

OTIMIZAÇÃO DO PLANEJAMENTO DA MÃO DE OBRA NA CONSTRUÇÃO CIVIL POR PROGRAMAÇÃO LINEAR: UM ESTUDO DE CASO NA REGIÃO METROPOLITANA DE BELÉM

OPTIMIZATION OF CONSTRUCTION WORKFORCE PLANNING THROUGH
LINEAR PROGRAMMING: A CASE STUDY IN THE BELÉM METROPOLITAN
REGION

OPTIMIZACIÓN DE LA PLANIFICACIÓN DE LA MANO DE OBRA EN LA
CONSTRUCCIÓN MEDIANTE PROGRAMACIÓN LINEAL: UN ESTUDIO DE CASO
EN LA REGIÓN METROPOLITANA DE BELÉM

**Yvelyne Bianca Iunes Santos¹, Renan Rodrigues Araujo², Léony Luis Lopes Negrão³, Mariana
Pereira Carneiro Barata⁴, Elzelis Muller da Silva⁵**

DOI: 10.54899/dcs.v23i94.6630

Recibido: 14/08/2026 | Aceptado: 17/08/2026 | Publicación en línea: 31/08/2026.

RESUMO

A gestão da mão de obra permanece entre os fatores de maior influência sobre custo, prazo e produtividade em empreendimentos de construção civil. Este estudo propõe e aplica um modelo de programação linear para apoiar o dimensionamento da força de trabalho empregada na execução de lajes de uma edificação, considerando salários, admissões, demissões, horas extras, produtividade e capacidade construtiva. A pesquisa foi desenvolvida como estudo de caso aplicado em uma construtora da Região Metropolitana de Belém, com dados operacionais coletados em diário de obra, registros de custos, visitas técnicas e entrevistas. O modelo foi implementado no Solver do Microsoft Excel e analisado em três cenários de capacidade mensal. No cenário correspondente à obra observada, a solução reproduziu a configuração de nove trabalhadores e custo total de R\$ 60.006,82 no horizonte de seis meses. Para capacidades de 500 m² e 200 m² por mês, o modelo indicou, respectivamente, equipes de 14 e 6 trabalhadores, com custos totais de R\$ 97.666,90 e R\$ 42.377,74. Os resultados evidenciam que a modelagem oferece suporte transparente ao planejamento de contratações e ao ajuste da capacidade, permitindo testar alternativas antes de sua implementação. Como contribuição, o estudo apresenta uma aplicação de baixo custo computacional, adequada a pequenas e médias construtoras, e discute possibilidades de atualização do modelo para incorporar incerteza, múltiplas competências e restrições de prazo.

¹ Doutora em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, Universidade Federal do Pará (UFPA), Belém, Pará, Brasil. E-mail: yvelyne@uepa.br Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-0839-2577>

² Mestre em Engenharia de Materiais, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará (IFPA), Belém, Pará, Brasil. E-mail: eng.prod.renan@hotmail.com Orcid: <https://orcid.org/0009-0006-2614-0740>

³ Doutor em Engenharia de Produção, Universidade Federal de São Carlos, Belém, Pará, Brasil. E-mail: leony@uepa.br Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-3059-894X>

⁴ Doutora em Engenharia de Produção, Universidade Federal de São Carlos, Belém, Pará, Brasil. E-mail: mariana.carneiro@uepa.br Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-0722-319X>

⁵ Doutora em Engenharia de Recursos Naturais, Universidade Federal do Pará (UFPA), Belém, Pará, Brasil. E-mail: elzelis@uepa.br Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-6778-520X>

Palavras-chave: Pesquisa Operacional. Programação Linear. Planejamento da Mão de Obra. Construção Civil. Otimização de Custos.

ABSTRACT

Workforce management remains one of the factors with the greatest influence on cost, schedule, and productivity in construction projects. This study proposes and applies a linear programming model to support workforce sizing for slab construction, considering wages, hiring, dismissals, overtime, productivity, and construction capacity. The research was conducted as an applied case study in a construction company located in the Belém Metropolitan Region, Brazil, using operational data collected from site records, cost documents, technical visits, and interviews. The model was implemented using Microsoft Excel Solver and assessed under three monthly-capacity scenarios. In the scenario corresponding to the observed project, the solution reproduced the nine-worker configuration and a total six-month cost of BRL 60,006.82. For monthly capacities of 500 m² and 200 m², the model indicated teams of 14 and 6 workers, respectively, with total costs of BRL 97,666.90 and BRL 42,377.74. The results show that mathematical modeling provides transparent support for hiring planning and capacity adjustment by allowing alternatives to be tested before implementation. The study contributes a computationally accessible application suitable for small and medium-sized construction firms and discusses extensions that incorporate uncertainty, multiple skills, and schedule constraints.

Keywords: Operations Research. Linear Programming. Workforce Planning. Construction. Cost Optimization.

RESUMEN

La gestión de la mano de obra sigue siendo uno de los factores con mayor influencia sobre los costos, los plazos y la productividad en los proyectos de construcción. Este estudio propone y aplica un modelo de programación lineal para apoyar el dimensionamiento de la fuerza laboral empleada en la ejecución de losas, considerando salarios, contrataciones, despidos, horas extras, productividad y capacidad constructiva. La investigación se desarrolló como un estudio de caso aplicado en una empresa constructora de la Región Metropolitana de Belém, Brasil, con datos operativos obtenidos de registros de obra, documentos de costos, visitas técnicas y entrevistas. El modelo fue implementado en Solver de Microsoft Excel y analizado en tres escenarios de capacidad mensual. En el escenario correspondiente a la obra observada, la solución reprodujo la configuración de nueve trabajadores y un costo total de R\$ 60.006,82 durante seis meses. Para capacidades mensuales de 500 m² y 200 m², el modelo indicó equipos de 14 y 6 trabajadores, respectivamente, con costos totales de R\$ 97.666,90 y R\$ 42.377,74. Los resultados muestran que la modelización matemática ofrece apoyo transparente a la planificación de contrataciones y al ajuste de capacidad. Como contribución, se presenta una aplicación de bajo costo computacional, apropiada para pequeñas y medianas constructoras, además de extensiones futuras para incorporar incertidumbre, múltiples competencias y restricciones de plazo.

Palabras clave: Investigación Operativa. Programación Lineal. Planificación de la Mano de Obra. Construcción. Optimización de Costos.



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución- NoComercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

INTRODUÇÃO

A construção civil combina elevada intensidade de recursos, variabilidade operacional e forte dependência da coordenação entre equipes. Nesse ambiente, decisões aparentemente simples — manter o quadro existente, contratar, dispensar ou recorrer a horas extras — produzem efeitos simultâneos sobre custos, produtividade e cumprimento do cronograma. A literatura recente confirma que a programação da força de trabalho em projetos de construção pode ser tratada por modelos de otimização capazes de explicitar esses compromissos e apoiar decisões gerenciais mais consistentes (Corral *et al.*, 2023; Ding *et al.*, 2024).

A relevância do tema também se mantém no contexto brasileiro. Após a retração observada na metade da década passada, o setor retomou crescimento e encerrou 2024 com expansão de 4,3% e aproximadamente 2,86 milhões de trabalhadores formais, o que reforça a necessidade de instrumentos que conciliem capacidade produtiva, custos e disponibilidade de mão de obra (CBIC, 2025). Dados estruturais da Pesquisa Anual da Indústria da Construção mostram, ainda, que pessoal ocupado, salários, custos e despesas constituem dimensões centrais para a análise econômica das empresas do setor (IBGE, 2026).

Embora ferramentas de planejamento sejam amplamente empregadas em grandes empreendimentos, pequenas e médias construtoras nem sempre dispõem de sistemas avançados de otimização. Soluções implementadas em planilhas eletrônicas podem reduzir essa barreira tecnológica, desde que o modelo represente adequadamente as restrições operacionais e que seus resultados sejam interpretados como apoio — e não substituição — ao julgamento do gestor. Esse princípio é coerente com a Pesquisa Operacional, cuja finalidade é estruturar problemas decisórios e identificar alternativas eficientes sob restrições de recursos (Hillier; Lieberman, 2021).

Diante desse contexto, o problema investigado é: Como dimensionar a mão de obra necessária à execução de lajes de uma edificação, ao longo de um horizonte de planejamento, de modo a minimizar os custos associados ao quadro de trabalhadores e, simultaneamente, respeitar produtividade, capacidade construtiva e limites operacionais?

O objetivo deste estudo é desenvolver e aplicar um modelo de programação linear para minimizar os custos de mão de obra na execução de lajes, determinando o número de

trabalhadores, admissões, demissões e utilização de horas extras em diferentes cenários de capacidade. Como objetivos específicos, busca-se: (i) estruturar os dados de produtividade e custos da atividade; (ii) formular a função objetivo e as restrições do problema; (iii) implementar o modelo em ferramenta computacional acessível; e (iv) analisar cenários capazes de apoiar o planejamento de obras futuras.

REFERENCIAL TEÓRICO

Planejamento da Mão de Obra e Produtividade na Construção

A produtividade da mão de obra é uma variável central para o desempenho dos projetos de construção, pois condiciona simultaneamente duração, custo, utilização dos recursos e confiabilidade do planejamento. Rathnayake e Middleton (2023), em revisão sistemática de mais de uma centena de estudos, destacam que a produtividade deve ser analisada em diferentes níveis e com indicadores coerentes com a finalidade da decisão. Em perspectiva complementar, Lee, Ahmad e Sarijari (2023) mostram que o monitoramento da produtividade do trabalho na construção vem incorporando métodos digitais, análise de dados e novas formas de mensuração. Assim, conhecer a produtividade de cada função permite converter metas físicas de produção em necessidades de horas de trabalho e, posteriormente, em decisões de dimensionamento da equipe.

A literatura também evidencia que a produtividade não depende apenas do número de trabalhadores alocados. Fatores associados à gestão, às competências, às condições do canteiro, à motivação, ao ambiente econômico e às características regionais podem alterar de forma relevante o desempenho observado. Momade *et al.* (2023) identificam diferenças geográficas nos fatores que afetam a produtividade da mão de obra, enquanto Jian *et al.* (2025), por meio de revisão sistemática e meta-análise, reforçam a importância de fatores humanos, gerenciais, tecnológicos e contextuais. Qi *et al.* (2024), ao sistematizarem cinco décadas de estudos, identificam temas recorrentes relacionados a programação de trabalhadores, horas extras, interação entre equipes, aprendizagem, salários e condições ambientais. Esses achados recomendam cautela na transferência direta de coeficientes de produtividade entre obras e justificam a utilização de parâmetros obtidos no contexto operacional analisado.

O planejamento de recursos humanos torna-se mais complexo quando contratação, desligamento, horas extras, competências e continuidade da força de trabalho precisam ser

avaliados conjuntamente. Corral, Forcael e Linfati (2023) demonstram, por meio de programação inteira mista multiobjetivo, que decisões relativas à composição da equipe e às horas adicionais podem ser avaliadas quantitativamente em projetos de construção. Ding *et al.* (2024), por sua vez, associam duração, produtividade, número de trabalhadores, custos e risco, evidenciando que a alocação da mão de obra deve ser examinada em conjunto com o desempenho temporal do empreendimento.

Além da otimização propriamente dita, a previsão das necessidades futuras de pessoal constitui etapa relevante do planejamento. Elkhooly *et al.* (2024) propõem uma abordagem baseada em mineração de dados para estimar requisitos de mão de obra em projetos, mostrando que a qualidade das previsões tende a melhorar à medida que aumenta a disponibilidade de dados históricos. Em outra vertente, Luo *et al.* (2022) discutem a gestão orientada a serviços dos recursos de trabalho na construção, ressaltando que disponibilidade, coordenação e acesso aos trabalhadores constituem problemas gerenciais que ultrapassam o simples cálculo da quantidade necessária. Em conjunto, esses estudos indicam que o dimensionamento da força de trabalho deve combinar informação histórica, parâmetros de produtividade e mecanismos quantitativos de apoio à decisão.

Pesquisa Operacional e Programação Linear

A Pesquisa Operacional fornece métodos quantitativos para representar sistemas decisórios nos quais recursos escassos precisam ser alocados de maneira eficiente. Na programação linear, uma função objetivo é otimizada sob um conjunto de restrições lineares que traduzem limites técnicos, econômicos ou operacionais. Em problemas de planejamento da mão de obra, variáveis como número de trabalhadores, admissões, desligamentos, horas extras e capacidade podem ser articuladas por equações de balanço e inequações de disponibilidade (Hillier; Lieberman, 2021). Quando parte das variáveis assume valores inteiros, a formulação aproxima-se dos modelos de programação linear inteira ou inteira mista, particularmente adequados a decisões que envolvem quantidades indivisíveis de trabalhadores.

A alocação e o nivelamento de recursos possuem tradição consolidada na gestão de projetos de construção. Easa (1989) apresentou uma formulação de otimização inteira para reduzir variações no uso de recursos; posteriormente, El-Rayes e Jun (2009) desenvolveram métricas voltadas à redução de flutuações capazes de gerar liberações, recontrações e períodos

improdutivos. Embora esses trabalhos sejam anteriores às abordagens computacionais recentes, permanecem relevantes por estabelecerem a relação entre estabilidade da utilização dos recursos, produtividade e custo — relação diretamente associada às decisões de contratação e manutenção de equipes examinadas neste estudo.

Abordagens mais recentes ampliam esse núcleo clássico ao incorporar múltiplos objetivos e restrições realistas. He, Li e Wang (2021) tratam conjuntamente tempo, custo e consumo de energia em operações de construção com recursos limitados. Tao *et al.* (2020) incorporam interferências de espaços de trabalho ao problema de programação, enquanto Dai, Liao e Zhang (2023) analisam o nivelamento de recursos em projetos repetitivos admitindo interrupções controladas das atividades. Esses estudos mostram que a alocação ótima não depende apenas da disponibilidade agregada de recursos, mas também da continuidade das equipes, da sequência das atividades e das condições de execução.

A representação das competências dos trabalhadores constitui outra extensão importante. Mozhdehi, Baradaran e Hosseinian (2024) formulam um problema de programação de múltiplos projetos com trabalhadores multicompetentes e evolução da destreza, evidenciando que a flexibilidade da força de trabalho pode alterar a solução de alocação. Peng e Liu (2024), em contexto de prazos extremamente reduzidos, estudam a alocação da mão de obra com foco na obtenção do menor custo compatível com metas temporais exigentes. Tais desenvolvimentos confirmam a tendência de modelos progressivamente mais ricos, mas também reforçam a utilidade de formulações parcimoniosas quando o objetivo é oferecer apoio gerencial transparente e de implementação acessível.

Lacuna e Posicionamento do Estudo

A literatura recente apresenta avanços importantes em produtividade, nivelamento de recursos, previsão de necessidades de pessoal, múltiplas competências e otimização multiobjetivo. Entretanto, uma parcela significativa dessas contribuições emprega modelos computacionalmente mais elaborados, heurísticas, meta-heurísticas ou estruturas que demandam maior disponibilidade de dados e capacidade analítica. Essa sofisticação é adequada a problemas complexos, mas pode dificultar a adoção por organizações de menor porte, nas quais decisões de contratação e ajuste de equipes frequentemente são realizadas com ferramentas convencionais.

A contribuição deste trabalho situa-se, portanto, na aplicação de um modelo parcimonioso

a dados reais de uma construtora da Região Metropolitana de Belém. Em vez de exigir software especializado ou infraestrutura computacional complexa, a formulação foi implementada em planilha eletrônica, preservando a rastreabilidade das premissas e permitindo a análise de cenários de capacidade. A opção por uma estrutura simples não pretende substituir modelos multiobjetivo ou estocásticos; busca oferecer uma etapa de apoio à decisão compatível com ambientes em que a disponibilidade de dados, recursos computacionais e pessoal especializado é limitada.

O estudo também se diferencia por articular, em uma mesma formulação aplicada, custos de manutenção da equipe, admissões, demissões, horas extras e produtividade por categoria profissional. Dessa forma, o modelo funciona como instrumento de planejamento da capacidade e permite observar como alterações na produção requerida repercutem sobre a composição da força de trabalho e o custo total. Essa perspectiva aproxima a Pesquisa Operacional da rotina decisória de pequenas e médias construtoras e estabelece uma base que pode ser posteriormente ampliada com incerteza, múltiplas competências, restrições espaciais e objetivos de prazo.

METODOLOGIA

A pesquisa é aplicada, quantitativa e estruturada como estudo de caso. A unidade de análise foi uma construtora que executava uma edificação de quatro pavimentos na Região Metropolitana de Belém. O recorte operacional concentrou-se na superestrutura, especificamente na execução das lajes, por se tratar de atividade recorrente e diretamente relacionada ao ritmo de avanço da obra.

A coleta de dados ocorreu durante seis meses e utilizou documentos de registro da produção, diário de obra, informações de custos, visitas técnicas e entrevistas com o engenheiro responsável e trabalhadores envolvidos na atividade. Foram considerados três perfis profissionais: servente, pedreiro e carpinteiro. Os dados foram organizados em planilha eletrônica e convertidos em parâmetros de produtividade, remuneração, custos de admissão e demissão, disponibilidade de horas e capacidade mensal.

O procedimento analítico compreendeu cinco etapas: definição do problema; estruturação das variáveis e parâmetros; formulação da função objetivo e das restrições; solução do modelo pelo método Simplex disponível no Solver do Microsoft Excel; e análise de cenários. A validação foi realizada por comparação entre a configuração efetivamente utilizada na obra e a solução obtida pelo modelo para o cenário de referência.

Formulação Matemática

A primeira equação (1) representa a função objetivo e expressa a minimização do custo total de pessoal no horizonte de seis meses (abril a setembro). A segunda (2) preserva a continuidade do quadro de trabalhadores entre períodos. As demais limitam a produção à capacidade construtiva (3), vinculam produção e disponibilidade de trabalho (4), restringem horas extras (5) e impõem não negatividade (6). Para fins de implementação, as variáveis de número de trabalhadores devem ser tratadas como inteiras, evitando soluções fracionárias sem interpretação operacional.

$$\text{Min } Z = \sum_t \sum_k (S_{kt} E_{kt} + CA_{kt} A_{kt} + CD_{kt} D_{kt} + CE_{kt} H_{kt}) \quad (1)$$

$$E_{kt} = E_{k,t-1} + A_{kt} - D_{kt}, \quad \forall k, t \quad (2)$$

$$Q_t \leq C_t, \quad \forall t \quad (3)$$

$$p_k Q_t \leq h_t E_{kt} + H_{kt}, \quad \forall k, t \quad (4)$$

$$H_{kt} \leq \bar{H}_{kt}, \quad \forall k, t \quad (5)$$

$$E_{kt}, A_{kt}, D_{kt}, Q_t, H_{kt} \geq 0 \quad (6)$$

Considere $t = 1, \dots, T$ como os períodos do horizonte e $k \in K$ como as categorias profissionais. As principais variáveis de decisão são E_{kt} (número de empregados), A_{kt} (admissões), D_{kt} (demissões) e H_{kt} (horas extras). A produção mensal é representada por Q_t . Os parâmetros incluem salário S_{kt} , custo de admissão CA_{kt} , custo de demissão CD_{kt} , custo unitário de hora extra CE_{kt} , produtividade (horas necessárias por m^2) p_k , capacidade máxima C_t e limite máximo de horas extras disponível para a categoria profissional no período $\bar{H}_{kt}$.

Dados do Estudo de Caso

Para a efetivação deste estudo, foram utilizados os dados fornecidos diretamente pela

empresa e as previsões de demandas para seis meses. A empresa iniciou a atividade com nove trabalhadores diretamente envolvidos na execução das lajes: seis carpinteiros, dois pedreiros e um servente. Considerando 20 dias úteis e jornada semanal de 44 horas, as produtividades médias mensais observadas foram de 54,16 m² por carpinteiro, 162,5 m² por pedreiro e 325 m² por servente. As informações de produção estão disponibilizadas na Tabela 1 abaixo.

Tabela 1. Parâmetros de produtividade e jornada.

Parâmetro	Valor
Número inicial de trabalhadores	9 (1 servente; 2 pedreiros; 6 carpinteiros)
Produtividade mensal – servente	325 m ²
Produtividade mensal – pedreiro	162,5 m ²
Produtividade mensal – carpinteiro	54,16 m ²
Carga horária mensal	176 h

Fonte: Dados disponibilizados pela empresa estudada.

Na Tabela 2, apresentada a seguir, podem ser verificadas as descrições dos custos que irão incidir sobre as variáveis de decisão na definição do modelo.

Tabela 2. Custos considerados no modelo.

Item	Servente (R\$)	Pedreiro (R\$)	Carpinteiro (R\$)
Remuneração mensal	828,70	1.146,47	1.146,47
Hora extra	3,77	5,21	5,21
Admissão	828,70	1.146,47	1.146,47
Demissão	1.165,56	1.612,74	1.612,74

Fonte: Dados disponibilizados pela empresa estudada.

As horas extras são calculadas com o acréscimo de 50% sobre o valor das horas normais. O valor da mão de obra contratada inclui os custos envolvidos na contratação, e o valor de mão de obra demitida refere-se ao custo de demitir, que nesse caso foi calculado sobre a base salarial fornecida, considerando o 13º salário e férias proporcionais a seis meses de trabalho, e aviso prévio.

Na Tabela 3, apresentam-se as limitações da capacidade produtiva da empresa.

Tabela 3 – Limitações operacionais/capacidade produtiva.

Descrição	Quantidade
Capacidade Máxima Mensal	325 m ²
Limite Máximo de Horas Extras	1 hora

Fonte: Dados disponibilizados pela empresa estudada.

A quantidade de horas extras utilizadas considera que, o trabalho só pode ser executado com luminosidade natural, limitada à apenas Uma hora extra.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

No cenário 1, que representa a situação observada na obra, o resultado do modelo manteve a equipe composta por 1 servente, 2 pedreiros e 6 carpinteiros, sem admissões, demissões ou horas extras. A capacidade mensal considerada foi de 325 m² e o custo total no horizonte de seis meses foi de R\$ 60.006,82. A coincidência entre a solução e a configuração efetivamente utilizada constitui uma validação empírica básica da formulação para o conjunto de dados analisado. Esse resultado também reforça a importância de calibrar o modelo com parâmetros de produtividade observados no próprio contexto de execução. Rathnayake e Middleton (2023) mostram que a mensuração da produtividade na construção depende da escala de análise, das fontes de dados e da definição do indicador adotado; Qi *et al.* (2024), ao sintetizarem 591 estudos publicados entre 1973 e 2023, identificam produtividade, programação da força de trabalho, horas extras, salários e desempenho dos trabalhadores como temas fortemente interligados. Assim, a aderência do cenário de referência à configuração real não deve ser interpretada apenas como coincidência numérica, mas como evidência de que parâmetros locais de produtividade podem sustentar decisões de dimensionamento quando são explicitamente incorporados à modelagem.

Tabela 4. Síntese dos cenários analisados.

Cenário	Capacidade mensal	Equipe (St; Pd; Cp)	Movimentação inicial	Horas extras	Custo total (R\$)
1 – Referência	325 m ²	1; 2; 6	sem alteração	0	60.006,82
2 – Maior capacidade	500 m ²	2; 3; 9	admite 1; 1; 3	1 h/mês por categoria	97.666,90
3 – Menor capacidade	200 m ²	1; 1; 4	reduz 0; 1; 2	0	42.377,74

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

O cenário 2 avaliou uma necessidade de produção de 500 m² por mês. A solução indicou aumento da equipe para 14 trabalhadores — 2 serventes, 3 pedreiros e 9 carpinteiros — com cinco admissões no início do horizonte e utilização limitada de horas extras. O custo total alcançou R\$ 97.666,90. O resultado evidencia que o aumento de capacidade não decorre apenas da ampliação proporcional do quadro: a composição por função é condicionada pelas produtividades específicas e pelas restrições de disponibilidade. Essa resposta do modelo encontra respaldo em Corral *et al.* (2023), que formulam um modelo de programação linear inteira mista multiobjetivo para programação da força de trabalho e demonstram que contratação, horas adicionais e horas não trabalhadas, porém remuneradas, constituem decisões

interdependentes. No presente estudo, a necessidade de admitir trabalhadores quando a meta física cresce para 500 m² mensais indica que o limite de horas extras, por ser restritivo, impede que o aumento da capacidade seja absorvido apenas pela extensão da jornada. Sob a perspectiva gerencial, a solução torna explícito o trade-off entre ampliar permanentemente a equipe e utilizar capacidade adicional de trabalho.

No cenário 3, correspondente a uma obra de menor porte, com capacidade mensal de 200 m², o modelo reduziu a equipe para 6 trabalhadores: 1 servente, 1 pedreiro e 4 carpinteiros. O custo total foi de R\$ 42.377,74. Em comparação ao cenário de referência, a diferença absoluta é de R\$ 17.629,08 no horizonte analisado. Essa comparação não deve ser interpretada como “economia” obtida na mesma obra, pois os cenários representam níveis distintos de capacidade; ela demonstra, antes, a sensibilidade do custo à escala de produção e ao dimensionamento da equipe. A literatura sobre nivelamento de recursos ajuda a interpretar esse resultado. Dai, Liao e Zhang (2023) mostram que a regularização do uso de recursos em projetos repetitivos exige compatibilizar disponibilidade, continuidade das atividades e variações na necessidade de recursos. Nessa perspectiva, a redução do quadro no cenário 3 é coerente com uma política de ajuste da capacidade à carga efetivamente requerida, evitando manter recursos ociosos sem que isso comprometa a meta física estabelecida.

Os achados são coerentes com estudos que tratam a força de trabalho como recurso decisório explícito. Corral, Forcael e Linfati (2023) mostram que contratação e horas extras podem produzir soluções de custo distintas conforme as restrições do projeto, enquanto Ding *et al.* (2024) destacam a interação entre número de trabalhadores, produtividade, duração e risco. A relevância de controlar flutuações no uso dos recursos também é consistente com El-Rayes e Jun (2009) e Dai, Liao e Zhang (2023), para os quais a estabilidade da alocação contribui para reduzir ociosidade, descontinuidades e movimentos desnecessários de recursos. A principal diferença é que o presente modelo privilegia simplicidade e aplicabilidade gerencial, enquanto parte dessas abordagens incorpora múltiplos objetivos, restrições adicionais ou métodos computacionais mais sofisticados.

A adoção do Solver em planilha eletrônica também possui implicação prática. Para empresas que não dispõem de plataformas especializadas, o modelo permite testar cenários de contratação, desligamento e capacidade, além de tornar visíveis as premissas utilizadas. Essa transparência é relevante porque a qualidade da solução depende diretamente da qualidade dos parâmetros de produtividade e custo. Rathnayake e Middleton (2023) destacam que diferentes

formas de mensuração da produtividade podem conduzir a interpretações distintas do desempenho; Qi *et al.* (2024) igualmente mostram que a literatura recente tem avançado para abordagens orientadas por dados e para a integração entre desempenho dos trabalhadores e otimização da gestão da construção. Portanto, uma estimativa inadequada de produtividade pode produzir uma equipe matematicamente ótima, porém operacionalmente insuficiente. O uso de uma ferramenta acessível não elimina a necessidade de calibração, atualização dos parâmetros e validação com dados de campo.

Os resultados também devem ser interpretados à luz da natureza multifatorial da produtividade na construção. Evidências de revisão e meta-análise indicam que experiência e qualificação dos trabalhadores, disponibilidade de materiais e equipamentos, supervisão, comunicação, retrabalho e condições ambientais afetam de maneira relevante o desempenho da mão de obra. Por essa razão, a solução ótima obtida neste estudo representa uma decisão condicionada aos parâmetros observados e às restrições formalizadas, e não uma regra universal de composição de equipes. Essa distinção é particularmente importante em um estudo de caso regional: a utilidade do modelo está em oferecer uma estrutura replicável para testar decisões, enquanto os coeficientes de produtividade e custo devem ser recalibrados para cada empreendimento. Essa leitura aproxima os resultados das discussões recentes sobre produtividade da construção, nas quais se enfatizam tanto a otimização do gerenciamento e da programação quanto a necessidade de considerar fatores humanos, gerenciais e ambientais (Qi *et al.*, 2024; Jian *et al.*, 2025).

Limitações e Agenda de Pesquisa

O estudo possui limitações que devem ser explicitadas. Os dados são provenientes de uma única empresa e de uma atividade específica; os parâmetros foram tratados de forma determinística; não foram modeladas faltas, absenteísmo, curva de aprendizagem, variabilidade climática, restrições de espaço, precedências detalhadas entre serviços ou múltiplas competências.

Como evolução, recomenda-se formular uma versão inteira mista multiobjetivo que minimize simultaneamente custo e duração, incorpore produtividade estocástica e permita trabalhadores multifuncionais. A literatura recente oferece caminhos concretos: modelos de interferência de espaço (Tao *et al.*, 2020), otimização conjunta de custo, tempo e recursos (He *et*

al., 2021; Ding *et al.*, 2024) e representação da evolução de competências (Mozhdehi; Baradaran; Hosseinian, 2024). Também seria pertinente comparar a solução obtida em planilha com solvers de código aberto ou comerciais e realizar análise de sensibilidade sistemática dos custos de contratação, demissão e horas extras

CONCLUSÃO

O estudo demonstrou que a programação linear pode apoiar o planejamento da mão de obra na execução de lajes ao transformar dados de produtividade, custos e capacidade em decisões explícitas de dimensionamento. No cenário de referência, o modelo reproduziu a equipe observada na obra e o custo correspondente, fornecendo uma verificação prática da coerência da formulação para o caso analisado.

A análise de cenários mostrou que alterações na capacidade mensal modificam de forma relevante a composição da equipe e o custo total. Mais do que produzir um valor ótimo isolado, a principal utilidade gerencial do modelo está na possibilidade de antecipar consequências de decisões de contratação e ajuste de capacidade antes de sua implementação. Essa característica é especialmente relevante para empresas que necessitam de ferramentas transparentes, acessíveis e de baixo custo computacional.

A contribuição deve, contudo, ser interpretada dentro dos limites de um estudo de caso determinístico. A atualização do modelo com dados correntes e a incorporação de incerteza, múltiplas competências, restrições de prazo e objetivos adicionais podem ampliar sua validade externa e aproximá-lo das condições atuais de gestão de projetos. Ainda assim, a formulação apresentada oferece uma base replicável para integrar Pesquisa Operacional e planejamento de recursos humanos na construção civil.

REFERÊNCIAS

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO (CBIC). Construção Civil cresce 4,3% em 2024 e impulsiona economia nacional. Brasília, DF, 7 mar. 2025. Disponível em: <https://cbic.org.br/construcao-civil-cresce-43-em-2024-e-impulsiona-economia-nacional/>. Acesso em: 13 ago. 2026.

CORRAL, F.; FORCAEL, E.; LINFATI, R. Workforce scheduling efficiency assessment in construction projects through a multi-objective optimization model in the COVID-19 context. *Heliyon*, v. 9, n. 6, e16745, 2023. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e16745.

DAI, G.; LIAO, M.; ZHANG, R. Resource levelling in repetitive construction projects with interruptions: an integrated approach. *Journal of Civil Engineering and Management*, v. 29, n. 2, p. 93-106, 2023. DOI: 10.3846/jcem.2023.17568.

DING, F.; LIU, M.; HSIANG, S. M.; HU, P.; ZHANG, Y.; JIANG, K. Duration and labor resource optimization for construction projects: a Conditional-Value-at-Risk-based analysis. *Buildings*, v. 14, n. 2, art. 553, 2024. DOI: 10.3390/buildings14020553.

EASA, S. M. Resource leveling in construction by optimization. *Journal of Construction Engineering and Management*, v. 115, n. 2, p. 302-316, 1989. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9364(1989)115:2(302).

EL-RAYES, K.; JUN, D. H. Optimizing resource leveling in construction projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, v. 135, n. 11, p. 1172-1180, 2009. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000097.

ELKHOLOS, H.; EAD, R.; HAMMAD, A.; ABOURIZK, S. M. Data mining for forecasting labor resource requirements: a case study of project management staffing requirements. *International Journal of Construction Management*, v. 24, 2024. DOI: 10.1080/15623599.2022.2112898.

HE, W.; LI, W.; WANG, W. Developing a resource allocation approach for resource-constrained construction operation under multi-objective operation. *Sustainability*, v. 13, n. 13, art. 7318, 2021. DOI: 10.3390/su13137318.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. *Introduction to operations research*. 11. ed. New York: McGraw-Hill, 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Pesquisa Anual da Indústria da Construção 2024*. Rio de Janeiro: IBGE, 2026. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/industria/9018-pesquisa-anual-da-industria-da-construcao.html>. Acesso em: 13 ago. 2026.

JIAN, F.; LIU, Q.; FENG, C.; HU, Q.; YU, Q. *et al.* Critical factors affecting construction labor productivity: a systematic review and meta-analysis. *Buildings*, v. 15, n. 14, art. 2463, 2025. DOI: 10.3390/buildings15142463.

LEE, T. Y.; AHMAD, F.; SARIJARI, M. A. Current status and future research trends of construction labor productivity monitoring: a bibliometric review. *Buildings*, v. 13, n. 6, art. 1479, 2023. DOI: 10.3390/buildings13061479.

LUO, H.; SHENG, D.; ZHONG, B.; CHEN, K.; SEPASGOZAR, S. M. E.; XING, X. Conceptual framework for the service-oriented management of construction labor resource. *Engineering Management Journal*, v. 34, n. 4, p. 543-558, 2022. DOI: 10.1080/10429247.2021.1954819.

MOMADE, M. H.; SHAHID, S.; FALAH, G.; SYAMSUNUR, D.; ESTRELLA, D. Review of construction labor productivity factors from a geographical standpoint. *International Journal of*

Construction Management, v. 23, n. 4, p. 697-707, 2023. DOI: 10.1080/15623599.2021.1917285.

MOZHDEHI, S.; BARADARAN, V.; HOSSEINIAN, A. H. Multi-skilled resource-constrained multi-project scheduling problem with dexterity improvement of workforce. Automation in Construction, v. 162, art. 105360, 2024. DOI: 10.1016/j.autcon.2024.105360.

PENG, J.; LIU, X.-J. Labor resource allocation under extremely short construction period based on the inverse optimization method. Engineering, Construction and Architectural Management, v. 31, p. 1254-1271, 2024. DOI: 10.1108/ECAM-06-2022-0604.

QI, K.; OWUSU, E. K.; SIU, M.-F. F.; CHAN, P.-C. A. A systematic review of construction labor productivity studies: clustering and analysis through hierarchical latent Dirichlet allocation. Ain Shams Engineering Journal, v. 15, n. 9, art. 102896, 2024. DOI: 10.1016/j.asej.2024.102896.

RATHNAYAKE, A.; MIDDLETON, C. Systematic review of the literature on construction productivity. Journal of Construction Engineering and Management, v. 149, n. 6, 2023. DOI: 10.1061/JCEMD4.COENG-13045.

TAO, S.; WU, C.; HU, S.; XU, F. Construction project scheduling under workspace interference. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, v. 35, n. 9, p. 923-946, 2020. DOI: 10.1111/mice.12547.