

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO
E GEOGRAFIA
CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

ALEX IONGBLODE DA ROCHA

**OTIMIZAÇÃO DE ROTA DE VISITAS TÉCNICAS NA CONSTRUÇÃO
CIVIL:
UM ESTUDO DE CASO COM O PROBLEMA DO MENOR CAMINHO**

CAMPO GRANDE, 2025

ALEX IONGBLODE DA ROCHA

OTIMIZAÇÃO PARA VISITAS TÉCNICAS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial à
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia de Produção da Universidade
Federal de Mato Grosso do Sul.

Orientadora: Prof.^a. Dr.^a. Carolina Lino
Martins Pompêo de Camargo.

CAMPO GRANDE, 2025

RESUMO

Este relatório técnico propõe a aplicação de um modelo matemático baseado no problema do menor caminho para otimizar rotas de visitas técnicas realizadas por engenheiros civis. O estudo tem como foco a redução de custos e do tempo de deslocamento em obras distribuídas em diferentes cidades do estado de São Paulo. Utilizando conceitos da Pesquisa Operacional, foi formulado um modelo de Programação Linear com apoio da ferramenta Solver do Microsoft Excel. O modelo considera como critério de otimização a menor distância percorrida entre os pontos de visita, respeitando a lógica de fluxo contínuo e a viabilidade operacional. O trajeto estudado parte da cidade de Avanhandava - SP e percorre outras sete cidades, finalizando em Tupã - SP. Através da análise computacional, foi possível identificar a rota ideal com base em dados reais de distâncias, totalizando 106,3 km no percurso final otimizado. Os resultados apontam benefícios diretos para o setor da construção civil, como a redução de despesas logísticas, melhor aproveitamento do tempo das equipes técnicas e maior controle sobre o planejamento de campo. Além disso, o estudo contribui para a disseminação do uso de técnicas quantitativas na Engenharia de Produção, demonstrando sua aplicabilidade prática na resolução de problemas reais do setor.

Palavras-chave: Pesquisa Operacional; Menor Caminho; Logística; Engenharia de Produção; Construção Civil.

ABSTRACT

This study proposes the application of a mathematical model based on the shortest path problem to optimize the routes of technical visits conducted by civil engineers. The main goal is to reduce costs and travel time across construction sites located in different cities in the state of São Paulo, Brazil. Using concepts from Operational Research, a Linear Programming model was formulated with the support of Microsoft Excel's Solver tool. The model considers the shortest distance between visit points as the optimization criterion, while respecting the flow logic and operational feasibility. The analyzed route starts in the city of Avanhandava -SP and covers seven other cities, ending in Tupã -SP. Through computational analysis, the ideal route was identified based on actual distance data, totaling 106.3 km in the optimized path. The results show direct benefits to the civil construction sector, such as reduced logistical expenses, better time management of technical teams, and greater control over field planning. Additionally, the study contributes to the dissemination of quantitative techniques in Production Engineering, demonstrating their practical application in solving real-world problems in the field.

Keywords: Operational Research; Shortest Path; Logistics; Production Engineering; Civil Construction.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	6
1.1 JUSTIFICATIVA	7
1.2 Objetivo Geral OBJETIVO GERAL	7
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	7
1.4 ESTRUTURA DO RELATÓRIO	7
2 METODOLOGIA.....	9
2.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	9
2.2 COLETA DE DADOS.....	10
2.2.1 DOCUMENTAÇÃO INDIRETA.....	11
2.2.2 DOCUMENTAÇÃO DIRETA.....	12
2.3 DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE OTIMIZAÇÃO.....	14
3 RESULTADOS	16
3.1 ESTRUTURA DA REDE E DADOS DO PROBLEMA	16
3.2 SOLUÇÃO COMPUTACIONAL NO SOLVER.....	16
3.3 LIMITAÇÕES DO MODELO	18
4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	20
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	22
REFERÊNCIAS.....	24

1 INTRODUÇÃO

A construção civil é um dos setores mais relevantes para a economia brasileira, representando cerca de 6% do PIB nacional e gerando milhões de empregos diretos e indiretos (CBIC, 2024). Esse setor, embora em constante crescimento, enfrenta desafios logísticos significativos, sobretudo relacionados ao deslocamento de profissionais técnicos entre diferentes frentes de obra, muitas vezes localizadas em regiões distintas.

Dentre as atividades exercidas pelos engenheiros civis, destaca-se a realização de visitas técnicas, fundamentais para supervisionar, fiscalizar e acompanhar o andamento das obras sob sua responsabilidade. No contexto dessas visitas, é comum o uso de rotas não otimizadas, definidas com base apenas na experiência prévia do profissional. Pesquisas recentes indicam que essa prática ainda é predominante no setor, resultando em deslocamentos mais longos, aumento de custos logísticos e redução da produtividade (SILVA; COSTA; NASCIMENTO, 2020). Esse cenário evidencia uma carência de planejamento logístico estruturado, apoiado em métodos quantitativos capazes de comparar alternativas de trajeto e orientar decisões mais eficientes. Assim, a ausência desse tipo de planejamento compromete o uso racional dos recursos disponíveis, gera desperdícios operacionais e reforça a necessidade de abordagens baseadas em otimização matemática para orientar o deslocamento técnico de forma mais eficiente.

Diante desse cenário, a Pesquisa Operacional (PO) surge como uma área essencial para a tomada de decisão e o planejamento eficiente de atividades. Segundo Hillier e Lieberman (2013), a PO visa encontrar soluções ótimas para problemas reais complexos por meio de modelos matemáticos e técnicas computacionais. No campo da Engenharia de Produção, a PO tem aplicação direta em logística, transporte, gestão de operações e otimização de processos, entre outras (TAHA, 2017).

No contexto da construção civil, essas metodologias se mostram particularmente úteis na organização e no controle de deslocamentos técnicos entre obras, possibilitando a redução de custos logísticos e a melhoria do aproveitamento da jornada de trabalho dos profissionais envolvidos. A utilização de modelos matemáticos, como o problema do menor caminho, permite que engenheiros civis planejem rotas de visita mais eficientes, baseadas em critérios quantitativos e não apenas na experiência empírica. Assim, a aplicação da Pesquisa Operacional contribui para elevar o nível de produtividade e racionalizar recursos, reforçando a importância de soluções otimizadas na rotina de fiscalização e acompanhamento de obras.

Neste trabalho, propõe-se o desenvolvimento de um modelo de programação linear, com foco no problema do menor caminho, para otimizar o trajeto de um engenheiro civil que realiza visitas técnicas em diversas cidades do interior do estado de São Paulo. Com base na modelagem de uma rede de cidades e na aplicação da ferramenta Solver® do Microsoft Excel,

busca-se identificar a rota mais eficiente entre os pontos de interesse, considerando a minimização da distância percorrida como objetivo principal.

Além de contribuir para a redução de custos logísticos, o modelo oferece ganhos significativos de produtividade e melhor aproveitamento da jornada de trabalho. A proposta se alinha aos princípios da Engenharia de Produção ao integrar teoria, dados reais e ferramentas práticas para a resolução de problemas, reforçando a aplicabilidade dos métodos quantitativos na gestão estratégica do setor da construção civil.

1.1 JUSTIFICATIVA

A logística de deslocamento de profissionais técnicos na construção civil representa uma atividade crítica, uma vez que influencia diretamente os custos operacionais e o cumprimento de prazos de entrega das obras. A ausência de um planejamento de rotas estruturado, com base em técnicas quantitativas, pode gerar desperdício de recursos, desgaste dos profissionais e diminuição da produtividade geral.

Nesse contexto, a aplicação da Pesquisa Operacional permite desenvolver soluções matemáticas capazes de apoiar o processo decisório e otimizar a gestão dos deslocamentos. O estudo justifica-se, portanto, pela necessidade de apresentar uma ferramenta prática, acessível e replicável, que auxilie na racionalização do uso de tempo e recursos, contribuindo para o aumento da eficiência nas visitas técnicas e na gestão de equipes de campo.

1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é construir um modelo de otimização de rota para visitas técnicas na construção civil.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Modelar matematicamente o problema do menor caminho aplicado à logística de visitas técnicas;
2. Implementar o modelo no Solver® para obter o trajeto de menor distância;
3. Avaliar os ganhos operacionais e econômicos obtidos com a aplicação do modelo;
4. Propor uma análise crítica sobre as limitações e possibilidades de ampliação do estudo.

1.4 ESTRUTURA DO RELATÓRIO

O presente relatório técnico está estruturado em cinco capítulos. O Capítulo 1

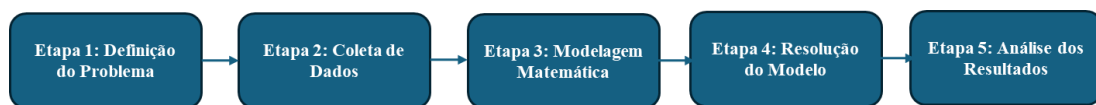
apresenta a introdução, a justificativa, os objetivos e a estrutura geral do trabalho. O Capítulo 2 descreve a metodologia adotada, contemplando a coleta de dados, a documentação indireta e direta, e o desenvolvimento do modelo de otimização. O Capítulo 3 apresenta o estudo de caso e a aplicação prática do modelo proposto. O Capítulo 4 discute os resultados obtidos e analisa o impacto da aplicação do modelo na redução de custos e melhoria operacional. Por fim, o Capítulo 5 traz as considerações finais, as limitações do estudo e sugestões para pesquisas futuras.

2 METODOLOGIA

Este estudo adota a abordagem quantitativa e aplicada, com foco na modelagem matemática de um problema logístico real enfrentado por engenheiros civis: o planejamento de rotas técnicas entre obras distribuídas em diferentes cidades. Trata-se de um estudo de caso prático, onde se busca aplicar a Pesquisa Operacional como suporte à tomada de decisão. Martins, Mello e Turrioni (2014) destacam que a clareza na definição do tipo de pesquisa e do método empregado é essencial para garantir a validade científica e a coerência metodológica de trabalhos técnicos em Engenharia de Produção.

A metodologia empregada está estruturada nas seguintes etapas: (i) definição do problema logístico a ser tratado; (ii) coleta dos dados de distâncias reais entre os pontos de interesse; (iii) modelagem do problema como uma rede de transporte; (iv) formulação matemática utilizando programação linear; (v) resolução do modelo com o uso do Solver®, uma ferramenta do Microsoft Excel adequada para esse tipo de problema. O fluxograma apresentado na Figura 1 ilustra o processo desenvolvido.

Figura 1 – Fluxo da metodologia empregada



Fonte: Esta pesquisa (2025)

Conforme Martins, Mello e Turrioni (2014), a definição clara do problema e a estruturação do modelo matemático são passos fundamentais para garantir a validade de um estudo técnico em Engenharia de Produção. Assim, neste trabalho, o problema do menor caminho foi estruturado como uma rede direcionada com pesos representando as distâncias entre as cidades.

2.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

O estudo de caso desenvolvido nesta pesquisa baseia-se em um cenário real de atuação de engenheiros civis responsáveis por visitas técnicas a obras localizadas em diferentes cidades do interior do estado de São Paulo. Esse tipo de atividade é comum em empresas de engenharia, construção e gerenciamento de obras, nas quais o acompanhamento presencial das etapas construtivas é essencial para assegurar o cumprimento de prazos, qualidade e conformidade técnica.

O problema logístico analisado está diretamente relacionado ao planejamento das rotas de deslocamento dos engenheiros, que frequentemente precisam visitar diversas frentes de

serviço distribuídas em diferentes municípios no mesmo período. Em geral, essas rotas são definidas de maneira empírica, baseadas na experiência do profissional, sem o apoio de ferramentas quantitativas para otimização de trajetos.

Nesse contexto, a ausência de um modelo estruturado para o planejamento das visitas resulta em aumento do tempo de deslocamento, maior consumo de combustível e redução da produtividade, especialmente quando as obras se encontram em locais distantes entre si. Assim, o modelo proposto neste trabalho busca oferecer uma solução matemática que apoie o processo de decisão logística, reduzindo os custos operacionais e otimizando o uso do tempo dos profissionais.

A representação do problema é feita por meio de uma rede de nove cidades, na qual cada nó corresponde a um ponto de visita técnica, e os arcos representam as conexões viáveis entre elas, ponderadas pelas distâncias reais obtidas via Google Maps. Essa estrutura permitiu a formulação do modelo matemático de menor caminho e sua posterior resolução com o uso da ferramenta Solver do Microsoft Excel. Importante destacar que o nó 1 (cidade de Avanhadava-SP) e o nó 9 (cidade de Tupã-SP) correspondem às obras de maior porte e prioridade no cenário analisado, justificando a definição clara de um ponto de origem e um ponto de destino.

2.2 COLETA DE DADOS

A coleta de dados realizada neste estudo teve como objetivo reunir informações suficientes para a representação de um problema logístico real enfrentado no setor da construção civil: o deslocamento técnico entre diferentes cidades. Essa etapa foi essencial para viabilizar a construção de um modelo matemático voltado à minimização da distância percorrida em visitas a obras, utilizando como base o problema do menor caminho.

Inicialmente, foi realizada uma revisão da literatura com foco nos fundamentos da Pesquisa Operacional, abordando especificamente os problemas de redes e a aplicação de algoritmos clássicos como o de Dijkstra. Obras como Hillier e Lieberman (2013) e Taha (2017) foram utilizadas para embasar a formulação do modelo, além do artigo original de Dijkstra (1959), que introduz o algoritmo mais amplamente empregado na resolução de problemas de menor caminho em grafos direcionados. A fundamentação teórica garantiu a solidez da modelagem proposta.

Com base nesse referencial, foram levantadas as distâncias entre as cidades envolvidas no estudo de caso, todas situadas no interior do estado de São Paulo. As rotas foram extraídas utilizando a ferramenta Google Maps, a fim de refletir trajetos reais e atuais. A cidade de Avanhadava-SP foi considerada como ponto de partida das visitas técnicas, enquanto Tupã foi definida como o destino final, passando por outros pontos de interesse ao longo do caminho. As distâncias entre os nós foram obtidas com precisão, priorizando caminhos rodoviários principais, para garantir representatividade prática.

Os dados coletados foram organizados em uma planilha eletrônica no Microsoft Excel, permitindo a construção da matriz de distâncias entre os nós da rede. Essa matriz pode ser visualizada na Tabela 1, que apresenta as distâncias rodoviárias entre as cidades que compõem o trajeto analisado.

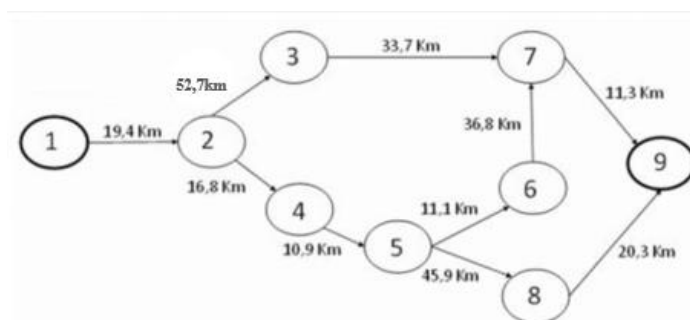
Tabela 1 – Distância entre as cidades de visitas

DE	Cidade	PARA	CIDADE	DISTÂNCIA
1	AVANHANDAVA	2	VILA ARAÚJO	19,4
2	VILA ARAÚJO	3	SANTÓPOLIS	52,7
2	VILA ARAÚJO	4	ALTO ALEGRE	16,8
3	SANTÓPOLIS	7	SANTA ESTELA	33,7
4	ALTO ALEGRE	5	JATOBÁ	10,9
5	JATOBÁ	6	LUIZIÂNIA	11,1
5	JATOBÁ	8	JULIÂNIA	45,9
6	LUIZIÂNIA	7	SANTA ESTELA	36,8
7	SANTA ESTELA	9	TUPÃ	11,3
8	JULIÂNIA	9	TUPÃ	20,3

Fonte: Esta pesquisa 2025

A representação gráfica do problema em formato de rede está ilustrada na Figura 2, a qual mostra os nós correspondentes a cada cidade e os arcos com os respectivos valores de distância.

Figura 2 – Rede do modelo apresentado



Fonte: Esta pesquisa 2025

A resolução do modelo foi realizada com o uso da ferramenta Solver, disponível no Excel, o que viabilizou a obtenção de uma solução ótima com base na menor distância total entre os pontos. Essa abordagem permitiu estruturar o problema como um modelo de otimização aplicável à realidade de engenheiros civis que realizam visitas técnicas rotineiras em múltiplas frentes de obra.

2.2.1 DOCUMENTAÇÃO INDIRETA

A documentação indireta utilizada neste trabalho teve como finalidade embasar

teoricamente o problema de otimização proposto, além de oferecer referências sobre sua aplicabilidade no setor da construção civil. Essa etapa envolveu a consulta a livros, artigos científicos e publicações técnicas sobre a Pesquisa Operacional, especialmente no que diz respeito à modelagem de redes e à resolução do problema do menor caminho.

Entre os autores consultados, destaca-se Dijkstra (1959), cuja formulação do algoritmo de menor caminho ainda é amplamente utilizada em aplicações práticas e acadêmicas. Hillier e Lieberman (2013) também foram fundamentais para a estruturação matemática do modelo, pois descrevem a lógica dos fluxos em redes direcionadas, considerando restrições e funções objetivo com base em pesos. Além disso, o livro de Taha (2017) foi adotado como suporte para a interpretação das etapas de modelagem e implementação computacional.

Foram selecionados artigos recentes que aplicam métodos similares em áreas como engenharia civil, logística e transporte. Dentre eles, o estudo de Santos e Rocha (2022) demonstra como a modelagem matemática pode ser utilizada para otimizar o deslocamento de equipes técnicas entre frentes de obra, considerando tanto os aspectos de custo quanto os de tempo. Também foi considerada a pesquisa de Silva et al. (2020), que apresenta um estudo de caso semelhante ao deste trabalho, abordando a minimização de rotas em atividades técnicas do setor de engenharia.

A seleção dessas fontes considerou critérios como atualidade, aplicabilidade prática, clareza metodológica e reconhecimento dos autores no campo da Pesquisa Operacional. Todos os materiais consultados foram devidamente organizados em fichamentos, permitindo sua posterior utilização nas seções teóricas e metodológicas do relatório.

Dessa forma, a documentação indireta contribuiu não apenas para o embasamento teórico da modelagem aplicada neste trabalho, mas também para reforçar a relevância e viabilidade de sua aplicação no contexto da construção civil. O cruzamento entre teoria e prática proporcionou maior robustez ao estudo e orientou decisões metodológicas relevantes.

2.2.2 DOCUMENTAÇÃO DIRETA

Os dados utilizados neste estudo também foram obtidos de forma direta, por meio de ações práticas realizadas pelo próprio autor durante o desenvolvimento do modelo. Essas atividades envolveram o uso de ferramentas computacionais, levantamentos manuais e organização de dados brutos em planilhas eletrônicas.

A principal forma de documentação direta ocorreu por meio da consulta e simulação de trajetos no Google Maps, ferramenta que possibilitou identificar com precisão as rotas entre os pontos de interesse, bem como medir as distâncias reais a serem utilizadas como pesos na construção da rede. O autor realizou manualmente a medição ponto a ponto, verificando as alternativas de percurso e selecionando os trajetos mais representativos do deslocamento real

entre as cidades envolvidas. Todas as distâncias foram registradas em quilômetros e organizadas em forma de matriz para posterior aplicação no modelo matemático.

Outra forma de documentação direta foi o desenho da rede de nós e arcos, conforme apresentado na Figura 2 deste trabalho. Esse grafo foi estruturado com base na lógica de visitas técnicas a diferentes obras, e os nós foram numerados de forma sequencial para representar as cidades, facilitando a identificação do fluxo no processo de roteirização.

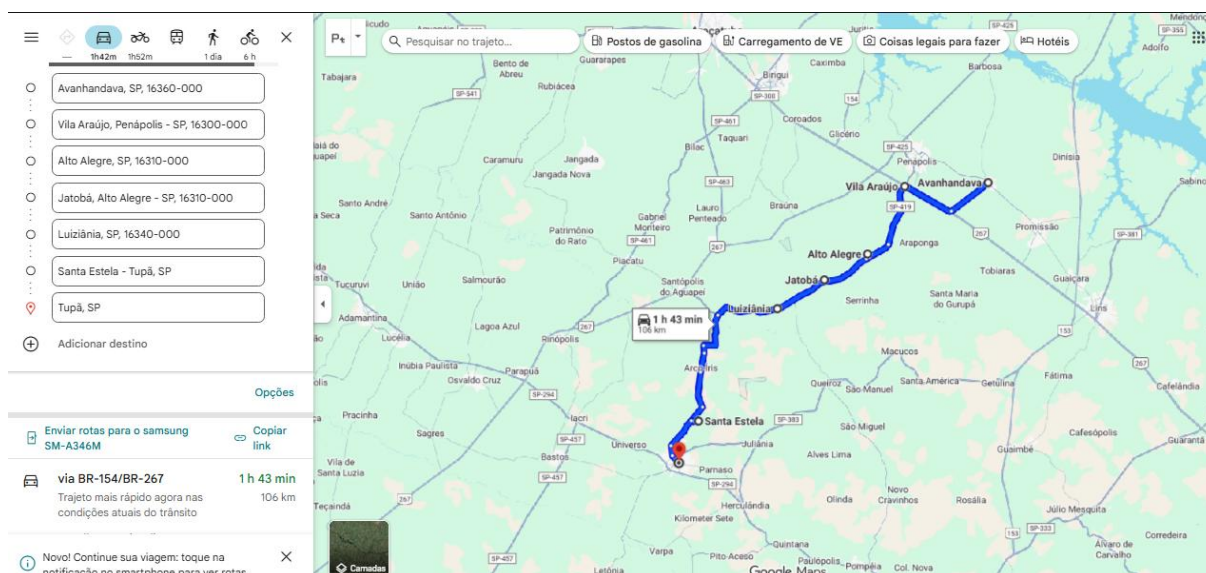
Além disso, o autor foi responsável por configurar manualmente o modelo no Solver do Excel, determinando as variáveis de decisão, restrições de fluxo e a função objetivo. O processo de implementação envolveu também a definição das equações que controlam a entrada e saída dos nós intermediários e a restrição de origem e destino. Esse processo pode ser verificado nas Tabelas 2 e 3, que apresentam respectivamente os dados utilizados na formulação e os resultados da solução ótima encontrada.

Tabela 2 – Formulação do modelo (variáveis e distâncias)

Variável	Rota (De → Para)	Distância (Km)
X12	1 → 2	19,4
X23	2 → 3	52,7
X24	2 → 4	16,8
X37	3 → 7	33,7
X45	4 → 5	10,9
X56	5 → 6	11,1
X58	5 → 8	45,9
X67	6 → 7	36,8
X79	7 → 9	11,3
X89	8 → 9	20,3

Fonte: Esta pesquisa (2025)

Figura 3 – Rota Google Maps dos resultados provenientes do Solver (caminho mínimo encontrado)



Fonte: Esta pesquisa (2025)

A realização dessas etapas permitiu que o modelo fosse construído com dados atualizados, representativos e operacionais, garantindo maior confiabilidade nos resultados obtidos.

2.3 DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE OTIMIZAÇÃO

A partir dos dados coletados e da estrutura da rede construída, foi possível desenvolver um modelo de otimização com base no problema do menor caminho. A formulação seguiu os princípios da Programação Linear Inteira, com variáveis binárias associadas às rotas possíveis entre os nós da rede. Nesse tipo de modelagem, cada variável x_{ij} assume apenas dois valores possíveis: 1 quando a rota que liga o nó i ao nó j é selecionada para compor o caminho final, e 0 quando essa rota é descartada pelo modelo. Essa estrutura binária é fundamental, pois permite ao Solver decidir de forma precisa quais conexões fazem parte do trajeto ótimo, evitando ambiguidades e garantindo que somente um caminho coerente seja formado. Em modelos de redes, essa abordagem é amplamente utilizada justamente porque transforma o processo de escolha das rotas em decisões discretas e mutuamente exclusivas, o que é compatível com a lógica de deslocamento real de um engenheiro civil: ou ele utiliza uma estrada, ou não a utiliza.

O objetivo principal do modelo é minimizar a distância total percorrida no deslocamento de visitas técnicas entre os pontos, partindo da cidade de Avandava-SP e finalizando em Tupã-SP. O modelo considera como variáveis de decisão os arcos que conectam os nós (cidades). Cada arco está associado a um valor binário (0 ou 1), representando, respectivamente, a exclusão ou inclusão da rota na solução ótima. A função objetivo busca minimizar o somatório das distâncias dos arcos escolhidos, de forma a identificar o caminho mais curto possível entre o ponto de origem e o destino, respeitando as condições de fluxo como apresentado na Tabela 2 anteriormente.

A seguir, o modelo foi estruturado conforme a notação clássica para problemas de redes, representando os seguintes elementos:

- Equação 1 - Função Objetivo:

$$\text{Min } Z = 19,4x_{12} + 52,7x_{23} + 16,8x_{24} + 33,7x_{37} + 10,9x_{45} + 11,1x_{56} + 45,9x_{58} + 36,8x_{67} + 11,3x_{79} + 20,3x_{89}$$

- Equação 2 - Restrições de fluxo:

- Nó de origem (Avandava-SP):
 $-x_{12} = -1$

- Nós intermediários (conservação de fluxo):
 $x_{12} - x_{23} - x_{24} = 0$
 $x_{23} - x_{37} = 0$

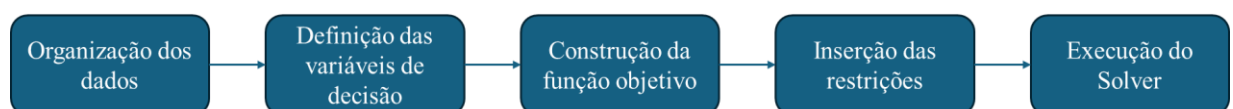
$$\begin{aligned}x_{24} - x_{45} &= 0 \\x_{45} - x_{56} - x_{58} &= 0 \\x_{56} - x_{67} &= 0 \\x_{37} + x_{67} - x_{79} &= 0 \\x_{58} - x_{89} &= 0\end{aligned}$$

- Nó de destino (Tupã):
 $x_{79} + x_{89} = 1$
- Restrição de não negatividade:
 $x_{ij} \in \{0, 1\}$

Essas equações asseguram que apenas um caminho seja selecionado, partindo do nó inicial até o nó final, respeitando a lógica de entrada e saída nos nós intermediários, característica do problema do menor caminho. O modelo foi então implementado na ferramenta Solver, do Microsoft Excel, conforme ilustrado na Figura 4, que apresenta o fluxo de resolução computacional adotado.

Essas equações asseguram que apenas um caminho seja selecionado, partindo do nó inicial até o nó final, respeitando a lógica de entrada e saída nos nós intermediários, característica do problema do menor caminho. Ao utilizar variáveis binárias, o modelo garante que não existam rotas parciais ou múltiplos caminhos ativos simultaneamente, apenas o conjunto estritamente necessário de arcos é mantido. O modelo foi então implementado na ferramenta Solver, do Microsoft Excel, conforme ilustrado na Figura 4, que apresenta o fluxo de resolução computacional adotado.

Figura 4 – Fluxograma da resolução computacional no Solver



Fonte: Esta pesquisa (2025)

A solução do modelo permitiu identificar a sequência ideal de cidades a serem percorridas pelo engenheiro civil, minimizando a distância total do trajeto. Essa sequência será apresentada e discutida na próxima seção, juntamente com os ganhos operacionais associados à aplicação da técnica.

3 RESULTADOS

Este capítulo apresenta a aplicação prática do modelo de otimização no contexto definido, ou seja, a minimização da distância percorrida por um engenheiro civil durante visitas técnicas entre cidades do interior de São Paulo. A estrutura da rede, a formulação matemática e a resolução computacional foram desenvolvidas com base nas etapas descritas anteriormente, utilizando dados reais de distância e o Solver do Excel como ferramenta de apoio.

3.1 ESTRUTURA DA REDE E DADOS DO PROBLEMA

A rede foi composta por nove nós, representando as cidades envolvidas na rota de visitas. O nó 1 (Avanhandava-SP) representa o ponto de partida, e o nó 9 (Tupã-SP) o destino final. Os demais “nós” representam os pontos intermediários de visita. A Figura 2 deste trabalho apresenta a representação gráfica da rede, com os arcos e as respectivas distâncias em quilômetros, conforme obtido via Google Maps.

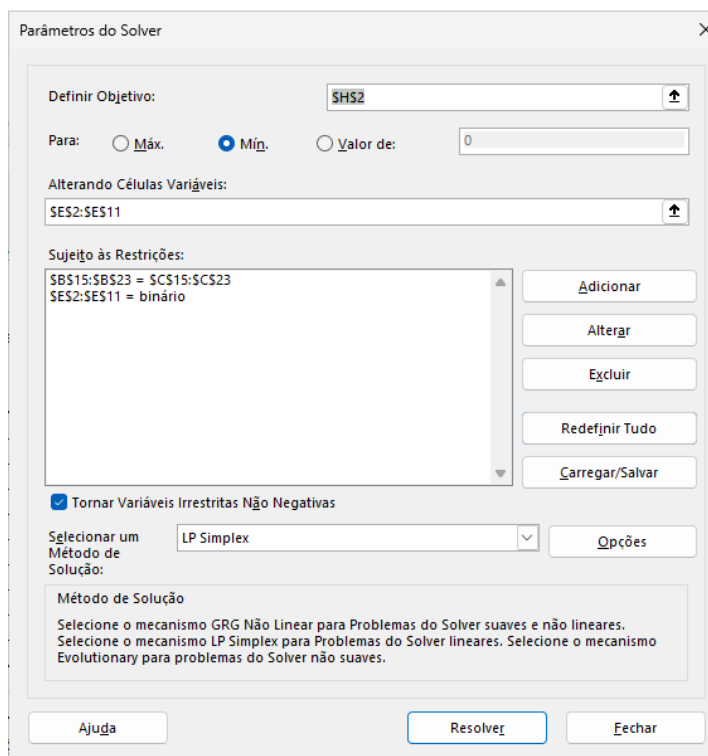
As conexões possíveis entre os nós foram definidas com base em critérios de conectividade prática e relevância logística. Os pesos atribuídos aos arcos correspondem às distâncias entre os pares de cidades conectadas, conforme detalhado na Tabela 1. A Tabela 2 apresenta as variáveis binárias associadas a cada arco, que compõem a base da formulação matemática do modelo.

3.2 SOLUÇÃO COMPUTACIONAL NO SOLVER

Com os dados organizados, o modelo foi implementado na ferramenta Solver do Excel, utilizando a metodologia de Programação Linear Inteira com variáveis binárias. A função objetivo foi configurada para minimizar a distância total percorrida, e as restrições de fluxo foram aplicadas de modo a garantir a passagem lógica por todos os nós e o respeito às condições de origem e destino.

A Figura 5 apresenta a tela de configuração do Solver utilizada neste estudo, destacando a definição da célula objetivo, o intervalo de variáveis de decisão e as restrições de entrada e saída de fluxo. Essa etapa foi configurada com o método Simplex LP, adequado para problemas de otimização linear com variáveis binárias, conforme orientam Hillier e Lieberman (2013).

Figura 5 – Configuração do Solver no Excel



Fonte: Esta Pesquisa (2025)

A Figura 6 mostra a planilha desenvolvida no Excel, contendo a matriz de distâncias, as variáveis de decisão (0 ou 1) e a função objetivo de minimização de Z. Essa estrutura permitiu a execução prática do modelo matemático e a visualização clara do comportamento das variáveis durante o processo de otimização.

Figura 6 – Planilha de modelagem com variáveis e função objetivo

De	Para	Distância (km)	Variável (x _{ij})	Selecionado (0/1)	Selecionado (0/1)	
1	2	19,4	x ₁₂	1	19,4	Min Z = 19,4x ₁₂ + 52,7x ₂₃ + 16,8x ₂₄ + 33,7x ₃₇ + 10,9x ₄₅ + 11,1x ₅₆ + 45,9x ₅₈ + 36,8x ₆₇ + 11,3x ₇₉ + 20,3x ₈₉ 106,3
2	3	52,7	x ₂₃	0	0	
2	4	16,8	x ₂₄	1	16,8	
3	7	33,7	x ₃₇	0	0	
4	5	10,9	x ₄₅	1	10,9	
5	6	11,1	x ₅₆	1	11,1	
5	8	45,9	x ₅₈	0	0	
6	7	36,8	x ₆₇	1	36,8	
7	9	11,3	x ₇₉	1	11,3	
8	9	20,3	x ₈₉	0	0	

Fonte: Esta Pesquisa (2025)

Após a execução do modelo, o Solver retornou a solução ótima, com seleção automática dos arcos que compõem o caminho de menor custo (distância), conectando o ponto inicial ao destino final. A Figura 7 apresenta o resultado final da otimização, evidenciando as variáveis que assumiram valor 1 (rotas selecionadas) e a distância total mínima obtida de 106,3 km.

Figura 7 – Resultado final da otimização via Solver

$\text{Min } Z = 19,4 \times 12 + 52,7 \times 23 + 16,8 \times 24 + 33,7 \times 37 + 10,9 \times 45 + 11,1 \times 56 + 45,9 \times 58 + 36,8 \times 67 + 11,3 \times 79 + 20,3 \times 89$
106,3

Fonte: Esta Pesquisa (2025)

O resultado confirma que a aplicação da Pesquisa Operacional em problemas de roteamento de visitas técnicas é eficiente e viável, permitindo a redução de distância, tempo de deslocamento e consumo de combustível, além de melhorar o planejamento das atividades de campo.

A seguir, a Tabela 3 apresenta os valores correspondentes às variáveis selecionadas na solução ótima, obtida com o Solver.

Tabela 3 – Resultados da solução ótima via Solver

De	Para	Distância (Km)	Variável Selecionada
1	2	19,4	1
2	4	16,8	1
4	5	10,9	1
5	6	11,1	1
6	7	36,8	1
7	9	11,3	1

Fonte: Esta pesquisa (2025)

3.3 LIMITAÇÕES DO MODELO

Apesar da eficácia comprovada na obtenção de um trajeto otimizado, o modelo desenvolvido apresenta algumas limitações inerentes à sua construção e ao escopo do estudo. A primeira limitação está relacionada à constância dos dados de entrada, principalmente as distâncias rodoviárias. Essas distâncias foram obtidas com base nas informações do Google Maps em um dado momento, desconsiderando possíveis variações futuras no tráfego, condições de estrada ou interdições temporárias, que podem impactar a rota ideal em situações reais.

O modelo não contempla fatores operacionais adicionais, como tempo de deslocamento, janelas de atendimento, condições climáticas, disponibilidade do engenheiro em horários específicos ou restrições relacionadas à prioridade de obras. A otimização considera

exclusivamente a distância como critério de decisão, o que pode ser insuficiente em contextos mais complexos de planejamento de rotas.

Também se reconhece que o modelo foi estruturado como um problema estático, ou seja, baseado em uma situação única e idealizada. Em contextos reais, o deslocamento de profissionais pode sofrer alterações diárias, exigindo replanejamento frequente, o que torna desejável uma abordagem dinâmica e adaptável com capacidade de atualização automatizada dos dados.

Mesmo diante dessas limitações, o modelo desenvolvido atinge seu propósito dentro do escopo definido e demonstra o potencial da aplicação de técnicas de Pesquisa Operacional na melhoria da eficiência logística em atividades de engenharia civil. As fragilidades aqui apontadas abrem possibilidades para o aprimoramento futuro da solução proposta.

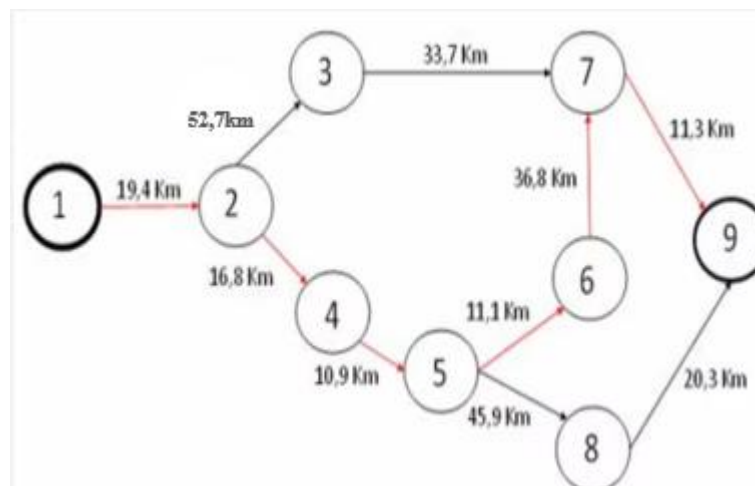
4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Atualmente, a rotas utilizada pelos profissionais é definida de forma empírica, baseada apenas no conhecimento prévio e na experiência individual de cada engenheiro. Esse tipo de decisão, embora comum na prática, não considera critérios quantitativos nem compara alternativas possíveis, o que pode levar a escolhas pouco eficientes. Como consequência, podem ocorrer trajetos mais longos, maior consumo de combustível e perda de tempo durante os deslocamentos. A ausência de um método estruturado reforça a necessidade de modelos de otimização que ofereçam suporte técnico ao planejamento das visitas, garantindo escolhas mais racionais e vantajosas do ponto de vista operacional.

A aplicação prática do modelo de otimização permitiu a identificação do caminho mínimo entre os pontos de visita técnica, otimizando a logística de deslocamento de um engenheiro civil entre as cidades do interior paulista. Com base na formulação matemática apresentada anteriormente e na execução do modelo via Solver, foi possível obter uma rota eficiente com distância total de 106,3 km, partindo de Avanhandava (nó 1) e chegando até Tupã (nó 9).

A sequência de cidades percorridas pelo caminho mínimo foi a seguinte: $1 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow 9$. Esse percurso foi destacado de forma visual na Figura 5 deste trabalho, onde os arcos selecionados na solução ótima estão evidenciados na rede, facilitando a interpretação da trajetória sugerida pelo modelo.

Figura 5 – Rede com caminho mínimo obtido via Solver



Fonte: Esta pesquisa (2025)

Ao comparar o caminho otimizado com outras rotas possíveis, observa-se uma economia significativa em relação a percursos convencionais não planejados, os quais poderiam ultrapassar facilmente os 130 km visto as rotas que eram executadas anteriormente. Essa redução de aproximadamente 23,7 km por visita técnica representa um ganho operacional concreto.

Para quantificar esse ganho, considerou-se o uso de uma Volkswagen Saveiro Robust 1.6 Flex, cuja autonomia média rodoviária com gasolina é de 12,1 km/L. Com base no preço médio da gasolina em São Paulo ao final de 2024, de R\$ 5,99 por litro (SEM PARAR, 2024), e assumindo a realização de 10 visitas técnicas mensais, foi possível estimar uma economia mensal de 237 km, equivalente a 19,58 litros de combustível poupados.

Essa economia representa um custo evitado de R\$ 117,32 por mês, resultando em uma poupança de R\$ 1.407,84 por ano, apenas com combustível. Entretanto, os ganhos não se limitam à economia direta. Considerando que a otimização do trajeto reduziu em média 23,7 km por visita técnica, e que essa distância equivale a aproximadamente 25 minutos de deslocamento em trechos rodoviários de velocidade média de 60 km/h, estima-se uma economia de cerca de 4 horas mensais de tempo de viagem.

Esse tempo poupado, quando convertido em produtividade, torna-se ainda mais expressivo. Com base no valor médio da hora técnica de um engenheiro civil no Brasil, que varia entre R\$ 120,00 e R\$ 150,00 por hora (SENGE, 2024), as 4 horas economizadas representam uma redução mensal entre R\$ 480,00 e R\$ 600,00 em custos de mão de obra. Em um ano, esse valor pode alcançar entre R\$ 5.760,00 e R\$ 7.200,00, reforçando a relevância prática da otimização das rotas. Além dos ganhos financeiros, a menor quilometragem percorrida reduz o desgaste do veículo, prolongando a vida útil de pneus e componentes mecânicos, além de diminuir a necessidade de manutenção preventiva e corretiva.

Do ponto de vista estratégico, a otimização também melhora o planejamento de campo, permitindo ao engenheiro realizar mais visitas no mesmo período e garantindo maior previsibilidade nas agendas de acompanhamento técnico. Essa racionalização das rotas traz reflexos positivos na qualidade da supervisão das obras e na satisfação das equipes de campo, uma vez que há melhor aproveitamento dos recursos e do tempo disponível.

A análise evidencia, portanto, que o modelo proposto, além de conceitualmente válido, gera resultados econômicos, operacionais e gerenciais concretos. Se forem considerados ainda os efeitos indiretos como a redução da fadiga do profissional e o aumento da confiabilidade no planejamento os benefícios tornam-se ainda mais relevantes para a gestão estratégica da Engenharia de Produção, promovendo eficiência, economia e sustentabilidade nas operações logísticas da construção civil.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O modelo proposto neste trabalho mostrou-se eficaz para resolver problemas logísticos de visitas técnicas na construção civil, pois permite ao engenheiro planejar seus deslocamentos de forma objetiva, segura e economicamente vantajosa. A utilização do problema do menor caminho possibilitou identificar a sequência ideal de trajetos entre diferentes obras, garantindo uma redução significativa na distância total percorrida, além de uma melhor alocação do tempo de trabalho e dos recursos operacionais. Essa abordagem pode ser facilmente replicada em outras atividades que envolvem deslocamentos técnicos frequentes, como manutenção predial, inspeções industriais, visitas agrícolas ou monitoramento ambiental.

A aplicação da Pesquisa Operacional por meio da modelagem matemática e do uso do Solver do Excel demonstrou que ferramentas simples e acessíveis podem gerar resultados de alto impacto prático. A formulação binária das variáveis e a definição de restrições de fluxo tornaram possível a minimização da distância total, resultando em uma rota otimizada de 106,3 km, consideravelmente menor que os trajetos convencionais não otimizados.

Entre os principais resultados, destaca-se a análise de ganho prático proporcionada pela aplicação do modelo, que indicou economia anual superior a R\$ 1.400,00 em combustível, conforme os preços médios da gasolina em São Paulo ao final de 2024. Além disso, observou-se uma redução aproximada de 4 horas mensais de deslocamento, o que representa ganhos adicionais de produtividade, considerando que a hora de trabalho de um engenheiro varia entre R\$ 120 e R\$ 150. Assim, somente esse tempo poupado pode corresponder a uma economia indireta anual entre R\$ 5.760 e R\$ 7.200, resultado do melhor aproveitamento da jornada e da diminuição do tempo improdutivo de viagem. Esses resultados evidenciam que a otimização de rotas vai além da economia financeira direta, gerando eficiência operacional e benefícios estratégicos para o setor da construção civil.

Embora o modelo tenha sido desenvolvido em planilhas eletrônicas, uma proposta de aprimoramento futuro consiste na criação de um aplicativo de rotas otimizadas para engenheiros civis, que utilize algoritmos de menor caminho integrados a ferramentas de geolocalização, como Google Maps ou Waze. Essa aplicação poderia automatizar o cálculo das rotas, atualizar distâncias em tempo real e permitir o planejamento diário de visitas com base em critérios personalizados (tempo, custo, prioridade de obras). Essa evolução tornaria o modelo ainda mais dinâmico, acessível e útil em contextos corporativos.

Apesar dos resultados positivos, reconhece-se que o modelo apresentado considera apenas o critério de distância, sendo, portanto, estático e dependente de dados fixos. Fatores como tráfego, condições climáticas, prioridades de visita e disponibilidade de profissionais não foram contemplados. Contudo, essas limitações configuram oportunidades para futuras pesquisas, especialmente voltadas ao desenvolvimento de modelos multicritério e sistemas inteligentes de otimização logística.

Conclui-se, portanto, que o modelo desenvolvido alinha teoria e prática, integrando fundamentos da Engenharia de Produção a uma necessidade real do setor da construção civil. Além disso, todos os objetivos propostos no início deste trabalho foram plenamente alcançados, uma vez que o modelo foi capaz de otimizar o trajeto, reduzir custos operacionais e demonstrar seus benefícios de forma mensurável. Ao traduzir conceitos de Pesquisa Operacional em resultados mensuráveis, o estudo reforça o potencial de soluções matemáticas como ferramentas estratégicas de gestão, promovendo eficiência, economia e inovação nos processos operacionais.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, E. L. de. **Introdução à pesquisa operacional: métodos e modelos para análise de decisões**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

BRASIL. **Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT**. Base de dados rodoviários. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit>. Acesso em: 25 set. 2025.

CBIC – **CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO**. **Construção cresce 3,5% no 2º trimestre de 2024, superando expectativas econômicas. 2024**. Disponível em: <https://cbic.org.br/construcao-cresce-35-no-2o-trimestre-de-2024-superando-expectativas-economicas/>. Acesso em: 25 nov. 2024.

DIJKSTRA, E. W. **A note on two problems in connexion with graphs**. *Numerische Mathematik*, v. 1, p. 269–271, 1959.

GOOGLE MAPS. **Distâncias rodoviárias entre cidades**. Disponível em: <https://www.google.com/maps>. Acesso em: 25 set. 2025.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introdução à Pesquisa Operacional**. 9. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

MARTINS, R. A.; MELLO, C. H. P.; TURRIONI, J. B. **Guia para elaboração de monografia e TCC em engenharia de produção**. São Paulo: Atlas, 2014.

SANTOS, A. P.; ROCHA, J. R. **Modelagem matemática aplicada à logística de visitas técnicas no setor de engenharia civil**. *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento*, v. 6, n. 12, p. 134–150, 2022. Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia/modelagem-matematica>. Acesso em: 25 set. 2025.

SEM PARAR. **Combustíveis em SP fecham 2024 com aumento de até 25%, aponta Sem Parar**. *Veja*, Radar, 29 dez. 2024. Disponível em: <https://veja.abril.com.br/coluna/radar/combustiveis-em-sp-fecham-2024-com-aumento-de-ate-25-aponta-sem-parar/>. Acesso em: 3 out. 2025.

SILVA, G. R.; COSTA, D. C.; NASCIMENTO, L. M. **Aplicação de modelos de otimização de rotas no planejamento logístico de obras civis**. *Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade*, v. 7, n. 1, p. 45–59, 2020. Disponível em: <https://revistas.uninter.com/rebes/article/view/3287>. Acesso em: 25 set. 2025.

TAHA, H. A. **Operations research: an introduction**. 9. ed. New Jersey: Pearson, 2017.

SENGE – **Sindicato dos Engenheiros no Estado de São Paulo**. Tabela Referencial de Honorários Profissionais. 2024. Disponível em: <https://www.senge.org.br/honorarios/>. Acesso em: 10 fev. 2025.