XXI ENTAC – Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
14 a 16 de outubro de 2026 | Goiânia-Brasil
DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8515

Construção off-site e desacoplamento geográfico em 51 obras públicas

Off-Site construction and geographic decoupling in 51 public buildings

Joao Bosco Pinheiro Dantas Filho
Universidade Federal do Ceará | Fortaleza| Brasil | arquibosco@alu.ufc.br
Luiz Roberto Da Costa Gomes
Defensoria Pública Estadual do Maranhão| São Luís | Brasil | luizgomes@ma.def.br
Nayanne Barros Feques
Defensoria Pública Estadual do Maranhão| São Luís | Brasil | nayannefeques@ma.def.br
Luis Felipe Cândido
Universidade Federal do Ceará | Crateús | Brasil | candido@crateus.ufc.br
José de Paula Barros Neto
Universidade Federal do Ceará | Fortaleza| Brasil | barrosneto@gercon.ufc.br

Resumo

Analisa-se o impacto da construção modular off-site e do desacoplamento geográfico na eficiência operacional de infraestruturas públicas remotas. Trata-se de um estudo de caso longitudinal (2019–2025) do programa de interiorização da Defensoria Pública do Maranhão (DPE-MA). Foram avaliadas 51 unidades padronizadas (5.141 m²) e o esforço logístico interestadual acumulado de 86.639 km. Os resultados mostram que a padronização tipológica e a aplicação do DfMA transferiram a complexidade executiva para polos fabris distantes. Esta estratégia mitigou incertezas locacionais e estabilizou o ritmo produtivo em 34 dias por unidade, mesmo com distancias de entrega de até 802 km. Conclui-se que o desacoplamento geográfico viabiliza a eficiência alocativa do Estado para garantir capilaridade territorial. Evidencia-se também que compras públicas ancoradas em inovação geram efeito de transbordamento que moderniza a cadeia de suprimentos.

Palavras-chave: Gestão enxuta. Cadeia de suprimentos. Industrialização. Transbordamento tecnológico.

Abstract

This study analyzes the impact of off-site modular construction and geographic decoupling on the operational efficiency of remote public infrastructures. This is a longitudinal case study (2019–2025) of the interiorization program of the Public Defender's Office of Maranhão (DPE-MA), Brazil. A total of 51 standardized units (5,141 m²) and an accumulated interstate logistical effort of 86,639 km were evaluated. The results demonstrate that typological standardization and the application of Design for Manufacture and Assembly (DfMA) transferred executive complexity to distant manufacturing hubs. This strategy mitigated locational uncertainties and stabilized the production rate at 34 days per unit, despite delivery distances of up to 802 km. It is concluded that geographic decoupling enables the State's allocative efficiency to ensure territorial capillarity. Furthermore, the study provides evidence that public procurement anchored in innovation generates a spillover effect that modernizes the supply chain.

Keywords: Lean management. Supply chain. Industrialization. Technological Spillover.

INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil enfrenta limitações crônicas de produtividade devido à sua natureza intrinsecamente ligada ao local da obra [1,2]. Em cenários de expansão de infraestrutura pública para regiões remotas ou periféricas, esta dependência geográfica agrava a ineficiência alocativa do Estado. A literatura consolida que a submissão de projetos à escassez de mão de obra local, à imprevisibilidade climática e a cadeias de suprimentos fragmentadas tende a gerar situações de '*making-do*' (improviso por falta de recursos), o que constitui uma oitava categoria de desperdício, reduzindo a eficiência do fluxo produtivo e podendo acarretar perdas financeiras[3].

Para mitigar estas anomalias, abordagens baseadas na manufatura avançada, como o *Design for Manufacturing and Assembly* (DfMA) [4]e a construção modular *off-site* [5], têm sido aplicadas. Ao transferir a complexidade executiva do canteiro de obras para um ambiente fabril controlado, estas tecnologias prometem estabilizar o fluxo de valor e garantir a previsibilidade das entregas [6].

Contudo, ainda não está claro na literatura como este modelo se comporta quando submetido a escalas territoriais continentais e aos rígidos protocolos de contratação do Brasil. Além disso, faltam evidências empíricas que comprovem a viabilidade e os limites do desacoplamento geográfico, compreendido como a separação física entre a produção industrial especializada e a demanda local [7,8]. Por fim, questiona-se se o poder de compra do Estado, ao exigir tais tecnologias, é capaz de induzir um efeito de transbordamento capaz de forçar a modernização técnica da cadeia de suprimentos privada [9,10].

Para preencher esta lacuna, este estudo analisou o impacto do desacoplamento geográfico e da manufatura modular na eficiência operacional e na gestão de infraestruturas públicas remotas. Como estudo de campo, investigou-se o programa de expansão da Defensoria Pública do Maranhão (DPE-MA, Brasil), que implementou 51 unidades padronizadas sob um rigoroso modelo de industrialização. Ao quantificar o ritmo de produção [11] e o esforço logístico interestadual percorrido, este trabalho argumenta que a adoção sistêmica da engenharia *off-site* pode atenuar a barreira geográfica e contribuir como possível indutora da eficiência estatal.

REFERENCIAL TEÓRICO

PARADIGMA LOCATION-BOUND E DESACOPLAMENTO GEOGRÁFICO NA CONSTRUÇÃO

A construção civil tradicional opera sob um sistema produtivo dependente do local. Ao contrário da manufatura, onde o produto se desloca pela linha de montagem, na construção tradicional os recursos (materiais, equipamentos e mão de obra) convergem para um canteiro de obras fixo [2]. Esta restrição geográfica sujeita o sistema produtivo a elevadas incertezas externas e contextuais, incluindo escassez de infraestrutura periférica, intempéries climáticas e flutuações na qualificação da mão de obra regional que afetam negativamente a confiabilidade das cadeias de suprimentos na construção civil. [1].

Para mitigar a vulnerabilidade destas cadeias de suprimentos, a literatura de gestão propõe o deslocamento do Ponto de Desacoplamento para montante na cadeia de

valor [7]. Ao transferir a complexidade de execução para um ambiente fabril distante do canteiro, materializa-se o "desacoplamento geográfico". Neste cenário, a distância deixa de ser um limitador técnico associado à precariedade local e passa a ser tratada estritamente como uma variável logística de transporte [8]. O canteiro de obras, antes um ambiente de processo caótico, é transformado à condição de mero polo de montagem final.

MANUFATURA OFF-SITE, DFMA E A ESTABILIZAÇÃO DO RITMO

A viabilização técnica do desacoplamento geográfico depende intrinsecamente da adoção de sistemas de construção *off-site* e dos princípios de DfMA. O DfMA atua como mecanismo de integração entre o projeto arquitetônico e a engenharia de produção, garantindo que os componentes sejam concebidos com tolerâncias rígidas para facilitar tanto a fabricação automatizada quanto a montagem rápida em campo [4,12].

Sob a ótica da Construção Enxuta, a industrialização modular não objetiva apenas a velocidade isolada, mas a confiabilidade do fluxo de trabalho [6,13]. A padronização rigorosa de componentes e a redução da variedade de produtos anulam as interrupções típicas da construção artesanal [14]. A consequência primária dessa estabilização é a capacidade de operar sob um o ritmo compassado de produção e entrega matemático e previsível [11]. A manutenção de um ritmo contínuo, independentemente da localização geográfica da montagem final, atesta a resiliência do sistema produtivo contra a fricção espacial.

COMPRAS PÚBLICAS E O EFEITO DE TRANSBORDAMENTO

A transição tecnológica da construção artesanal para a manufatura avançada enfrenta severas barreiras de entrada, primariamente financeiras e culturais. Neste contexto, o poder de compra do Estado emerge como o principal indutor da modernização setorial através das Compras Públicas para Inovação [9]. Quando a administração pública ancora seus editais de infraestrutura em exigências de alto desempenho tecnológico, modularidade e controle de ciclo de vida, argumenta-se que ela pode atuar na correção de falhas de mercado e potencialmente contribuir para a eficiência alocativa dos recursos governamentais.

Mais do que suprir um déficit de infraestrutura isolado, a injeção de capital público condicionada à industrialização gera um profundo efeito de transbordamento espacial e tecnológico [10]. O rigor exigido para o cumprimento dos contratos públicos pode levar a cadeia de suprimentos a absorver novas normativas, treinar mão de obra e otimizar rotinas de DfMA.

METODOLOGIA

A presente pesquisa adota uma abordagem qualitativa e descritivo-exploratória. O método foi Estudo de Caso Único e Longitudinal [15]. A escolha por este método justifica-se pela necessidade de investigar um fenômeno contemporâneo e complexo

(o desacoplamento geográfico e a industrialização) inserido em seu contexto de mundo real (a expansão da infraestrutura pública no Maranhão).

Os resultados empíricos do caso, materializados por descritores de magnitude (como o volume de 51 unidades, a área construída e o ritmo), foram confrontados diretamente com a literatura para expandir e consolidar os construtos teóricos da área.

UNIDADE DE ANÁLISE E HORIZONTE LONGITUDINAL

O objeto de estudo é o programa de interiorização da Defensoria Pública do Estado do Maranhão (DPE-MA), especificamente a sua transição tecnológica para a construção modular *off-site*. A unidade de análise estabelecida recai sobre o modelo de gestão da produção e as estratégias de compras públicas adotadas pela autarquia.

O horizonte temporal caracteriza-se como longitudinal, cobrindo o período de 2019 a 2025. Este corte longitudinal é fundamental para a pesquisa qualitativa, pois permite a observação do amadurecimento institucional e a transição operacional entre duas fases tecnológicas distintas do projeto: o Bloco I (adaptação de contêineres marítimos e fluxo intermitente) e o Bloco II (engenharia modular padronizada e fluxo contínuo).

COLETA E TRIANGULAÇÃO DE DADOS

Para garantir a validade, adotou-se a triangulação de múltiplas fontes de evidências, combinando a análise documental profunda [16] com relatos técnicos primários. O acervo examinado compreende:

- Documentação Técnica e de Engenharia: Projetos arquitetônicos de padronização (tipologias 1 DEF a 6 DEF), memoriais descritivos e cronogramas de entrega, essenciais para a apuração do ritmo (cadência estabilizada de 34 dias);
- Documentação Institucional e Normativa: Editais de licitação, termos de referência e contratos públicos, fundamentais para mapear as exigências de inovações tecnológicas e o papel indutor do Estado;
- Entrevistas e Escuta Técnica: Relatos colhidos junto aos atores-chave do processo, englobando agentes da contratação, gestores e planejadores do setor de engenharia da autarquia. Destaca-se a oitiva e validação técnica junto ao Supervisor de Obras e Reformas (SOR) da DPE-MA, permitindo capturar o "como" e o "porquê" das decisões estratégicas tomadas frente aos desafios logísticos territoriais.

TRATAMENTO E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS

O processo de análise e síntese dos dados orientou-se pelo confronto teórico-empírico. Consistiu em alinhar o comportamento observado na prática, como a drástica redução de prazos, a padronização tipológica, a superação de grandes distâncias e a mitigação de impactos ambientais, com o referencial previsto na literatura acadêmica sobre o desacoplamento geográfico, a transferência de complexidade para o ambiente off-site e a produção enxuta. Para fins operacionais, a

análise foi estruturada em quatro eixos analíticos estratégicos, conforme sistematizado no Quadro 1.

Quadro 1 — Eixos de análise e procedimentos metodológicos

Eixo Analítico	Variáveis analisadas	Fonte de dados	Procedimento de análise
Eficiência operacional	Prazo de entrega por unidade; número de unidades entregues por período.	Cronogramas de entrega; relatórios de obra.	Cálculo da média de dias por unidade por Bloco (I e II); comparação entre períodos.
Desacoplamento geográfico	Distância fábrica → comarca (km); esforço logístico total (km); raio máximo de entrega.	Notas fiscais de transporte; coordenadas geográficas das comarcas; registros de frete.	Georreferenciamento; cálculo de distâncias rodoviárias via ferramentas SIG; soma do esforço acumulado; análise de distribuição espacial.
Transbordamento tecnológico	Evolução da tipologia construtiva; exigências contratuais; capacidade instalada dos fornecedores.	Editais de licitação; termos de referência; contratos; entrevistas com gestores.	Análise documental longitudinal; categorização das fases tecnológicas (Bloco I × Bloco II); identificação de mudanças nas especificações técnicas.
Sustentabilidade e Eco-eficiência	Estimativa de massa de resíduos gerados (kg); volume absoluto e percentual de resíduos evitados na fonte.	Projetos arquitetônicos das tipologias da DPE-MA; índices paramétricos da literatura nacional.	Modelagem comparativa (Cenário Convencional vs. Cenário Realizado *Off-site*) com base na área construída total homologada.

Fonte: os autores.

A convergência entre os dados institucionais, a visão dos gestores e a bibliografia permitiu tecer inferências sobre o papel do poder de compra governamental como indutor da capacidade construtiva e gerador de inovações na cadeia de suprimentos. Para garantir a replicabilidade do eixo logístico, todas as distâncias foram calculadas a partir das coordenadas oficiais dos municípios (IBGE) e das sedes fabris informadas nos contratos, utilizando a malha viária rodoviária pavimentada como referência para o trajeto mais curto.

Para a estimativa do eixo de ecoeficiência (redução de resíduos), adotaram-se parâmetros referenciais extraídos da literatura nacional. Para a modelagem da construção convencional em alvenaria, adotou-se o índice de 0,10 t/m² (100 kg/m²), valor que se alinha a achados nacionais recentes para edificações horizontais dessa tipologia [17]e a estimativas indiretas macro ambientais de perdas estruturais [18].

Em contrapartida, para a construção modular off-site com painéis SIP e estrutura metálica, adotou-se o índice de 0,02 t/m² (20 kg/m²). Esse valor foi estimado aplicando-se o teto de redução de resíduos preconizado pela literatura internacional para processos industrializados, a qual aponta uma diminuição de até 80% na geração de rejeitos na fonte quando comparada aos métodos artesanais [12]

RESULTADOS

A PADRONIZAÇÃO REDUZ A VARIABILIDADE DO PROCESSO PRODUTIVO

A literatura de *lean construction* [14] adverte que a variabilidade de projetos é uma das principais fontes de desperdício e instabilidade em cadeias produtivas da construção. Os dados do programa da DPE-MA corroboram essa tese ao demonstrar os efeitos da redução da variabilidade: 88% das unidades entregues (45 de 51) pertencem a uma única tipologia — o modelo "1 DEF", com 90,27 m², conforme sistematizado na Tabela 1.

Tabela 1: Distribuição das unidades já inauguradas:

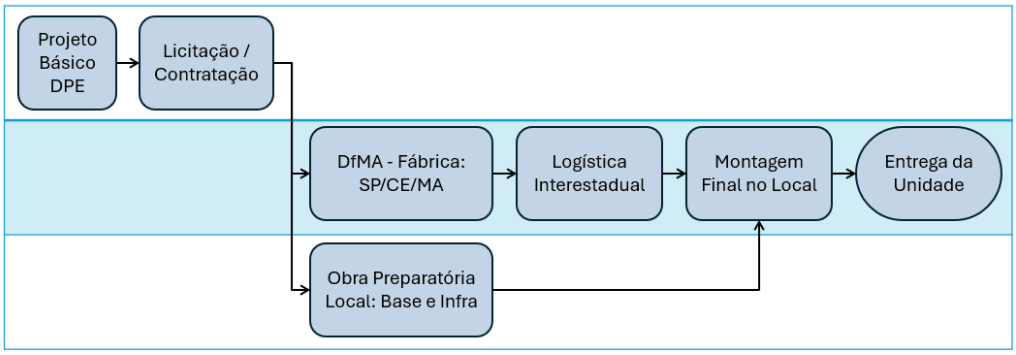
Tipo de Projeto	Quantidade Inaugurada
1 DEF	45
2 DEF	4
4 DEF	0
5 DEF	1
6 DEF	1
Total	51 unidades

Nota: Predominam os econúcleos do tipo 1 DEF (45 unidades), que correspondem à menor área (90,27 m²), sugerindo que esse modelo é o padrão para a maioria das localidades atendidas. Os tipos 2 DEF, 5 DEF e 6 DEF aparecem em menor número, possivelmente para atender demandas específicas em cidades maiores ou com maior volume de atendimento. Fonte: os autores.

Esta concentração não é fruto do acaso, mas sim de uma estratégia deliberada de engenharia simultânea, onde o projeto arquitetônico foi tratado como um chassi modular. Ao reduzir a variedade de produtos, a autarquia viabilizou a aplicação sistemática do DfMA [4], transferindo a complexidade para o ambiente fabril.

O ganho operacional manifesta-se na estabilização do tempo de ciclo. O fluxograma do processo construtivo industrializado (Figura 1) ilustra como a sincronia entre fabricação, logística e montagem foi alcançada.

Figura 1 – Fluxograma do processo construtivo industrializado.



Fonte: os autores.

Os cronogramas de entrega analisados revelam que, a partir da consolidação do Bloco II (2021), o ritmo de produção e montagem estabilizou-se em 34 dias por unidade, independentemente da distância entre fábrica e canteiro. Este dado corrobora a literatura [13]: a previsibilidade do fluxo é resultado direto da padronização.

DESACOPLAMENTO GEOGRÁFICO: QUANDO A DISTÂNCIA DEIXA DE SER BARREIRA

A construção tradicional apresenta alta dependência das condições do canteiro de obras. O caso da DPE-MA materializa a proposição observada na literatura de que, para romper essa amarra, é necessário deslocar o Ponto de Desacoplamento para montante [7].

Os dados logísticos sistematizados no Quadro 2 demonstram que 86.639 km foram percorridos para entregar as 51 unidades, com origens fabris tão diversas quanto Pirajuí/SP (2.502 km de distância média) e Fortaleza/CE (734 km).

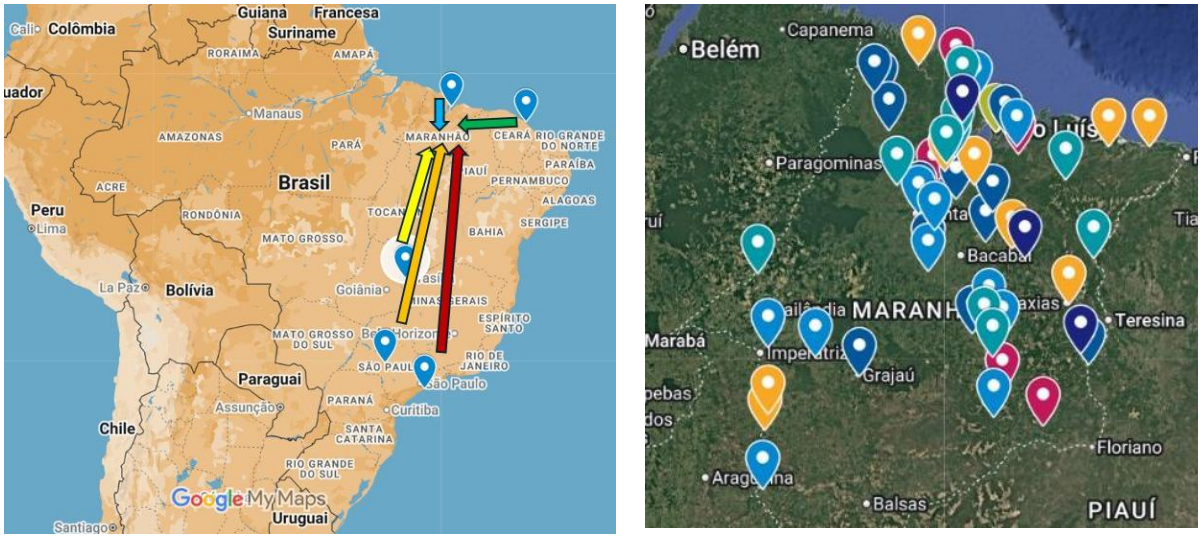
Quadro 2: Resumo do Esforço Logístico por Origem Industrial

Origem da Fábrica	Estado	Qtd. Unidades	Distância Média Fábrica → Comarca	Esforço Total de Deslocamento (km)
Pirajuí	SP	26	2.502 km	65.057 km
Fortaleza	CE	10	734 km	7.346 km
São Luís	MA	10	289 km	2.896 km
Cubatão	SP	3	2.701 km	8.105 km
Brasília	DF	2	1.617 km	3.235 km
TOTAL GERAL	-	51	1.698 km (média)	86.639 km

Fonte: os autores.

A mediana das distâncias, que em 2019–2020 situava-se abaixo dos 100 km, saltou para patamares superiores a 300 km a partir de 2021, com picos de 802 km (Comarca de Carolina/MA). A Figura 2 (mapas duplos) ilustra este fenômeno: à esquerda, os vetores logísticos cruzando o país; à direita, a capilaridade da rede instalada no Maranhão.

Figura 2 – Mapeamento de Vetores Logísticos e Origem da Fabricação Modular (à esquerda); Capilaridade Territorial e Distribuição Geoespacial da Rede de Econúcleos no Maranhão – 2019–2025 (à direita)



Fonte: os autores.

Isto significa, na prática, que a produção foi descolada do consumo. As fábricas, e não os canteiros, passaram a ditar o ritmo. O Ponto de Desacoplamento foi, assim, deslocado para montante, conforme previsto nos modelos de postergação da cadeia de suprimentos enxuta. Na construção tradicional, os recursos (materiais,

equipamentos e mão de obra) convergem para um canteiro de obras fixo [7] e de integração entre Construção enxuta e produção industrializada [8]. A estratégia demonstra que a produção pode ser descentralizada geograficamente desde que a fabricação seja concentrada em polos especializados.

O ESTADO COMO INDUTOR: COMPRAS PÚBLICAS E EFEITO SPILLOVER

A literatura argumenta que o poder de compra do Estado pode funcionar como alavanca para inovação setorial [9]. O Quadro 3 permite observar este efeito.

Predominavam no Bloco I (2019–2021), adaptações de contêineres marítimos, soluções artesanais e de baixa maturidade industrial. A partir de outubro de 2021, há uma inflexão clara: todas as novas unidades passam a ser entregues com painéis SIP (*Structural Insulated Panels*) e estrutura metálica padronizada, oriundas de fábricas especializadas nos estados de SP, CE, DF e MA.

Esta transição não é espontânea. Ela foi exigida contratualmente pelos editais da DPE-MA, que passaram a incorporar critérios de desempenho, rastreabilidade e conformidade com a normas técnicas. O efeito imediato foi a elevação forçada da capacidade instalada dos fornecedores: empresas que antes operavam de forma semiartesanal tiveram de adotar controles de qualidade, linhas de montagem e gestão de projetos compatíveis com a escala da demanda pública.

Quadro 3 – Evolução Tecnológica das Unidades (2019–2025): De Contêineres a Sistemas Modulares

Tecnologia Construtiva	Ano	Comarca (Inauguração/Distância Km)
Bloco I: Contêineres Reciclados (2019 – SET/2021)	2019	Itaqui-Bacanga (10/12/19; 8 km).
	2020	Penalva (24/06/20; 88 km), Morros (30/06/20; 58 km), São João dos Patos (05/10/20; 507 km), Colinas (05/10/20; 420 km), Cururupu (11/11/20; 197 km).
	2021	Gov. Nunes Freire (05/02/21; 379 km), Grajaú (30/04/21; 619 km), Zona Rural/S. Luís (05/05/21; –), Parnarama (15/05/21; 420 km), São Mateus (18/06/21; 316 km), Cantanhede (24/09/21; 54 km).
Bloco II: Sistemas Modulares Pré-Fabricados (OUT/2021 – 2025)	2021	Tuntum (27/10/21; 336 km), Vitorino Freire (28/10/21; 323 km), Pindaré-Mirim (29/10/21; 268 km), Santa Luzia do Paruá (07/12/21; 523 km), Maracumé (07/12/21; 548 km), Vitória do Mearim (15/12/21; 214 km)
	2022	Caxias (04/02/22; 365 km), Matinha (15/02/22; 201 km), Estreito (24/02/22; 630 km), Porto Franco (25/02/22; 647 km), Tutóia (11/03/22; 400 km), Turiaçu (03/05/22; 302 km), Anajatuba (27/05/22; 203 km), Coroatá (30/05/22; 278 km), Barreirinhas (31/05/22; 252 km).
	2023	Amarante (03/02/23; 433 km), Dom Pedro (09/02/23; 287 km), Paulo Ramos (16/03/23; 483 km), Gov. Eugênio Barros (18/03/23; 325 km), João Lisboa (11/04/23; 575 km), Carolina (26/06/23; 802 km), Santa Inês (24/10/23; 256 km), Icatu (26/10/23; 28 km), São Vicente Férrer (09/11/23; 295 km), Guimarães (17/11/23; 216 km), Mirador (27/11/23; 530 km), Pio XII (06/12/23; 286 km)
	2024	Urbano Santos (10/02/24; 255 km), Presidente Dutra (20/02/24; 362 km), São Bento (14/03/24; 244 km), Mirinzal (11/04/24; 177 km), São Domingos do MA (18/06/24; 296 km), Coelho Neto (14/08/24; 403 km), Olinda Nova do MA (18/11/24; 170 km), Itinga do MA (29/11/24; 396 km), Zé Doca (10/12/24; 427 km)
	2025	Bequimão (17/06/25; 153 km), Matões (07/11/25; 320 km), Timbiras (12/11/25; 278 km).

Fonte: o autor.

O transbordamento pode ser evidenciado pela internalização dessas competências pelo mercado. Uma vez capacitadas para atender a DPE-MA, as mesmas fábricas passaram a ofertar soluções modulares para o setor privado (hospitais, escolas, escritórios), barateando o acesso à tecnologia e difundindo a cultura da industrialização na construção civil da região.

SUSTENTABILIDADE E ECO-EFICIÊNCIA: MITIGAÇÃO DE RESÍDUOS NA FONTE

Paralelamente, os dados indicam uma redução estimada na geração de resíduos sólidos. Conforme a Tabela 2, a opção pela modularidade resultou em uma estimativa de redução de 411,3 toneladas de resíduos em comparação com o cenário hipotético de construção em alvenaria convencional. Esta estimativa foi calculada com base nos fatores de geração de resíduos por metro quadrado adotados pela literatura especializada (taxa média de 1,0 t/m² para alvenaria convencional versus 0,2 t/m² para construção modular), conforme metodologia descrita na seção de tratamento dos dados.

Tabela 02 – Estimativa Total de Redução com Núcleos Inaugurados pela DPE-MA

Tipo de Projeto	Área média (m²)	Qtd.	Modular (kg)	Convencional (kg)	Redução Total Estimada (kg)
1 DEF	90,27	45	81.243	406.215	324.972
2 DEF	170,80	4	13.664	68.320	54.656
5 DEF	183,00	1	3.660	18.300	14.640
6 DEF	213,50	1	4.270	21.350	17.080
TOTAL GERAL	**—**	**51 unidades**	**102.837**	**514.185**	**411.348**

Fonte: o autor.

Este número dialoga diretamente com a Política Nacional de Resíduos Sólidos [19] e com o princípio da construção enxuta de eliminar desperdícios na fonte [3].

Reconhece-se que o programa não está isento de limitações. A ausência de uma análise comparativa de custos entre a solução modular e uma hipotética construção local em alvenaria convencional constitui uma restrição deste estudo. Embora a literatura indique que a construção modular tende a apresentar custos iniciais mais elevados, compensados por ganhos de prazo e redução de desperdícios, não foi possível acessar os dados financeiros desagregados das licitações para uma análise custo-benefício robusta. Além disso, o impacto econômico local (geração de emprego nos municípios atendidos) não foi mensurado, representando uma lacuna a ser explorada em pesquisas futuras.

CONCLUSÕES

O presente estudo evidenciou que a adoção da manufatura *off-site* e dos princípios de *Design for Manufacturing and Assembly* (DfMA) viabiliza o desacoplamento geográfico na construção de infraestruturas públicas. A análise longitudinal do programa da DPE-MA demonstrou que a barreira espacial, historicamente limitadora da construção civil artesanal, foi superada pela engenharia de produção. A adoção de um "chassi"

padronizado permitiu entregar 51 obras (totalizando 5.141 m²) com um ritmo de produção estabilizado em 34 dias, suportando com resiliência um esforço logístico interestadual de 86.639 quilômetros e raios de entrega extremos de até 802 km.

Os dados sugerem que as compras públicas estratégicas podem atuar como indutoras de inovação no setor, ainda que este efeito dependa de condições contratuais específicas e da capacidade de fiscalização e gestão dos órgãos públicos. Ao exigir rigor tecnológico, normativo e logístico nos editais, o Estado transcendeu a mera aquisição de edifícios e provocou um efeito de transbordamento na cadeia de suprimentos. O mercado fornecedor foi forçado a elevar sua maturidade industrial para atender a esta demanda. Concomitantemente, comprovou-se a eficiência alocativa estatal: a transição tecnológica mitigou a desperdícios do canteiro tradicional, materializada na prevenção de 411,3 toneladas de resíduos sólidos, alinhando a operação governamental aos princípios da construção enxuta e sustentáveis.

Reconhecem-se, contudo, as limitações inerentes ao estudo. Por tratar-se de um estudo de caso qualitativo focado em uma autarquia específica e restrito a tipologias modulares de até 213 m², os indicadores operacionais de cadência e resiliência logística obtidos devem ser interpretados com parcimônia exigida para adaptações para obras públicas verticalizadas ou de altíssima complexidade sistêmica (como infraestruturas hospitalares pesadas).

Como agenda para pesquisas futuras, recomenda-se a quantificação do trade-off ambiental estabelecido pelo desacoplamento geográfico, contrapondo formalmente as emissões de carbono geradas pelo extensivo transporte rodoviário à mitigação proporcionada pela eficiência material fabril. Ademais, investigações sobre a integração do monitoramento digital durante a fase de operação e manutenção desta malha de edifícios descentralizados poderão expandir as fronteiras da gestão de facilidades no ciclo de vida da infraestrutura pública modular.

DECLARAÇÃO

Durante a preparação deste artigo, o autor Joao Bosco Pinheiro Dantas Filho utilizou o DeepSeek (modelo de linguagem de grande escala) para revisão gramatical, aprimoramento de coesão e estruturação de tópicos. A ferramenta foi utilizada como apoio à redação, sem substituir a autoria ou a responsabilidade intelectual do pesquisador. Após o uso da ferramenta, o autor revisou e editou o conteúdo conforme necessário, verificando a precisão das informações, a adequação das citações e a consistência dos argumentos apresentados. O autor assume total responsabilidade pelo conteúdo do artigo publicado, incluindo a originalidade do texto e a correta atribuição das fontes citadas, em conformidade com o disposto no art. 9º, inciso I, alíneas "c" e "f", da Portaria CNPq nº 2.664/2026.

REFERÊNCIAS

[1] SEGERSTEDT, A. et al. Supply chains in the construction industry. **Supply Chain Management: An International Journal**, v. 15, n. 5, p. 347–353, 10 ago. 2010.

[2] VRIJHOEF, R.; KOSKELA, L. The four roles of supply chain management in construction. **European Journal of Purchasing & Supply Management**, v. 6, n. 3, p. 169–178, 2000.

[3] KOSKELA, L. **Making-do - The eighth category of waste**. 12th Annual Conference of the IGLC. **Anais**...Helsingor, Denmark.: 2004. Disponível em: <http://usir.salford.ac.uk/9386/>. Acesso em: 19 jul. 2014

[4] GAO, S.; JIN, R.; LU, W. Design for manufacture and assembly in construction: a review. **Building Research & Information**, v. 48, n. 5, p. 538–550, 3 jul. 2020.

[5] PAN, W.; GIBB, A. G. F.; DAINTY, A. R. J. Strategies for Integrating the Use of Off-Site Production Technologies in House Building. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 138, n. 11, p. 1331–1340, nov. 2012.

[6] TOMMELEIN, I. D. Journey toward Lean Construction: Pursuing a Paradigm Shift in the AEC Industry. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 141, n. 6, p. 04015005, 20 jan. 2015.

[7] NAIM, M.; NAYLOR, J.; BARLOW, J. **Developing lean and agile supply chains in the UK housebuilding industry**. Annual Conference of the IGLC. **Anais**...Berkeley: 28 jul. 1999. Disponível em: <https://shorturl.at/zcUGB>. Acesso em: 17 out. 2014

[8] VRIJHOEF, R.; CUPERUS, Y.; VOORDIJK, H. **Exploring the Connection Between Open Building and Lean Construction - Defining a Postponement Strategy for Supply Chain Management**. 10th Annual Conference of the International Group for Lean Construction. **Anais**...Gramado, Brazil: 2002. Disponível em: <http://iglc.net/Papers/Details/217/pdf>

[9] UYARRA, E. et al. Barriers to innovation through public procurement: A supplier perspective. **Technovation**, v. 34, n. 10, p. 631–645, 1 out. 2014.

[10] DU, Q. et al. Prefabrication decisions of the construction supply chain under government subsidies. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 39, p. 59127–59144, 5 ago. 2022.

[11] FRANDSON, A.; BERGHEDE, K.; TOMMELEIN, I. D. **Takt Time Planning for Construction of Exterior Cladding**. 21th Annual Conference of the International Group for Lean Construction. **Anais**...Fortaleza, Brazil: 2013. Disponível em: <http://iglc.net/Papers/Details/902/pdf>

[12] YUAN, R. et al. A system dynamic model for simulating the potential of prefabrication on construction waste reduction. **Environmental Science and Pollution Research.**, v. 29, n. 9, p. 12589–12600, 1 fev. 2022.

[13] BALLARD, H. G. **The last planner system of production control.** Tese de Doutorado.— [s.l.] University of Birmingham, 2000.

[14] GRAVINA DA ROCHA, C.; KEMMER, S. **Product Variety in Construction: A Critical Review and Way Forward**. IGLC 2021 - 29th Annual Conference of the International Group for Lean Construction - Lean Construction in Crisis Times: Responding to the Post-Pandemic AEC Industry Challenges. **Anais**...International Group for Lean Construction, 14 jul. 2021. Disponível em: <http://iglc.net/Papers/Details/1910>. Acesso em: 25 mar. 2026

[15] YIN, R. K. **Qualitative Research From Start To Finish**. New York: The Guilford Press, 2011.

[16] CELLARD, A. **A Pesquisa Qualitativa: Enfoques Epistemológicos e Metodológicos**. Petrópolis: Vozes, 2008.

[17] DA SILVA, C. et al. Índices de geração de resíduos de construção civil: caso de uma obra de edificação horizontal em alvenaria no município de Curitiba, Paraná. **Caderno Pedagógico**, v. 22, n. 6, p. e15275–e15275, 2025.

[18] PINTO, T. DE P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. Tese—São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1999.

[19] BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos.** BrasíliaDiário Oficial da União, , 2 ago. 2010. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 25 fev. 2026