de que o motorista possui experiência comprovada em transporte de cargas e manter treinamento específico sobre condução segura sob vento lateral, incluindo manutenção de aceleração constante, redução antecipada antes das curvas, freio motor, evitando frenagens bruscas.
Realizar dupla verificação do sistema de freios e pneus antes do início da viagem, com conferência independente por duas pessoas (motorista e responsável técnico da transportadora), assegurando o funcionamento de frenagem, ausência de desgastes, calibração correta conforme especificação do fabricante e bom estado geral dos pneus, a fim de manter a aderência e evitar variações de pressão que ampliem o risco de instabilidade lateral em curvas e declives.

Equalizar e registrar pressão lateral de pneus “esquerda vs. direita” no check de partida e nas paradas, com diferença máxima recomendada $\leq 5\%$ para evitar tendência de rolagem em curvas.

Reprogramar travessias de serra e/ou pontes expostas para horários de menor vento (manhã cedo/fim de tarde).

Carro de apoio à frente (pilot car) apenas para informar condições locais de vento em cristas/clareiras e orientar pausas táticas antes de segmentos expostos

5. Conclusão Técnica

O modelo preditivo confirma que a instabilidade física do conjunto veículo–módulo constitui o principal vetor de criticidade da operação. A configuração analisada: módulo leve (3 t), volumétrico, com largura excedente (3,00 m) e fixação têxtil sem amortecimento, associada a um trajeto com declividades e curvas de raio reduzido sob ventos transversais caracteriza um cenário de vulnerabilidade dinâmica. Nestas condições, há potencial tanto para queda parcial da carga quanto para tombamento completo do conjunto, especialmente em trechos de serra.

Do ponto de vista mecânico, o conjunto apresenta baixo momento inercial e elevado coeficiente aerodinâmico lateral, o que amplifica as forças horizontais atuantes durante frenagens, manobras e exposição a ventos laterais superiores a 30 km/h.

A aplicação das medidas preventivas propostas, como mantas de alto atrito e calços de borracha técnica, amarração cruzada e redundante, limitação operacional de velocidade (≤ 60 km/h), redistribuição de peso e monitoramento meteorológico contínuo tem potencial para reduzir em até 25% a criticidade global do transporte, segundo a matriz de ponderação do modelo.

Nota metodológica: Esta operação integra a fase de teste do modelo preditivo, com caráter exclusivamente experimental. As medidas de mitigação aqui indicadas têm finalidade analítica e não devem ser aplicadas no campo até a validação integral do modelo e a conclusão da fase de calibração.