

REVISTA BRASILEIRA DE AUDITORIA DO SETOR PÚBLICO

(Edição Especial, v. 1, n. 2, maio/nov. 2026)



Brasília | p. 1- 124
Revista Brasileira de Auditoria do Setor Público - RBASP

RBASP

REVISTA BRASILEIRA DE AUDITORIA DO SETOR PÚBLICO

Edição Especial do Instituto Brasileiro de Auditoria de Obras Públicas - IBRAOP

© 2026 Instituto Rui Barbosa (IRB)

É permitida a reprodução parcial ou total desta obra, desde que citada a fonte e que não seja para venda ou qualquer fim comercial.

As imagens de destaque dos artigos foram geradas através de Inteligência Artificial.

CONSELHO CIENTÍFICO

Adriana Cuoco Portugal
Éricka da Silva Cândido

APOIO TÉCNICO

Arthur de Oliveira Viana Neto
Bruno Malaquias
Guilherme Bride Fernandes
Júlio Uchoa Cavalcanti Neto

APOIO LOGÍSTICO

Raiane de Sousa Silva Barbosa

REVISÃO TEXTUAL

Inaldo da Paixão Santos Araújo
Luciano Amaral Oliveira

REVISÃO ORTOGRÁFICA

Dayse Lucia Mendes

DIAGRAMAÇÃO E PROJETO GRÁFICO

Gabriela de Araujo Dantas

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

R454 Revista Brasileira de Auditoria do Setor Público / Instituto Rui Barbosa. – v.1, n. 2 (maio / nov.2026). – Brasília: IRB, 2026.

Semestral (2025-)
ISSN: 3085-9204

1. Auditoria. 2. Serviço Público. I. Instituto Rui Barbosa. II. Tribunal de Contas do Estado da Bahia.

CDU 336.126(05)

Instituto Rui Barbosa Gestão 2026 • 2027 Diretoria

Inaldo da Paixão Santos Araújo (TCE-BA)
PRESIDENTE

VICE-PRESIDENTES

Cristiana de Castro Moraes (TCE-SP)
VICE-PRESIDENTE DE AUDITORIA

Edilberto Carlos Pontes Lima (TCE-CE)
VICE-PRESIDENTE DE ENSINO PESQUISA E EXTENSÃO

Ivan Lelis Bonilha (TCE-PR)
VICE-PRESIDENTE DE DESENVOLVIMENTO INSTITUCIONAL

Reginaldo Parnow Ennes (TCE-AP)
VICE-PRESIDENTE DE RELAÇÕES INSTITUCIONAIS

Sebastião Helvecio Ramos de Castro (TCE-MG)
VICE-PRESIDENTE DE DESENVOLVIMENTO E POLÍTICAS PÚBLICAS

Luis Fabian Barbosa (TCE-AM)
PRIMEIRO SECRETÁRIO

José Valdomiro Távora de Castro Júnior (TCE-CE)
SEGUNDO SECRETÁRIO

Maria Elizabeth Cavalcante de Azevedo Picanço (TCE-AP)
TESOUREIRO

RELAÇÕES INSTITUCIONAIS

Francisco José Brito Bezerra (TCE-RR)
Marco Peixoto (TCE-RS)
Gilberto Pinto Monteiro Diniz (TCE-MG)
Antonio José Costa de Freitas Guimarães (TCM-PA)
Ranilson Brandão Ramos (TCE-PE)

DESENVOLVIMENTO INSTITUCIONAL

André Clemente Lara de Oliveira (TC-DF)
Domingos Augusto Taufner (TCE-ES)
Fábio Túlio Filgueiras Nogueira (TCE-PB)
Alexandre Postal (TCE-RS)
José Nei Alberton Ascari (TCE-SC)

ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO

Lilian de Almeida Veloso Nunes Martins (TCE-PI)
Felipe Galvão Puccioni (TCM-RJ)
Saulo Marques Mesquita (TCE-GO)
Ricardo Ezequiel Torres (TCM-SP)
Onélia Leite (TCE-CE)

AUDITORIA

Severiano José Costandrade de Aguiar (TCE-TO)
Naluh Maria Lima Gouveia (TCE-AC)
Ronaldo Nascimento de Sant'Anna (TCE-GO)
Susana Maria Fontes Azevedo Freitas (TCE-SE)
Joaquim Kennedy Nogueira Barros (TCM-PI)

DESENVOLVIMENTO E POLÍTICAS PÚBLICAS

Rosa Egídia Crispino Calheiros Lopes (TCE-PA)
Rodrigo Siqueira Cavalcante (TCE-AL)
Rholden Botelho de Queiroz (TCE-CE)
Rodrigo Melo do Nascimento (TCE-RJ)
Márcio Pacheco (TCE-RJ)

CONSELHO FISCAL

Fernando Ribeiro Toledo (TCE-AL)
Cilene Lago Salomão (TCE-RR)
Patrícia Lúcia Mendes Saboya (TCE-CE)
Estilac Martins Rodrigues Xavier (TCE-RS)
Inácio Magalhães Filho (TC-DF)

SUPLENTE

Wilber Coimbra (TCE-RO)
Flavio Kayatt (TCE-MS)
Carlos Thompson Costa Fernandes (TCE-RN)
Celmar Rech (TCE-GO)
Luiz Eduardo Cherem (TCE-SC)

Instituto Brasileiro de Auditoria de Obras Públicas

Gestão 2025 • 2026

Diretoria Executiva

Adriana Cuoco Portugal (TCDF)
PRESIDENTE

DIRETORES

Guilherme Bride Fernandes (TCE-ES)
VICE-PRESIDENTE / DIRETOR TÉCNICO

Fernando Celso Morini (TCM-SP)
DIRETOR ADMINISTRATIVO / DIRETOR DE COMUNICAÇÃO

Paulo Augusto Daschevi (TCE-PR)
DIRETOR ADMINISTRATIVO ADJUNTO

Arthur de Oliveira Viana Neto (TCE-AC)
DIRETOR DE COMUNICAÇÃO ADJUNTO

Júlio Uchoa Cavalcanti Neto (TCE-PB)
DIRETOR DE EVENTOS

Alysson Mattje (TCE-SC)
DIRETOR FINANCEIRO

Aristóteles Sampaio Costa (TCE-RR)
DIRETOR FINANCEIRO ADJUNTO

Bartolomeu Barros Lordelo Jr (TCM-BA)
DIRETOR DE PLANEJAMENTO

Douglas Emanuel Nascimento de Oliveira (TCE-MG)
DIRETOR DE PLANEJAMENTO ADJUNTO

Rafael Di Bello (TCU)
DIRETOR DE RELAÇÕES INSTITUCIONAIS

Bruno Malaquias (TCE-GO)
DIRETOR DE RELAÇÕES INSTITUCIONAIS ADJUNTO

Éricka da Silva Cândido (TCM-GO)
DIRETORA TÉCNICA ADJUNTA



SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO	9
O USO DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NO PLANEJAMENTO DA INFRAESTRUTURA DAS CIDADES AMAZÔNICAS	11
DIAGNÓSTICO E EFICIÊNCIA DOS SERVIÇOS DE SANEAMENTO BÁSICO EM ESCOLAS DO CAMPO EM MINAS GERAIS: UM ESTUDO DE CASO A PARTIR DO PROJETO SEDE DE APRENDER	25
VERIFICAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO USO DE IA EM AUDITORIAS: O CASO DE UMA OBRA EM TEOTÔNIO VILELA, ALAGOAS	37
VOLO APLICADO À INFRAESTRUTURA URBANA: DETECÇÃO DE FISSURAS EM CICLOVIAS COM O APOIO DE DRONES	63
ANÁLISE DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA ASSOCIADAS A SERVIÇOS DE PAVIMENTAÇÃO EM VIA URBANA	77
ESTUDO DE IMPACTO AMBIENTAL EM INFRAESTRUTURAS VIÁRIAS: APLICAÇÃO DA ACV EM DIFERENTES TIPOS DE SUPERESTRUTURA DE PONTES	89
AVALIAÇÃO DO ORÇAMENTO E DO PROJETO BÁSICO DE UMA OBRA FERROVIÁRIA NÃO INICIADA E O POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BENEFÍCIOS EFETIVOS	103
CONHEÇA OS AUTORES	121



Instituições não se sustentam apenas por aquilo que está escrito. Sustentam-se, sobretudo, por aquilo que conseguem fazer permanecer.

A confiança pública é uma dessas construção silenciosa. Não se impõe, não se declara, não se decreta. Forma-se aos poucos, no acúmulo de decisões, na coerência dos atos, na capacidade de resistir às pressões do tempo e às facilidades do momento.

No campo do controle público, essa construção ganha contornos ainda mais exigentes. Julgar, orientar, avaliar políticas públicas; acompanhar a aplicação dos recursos, tudo isso ultrapassa o domínio da técnica. Há sempre algo mais em jogo. Há sempre uma escolha que, embora fundada em normas, repercute na vida real.

Por isso, o controle não pode ser exercido como um gesto automático. Ele exige pausa, exige reflexão, exige a compreensão de que cada processo carrega mais do que números. Carrega contextos, consequências e, muitas vezes, expectativas que não aparecem nos autos, mas que se fazem presentes na realidade.

É nesse território, onde a técnica encontra seus limites e a responsabilidade se amplia, que esta revista se insere.

Os estudos aqui reunidos percorrem temas que, à primeira vista, parecem distintos, mas que, em essência, dialogam entre si. A inteligência artificial, a infraestrutura urbana, o saneamento, a educação, a análise de políticas públicas, todos esses assuntos revelam, sob diferentes ângulos, o mesmo desafio de fundo, que é o de tornar a ação estatal mais consciente, mais eficiente e mais comprometida com a vida das pessoas.

A inteligência artificial, por exemplo, amplia horizontes. Permite ver antes, cruzar melhor os dados, decidir com mais informações. Mas não substitui o juízo. Ao contrário, exige que ele seja ainda mais qualificado. Afinal, toda tecnologia, quando deslocada de um compromisso ético e institucional, corre o risco de apenas sofisticar problemas antigos.

O mesmo se pode dizer das demais dimensões tratadas nesta publicação. O saneamento que não chega, a escola que não oferece condições adequadas, a infraestrutura que não acompanha o crescimento das cidades, tudo isso não são apenas falhas de gestão: são interrupções concretas de direitos, são distâncias reais entre o que se promete e o que se entrega.

É nesse ponto que o controle externo precisa reafirmar o seu sentido. Não como uma instância que apenas revisita o passado, mas como uma presença que ilumina o presente e ajuda a organizar o futuro. Controlar também é orientar, é induzir, é contribuir para que as decisões públicas sejam repensadas antes que seus efeitos se tornem irreversíveis.

Há sempre um caminho mais fácil, que é o da indiferença técnica, que se satisfaz com o cumprimento formal. E há o caminho mais difícil, que é o da responsabilidade consciente, que exige compreender, ponderar e decidir com a medida exata do interesse público.

É esse segundo caminho que dá sentido ao controle.

Esta revista nasce desses mesmos compromissos: não apenas o de reunir reflexões qualificadas, mas o de afirmar a visão de que conhecimento, inovação e responsabilidade institucional não caminham separados. Ao contrário, se entrelaçam na construção de um Estado que não apenas funciona, mas que faz diferença.

Ao final, permanece uma evidência simples, embora muitas vezes esquecida: por trás de cada dado, de cada política, de cada decisão, há sempre algo que escapa às planilhas.

Há vidas.

Inaldo da Paixão Santos Araújo

PRESIDENTE DO INSTITUTO RUI BARBOSA

Edilson de Sousa Silva

PRESIDENTE DA ASSOCIAÇÃO DOS MEMBROS DOS
TRIBUNAIS DE CONTAS DO BRASIL

Adriana Cuoco Portugal

PRESIDENTE DO INSTITUTO BRASILEIRO DE AUDITORIA
DE OBRAS PÚBLICAS

Cristiana de Castro Moraes

PRESIDENTE DO TRIBUNAL DE CONTAS DO ESTADO
DE SÃO PAULO





O USO DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NO PLANEJAMENTO DA INFRAESTRUTURA DAS CIDADES AMAZÔNICAS

César Augusto Wanderley Oliveira/ Pontifícia Universidade Católica do Paraná

RESUMO

O presente trabalho analisa a inteligência artificial (IA) como instrumento para aprimorar o planejamento urbano e promover o desenvolvimento sustentável nas cidades da Amazônia Legal. A pesquisa teve como finalidade identificar aplicações tecnológicas viáveis para o contexto amazônico, caracterizado por uma urbanização fragmentada, déficits históricos de infraestrutura e uma elevada desigualdade intramunicipal. A metodologia adotada inclui revisão bibliográfica e a análise de relatórios técnicos sobre o uso de IA em ambientes urbanos. Os resultados demonstram que a IA pode ser empregada em múltiplas frentes, como a análise preditiva da expansão urbana, o mapeamento de vulnerabilidades territoriais e a priorização de políticas públicas com base em dados georreferenciados. Contudo, o estudo também evidencia riscos associados ao viés algorítmico, à proteção de dados pessoais e à opacidade das decisões automatizadas. Conclui-se que a aplicação da IA no planejamento urbano amazônico exige governança ética, participação

social e adaptação às realidades territoriais, sob pena de ampliação das desigualdades existentes. A integração entre inovação tecnológica e responsabilidade institucional é, portanto, o caminho para cidades mais inteligentes, inclusivas e sustentáveis na região.

Palavras-chave: inteligência artificial; planejamento urbano; Amazônia Legal; sustentabilidade.

1 INTRODUÇÃO

A influência transformadora da IA está progressivamente remodelando diversos setores em todo o mundo, e isso não poderia ser diferente em relação à indicação de melhores políticas ou métodos para o aperfeiçoamento da infraestrutura urbana. No Brasil, a Estratégia Brasileira de Inteligência Artificial identificou as cidades inteligentes como uma das prioridades para a pesquisa aplicada de IA, reconhecendo seu potencial para melhorar a gestão urbana e a qualidade dos serviços públicos (BRASIL, 2021).

Globalmente, as cidades enfrentam problemas crescentes decorrentes da urbanização, incluindo poluição e infraestrutura inadequada. A IA apresenta uma poderosa oportunidade para aprofundar nossa compreensão desses desafios complexos e facilitar a criação de soluções computacionais para mitigá-los ou resolvê-los (UNESCO, 2021). Isso oferece potenciais avanços em áreas como mobilidade, segurança e sustentabilidade, visando, em última análise, criar ambientes urbanos mais eficientes, inteligentes e centrados no cidadão.

Conseqüentemente, a capacidade da IA de revolucionar os serviços urbanos, abrangendo infraestrutura, transporte, segurança pública, saúde e gestão ambiental, está ganhando crescente reconhecimento (OCDE, 2020).

No entanto, o contexto do desenvolvimento urbano na região da Amazônia Legal brasileira introduz um conjunto distinto de complexidades. Diferentemente de outras áreas do Brasil, os padrões históricos de assentamento e desenvolvimento nas cidades amazônicas estão intimamente ligados à exploração de recursos naturais e à construção de grandes rodovias. Isso levou a padrões únicos de expansão urbana e desenvolvimento de infraestrutura (CHEIN; PROCÓPIO, 2022).

A urbanização rápida e frequentemente desorganizada na Amazônia resultou em municípios lutando para atender às necessidades básicas de suas populações, exacerbando problemas sociais e ambientais e contribuindo para o acesso insuficiente a serviços urbanos essenciais como saneamento, abastecimento de água e gestão de resíduos. Além disso, o contexto ecológico único da região exige um foco no desenvolvimento urbano sustentável que integre harmoniosamente os ecossistemas naturais dentro da paisagem urbana (TAN *et al.*, 2021).

A história do desenvolvimento urbano na Amazônia Legal é marcada por fases distintas ligadas a ciclos de recursos naturais e políticas governamentais, destacando-se a heterogeneidade dentro da rede urbana da região. Esse desenvolvimento frequentemente ocorreu sem planejamento adequado, contribuindo para os déficits de infraestrutura atuais. O acesso mais precário a serviços básicos de infraestrutura na Amazônia Legal, em comparação com o restante do Brasil, ressalta, ainda mais, esses desafios (CHEIN; PROCÓPIO, 2022).

Considerando esses desafios específicos e o potencial reconhecido da IA para abordar questões urbanas, este artigo investiga a aplicação da inteligência artificial à infraestrutura de cidades dentro da Amazônia Legal. Ao examinar a convergência das tecnologias de IA e as realidades ambientais, sociais e infraestruturais únicas da Amazônia, este estudo visa iluminar as oportunidades e os obstáculos no aproveitamento da IA para promover o desenvolvimento urbano sustentável e inteligente nessa região vital do Brasil.

O objetivo é explorar como a IA pode contribuir para a criação de cidades mais eficientes, resilientes e habitáveis na Amazônia, respeitando sua significância ecológica e as necessidades de seus habitantes. Para isso, é crucial reconhecer os diversos contextos urbanos dentro da Amazônia Legal, indo além de uma visão simplista dela como um único espaço integrado. Compreender as heterogeneidades intramunicipais no acesso à infraestrutura também é vital para a implementação eficaz da IA (CHEIN; PROCÓPIO, 2022).

2 UMA PERSPECTIVA SOBRE O SURGIMENTO DOS MUNICÍPIOS E A INFRAESTRUTURA URBANA NA AMAZÔNIA LEGAL

O processo de urbanização na Amazônia Legal é marcado por transformações profundas, impulsionadas por políticas estatais de integração territorial e exploração de recursos naturais. A partir da década de 1960, o governo federal implementou projetos como o Plano de Integração Nacional e o Programa de Pólos Agropecuários e Agrominerais da Amazônia, visando à ocupação e ao desenvolvimento econômico da região (MONTEIRO; COELHO, 2013). Essas iniciativas resultaram na construção de rodovias estratégicas, como a BR-010 (Belém-Brasília) e a BR-319 (Manaus-Porto Velho), que facilitaram o acesso a áreas antes isoladas e estimularam a formação de novos núcleos urbanos (JESUS *et al.*, 2022)

A expansão da fronteira agrícola, especialmente nas décadas de 1970 e 1980, atraiu migrantes de diversas partes do país, levando à criação de municípios em áreas anteriormente desabitadas. Esse crescimento urbano, no entanto, ocorreu de forma desordenada, sem planejamento adequado, resultando em desafios significativos para a infraestrutura e a prestação de serviços públicos (IMAZON, 2021).

Atualmente, as cidades da Amazônia Legal enfrentam sérias deficiências em infraestrutura urbana. Dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) indicam que, em 2010, apenas 14% da população da região tinha acesso à rede geral de esgoto, em contraste com 60% no restante do país (IBGE, 2012). Além disso, o fornecimento de água potável, a coleta de lixo e o acesso à energia elétrica são limitados, especialmente nas áreas periféricas e rurais (SILVA, 2015).

A gestão urbana na região é dificultada pela ausência de instrumentos eficazes de planejamento e regulação. Muitos municípios carecem de cadastros imobiliários atualizados, o que compromete a arrecadação de tributos, como o Imposto Predial e Territorial Urbano, e dificulta a implementação de políticas públicas (GOUVÊA *et al.*, 2017). Além disso, a aplicação de mecanismos de restrição a empreendimentos de alto impacto ambiental é limitada, contribuindo para a ocupação desordenada do território (SILVA, 2019).

A heterogeneidade da rede urbana na Amazônia Legal, caracterizada por uma predominância de pequenos municípios com baixa capacidade de atração de investimentos, reforça as desigualdades regionais e dificulta a articulação entre as cidades (SILVA *et al.*, 2021). Essa fragmentação compromete a eficiência das políticas públicas e a promoção de um desenvolvimento urbano sustentável.

Em suma, o processo de urbanização na Amazônia Legal é resultado de políticas de ocupação territorial que, embora tenham promovido o crescimento de cidades, não foram acompanhadas de investimentos adequados em infraestrutura e planejamento urbano. Compreender esse contexto histórico e estrutural é fundamental para a formulação de estratégias que visem à melhoria das condições urbanas na região.

3 DO CENTRO À PERIFERIA: UMA LEITURA CENSITÁRIA DA URBANIZAÇÃO NA AMAZÔNIA LEGAL

Essa disparidade não ocorre apenas entre municípios, mas também dentro deles. A Amazônia Legal brasileira apresenta um processo de urbanização marcado pela desigualdade espacial, resultante de dinâmicas territoriais que se desdobram de forma diferenciada entre os centros urbanos consolidados e suas periferias. Para compreender essas disparidades, é necessário adotar uma abordagem que vá além das estatísticas municipais agregadas, explorando o território em sua escala mais fina: os setores censitários.

Utilizando-se os dados do Censo Demográfico de 2010 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), torna-se possível mapear a distribuição populacional e o acesso à infraestrutura urbana em níveis intramunicipais. A análise censitária permite visualizar a estrutura interna das cidades amazônicas, revelando subespaços urbanos com níveis bastante distintos de habitabilidade e acesso a serviços públicos essenciais (IBGE, 2012).

Em muitas cidades da região, as áreas centrais concentram a maior parte da infraestrutura básica — como redes de esgotamento sanitário, abastecimento de água e energia elétrica —, enquanto as franjas urbanas e setores periféricos permanecem subatendidos. Essa clivagem espacial evidencia um padrão de urbanização excludente, que reproduz desigualdades sociais no território (SILVA *et al.*, 2021).

Um aspecto central dessa leitura censitária é a redefinição do conceito de área urbanizada, baseada não apenas em critérios legais, mas na densidade demográfica efetiva. Essa perspectiva, proposta em estudos recentes, permite identificar o espaço efetivamente ocupado e funcional dentro dos limites municipais, independentemente do que está oficialmente delimitado como urbano (MONTEIRO; COELHO, 2013).

Mapas temáticos produzidos com base nos dados do Censo revelam bolsões de pobreza urbana e ausência de serviços em setores geograficamente próximos a áreas dotadas de melhor infraestrutura, indicando uma urbanização fragmentada. Nas cidades de médio porte, como Santarém (PA) e Ji-Paraná (RO), essa assimetria se expressa em uma malha urbana descontínua, com zonas periféricas emergindo a partir de processos de ocupação informal e pressão por moradia (DALASTA, 2012).

Além disso, a distribuição do Índice de Qualidade do Entorno — que combina variáveis ambientais, de infraestrutura e de acessibilidade —, reforça a leitura de que as cidades amazônicas apresentam baixa homogeneidade interna. Mesmo setores censitários classificados como urbanos apresentam níveis muito diferentes de qualidade ambiental e de acesso a bens públicos, em especial nas regiões norte e oeste dos municípios (SILVA, 2017).

A escala setorial também é reveladora das limitações das políticas públicas baseadas em dados agregados, muitas vezes, incapazes de captar as necessidades específicas das comunidades periféricas. A análise detalhada do território permite, assim, uma atuação mais eficaz do poder público, ao direcionar investimentos para áreas negligenciadas e fomentar a equidade territorial (FERREIRA; FREITAS, 2015).

Portanto, ao observarmos o território do centro à periferia por meio das evidências censitárias, torna-se evidente a necessidade de um novo paradigma de planejamento urbano na Amazônia Legal: um paradigma que reconheça as múltiplas realidades coexistentes dentro de um mesmo município e que promova estratégias localizadas de desenvolvimento, integrando as dimensões social, ambiental e espacial.

Essa abordagem, ao revelar as desigualdades ocultas pela média estatística, constitui um passo fundamental para a aplicação de soluções tecnológicas e inovadoras, como o uso da IA, no planejamento urbano. Tais soluções só serão eficazes se forem sensíveis à geografia das desigualdades e às especificidades do espaço amazônico.

4 INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E PLANEJAMENTO URBANO: APLICAÇÕES NA SUSTENTABILIDADE NAS CIDADES DA AMAZÔNIA LEGAL

A urbanização na Amazônia Legal apresenta características particulares que desafiam os modelos tradicionais de planejamento urbano, especialmente quando considerados os déficits históricos de infraestrutura, as distâncias geográficas significativas entre os núcleos urbanos e a heterogeneidade intramunicipal observada nas seções anteriores. Nesse cenário, a incorporação de soluções tecnológicas, com destaque para a IA, surge como uma alternativa estratégica para o enfrentamento dessas fragilidades e para o fortalecimento da governança territorial.

A IA, compreendida como o conjunto de sistemas computacionais capazes de realizar tarefas normalmente associadas à inteligência humana — como classificação, previsão e tomada de decisão baseada em padrões de dados —, tem se mostrado promissora no apoio à gestão pública urbana. Em cidades com desafios estruturais severos, como os municípios amazônicos, o uso de IA pode representar um avanço disruptivo na coleta, no processamento e na análise de informações, contribuindo para a formulação de políticas públicas mais precisas e responsivas (OCDE, 2020).

No contexto brasileiro, a Estratégia Brasileira de Inteligência Artificial aponta expressamente as cidades inteligentes como uma das áreas prioritárias para o desenvolvimento de aplicações práticas da IA. De acordo com o documento, a adoção de tecnologias inteligentes em municípios pode melhorar significativamente os serviços de mobilidade urbana, saneamento, segurança pública e gestão de resíduos, além de ampliar a participação cidadã na administração pública (BRASIL, 2021).

Na Amazônia Legal, essa promessa esbarra, no entanto, em limitações concretas: ausência de conectividade em áreas remotas, falta de dados digitalizados e atualizados, escassez de profissionais qualificados e baixa institucionalização de mecanismos de inovação no setor público. Isso não significa que a IA seja inviável na região — ao contrário, seu potencial é ainda maior justamente onde a eficiência operacional é mais necessária. Para isso, é preciso desenvolver abordagens ajustadas ao contexto amazônico, respeitando-se os limites ambientais e as realidades socioterritoriais de cada município (SANTOS *et al.*, 2022).

Dentre as possíveis aplicações, destacam-se os sistemas de análise preditiva para o monitoramento de expansão urbana desordenada, a identificação automatizada de áreas críticas com base em imagens de satélite e o cruzamento de dados de setores censitários com indicadores sociais e ambientais para orientar decisões de investimento em infraestrutura. Tais soluções, alimentadas por dados locais, podem proporcionar aos gestores públicos uma visão detalhada e dinâmica do território, fundamental para reduzir desigualdades e promover a sustentabilidade urbana (CRUZ *et al.*, 2021).

Além disso, ferramentas de IA voltadas à triagem e priorização de projetos urbanos — como licenciamento de obras, análise de riscos ambientais e regularização fundiária — podem aliviar gargalos na administração municipal, tornando os processos mais céleres e menos dependentes da estrutura burocrática tradicional. Essas soluções são particularmente promissoras em municípios com escassez de técnicos especializados, o que é comum em boa parte da Amazônia Legal (GOMES *et al.*, 2020).

O uso de IA em processos decisórios no âmbito do planejamento urbano não está isento de desafios e implicações éticas, especialmente quando aplicado a territórios complexos e vulneráveis como a Amazônia Legal. A dependência crescente de algoritmos na formulação de políticas públicas exige atenção redobrada quanto à transparência, à equidade e à proteção de dados pessoais, de modo a evitar a amplificação de desigualdades históricas e a produção de injustiças algorítmicas.

A implementação da IA no planejamento urbano da Amazônia Legal deve ser acompanhada de uma análise crítica quanto aos riscos éticos e institucionais que essa tecnologia pode acarretar. Um dos principais desafios reside no viés algorítmico e na desigualdade estrutural de dados, visto que muitos municípios da região apresentam lacunas estatísticas, subnotificações e ausência de cobertura em comunidades ribeirinhas ou indígenas. Esse cenário compromete a qualidade dos modelos preditivos, que tendem a reproduzir ou até a intensificar desigualdades territoriais, caso não sejam adequadamente ajustados à realidade local (CHEIN; PROCÓPIO, 2022; RODRIGUES *et al.*, 2024). Além disso, a coleta massiva de dados por sensores e sistemas georreferenciados deve observar os princípios da Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais (Lei nº 13.709/2018), sob pena de expor populações vulneráveis à discriminação e à vigilância indevida, especialmente em contextos nos quais a governança de dados ainda é incipiente (BRASIL, 2018).

Outro aspecto fundamental diz respeito à opacidade algorítmica e à ausência de mecanismos robustos de *accountability*. O uso de sistemas automatizados sem critérios claros de explicação e auditoria pode comprometer o controle social e a legitimidade das decisões públicas (CALVETTI, 2025). Para que a IA contribua efetivamente para a inclusão urbana e territorial, é indispensável que sua adoção venha acompanhada de uma governança digital democrática, que promova a escuta ativa das comunidades locais, capacite tecnicamente os servidores e assegure transparência nos processos decisórios. A confiança pública, nesse contexto, não se constrói apenas com inovação tecnológica, mas com práticas institucionais sólidas e abertas à participação social (MOREIRA, 2020).

Esse tópico, portanto, parte da premissa de que a aplicação da IA no planejamento urbano na Amazônia deve ser orientada por três eixos estruturantes: (i) o uso ético e transparente dos dados; (ii) o respeito à complexidade socioambiental do território; e (iii) o fortalecimento das capacidades locais de inovação e gestão.

4.1 EXEMPLOS DE USO DE IA NO CENÁRIO MACRO

A aplicação da IA em planejamento urbano é uma realidade consolidada em diversas cidades ao redor do mundo. De acordo com Calvetti (2025, p.1), “[...] diversas metrópoles ao redor do mundo utilizam modelos de aprendizado de máquina, visão computacional e redes neurais [...] para prever tendências urbanas e otimizar a infraestrutura existente”. Essa integração de tecnologias permite uma gestão urbana mais eficiente e responsiva, especialmente em áreas densamente povoadas.

Em Xangai, algoritmos monitoram padrões de deslocamento para ajustar, em tempo real, a frequência do transporte público. Em Amsterdã, sensores urbanos alimentam sistemas preditivos para responder mais rapidamente a enchentes. Em Tóquio, a IA é usada para simular cenários de desastres naturais e planejar evacuações. Em Helsinque e Seul, cidades de referência no uso de IA, modelos preditivos orientam decisões sobre mobilidade urbana, monitorando congestionamentos e recomendando rotas alternativas (CALVETTI, 2025).

No Brasil, os exemplos ainda são incipientes, mas demonstram potencial. Em Curitiba, o sistema de transporte público usa aprendizado de máquina para prever a lotação de ônibus e ajustar a frota de acordo com a demanda. São Paulo, por sua vez, testa ferramentas de visão computacional para monitorar o fluxo de pedestres (CALVETTI, 2025, p. 2). Essas iniciativas, embora limitadas, indicam a viabilidade da IA mesmo em contextos urbanos desiguais.

Outro estudo, de Moreira (2020, p. 1) reforça que “[...] o uso da inteligência artificial se embasa na ideia de otimizar, dinamizar e ampliar o alcance das mais diversas operações [...] no âmbito urbano, a tecnologia tem sido vista como forma de aperfeiçoar o gerenciamento destes territórios”. Em sua análise, destaca-se a associação entre IA e conceitos como cidades inteligentes, *big data*, *machine learning* e Internet das Coisas, todos centrados na eficiência de serviços urbanos e na qualidade de vida.

De forma complementar, o relatório Amazônia 2030 reconhece que o potencial da IA está “[...] intimamente ligado à melhoria da gestão urbana, desde que articulado com soluções que respeitem a complexidade ambiental, social e territorial da Amazônia Legal” (CHEIN; PROCÓPIO, 2022, p. 104).

Esses exemplos, tanto internacionais quanto nacionais, demonstram que o uso de IA para apoiar a gestão pública e o planejamento urbano é uma tendência irreversível — ainda que, para ser bem-sucedida em regiões como a Amazônia Legal, essa tecnologia deva ser adaptada à realidade local, respeitando sua infraestrutura limitada, a diversidade cultural e a fragilidade socioambiental.

4.2 POTENCIAIS APLICAÇÕES ESPECÍFICAS NA AMAZÔNIA LEGAL

A IA oferece uma gama de soluções com grande potencial para enfrentar os desafios

estruturais, territoriais e ambientais dos municípios da Amazônia Legal. A especificidade regional — marcada por urbanização fragmentada, déficits históricos de infraestrutura e dificuldades de gestão — exige aplicações sensíveis à complexidade local. A seguir, apresentam-se quatro frentes de uso estratégico da IA no contexto amazônico.

4.2.1 Análise preditiva para a expansão urbana desordenada

A rápida e, muitas vezes, informal expansão urbana observada nas bordas das cidades da Amazônia Legal pode ser monitorada com o apoio de modelos preditivos. Esses modelos, alimentados por dados censitários, imagens de satélite e padrões históricos de ocupação, permitem antecipar vetores de crescimento e orientar o ordenamento territorial. Como observado por Chein e Procópio (2022, p.63), “ [...] o crescimento urbano recente [...] foi predominantemente horizontal e disperso, gerando dificuldades na provisão de infraestrutura e na gestão urbana integrada”.

A aplicação da IA nesse caso pode auxiliar na detecção de ocupações irregulares em estágio inicial, viabilizando intervenções mais eficazes na contenção de desmatamento e no planejamento da infraestrutura urbana de forma antecipada.

4.2.2 Georreferenciamento e mapeamento de vulnerabilidades intramunicipais

Outra frente promissora consiste no uso de IA combinada a Sistemas de Informação Geográfica para mapear vulnerabilidades internas aos municípios. Tais sistemas podem identificar, por setor censitário, zonas críticas de exclusão em termos de acesso a saneamento, abastecimento de água, energia e transporte. Como afirma Silva (2017, p.88), “ [...] a análise espacial orientada por inteligência computacional [...] pode contribuir significativamente para a gestão territorial em regiões com carência de dados estruturados”.

Esse tipo de solução é particularmente útil para municípios amazônicos de grande extensão territorial e com elevada dispersão populacional, pois permite visualizações detalhadas do território e facilita a definição de prioridades de investimento.

4.2.3 Priorização automatizada de políticas públicas

A IA pode ser aplicada à priorização de investimentos públicos com base em critérios multicritério, como densidade populacional, indicadores de pobreza, cobertura de serviços e risco ambiental. A publicação da Escola Nacional de Administração Pública (CRUZ *et al.*, 2021, p. 12) destaca que “ [...] os algoritmos de IA permitem processar uma grande quantidade de dados e identificar padrões e correlações que orientam a tomada de decisões de forma mais precisa e eficiente” . No caso da Amazônia Legal, esse uso pode apoiar a definição de áreas prioritárias para regularização fundiária, expansão de serviços de saúde e educação ou mitigação de riscos em zonas alagáveis, por exemplo.

4.2.4 Planejamento urbano adaptativo com IA generativa

Ferramentas de *design* generativo e simulações computacionais baseadas em IA podem auxiliar no planejamento urbano adaptativo, especialmente em regiões ambientalmente sensíveis. Essas ferramentas geram automaticamente múltiplos cenários de uso do solo, considerando restrições ecológicas, dados climáticos e infraestrutura existente. Conforme Moreira (2020, p.3), “[...] essas aplicações promovem uma nova abordagem para o urbanismo: responsiva, adaptativa e orientada por dados”.

Na Amazônia, tal abordagem pode apoiar decisões mais sustentáveis quanto à expansão urbana, evitando a ocupação de áreas de risco ou de relevância ecológica, como margens de rios ou zonas de recarga hídrica.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise desenvolvida ao longo desta seção evidencia que a IA representa uma ferramenta estratégica para enfrentar os desafios históricos e contemporâneos das cidades amazônicas. A partir de experiências consolidadas em contextos urbanos diversos, tanto no Brasil quanto no exterior, é possível constatar que a IA tem contribuído para a melhoria da eficiência na gestão de serviços públicos, para o planejamento urbano orientado por dados e para a construção de cidades mais resilientes, adaptativas e centradas no cidadão.

No caso da Amazônia Legal, onde a urbanização se desenvolveu de forma acelerada, fragmentada e, muitas vezes, desordenada, o uso da IA pode permitir avanços concretos na identificação de vulnerabilidades territoriais, na priorização de investimentos em infraestrutura básica e na modelagem de cenários urbanos mais sustentáveis. Aplicações como a análise preditiva para expansão urbana, o georreferenciamento de setores com baixa cobertura de serviços e o planejamento baseado em simulações generativas surgem como possibilidades concretas de inovação aplicável ao contexto regional.

Entretanto, o uso de tecnologias inteligentes em territórios ambientalmente sensíveis e socialmente desiguais impõe limites éticos e normativos que não podem ser negligenciados. A qualidade e a representatividade dos dados, a transparência dos algoritmos, o respeito à privacidade dos cidadãos e a equidade na distribuição dos benefícios devem orientar qualquer política pública baseada em IA. Nesse sentido, a conformidade com a Lei Geral de Proteção de Dados e a adoção de práticas de governança digital participativa são requisitos fundamentais para a legitimidade e a eficácia dessas iniciativas.

Portanto, conclui-se que a IA pode ser um vetor de transformação urbana na Amazônia Legal, desde que sua implementação seja pautada por critérios técnicos, sensibilidade territorial e responsabilidade institucional. Mais do que uma solução tecnológica, trata-se de uma nova forma de pensar a gestão pública — orientada por dados, mas enraizada no compromisso com o bem-estar das populações locais e a preservação dos ecossistemas amazônicos.

REFERÊNCIAS

BRASIL. Lei nº 13.709, de 14 de agosto de 2018. Dispõe sobre a proteção de dados pessoais e altera a Lei nº 12.965, de 23 de abril de 2014 (Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais – LGPD). *Diário Oficial da União: seção 1*, Brasília, DF, 15 ago. 2018.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. *Estratégia Brasileira de Inteligência Artificial – EBIA*. Brasília, DF: MCTI, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/transformacaodigital/inteligencia-artificial>. Acesso em: 15 abr. 2025.

CALVETTI, Fernando. Os impactos da inteligência artificial na formulação de políticas urbanas. *Caos Planejado*, São Paulo, 3 abr. 2025. Disponível em: <https://caosplanejado.com>. Acesso em: 15 abr. 2025.

CHEIN, Flávia; PROCÓPIO, Igor Vieira. As cidades na Amazônia Legal: diagnóstico, desafios e oportunidades para urbanização sustentável. Projeto Amazônia 2030. Rio de Janeiro. *O Mundo Que Queremos*, 2022. Disponível em: <https://amazonia2030.org/publicacoes>. Acesso em: 15 abr. 2025.

CRUZ, Bruno Ferreira da *et al.* *Diagnóstico do uso de inteligência artificial no setor público: cenário brasileiro*. Brasília: ENAP, 2021. Disponível em: <https://repositorio.enap.gov.br>. Acesso em: 15 abr. 2025.

DALASTA, Ana Paula. *Explorando as dinâmicas de urbanização e de desmatamento na Amazônia Legal no período de 2000 e 2010 através de ferramentas de geoprocessamento*. São José dos Campos: INPE, 2012.

FERREIRA, Luiz César de Queiroz; FREITAS, Mariana M. de. A dimensão territorial da desigualdade socioespacial urbana no Brasil. *Cadernos Metrópole*, São Paulo, v. 17, n. 33, p. 13-35, 2015.

GOUVÊA, Denise de Campos; ÁVILA, Paulo Coelho; RIBEIRO, Sandra Bernardes. A regularização fundiária urbana na Amazônia Legal. *Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais*, v. 11, n. 2, p. 73-93, nov. 2009. Disponível em: <https://rbeur.anpur.org.br/rbeur/article/view/221/205>. Acesso em: 15 abr. 2025.

IMAZON. *Linha do tempo*: Entenda como ocorreu a ocupação da Amazônia. 2021. Disponível em: <https://amazon.org.br/imprensa/linha-do-tempo-entenda-como-ocorreu-a-ocupacao-da-amazonia/>. Acesso em: 15 abr. 2025

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Censo Demográfico 2010*: características gerais da população, religião e pessoas com deficiência. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.

JESUS, Ana Beatriz Castro de; NETO, Thiago Oliveira; SILVA, Fredson Bernadino Araújo da. Rede urbana e frentes pioneiras no Sul do Amazonas: rodovias Transamazônica (BR-230) e Manaus-Porto Velho (BR-319). *Boletim Paulista de Geografia*, n. 108, p. 131-150, 2022. Disponível em: <https://publicacoes.agb.org.br/boletim-paulista/article/view/2864/2207>. Acesso em: 15 abr. 2025.

MONTEIRO, Maurílio de Abreu; COELHO, Maria Célia Nunes. As políticas federais e reconfigurações espaciais na Amazônia. In: *Programa de Polos Agropecuários e Agromineriais da Amazônia (POLAMAZÔNIA)*. Belém: Universidade Federal do Pará, 2013.

MOREIRA, Susanna. Como a inteligência artificial pode ser aplicada aos sistemas urbanos e à sua gestão. *ArchDaily*, São Paulo, 20 abr. 2020. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/937777>. Acesso em: 15 abr. 2025.

OCDE. *The OECD AI Principles*: recommendations of the Council on Artificial Intelligence. Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development, 2020. Disponível em: <https://oecd.ai>. Acesso em: 15 abr. 2025.

RODRIGUES, Rodrigo Silvano Silva *et al.* Órgãos multilaterais e o desenvolvimento da infraestrutura urbana na Amazônia. *Sociedade e Território*, Natal, v. 36, n. 1, p. 56–75, jan./abr. 2024. Disponível em: <https://periodicos.ufrn.br/sociedadeeterritorio>. Acesso em: 15 abr. 2025.

SANTOS, Maria Eduarda *et al.* Oportunidades e riscos da aplicação de inteligência artificial em políticas públicas no Brasil. *Revista de Administração Pública*, Rio de Janeiro, v. 56, n. 2, p. 284–306, 2022.

SILVA, Idelma Santiago da. Fronteiras culturais: alteridades de migrantes nordestinos e sulistas na região de Marabá. *Revista de Estudos Amazônicos*, v. 5, n. 2, p. 45-60, 2019.

SILVA, J. B. da. *Condição de moradia dos domicílios urbanos nos municípios da Amazônia Legal segundo redes infraestruturais: 2000 e 2010*. *Novos Cadernos NAEA*, v. 18, n. 1, p. 401-420, 2015. Disponível em: [[Portal de Revistas Científicas da UFPA+1Research-Gate+1](#)] Acesso em: 15 abr. 2025.

SILVA, Márcio Antônio da; SOUZA, Rodrigo Ferreira de; OLIVEIRA, Larissa Alves de. As redes para além dos rios: urbanização e desequilíbrios na Amazônia Legal. *Nova Economia*, v. 31, n. 1, p. 145-170, 2021.

SILVA, Simone Mendes da. *Análise espacial para processos geográficos: uma abordagem aplicada à dinâmica da ocupação urbana na região Amazônica*. São José dos Campos: INPE, 2017. Disponível em: <http://mtc-m21c.sid.inpe.br>. Acesso em: 15 abr. 2025.

TAN, Puay Yok *et al.* Nature-based solutions for urban liveability and resilience in Singapore: the Tengah forest town experience. *Nature-Based Solutions*, v. 1, p. 100004, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2021.100004>. Acesso em: 15 abr. 2025.

UNESCO. *Artificial Intelligence and Cities: developing knowledge and capacity for inclusive and sustainable urban development*. Paris: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 2021. Disponível em: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000377257>. Acesso em: 15 abr. 2025.





DIAGNÓSTICO E EFICIÊNCIA DOS SERVIÇOS DE SANEAMENTO BÁSICO EM ESCOLAS DO CAMPO EM MINAS GERAIS: UM ESTUDO DE CASO A PARTIR DO PROJETO SEDE DE APRENDER

Douglas Emanuel Nascimento de Oliveira / TCE/MG¹

Silvio Cesar Santana Barreto / TCE/MG

RESUMO

A partir de dados do Censo Escolar 2021, foi constatado que milhares de escolas no Brasil enfrentam a ausência de água potável, coleta de esgoto e banheiros adequados. O Tribunal de Contas do Estado de Minas Gerais (TCE/MG), em parceria com o Ministério Público de Minas Gerais e a Companhia de Saneamento de Minas Gerais, realizou inspeções em 73 escolas de Minas Gerais selecionadas a partir de critérios de riscos, revelando que 93,15% das amostras de água coletadas eram inadequadas para consumo humano. Além disso, a maior parte das escolas não dispõe de sistema adequado de encaminhamento dos esgotos gerados, contribuindo para a contaminação do solo e das águas subterrâneas. Resíduos sólidos foram inadequadamente descartados em 60,27% das unidades. Esses problemas geram riscos à saúde e dificultam a frequência e o aprendizado dos estudantes. O estudo aqui abordado enfatiza a necessidade de ações efetivas

1 Tribunal de Contas do Estado de Minas Gerais - TCE/MG.

de gestores públicos e órgãos de controle para melhorar as condições de saneamento, garantindo direitos fundamentais, como educação e saúde. A pesquisa aponta que melhores práticas de saneamento podem reduzir doenças, aumentar a frequência escolar e beneficiar o rendimento acadêmico das crianças.

Palavras-chave: saneamento básico; escolas; água potável.

1 INTRODUÇÃO

A educação é historicamente um tema de destaque nos Poderes Legislativo e Executivo, com aumentos anuais nas dotações orçamentárias. Os desafios para os Estados e Municípios incluem a utilização eficiente e eficaz dos recursos para melhorar a qualidade da educação e a gestão pública.

Nessa linha, a Lei Federal nº 13.005/2014 (BRASIL, 2014) criou o Plano Nacional de Educação (PNE), definindo dez diretrizes para o período de 2014 a 2024. A lei promove a cooperação entre as três esferas de governo, responsabilizando gestores federais, estaduais e municipais pelo cumprimento das metas.

As principais metas do PNE incluem:

- universalizar a educação infantil;
- universalizar o ensino fundamental;
- melhorar a qualidade da educação em todas as modalidades; e
- garantir educação inclusiva para pessoas de 4 a 17 anos com deficiência.

Os gestores municipais têm implementado ações e direcionado recursos para alcançar as metas do PNE e melhorar a classificação no Índice de Desenvolvimento da Educação Básica. Lado outro, a garantia ao saneamento básico nas escolas está intrinsecamente associada à melhoria da saúde e da qualidade da educação e, por consequência, ao cumprimento das metas do PNE. Disponibilizar água potável, sistemas adequados de gestão de resíduos, sistemas de tratamento de esgoto, acessibilidade e uma boa infraestrutura física é uma premissa de uma boa gestão de recursos públicos e corrobora a melhoria da qualidade da educação. Nessa linha, o saneamento básico está intrinsecamente relacionado à saúde e, por consequência, à qualidade da educação, uma vez que a água contaminada provoca uma série de doenças gastrointestinais, que levam ao afastamento das crianças das atividades escolares e contribuem para a distorção idade-série.

Dada a relevância social do tema e a necessidade de contribuir para a universalização do acesso aos serviços de saneamento básico nas escolas públicas do Estado e, por consequência, da melhoria da qualidade de ensino, o Tribunal de Contas do Estado de Minas Gerais (TCE/MG) aderiu ao projeto Sede de Aprender Brasil, uma iniciativa que busca

prioritariamente garantir água potável aos estudantes da educação básica do país. O programa foi idealizado pelo Ministério Público de Alagoas. Em 2022, um convênio entre a Associação dos Membros dos Tribunais de Contas do Brasil (ATRICON), o Instituto Rui Barbosa e o Instituto do Meio Ambiente do Estado de Alagoas, com o apoio do Tribunal de Contas alagoano, tornou o projeto nacional, permitindo aos Estados participantes o compartilhamento de informações.

O objetivo do projeto no âmbito do TCE/MG, no tocante ao saneamento básico, foi levantar as condições de fornecimento e potabilidade da água, encaminhamento dos esgotos gerados nas unidades e descarte de resíduos em escolas mineiras. Para tanto, foi firmado um Termo de Cooperação Técnica com o Ministério Público de Minas Gerais e com a Companhia de Saneamento de Minas Gerais.

Assim, o projeto Sede de Aprender surge como uma iniciativa estratégica para melhorias no saneamento básico de escolas em áreas vulneráveis. Ele atua como um catalisador de mudança. Ao fornecer acesso à água potável, a banheiros limpos e à infraestrutura de saneamento adequada, o Sede de Aprender promove um ambiente escolar mais higiênico e seguro. Isso tem um impacto direto e positivo na saúde dos alunos, reduzindo a incidência de doenças e, conseqüentemente, as faltas escolares. Com menos interrupções no calendário letivo, as crianças podem se concentrar no aprendizado, melhorando seu desempenho acadêmico.

2 SANEAMENTO BÁSICO E EDUCAÇÃO

Conforme o art. 2º da Lei Federal nº 11.445/2007, os serviços públicos de saneamento básico serão prestados tendo como princípios fundamentais:

I - universalização do acesso e efetiva prestação do serviço;

II - integralidade, compreendida como o conjunto de atividades e componentes de cada um dos diversos serviços de saneamento que propicie à população o acesso a eles em conformidade com suas necessidades e maximize a eficácia das ações e dos resultados;

III - abastecimento de água, esgotamento sanitário, limpeza urbana e manejo dos resíduos sólidos realizados de forma adequada à saúde pública, à conservação dos recursos naturais e à proteção do meio ambiente;

(...)

V - adoção de métodos, técnicas e processos que considerem as peculiaridades locais e regionais;

(...)

XI - segurança, qualidade, regularidade e continuidade;

(...)

XVI - prestação concomitante dos serviços de abastecimento de água e de esgotamento sanitário (BRASIL, 2007).

Nota-se, assim, a relevância dos serviços de abastecimento de água, esgotamento sanitário e manejo de resíduos sólidos no âmbito do saneamento básico. Nesse contexto, conforme dados do levantamento da ATRICON (2022), com base no Censo Escolar 2021 (BRASIL, 2022), em que foram analisadas informações de 138 mil escolas e de 38 milhões de alunos, pelo menos 5,2 mil (3,78%) escolas não possuíam banheiros, 8,1 mil (5,84%) não tinham acesso à água potável e 7,6 mil (5,53%) não tinham coleta de esgoto. Outros 3,5 mil (2,59%) estabelecimentos de ensino não dispunham de abastecimento de água.

O impacto direto da falta de saneamento sobre a saúde pública é preocupante, pois incide, de forma mais significativa, sobre as crianças, os organismos mais frágeis e suscetíveis à contração de doenças relacionadas ao saneamento ambiental inadequado. Entre essas doenças, que causam elevadas taxas de mortalidade infantil em diversos países do mundo, estão a diarreia e a malária.

A principal consequência do baixo acesso aos serviços de saneamento básico é o impacto na saúde da população, uma vez que regiões deficientes de instalações sanitárias geram condições propícias para a proliferação de inúmeras doenças infecto-parasitárias. É consolidado na literatura o efeito positivo da presença de saneamento básico adequado sobre a redução nas taxas de mortalidade infantil. No entanto, o efeito multiplicador causado pelo saneamento sobre a saúde dos indivíduos também pode ser avaliado por meio de indicadores epidemiológicos (SCRIPTORE *et al.*, 2015).

A saúde deficiente é uma das razões para a baixa frequência escolar, com consequente impacto em outros indicadores de rendimento escolar, tais como abandono e distorção idade-série. De acordo com Banerjee e Duflo (2011 *apud* SCRIPTORE *et al.*, 2018), entre as prováveis explicações para a evasão escolar infantil em vários países do mundo, além da falta de exigência dos pais no sentido de obrigar as crianças a continuarem os estudos, está a falta de estímulo para frequentarem as escolas, a qual pode estar associada a um estado de saúde comprometido. Logo, a falta de saneamento básico em escolas reflete diretamente na saúde dos alunos, impacta o aprendizado e pode levar a dificuldades no desenvolvimento das crianças.

Em um estudo desenvolvido por Miguel e Kremer (2004 *apud* SCRIPTORE *et al.*, 2018), ficou evidenciado que a evasão escolar é um efeito associado a doenças. Segundo esse estudo, há um efeito positivo da medicação contra helmintos (vermes) intestinais, alojados em crianças quenianas, sobre a frequência escolar. Os autores ressaltam a importância da adequada provisão de bens públicos de saneamento, uma vez que a transmissão de tais agentes patogênicos ocorre pela matéria fecal não tratada ou não disposta

corretamente. Ou seja, oferecer tais serviços é uma forma de impactar positivamente o desempenho das crianças na escola (SCRIPTORE *et al.*, 2018).

3 METODOLOGIA

Na fase de planejamento, a partir de dados do Censo Escolar de 2021, foram encaminhados questionários aos gestores de 156 (cento e cinquenta e seis) escolas indicadas como sem água potável ou sem abastecimento de água, com o objetivo de validar as informações e estabelecer critérios de riscos para a delimitação do escopo. As respostas ao questionário evidenciaram a precariedade e a ausência de saneamento básico em diversas unidades escolares, tais como:

- captação e consumo de água de nascente (minadouro);
- captação e consumo de água de poço rudimentar, sem análise prévia da qualidade da água para consumo;
- preparo de alimentos com água contaminada;
- captação e consumo de água de rio; e
- lançamento do esgoto em fossas negras, sem tratamento adequado.

Destaca-se o depoimento do responsável por uma das unidades:

A água disponibilizada é salobra, contém muito calcário. A escola não tem caixa d'água própria. Utiliza a caixa comunitária da comunidade. Os banheiros estão todos com entupimentos e com mau cheiro. Apenas 01 banheiro feminino e 01 banheiro masculino para atender a aproximadamente 150 alunos.

Constatou-se, também, que a maior parte das escolas sem água potável estavam localizadas nas regiões dos vales do Jequitinhonha e Mucuri e no norte de Minas Gerais, bem como em ambientes rurais, sendo comumente denominadas escolas do campo.

A partir dessas informações, foi possível estabelecer critérios de priorização e de seleção de municípios que possuíam a maior quantidade de escolas e unidades em situação crítica, para uma avaliação por meio de inspeção física e coleta de água para ensaio microbiológico e análise de parâmetros físico-químicos em laboratório.

Quanto à potabilidade da água, Brasil (2021) estabelece por meio da Portaria GM/MS nº 888 de 04/05/2021 do Ministério da Saúde sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano, distribuída coletivamente através de sistema de abastecimento de água, solução alternativa coletiva, individual ou carros pipas. Além disso, o documento define responsabilidades e competências gerais e específicas dos entes federados quanto à vigilância da qualidade da água e estabelece

penalidades aos responsáveis que não observarem as determinações da Portaria. Ela dispõe, ainda, sobre parâmetros e padrões microbiológicos para a determinação do padrão de potabilidade e apresenta como exigência para o consumo de água de manancial superficial que esta seja submetida ao processo de filtração. Como critério, considerou-se que as escolas fiscalizadas adotam a solução alternativa coletiva de abastecimento de água para consumo humano.

O Anexo 1 da Portaria apresenta a tabela de padrão bacteriológico da água para consumo humano, tendo como parâmetros os coliformes totais e da *Escherichia coli*. Segundo esse documento, a amostra de 100 mL de água coletada atende ao padrão bacteriológico para consumo humano, desde que não seja identificada a presença de coliformes totais na saída do tratamento, nem a presença de *Escherichia coli* no sistema de distribuição ou nos pontos de consumo. A presença dessa bactéria, por sua vez, é considerada um indicativo de contaminação fecal.

A ausência de coliformes totais e da *Escherichia Coli* no ensaio microbiológico da amostra coletada é um indicativo de potabilidade, porém há a necessidade de confirmação através da análise de parâmetros físico-químicos, tais como cor aparente, dureza total, ferro total, fluoreto, manganês total, nitrato, pH e turbidez. De acordo com a retro-mencionada portaria, os limites máximos desses indicadores são:

- cor aparente - 15 uH;
- dureza total - 300 mg/L;
- ferro total - 0,3 mg/L;
- fluoreto - 1,5 mg/L;
- manganês total - 0,1 mg/L;
- nitrato - 10 mg/L; e
- turbidez - 5 uT (NTU).

As condições de esgotamento sanitário foram avaliadas por meio de inspeção física, observando-se a existência de rede coletora de esgoto ou tanque séptico, ou a disposição dos dejetos maneira inadequada.

Por meio da inspeção física e da entrevista com os responsáveis pelas unidades escolares, foi avaliado, ainda, o encaminhamento dos resíduos sólidos gerados nessas unidades escolares, verificando-se a existência ou não de coleta desses resíduos.

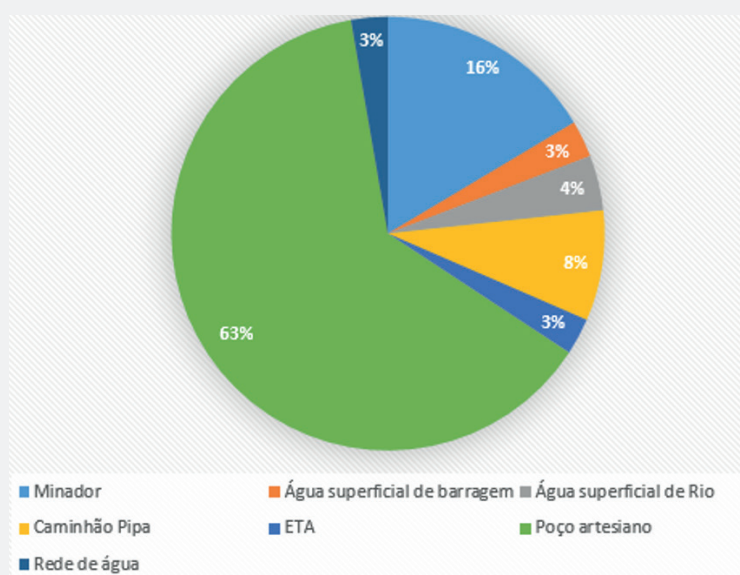
No total, foram vistoriadas 73 (setenta e três) unidades escolares em 18 (dezoito) municípios de Minas Gerais entre novembro de 2023 e maio de 2024, quais sejam: Teófilo Otoni, Bertópolis, Santa Helena de Minas, Cachoeira de Pajeú, Pedra Azul, Medina, Santa Cruz de Salinas, Itinga, Montes Claros, Japonvar, São Francisco, Icarai de Minas, Januária, Pedras de Maria da Cruz, São João das Missões, Santo Antônio do Retiro, Seranópolis de Minas e Francisco Sá.

4 RESULTADOS

Quanto aos métodos de captação de água existentes nas unidades escolares vistoriadas, constatou-se a maior incidência de poços artesianos (63%), minadouros (16%), caminhões-pipa (8%) e água superficial de rio (4%), além de outros métodos indicados na Figura 1.

Na análise dos resultados dos ensaios microbiológicos realizados nas amostras de água coletadas nas 73 (setenta e três) unidades escolares vistoriadas, constatou-se que 93,15% não apresentam condições de potabilidade, sendo que 87,67% das amostras apresentaram coliformes totais. A bactéria *Escherichia Coli* foi encontrada em 43,84% das amostras coletadas, indicando a presença de coliformes fecais. A presença desses microrganismos nas amostras de água representa um risco para a saúde dos usuários das unidades, uma vez que são agentes causadores de diversas doenças, como diarreia, vômitos, cólicas abdominais, febre, gastroenterite e cólera.

Figura 1 - Métodos de captação de água observados nas escolas vistoriadas



Fonte: os autores.

Ressalta-se que somente 12,32% das amostras de água coletadas apresentaram ausência tanto de coliformes totais quanto de *Escherichia Coli*, mas 44,44% dessas apresentaram parâmetros físico-químicos acima dos limites estabelecidos na Portaria GM/MS nº 888 de 04/05/2021 do Ministério da Saúde. Logo, somente 6,85% das amostras de água coletadas podem ser consideradas adequadas para consumo humano, o que equivale a tão somente 5 (cinco) escolas das 73 (setenta e três) vistoriadas.

Quanto à eficiência dos métodos de captação de água empregados, observa-se um baixo índice de potabilidade para águas coletadas por meio de poços artesianos e mina-

douros, que são os principais métodos empregados nas escolas de campo. Notou-se que apenas em uma das escolas que emprega algum desses dois métodos a amostra de água foi considerada adequada para consumo humano.

Salienta-se que, na captação por minadouro, que consiste em uma nascente de córrego ou olho d'água conforme ilustrado na Figura 2, a incidência de indicativo de coliformes fecais foi de 66,67%, enquanto a água coletada diretamente de rios apresentou 100% de incidência de indicativo de coliformes fecais, o que demonstra os riscos associados a esses tipos de captação.

Figura 2 - Exemplo de minadouro



Fonte: os autores.

As amostras coletadas em rede de água urbana, em que pese não terem apresentado a ocorrência de coliformes totais ou *Escherichia Coli*, apresentaram ferro total e manganês total acima dos limites fixados na Portaria GM/MS nº 888/2021.

Contatou-se que a captação a partir de Estação de Tratamento de Água foi a que apresentou maior eficiência, uma vez que 100% das amostras obtidas a partir desse sistema foram consideradas adequadas para consumo humano.

Diante desses resultados, nota-se que ausência de potabilidade pode ser explicada por fatores como a captação inadequada de água diretamente de rios, minadouros ou de poços artesianos sem qualquer tipo de tratamento, situação encontrada em 83,56% das escolas vistoriadas. Outrossim, constatou-se a presença de fossas negras em 93,15% da unidades, que consistem em escavações no terreno em que os dejetos são lançados diretamente sobre o solo, infiltrando e contaminando o subsolo e as águas subterrâneas do lençol freático que abastecem os poços existentes nas proximidades. Ademais, a situação observada na maior parte das escolas facilita a proliferação de vetores e contribui para a disseminação de doenças infecciosas.

Constatou-se, ainda, que 60,27% das unidades não dispõem de coleta de resíduos sólidos, realizando a queima, a céu aberto, dos resíduos gerados, conforme ilustra a Figura 3.

Figura 3 - Local de queima de resíduos em escola do campo vistoriada



Fonte: os autores.

As situações observadas foram submetidas aos gestores municipais por meio de relatórios de auditorias operacionais.

Destaca-se a atuação do TCE/MG no âmbito da Auditoria Operacional nº 1.167.044, relativa a 21 (vinte e uma) escolas do município de Teófilo Otoni. Nessa fiscalização, os auditores detectaram que 20 (vinte) das 21 (vinte e uma) escolas possuíam água imprópria para consumo humano, sendo coletada de fontes como minadouros, poços rudimentares ou poços particulares sem a devida outorga do Instituto Mineiro de Gestão das Águas. Em nove escolas, foram encontrados coliformes fecais na água, o que aumenta o risco de doenças de veiculação hídrica.

Outrossim, ainda no âmbito da Auditoria Operacional nº 1.167.044, todas as escolas inspecionadas utilizavam fossas negras para descartes do esgoto sanitário. Notaram-se, ainda, nessa fiscalização, problemas relacionados à infraestrutura, incluindo telhados danificados, infiltrações, mofo nas paredes e pisos danificados, além da falta de acessibilidade e do alvará da vigilância sanitária, bem como armazenamento inadequado de alimentos.

Por meio de Acórdão prolatado no dia 25/09/2024 em sessão do Tribunal Pleno, a Corte de Contas mineira entendeu que:

1. Os efeitos deletérios da ausência de saneamento básico nas escolas públicas ensejam a involução do sistema de ensino brasileiro, notadamente quando as premissas da política educacional se dissociam daquelas da política de infraestrutura.
2. A escola deve ser um ambiente seguro e acolhedor. Instalações e infraestrutura dignas, boas condições de trabalho para os professores e demais colaboradores da educação, merenda de qualidade, corpo de docentes qualificado, mecanismos eficazes de gestão do ensino e a salvaguarda da higidez das novas gerações de

estudantes proporciona maior longevidade acadêmica na rede pública.

3. A preservação dos mananciais, a apropriada eliminação dos efluentes dos esgotos, o equilíbrio dos ecossistemas, a adoção de hábitos mais conscientes e a esmerada governança ambiental constituem sustentáculos do desenvolvimento sustentável (TRIBUNAL DE CONTAS DO ESTADO DE MINAS GERAIS, 2024).

Outrossim, a Corte de Contas mineira, em relação ao sistema de tratamento de esgoto, determinou ao município de Teófilo Otoni que implantasse “[...] fossas sépticas ou outra solução de descarte de dejetos ambientalmente adequada nas 21 escolas rurais visitadas. Posteriormente, adotar medidas de proteção das áreas das fossas e desativação das fossas negras existentes” e, em relação à água potável, disponibilizasse

[...] água para consumo humano que atenda aos padrões de potabilidade estabelecidos na Portaria GM/MS n. 888 do Ministério da Saúde, mediante poços artesianos, água comercial devidamente qualificada, ou outra forma de ensaios periódicos que atestem a qualidade e a potabilidade da água disponibilizada aos usuários dos estabelecimentos escolares, bem como sistema de filtragem nos pontos de consumo [...] (TRIBUNAL DE CONTAS DO ESTADO DE MINAS GERAIS, 2024).

Assim, há expectativas de que seja alcançada uma melhoria nas condições de saneamento básico em escolas por meio da ação dos órgãos de controle. Contudo, a situação observada nas unidades vistoriadas por auditores alerta para a necessidade de atuação efetiva dos responsáveis pela implementação da política pública. Espera-se que a correção das impropriedades observadas no saneamento básico das escolas avaliadas reflita diretamente na melhoria da frequência escolar e no aprendizado dos alunos, haja vista o efeito benéfico na saúde.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Saneamento básico e educação são políticas públicas que, cada vez mais, demandam ações por parte dos gestores públicos com vistas a garantir a universalização daquele e a efetividade desta. Nesse contexto, a ausência de saneamento básico tende a ser um bloqueio para a efetividade da educação, haja vista os efeitos na saúde dos alunos, impactando a frequência escolar e, conseqüentemente, o aprendizado.

Por meio da pesquisa que originou este trabalho, buscou-se avaliar as condições de abastecimento de água, encaminhamento de esgotos e descarte de resíduos sólidos em

uma amostra de 73 (setenta e três) escolas de Minas Gerais selecionadas a partir de critérios de risco. Os resultados indicaram que 93,15% das escolas vistoriadas apresentam água considerada imprópria para consumo humano, sendo que, em 43,84% das amostras coletadas, há um indicativo da presença de coliformes fecais. Tal situação gera riscos para a saúde dos usuários das unidades, haja vista a presença de agentes causadores de doenças como diarreia, vômitos, cólicas abdominais, febre, gastroenterite e cólera.

Os principais sistemas de captação observados nas unidades foram os minadouros e poços artesanais, que, juntos, representam 79% da amostra. Contudo, tais sistemas apresentam uma elevada ineficiência, uma vez que apenas uma das escolas com esse tipo de captação teve a amostra de água coletada considerada apropriada para consumo.

Notou-se, ainda, a existência de fossas negras em 93,15% das escolas, o que corrobora a contaminação do solo e do lençol freático, além da proliferação de vetores e disseminação de doenças infecciosas. Outrossim, 60,27% das unidades não dispõem de coleta de resíduos sólidos.

Diante desse cenário, nota-se a existência de uma situação alarmante em relação ao saneamento básico em escolas, principalmente as localizadas fora do ambiente urbano, em que as condições de abastecimento de água e coleta de esgoto e de resíduos sólidos são dificultadas. Assim, faz-se necessária a implementação de ações por parte de gestores públicos e órgãos de controle com o objetivo de identificar soluções que possam garantir o acesso aos direitos fundamentais da educação e do saneamento básico.

REFERÊNCIAS

ATRICON. *Problemas de infraestrutura nas escolas afetam pelo menos 14,7 milhões de estudantes*. 2022. Disponível em: <https://atrimon.org.br/problemas-de-infraestrutura-nas-escolas-afetam-pelo-menos-147-milhoes-de-estudantes/>. Acesso em: 8 abr. de 2025.

BRASIL. Constituição (1988). *Constituição da República Federativa do Brasil*: promulgada em 5 de outubro de 1988: atualizada até a Emenda Constitucional n. 20, de 15-12-1998. 21. ed. São Paulo: Saraiva, 1999.

BRASIL. Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira (INEP). *Censo Escolar da Educação Básica 2021*: notas estatísticas. Brasília, DF: INEP, 2022.

BRASIL. Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 8 jan. 2007. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm. Acesso em: 8 abr. 2025.

BRASIL. Lei nº 13.005, de 25 de junho de 2014. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 26 jun. 2014. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2011-2014/2014/lei/l13005.htm. Acesso em: 8 abr. 2025.

BRASIL. Ministério da Saúde. Gabinete do Ministro. *Portaria nº 888*, de 4 de maio de 2021. Brasília, DF, 4 abr. 2021. Disponível em: https://bvsmms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2021/prt0888_07_05_2021.html. Acesso em: 8 abr. 2025.

SCRIPTORE, Juliana Souza; AZZONI, Carlos Roberto; MENEZES FILHO, Naércio Aquino. Os impactos do saneamento básico sobre a educação: usando a privatização como variável instrumental. 2018, *Anais do Encontro Nacional de Economia*. Niterói: ANPEC, 2018.

SCRIPTORE, Juliana Souza; AZZONI, Carlos Roberto; MENEZES FILHO, Naércio Aquino. *Saneamento básico e indicadores educacionais no Brasil*. São Paulo: Universidade de São Paulo (FEA-USP), 2015.

TRIBUNAL DE CONTAS DO ESTADO DE MINAS GERAIS, 25 de set. de 2024. *Diário Oficial de Contas*, Belo Horizonte, MG, 10 de out. de 2024. Disponível em: <https://tcnotas.tce.mg.gov.br/TCJuris/Nota/BuscarArquivo/3818863>. Acesso em: 8 abr. de 2025.



VERIFICAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO USO DE IA EM AUDITORIAS: O CASO DE UMA OBRA EM TEOTÔNIO VILELA, ALAGOAS

Edson Kurokawa / TCU²

RESUMO

O artigo apresenta os resultados de um case de auditoria em editais e licitações da Companhia de Desenvolvimento do Vale do São Francisco (CODEVASF) realizada no ano de 2023. A fiscalização foi conduzida sobre o edital e o orçamento utilizado no processo de licitação municipal com recursos federais da CODEVASF para a construção de uma elevatória e uma adutora de água bruta no município de Teotônio Vilela, Alagoas. Durante a análise do orçamento utilizado no processo licitatório, foram identificados indícios de sobrepreço decorrentes do superdimensionamento da adutora a ser licitada e, posteriormente, de uma possível ocorrência de superfaturamento por superdimensionamento na execução. Após questionamentos técnicos realizados pela equipe de auditoria responsável aos gestores do projeto e da licitação, foi confirmada a ocorrência da irregularidade apontada, o que resultou no cancelamento do edital para sua reformulação e correção. O presente artigo propõe verificar, utilizando três ferramentas de inteligência

2 Tribunal de Contas da União - TCU.

artificial (IA) disponíveis para as equipes do Tribunal de Contas da União (TCU), se é possível detectar, pelos modelos de IA, as irregularidades identificadas no case real. A verificação será realizada por meio de um *prompt* padronizado com o objetivo de avaliar as respostas e a capacidade dessas ferramentas de gerar sinalizações de alerta (*red flags*) para as irregularidades detectadas, a fim de compará-las com os resultados encontrados na auditoria do TCU.

Palavras-chave: edital; orçamento; adutora; IA; predição; *prompt*.

1 INTRODUÇÃO

No âmbito do processo TC nº 005.920/2022-1, foi realizada a Auditoria Contínua em Editais e Orçamentos da CODEVASF. Entre os diversos editais e orçamentos analisados, destacou-se o projeto de Ampliação e Melhorias no Sistema de Abastecimento de Água do Município de Teotônio Vilela, em Alagoas. A obra previa a construção de um novo sistema de adução de água bruta, incluindo uma estação de bombeamento e uma adutora com vazão projetada de 100 m³/hora.

Durante a etapa de avaliação do edital e do orçamento, a equipe de auditoria identificou indícios de sobrepreço, com base nos dados técnicos presentes na planilha orçamentária e no edital. Esses indícios estavam relacionados ao superdimensionamento da tubulação e, conseqüentemente, do sistema de bombeamento e da elevatória.

Os indícios de irregularidades foram detalhados e fundamentados com base nos dados orçamentários e em um referencial teórico clássico de dimensionamento de tubulações, o *Manual de hidráulica*, do Professor Azevedo Neto. Esse material foi utilizado para embasar a argumentação técnica e gerar indicadores que sustentassem os apontamentos da auditoria.

Após demonstrar as inconsistências técnicas e solicitar esclarecimentos, os gestores responsáveis pela obra e pelo projeto do sistema de adução de Teotônio Vilela admitiram a ocorrência de erros nos cálculos e no dimensionamento da tubulação. Esses erros resultaram no superdimensionamento da adutora e da elevatória. Portanto, os responsáveis decidiram pelo cancelamento do processo licitatório para que fossem realizadas as devidas correções e reformulações no projeto.

O objetivo deste artigo é avaliar se os passos utilizados pela equipe humana para identificar os indícios de sobrepreço no orçamento e potencial superfaturamento na execução podem ser replicados por um modelo de IA. A proposta busca verificar se, em situações semelhantes, seria possível dispensar o conhecimento especializado em hidráulica por parte da equipe de auditoria. Nesse cenário, os integrantes da equipe poderiam apenas levantar as informações básicas e fornecê-las, por meio de um *prompt* padrão para que a IA analisasse os dados orçamentários e gerasse alertas de irregularidades (*red flag*) ou não.

2 OBJETIVO

O objetivo mais específico deste artigo é avaliar se três modelos de IA são capazes de replicar a análise realizada por auditor humano, sinalizando, por meio de *red flags*, potenciais irregularidades em uma situação real de auditoria de editais relacionados a um projeto de adutora.

2.1 LIMITAÇÕES

Este artigo apresenta um caso real, focando exclusivamente nos passos necessários para a identificação de *red flags* com base em informações técnicas básicas presentes no orçamento, e, com base nesse caso, verifica o potencial de uso da IA em auditorias. Não é objetivo deste trabalho detalhar aspectos técnicos hidráulicos ou todos os passos envolvidos no dimensionamento de uma adutora, uma vez que essa atividade é de competência de profissionais especializados na área, além de necessitar de maior referencial técnico e de informações do que está sendo discutido. O foco está na capacidade das ferramentas de IA para identificar e sinalizar irregularidades a partir de dados técnicos simples, levantados a partir do edital e do orçamento, sem que haja a necessidade de conhecimento técnico aprofundado por parte da equipe de auditoria.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica tem como objetivo apresentar, de forma sintética, o conceito de superfaturamento por superdimensionamento, destacando suas características e implicações. Além disso, serão descritos os principais procedimentos realizados no âmbito do processo TC nº 005.920/2022-1 que serviram de base para a análise e a identificação de irregularidades e que serão objeto da verificação da eficiência do uso de IA em auditorias.

Por fim, a revisão também aborda as três ferramentas de IA que foram testadas neste estudo, detalhando suas funcionalidades e o potencial de aplicação na identificação de *red flags* em situações semelhantes às analisadas no caso real.

3.1 SUPERFATURAMENTO POR SUPERDIMENSIONAMENTO

Baeta (2012) define superfaturamento como “[...] um conjunto de práticas que tornam, injustamente, mais onerosa a proposta ou a execução de contrato para o contratante”. Entre as diversas modalidades de superfaturamento, este artigo técnico foca a análise do superfaturamento por superdimensionamento, abordando suas características e implicações no contexto de auditorias em editais e orçamentos.

O Instituto Brasileiro de Auditoria de Obras Públicas, por meio da Orientação Técnica OT – IBR 005/2012, define o superfaturamento por superdimensionamento como “[...] o dano ao erário caracterizado pelo superdimensionamento de projetos, estipulan-

do dimensões, quantidades e/ou qualidades de materiais ou serviços além das necessárias, segundo práticas e normas de engenharia vigentes à época do projeto”.

Identificar o superfaturamento causado por superdimensionamento em obras públicas é uma tarefa complexa e desafiadora, que exige atenção e rigor técnico durante as auditorias. Lopes A. *et al.* (2021) esclarecem que “[...] faz-se necessário o desenvolvimento de métodos de cálculo do superfaturamento confiáveis e testáveis, de modo a propiciar que toda a sociedade possa avaliar eventuais desvios em valores pagos e serviços prestados em contratações públicas”.

Nesse contexto, o uso de modelos e técnicas apoiados por IA pode ser uma ferramenta relevante para alcançar o objetivo de identificação e/ou de previsão de potenciais superfaturamentos em obras públicas. Essa abordagem permite que potenciais irregularidades de superfaturamento sejam detectadas em etapas anteriores ao início da execução da obra, contribuindo para evitar sua ocorrência e, conseqüentemente, evitar o desperdício de recursos públicos.

3.2 AUDITORIA EM EDITAIS E ORÇAMENTOS

No âmbito do processo TC nº 005.920/2022-1, foi realizada Auditoria Contínua em Editais e Orçamentos da CODEVASF. Esse modelo de auditoria contínua tem como objetivo avaliar editais em estágio de publicação, buscando identificar potenciais não conformidades nessa etapa. A intenção é identificar possíveis problemas de forma antecipada e implementar as correções necessárias antes da etapa de contratação e do encerramento do processo licitatório. Essa abordagem busca garantir mais eficiência e conformidade, prevenindo falhas e irregularidades de maneira proativa.

Para alcançar esses objetivos, a equipe de auditoria utilizou ferramentas automatizadas para varredura de convênios com recursos disponibilizados no Sistema de Gestão de Convênios e Contratos de Repasse (SICONV³). Além disso, foi utilizado o Analisador de Licitações, Contratos e Editais (ALICE) para identificar editais recentemente publicados e o Sistema de Análise de Orçamentos (SAO) para avaliar e analisar, de forma detalhada, os orçamentos que compõem os processos licitatórios.

Um dos editais analisados nesse processo de auditoria contínua foi o projeto de Ampliação e Melhorias no Sistema de Abastecimento de Água do Município de Teotônio Vilela (AL), com valor total estimado em, aproximadamente, R\$ 10 milhões.

Durante a avaliação orçamentária, realizada com o apoio do SAO, verificou-se que a tubulação da adutora era o item mais relevante da curva ABC, representando quase 60% do custo total da obra. Outro serviço significativo presente no orçamento, e o segundo mais relevante, refere-se aos custos dos equipamentos, conexões e instalações civis, hi-

³ Atual plataforma de transferência de recursos da União para estados e municípios, conhecida como [Transfere.gov](https://www.transfere.gov.br).

dráulicas, mecânicas e elétricas que compõem a estação elevatória de bombeamento e que representavam em torno de 18% do valor total. Esses dois itens mais significativos foram analisados com atenção especial, devido à sua relevância no orçamento e ao seu impacto no custo total do projeto.

É importante destacar que qualquer alteração no item mais relevante do projeto, como o diâmetro da adutora, terá impacto financeiro nos demais componentes hidráulicos, elétricos e mecânicos que integram a estação elevatória e/ou vice-versa. Por exemplo, uma tubulação superdimensionada pode levar ao superdimensionamento de todos os outros itens da estação elevatória, como equipamentos, conexões e sistemas de bombeamento, resultando em custos adicionais desnecessários.

Os dados técnicos associados, extraídos do orçamento, são apresentados a seguir para análise detalhada nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 – Excerto de dados técnicos do conjunto motor-bomba extraídos do orçamento da licitação.

PLANILHA ORÇAMENTÁRIA											
AMPLIAÇÃO E MELHORIAS NO SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA DO MUNICÍPIO DE TEOTÔNIO VILELA - CAPTAÇÃO ROCHEIRA											
Sistema Adutor de Água Tratada - Teotônio Vilela											
										BDI - SERVIÇOS = 24,18%	
										BDI- MATERIAIS CONTRATADO = 15,28%	
Item	Serviço/ Material (1/2)	Insumo/ Serviço	Banco	Código	Descrição dos Serviços	Unid.	Quant.	Custo Unit.	Preço Unit.	Preço total	
Bombeamento sob flutuante											
3.1.47	2	Insumo		Cotação	Captação bomba anfíbia tipo monobloco (água tratada): VAZÃO: 100M ³ /H, PRESSÃO:110 M.C.A - 75CV	N7	UND	2,00	345.575,00	398.378,86	796.757,72
3.1.61	1	Serviço		Comp-10	Conexões - Aço Carbono - 300mm	UND	UND	41,00	1.894,31	2.352,36	96.446,76
3.1.62	2	Insumo		Cotação	Tubo PEAD, SDR11, PN16, DN250MM, COMPRIMENTO 6000MM, espessura 22,7mm, Extremidade flangeada ANSIB 16,5 lbs	M	M	24,00	1.389,25	1.601,53	38.436,72
3.1.63	1	Serviço		Comp-11	Montagem do Tubo PEAD	M	M	24,00	443,60	550,86	13.220,64
Sub-total								Subtotal de equipamentos			1.930.155,20
3.2					Linha de recalque						

Fonte: o autor.

Tabela 2 – Excerto de dados técnicos da tubulação de recalque extraídos do orçamento da licitação.

PLANILHA ORÇAMENTÁRIA											
AMPLIAÇÃO E MELHORIAS NO SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA DO MUNICÍPIO DE TEOTÔNIO VILELA - CAPTAÇÃO ROCHEIRA											
Sistema Adutor de Água Tratada - Teotônio Vilela											
										BDI - SERVIÇOS = 24,18%	
										BDI- MATERIAIS CONTRATADO = 15,28%	
Item	Serviço/ Material (1/2)	Insumo/ Serviço	Banco	Código	Descrição dos Serviços	Unid.	Quant.	Custo Unit.	Preço Unit.	Preço total	
Fornecimento de materiais e equipamentos											
3.2.28	2	Insumo		Cotação	Tubo PVC DEFOFO, JEL, 1,6 MPA, DN 300MM, PARA REDEDE AGA (NBR 7665)	N4	m	4.910,00	889,58	1.025,51	5.035.254,10
3.2.29	2	Insumo		Cotação	Tribulação e Aço Carbono com revestimento em aço zincado, epóxi ou similar com acoplamento rápido (acoplamento K, Globoall, ou similar). Incluso conexões e anéis de vedação. DN-3000MM, PN-166.	M	M	24,00	1.389,25	1.601,53	38.436,72
Sub-total											6.0880.525,06

Fonte: o autor.

De acordo com os dados orçamentários, está prevista a construção de uma adutora com 4.910 metros de comprimento fabricada em PVC DeFoFo PN-16, com o diâmetro de 300 mm e vazão de recalque de 100 m³/hora. Além disso, a altura manométrica foi especificada em 110 metros de coluna de água (mca), e a potência do equipamento foi definida em 75 Cv.

Com base nesses dados, a equipe determinou três indicadores técnicos para uma avaliação inicial:

- **velocidade média da água no interior da tubulação:** calculada em 0,393 m/s.
- **diâmetro econômico da tubulação:** estimado pela fórmula de Bresse, entre 160 mm e 200 mm, considerando-se os coeficientes $k_1 = 1$ e $k_2 = 1,2$.
- **perda de carga unitária e total na tubulação:** calculada com a equação de Hazen-Williams, resultando em 0,000531 m/m e aproximadamente 2,6 metros de coluna de água (mca).

A literatura técnica, segundo Azevedo Netto (2012), recomenda que, em tubulações forçadas, a velocidade do líquido (água) deve estar entre 0,66 m/s e 2,4 m/s e sugere a velocidade econômica em torno de 1,5 m/s. Velocidades abaixo de 0,66 m/s podem indicar tubulações com diâmetro acima do necessário, tornando o projeto antieconômico. Além disso, velocidades muito baixas podem causar sedimentação de resíduos no interior da tubulação de água bruta.

Por outro lado, diversos autores, como Guedes (2019) e Tsutya (2006), explicam que velocidades acima da faixa de 2,4 m/s a 3,0 m/s resultam em tubulações com diâmetro reduzido e menores custos, mas geram atritos significativos entre o líquido e as paredes da tubulação. Isso exige equipamentos com pressões superiores para vencer o atrito, aumentando os custos operacionais, especialmente os relacionados ao consumo de energia elétrica para o recalque do líquido.

Segundo Guedes (2019), a faixa ideal de velocidade da água no interior da tubulação recomendada está entre 1,0 m/s e 2,0 m/s. Portanto, o dimensionamento com velocidade de 0,393 m/s está bem abaixo das condições de velocidades mínimas aceitáveis, indicando que a adutora com diâmetro de 300 mm está, possivelmente, superdimensionada, conforme os valores econômicos calculados pela fórmula de Bresse.

Além disso, a perda de carga total de aproximadamente 2,6 mca é muito pequena em comparação com a altura manométrica total de 110 mca definida no orçamento, especificamente, nos dados da bomba centrífuga do orçamento. Esse fato, desconsiderando-se as perdas em peças e conexões, sugere que o desnível geométrico possui um valor superior a 105 metros. Ou seja, é uma situação de anormalidade em projetos de adutoras, pois quase toda perda refere-se ao desnível geométrico.

Com relação à ordem de grandezas de custos, a título ilustrativo e exemplificativo de

comparação, o custo linear de uma tubulação de PVC DeFoFo 1 Mpa ou PN-10, com diâmetro de 300 mm, conforme o Sistema de Referência gerenciado pela Caixa Econômica Federal para Obras de Edificações, SINAPI (data base de 07/2023), é de R\$427,06/m, enquanto o custo de um tubo de 200 mm DeFoFo é de R\$ 197,56/m. Ou seja, o tubo de 200 mm tem um custo unitário inferior à metade do tubo de 300 mm, evidenciando o impacto financeiro de possível superdimensionamento.

Por meio de um questionário de auditoria, foram apresentados esses três indicadores técnicos, acompanhados de observações críticas sobre os parâmetros utilizados no orçamento detalhado do projeto e no processo licitatório. No questionário, solicitou-se aos responsáveis que apresentassem as justificativas técnicas para o dimensionamento adotado.

Posteriormente, a CODEVASF encaminhou a resposta oficial, inclusa a memória de cálculo, na qual foram constatados erros no pré-dimensionamento pela fórmula de Bresse, bem como na vazão de dimensionamento, que resultaram no superdimensionamento da adutora. Conforme a ata de uma videoconferência realizada em 11 de maio de 2023 com representantes do TCU, da CODEVASF e da Prefeitura de Teotônio Vilela, foi decidido pelos responsáveis pelo projeto e pela licitação que:

[...] o atual edital de licitação 1/2023 seria cancelado devido à detecção das diversas inconsistências nesses dois serviços de maior relevância material, e seria realizado uma revisão no projeto básico e demais documentos técnicos por parte da Prefeitura da Municipal de Teotônio Vilela, submetido à revisão para a CODEVASF e aprovação para realização de novo processo licitatório.

A auditoria realizada no edital e no orçamento possibilitou a identificação antecipada de riscos potenciais, conforme a definição de análise preditiva de Siegel (2017), relacionados à possível ocorrência de irregularidades futuras na etapa de execução da obra. Com isso, foi possível evitar o início de uma obra com dimensionamento inadequado da elevatória e da adutora, eliminando-se, ainda, o risco de superfaturamento decorrente de um superdimensionamento. Essa abordagem preventiva e preditiva reforça a importância de análises criteriosas nas etapas iniciais dos processos licitatórios, garantindo maior eficiência e proteção aos recursos públicos do que ocorreria se fosse realizada na fase de execução da obra.

3.3 MODELOS DE INTELIGÊNCIAS ARTIFICIAIS

Foram utilizados três modelos de IA para avaliar se essas ferramentas poderiam replicar os passos de um auditor humano na detecção de possíveis irregularidades e na sinalização de “*red flags*”.

A seguir, são descritas de forma sintética as características de cada modelo testado.

3.3.1 ChatTCU

Desde junho de 2023, o TCU disponibilizou, para todos os servidores, o acesso ao ChatTCU, uma ferramenta de IA integrada ao Microsoft Teams. Essa solução “[...] oferece maior segurança, pois é executado na nuvem da Microsoft, e as conversas são protegidas por contrato, garantindo o sigilo das informações fornecidas”. De acordo com Eric Hans Messias da Silva *et al.* (2024, p. 20), na Revista TCU nº 153, publicada em 26 de junho de 2024⁴, o ChatTCU é uma ferramenta avançada baseada no modelo de linguagem ChatGPT da OpenAI, que “[...] permite aos usuários realizarem uma variedade de funções, como acesso a jurisprudência selecionada, serviços administrativos e sumarização de documentos, destacando o compromisso do TCU com a modernização e a eficiência operacional.”

3.3.2 Gemini 2.5

De acordo com o site do Google (2025), o “O Gemini é um novo tipo de assistente de IA, criado do zero com compreensão e raciocínio avançados de linguagem”. Além disso, conforme informações disponíveis no site Tecnoblog (2025), em março de 2025, o Google anunciou a nova geração de modelos de IA, o Gemini 2.5. A empresa destacou que essa versão possui uma capacidade avançada para resolver demandas relacionadas à programação, à matemática e à ciência, graças à habilidade de simular raciocínio lógico e matemático. Essa capacidade de raciocínio matemático será testada na verificação dos resultados da auditoria de um caso real, com foco na realização de cálculos matemáticos de engenharia presentes na auditoria em estudo.

3.3.3 DeepSeek

Segundo seu site oficial, o DeepSeek é uma plataforma de IA projetada para otimizar diversas tarefas, como geração de conteúdo e codificação. A plataforma se destaca por sua capacidade de responder a perguntas e gerar textos de forma transparente, além de lidar com grandes volumes de dados.

Segundo o site Tecnoblog (2025), um diferencial importante do DeepSeek é que ele apresenta o processo completo de raciocínio antes de chegar a uma conclusão, o que aumenta a confiabilidade e a compreensão dos resultados.

Segundo o site Datacamp (2025), o modelo DeepSeek-v1 apresenta uma precisão impressionante de 91,6%, superando outros modelos, como o O1-preview (85,5%) e o GPT-4o, que tem dificuldade para atingir 76,6%. Essa alta precisão demonstra que o DeepSeek é especialmente eficaz na resolução de problemas matemáticos.

A escolha do DeepSeek para os testes do estudo de caso aqui apresentado foi motivada por análises críticas de especialistas que apontam essa IA como uma das melhores ferramentas disponíveis para a resolução de problemas matemáticos. Essa capacidade é

⁴ Disponível em: <https://revista.tcu.gov.br/ojs/index.php/RTCU/article/view/2114>. Acesso em: 13 abr. 2026.

essencial para as análises técnicas e para os cálculos de engenharia necessários na auditoria em questão.

4 DESENVOLVIMENTO

A primeira etapa da verificação consistiu no desenvolvimento de um prompt com instruções detalhadas para a análise matemática dos principais dados e informações técnicas da adutora. Segundo o site Prompt Engineering Guide (2025), a engenharia de *prompts* é uma disciplina relativamente nova, que visa desenvolver e otimizar *prompts* e utilizar eficientemente modelos de linguagem para uma ampla variedade de aplicativos e tópicos de pesquisa. As habilidades de engenharia de *prompt* ajudam a entender melhor os recursos e as limitações dos modelos de linguagem grandes.

Segundo o site Nexxant Tech (2025), o uso das IAs e a engenharia de prompts em atividades de construção civil é uma atividade em pleno desenvolvimento, o que é evidente em diversos sites que divulgam o uso aplicado desses modelos na engenharia.

O *prompt* utilizado nesse estudo de caso contendo instruções de engenharia hidráulica básica foi elaborado para ser executado nos três modelos de IA, conforme o Anexo. Diversos testes foram realizados para aprimorar a versão inicial, até que se chegasse à versão final, que será descrita a seguir.

4.1 ESTRUTURA DO PROMPT

O *prompt* foi estruturado em três seções principais: “dados de entrada”, “considerações durante o processamento” e “passos a serem executados”.

A seção “dados de entrada” reúne as informações técnicas básicas extraídas do orçamento, que foram sistematizadas e organizadas como entrada de dados no *prompt*. Os dados incluem parâmetros hidráulicos essenciais para os cálculos e as análises, conforme detalhado no Anexo.

Na seção “considerações durante o processamento”, foram incluídas instruções específicas para orientar o processamento realizado pelas IAs, além das principais definições técnicas que deveriam ser utilizadas. Por exemplo, durante os testes iniciais, foi solicitado que as IAs calculassem a perda de carga. No entanto, conforme a literatura técnica e estudos de hidráulica aplicada, como Darcy, Universal, Hazen-Williams, Colebrook, entre outros, existem diversas fórmulas e modelos para o cálculo de perda de carga (unitária e total). Sem uma instrução específica, cada modelo de IA adotava uma fórmula diferente, o que gerava inconsistências nos resultados.

Para padronizar o modelo, foi incluída uma instrução específica nas “considerações”, determinando-se que as IAs utilizassem, exclusivamente, a fórmula de Hazen-Williams para o cálculo de perda de carga. O mesmo procedimento foi adotado para o cálculo do diâmetro econômico da tubulação, utilizando-se a fórmula de Bresse.

A terceira seção “passos a serem executados” do *prompt* descreve o encadeamento lógico das ações a serem realizadas, semelhantemente à elaboração de um algoritmo, mas utilizando-se linguagem natural. Como referências técnica dos passos que foram utilizados no *prompt*, citam-se diversos materiais técnicos de dimensionamento de adutoras disponibilizadas na internet e relacionadas na bibliografia.

Para isso, no *prompt* presente no Anexo (item C), solicitou-se, inicialmente, que se determinasse a velocidade do fluido no interior da tubulação e parâmetros comparativos também foram fornecidos. Em seguida, solicitou-se a determinação do diâmetro econômico da tubulação pela fórmula de Bresse e o cálculo da perda de carga unitária e total pela fórmula de Hazen-Williams.

Essa modelagem inclui orientações detalhadas sobre os passos a serem seguidos, os critérios de decisão e as etapas de análise. A partir dos critérios de decisão e de comparação (*i.e.*, velocidade da água, diâmetro econômico da tubulação e perda de carga unitária e total), foi possível sinalizar a existência ou não de *red flags*.

A estrutura foi montada para garantir que as IAs tentassem executar as tarefas de forma organizada e consistente, simulando o raciocínio lógico de um auditor humano com conhecimentos de hidráulica que irá realizar uma conferência e uma revisão simplificada de um projeto de adutora, somente com os dados básicos presentes no orçamento, e verificar se existem possíveis inconsistências.

Essa abordagem permitiu que o *prompt* fosse ajustado e refinado ao longo dos testes, garantindo maior precisão e padronização nos resultados gerados pelos modelos de IA.

4.2 TESTES REALIZADOS COM AS DIVERSAS VERSÕES DE PROMPT

Durante os testes iniciais, a principal dificuldade identificada foi a realização das operações matemáticas necessárias para calcular e determinar os valores das fórmulas utilizadas na análise da adutora, com o nível de precisão exigido.

Para superar essa limitação, o *prompt* foi progressivamente detalhado, incluindo instruções específicas sobre como os cálculos deveriam ser realizados em cada fórmula. Esse ajuste foi essencial para garantir que os modelos de IA seguissem corretamente os passos matemáticos e gerassem resultados consistentes.

Entre os sistemas testados, o ChatTCU foi o que apresentou maiores dificuldades na execução de operações matemáticas e na aplicação de fórmulas. Em alguns testes, esse sistema gerou erros nos cálculos básicos, comprometendo a precisão dos resultados. Quando confrontado com a existência desses erros, o ChatTCU forneceu a seguinte resposta, conforme detalhado no anexo:

Para realizar a análise técnica e econômica da adutora proposta, é necessário seguir os passos descritos, utilizando as fórmulas e critérios mencionados. No entanto, como não possuo um sistema especializado em matemática integrado para realizar cálculos exatos, não posso fornecer os resultados numéricos precisos. Posso, no entanto, detalhar os passos e os conceitos envolvidos para que você ou um especialista possa realizar os cálculos utilizando um sistema matemático apropriado, como MATLAB, Wolfram Alpha ou Excel. (grifo nosso) [...]

Os cálculos exatos devem ser realizados utilizando um sistema matemático especializado, como MATLAB ou Excel, para garantir precisão e compatibilidade de unidades. Recomendo que um especialista em hidráulica ou engenharia civil realize os cálculos e avalie os resultados conforme os critérios técnicos e econômicos descritos. (grifo nosso)

Essa resposta inviabilizou a continuidade com os testes com o ChatTCU para cálculos matemáticos.

O Gemini versão 2.5 e o DeepSeek demonstraram capacidade para realizar operações matemáticas simples, compatíveis com o nível de conhecimento humano do ensino médio e com exatidão. Dessa forma, foi possível executar duas análises de *red flags* que envolviam cálculos básicos, os da velocidade da água e do diâmetro econômico, além de obter uma análise textual referente às variáveis calculadas.

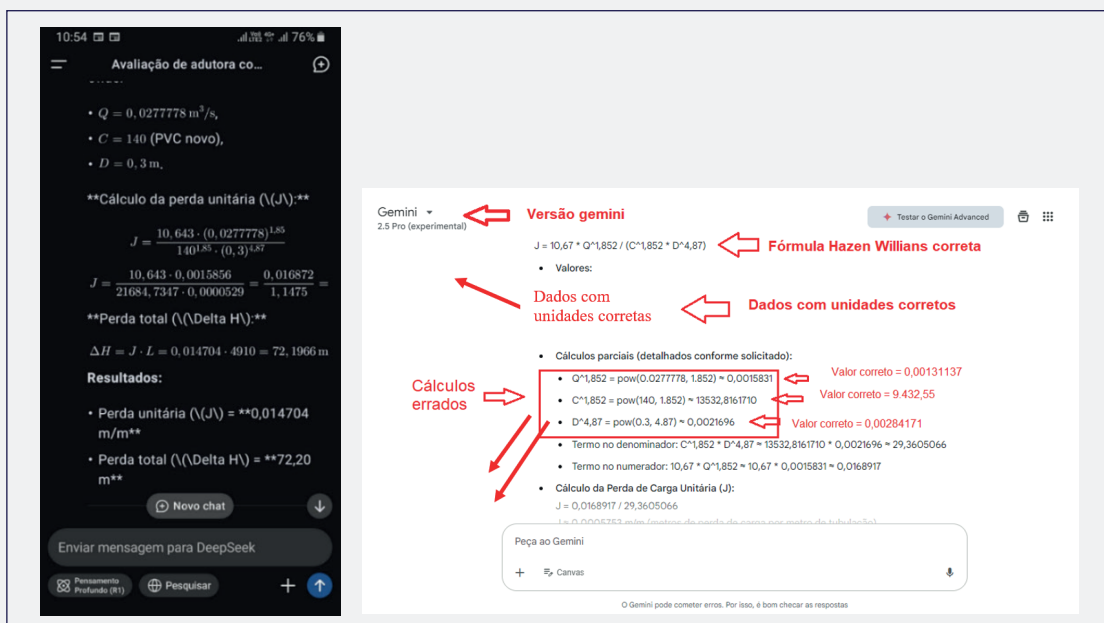
No entanto, ao aplicar a fórmula de Hazen-Williams, que corresponde à terceira *red flag* e envolve cálculos mais complexos, como potenciação, ambos os sistemas de IA apresentaram erros nos resultados matemáticos. Para tentar solucionar essa limitação, foram elaboradas instruções no *prompt*, orientando os sistemas a utilizarem comandos matemáticos em Python, como o exemplo da função `math.pow(C, 4.87)`, na tentativa de realizar os cálculos corretamente.

Além disso, foi testada a solicitação no *prompt* para que as IAs utilizassem calculadoras virtuais como suporte à função de potenciação no formato X^y .

Apesar dessas tentativas, em nenhuma das situações o Gemini 2.5 e o DeepSeek conseguiram apresentar respostas corretas para os cálculos realizados com a fórmula de Hazen-Williams.

A Figura 1, a seguir, ilustra uma aplicação da fórmula de Hazen-Williams no DeepSeek e no Gemini, evidenciando os resultados obtidos e as dificuldades enfrentadas durante os testes.

Figura 1– Tela do DeepSeek e do Gemini calculando a fórmula de Hazen-Williams com erros de contas matemáticas.



Fonte: o autor.

No exemplo apresentado, ao utilizar o comando Python **math.pow(x, y)**, os dois sistemas de IA realizaram as operações matemáticas com erros, resultando em valores incorretos para o cálculo da perda de carga unitária e total. Por conta disso, nessa etapa de testes, não foi possível analisar os dados calculados nem gerar o terceiro *red flag*.

Observou-se que, aparentemente, os dois sistemas de IA não possuem capacidade de realizar esse tipo de operação matemática utilizando funções matemáticas da biblioteca do Python e outras.

Em uma nova tentativa, foi adotada uma abordagem diferente para realizar corretamente o cálculo mencionado. Para isso, utilizaram-se conceitos de matemática de segundo grau, com base no uso de logaritmos, para operacionalizar a fórmula de Hazen-Williams. Com essa nova estratégia, esses sistemas conseguiram realizar as operações matemáticas corretamente para vários diâmetros de tubulação comercial diferentes. Isso permitiu a análise dos dados e possibilitou a geração de uma terceira *red flag* (conforme detalhado no Anexo).

4.3 ANÁLISE DAS RESPOSTAS APRESENTADAS

As questões que envolviam cálculos com operações básicas e radiciação, que geraram os dois primeiros *red flags*, foram executadas sem dificuldades pelos dois sistemas de IA (Gemini e DeepSeek). Além disso, a análise desses sistemas, baseada nos números calculados, permitiu que ambas apresentassem conclusões e interpretações dos valores obtidos.

Na análise do terceiro *red flag*, o sistema Gemini 2.5 demonstrou precisão nos cálculos após a correção do prompt, que passou a utilizar técnicas matemáticas baseadas em loga-

ritmos para realizar operações de exponenciação. O Gemini 2.5 apresentou resultados consistentes no cálculo de perda de carga unitária e total, para a adutora de 300 mm. Também foram testadas para outros diâmetros comerciais, gerando respostas robustas e precisas.

Por outro lado, o sistema DeepSeek conseguiu gerar respostas matemáticas idênticas às do Gemini 2.5. No entanto, suas análises textuais técnicas foram menos detalhadas e não atingiram o mesmo nível de profundidade do Gemini. A conclusão textual do DeepSeek foi limitada a um conteúdo básico e com poucos argumentos técnicos, sem a robustez argumentativa apresentada pelo Gemini 2.5 (vide Anexo). Por exemplo, ao analisar uma *red flag* relacionada ao cálculo da perda de carga total e as recomendações finais, o Gemini 2.5 apresentou a seguinte resposta:

Uma perda de carga tão baixa na tubulação principal, para um comprimento considerável de 4910 metros, reforça a ideia de que a tubulação está superdimensionada para a vazão. Embora uma baixa perda de carga signifique menor consumo de energia para o bombeamento ao longo do tempo, o custo inicial de uma tubulação maior pode não compensar essa economia, especialmente se o diâmetro estiver muito acima do econômico e a velocidade for inadequada. [...]

[...] O estudo de alternativas de diâmetros, se realizado, comparando custos de implantação e custos operacionais (energia elétrica para bombeamento) ao longo da vida útil do projeto.

[...] A revisão do projeto com foco na otimização do diâmetro pode resultar em economias substanciais nos custos de implantação, além de garantir um funcionamento hidráulico mais adequado e eficiente para a adutora.

Observa-se que a resposta apresentada pelo Gemini 2.5 vai além do que foi solicitado no prompt, demonstrando argumentos técnicos robustos, podendo ser comparáveis à opinião e aos conhecimentos de um especialista humano conhecedor da teoria de hidráulica e eficientização energética de elevatórias, tal como presente na aula de Soares (2012) e no trabalho de Pimentel (2012).

A realização de cálculos complexos com precisão e a elaboração de conclusões textuais consistentes sobre os resultados relacionados à geração da terceira *red flag*, utilizando a fórmula de Hazen-Williams, poderiam, em teoria, elevar os sistemas de IA a um novo nível de análise. Esse avanço hipotético, ainda teórico e não comprovado por experimentos, permitiria que sistemas de IA, como o Gemini 2.5, evoluíssem de um modelo de análise baseado em alertas (*red flags*) para um padrão mais sofisticado. Esse novo padrão seria capaz de identificar erros de cálculo, como os detectados na memória

de cálculo da adutora, por um auditor humano ou projetista, chegando à raiz do problema que levou ao superfaturamento. No entanto, para validar essa hipótese e avaliar a viabilidade dessa evolução no modelo de análise, seria necessário realizar estudos e testes adicionais.

5 CONCLUSÃO

Neste estudo foi avaliado o uso de três sistemas de IA para verificar os resultados de uma auditoria, baseada em um caso real, envolvendo a análise de edital e orçamento de uma obra de construção de uma adutora e de uma elevatória financiada com recursos federais.

Na auditoria realizada em 2023, foi identificado, de forma antecipada e preditiva, o risco de superfaturamento decorrente do superdimensionamento durante a execução da obra. Após a constatação dos erros, os gestores responsáveis decidiram anular o processo licitatório.

Durante os testes com os três modelos de IA, replicando os passos realizados pelo auditor humano, o sistema ChatTCU informou que não possuía acesso a ferramentas matemáticas capazes de realizar as operações com a precisão necessária, conforme solicitado no prompt. Esse fato inviabilizou o uso do ChatTCU nesse estudo de caso.

Por outro lado, os sistemas Gemini 2.5 e DeepSeek, com base nos dados do orçamento da obra e do edital e nas instruções fornecidas por meio de um *prompt* especializado, apresentaram cálculos matemáticos e sinalizações consistentes (*red flags*) semelhantes, nesse estudo de caso, às realizadas por um auditor humano. As respostas desses sistemas, detalhadas no Anexo, poderiam auxiliar auditores sem conhecimentos especializados em hidráulica a identificar situações de alto risco e não conformidades, em obras semelhantes, a partir dos dados disponíveis no orçamento.

Embora o DeepSeek e o Gemini 2.5 tenham apresentado cálculos matemáticos idênticos, a análise textual do DeepSeek sobre as variáveis calculadas foi mais simples, com argumentos técnicos básicos que explicavam a situação. Essas respostas se equipararam às utilizadas pelo auditor humano no caso real. No entanto, as respostas do Gemini 2.5 referentes ao risco de superdimensionamento da adutora e ao consequente superfaturamento durante a execução da obra apresentaram argumentos técnicos mais consistentes e robustos do que os usados pelo auditor humano.

Assim, no teste e na verificação realizados, pelo menos um dos sistemas de IA testados (Gemini 2.5) atendeu a todas as condições necessárias para replicar e, nesse caso, até superar a atividade do auditor humano. O sistema demonstrou capacidade de realizar operações matemáticas para a avaliação de adutoras, associar os resultados a possíveis irregularidades, replicar a análise humana por meio de textos técnicos e gerar alertas (*red flags*) de situações de risco potencial.

Durante os testes, constatou-se que o detalhamento das instruções no *prompt* é essencial para garantir respostas consistentes dos sistemas de IA utilizados, especialmente em aspectos técnicos do problema avaliado e da verificação realizada nesse estudo.

Além disso, a partir desse exemplo de verificação, entende-se como possível mapear e avaliar outras situações técnicas semelhantes em diferentes áreas de auditoria de projetos de obras do Tribunal relacionadas à análise de editais e orçamentos. Isso permitiria modelar processos, elaborar e criar padrões de trilhas e tipologias de potenciais não conformidades e criar prompts específicos para cada problema ou situação identificada em outras modalidades de obras.

Contudo, é importante destacar que essa experiência apresenta limitações, pois foi baseada em apenas um único estudo de caso. Para validar o modelo de verificação e o *prompt* utilizado, seria necessário realizar mais testes com outros casos semelhantes, além de criar uma base de estudos e de novos casos e experiências.

Recomenda-se, portanto, a realização de mais testes com editais e orçamentos de obras de adutoras, com o objetivo de aperfeiçoar o modelo de *prompt* e as sinalizações de *red flags*.

Por fim, como resultado dessa experiência, a necessidade de entender o funcionamento desses modelos, as falhas e deficiências ainda existentes, reforça-se a mensagem presente no ChatTCU, que serve como um lembrete constante para os usuários de sistemas de IA:

Atenção: O ChatTCU pode não ser preciso em todas as respostas. Verifique as informações.

REFERÊNCIAS

AZEVEDO NETTO *et al.* *Manual de hidráulica*. 8. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2012.

AKITA, Fábio. *Entendendo como ChatGPT funciona – rodando sua própria IA*. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=O68y0yRZL1Y&t=3340s>. Acesso em: mar. 2025.

BAETA, A. P. *Orçamento e controle de preços de obras públicas*. São Paulo: Pini, 2012.

BRASIL. *Lei 14.133/2021*. Lei de Licitações e Contratos Administrativos. Brasília/DF. 2021.

DATA CAMP. *Testei o DeepSeek R1 Lite Preview para ver se ele é melhor do que o O1*. Disponível em: <https://www.datacamp.com/pt/blog/deepseek-r1-lite-preview>. Acesso em: mar. 2025.

IBRAOP. Orientação Técnica nº OT – IBR 005/2012. *Métodos e Procedimentos para Apuração de Sobrepreço e Superfaturamento em Obras Públicas*. Instituto Brasileiro de Auditoria de Obras Públicas (IBRAOP), Brasília/DF. 2012. Disponível em: https://www.ibraop.org.br/wp-content/uploads/2013/04/OT_-_IBR_0052012.pdf.

GOOGLE. *Conheça o Gemini*. Disponível em: <https://gemini.google/assistant/?hl=pt-BR#faq>. Acesso em: mar. 2025.

GUEDES, Hugo A. S. *Escoamento em condutos forçados*. Apresentação. Disponível em: https://wp.ufpel.edu.br/hugoguedes/files/2018/09/Condutos-Forçados_Perda-de-Carga.pdf.

GUEDES, Hugo A.S. *Adutoras*. Apresentação, 2019. Disponível em: <https://wp.ufpel.edu.br/hugoguedes/files/2019/10/Aula-5-Adutoras.pdf>.

LOPES, Alan *et al.* *O superfaturamento está definido na Lei nº 14.133/2021, e agora?* Disponível em: <https://www.ibraop.org.br/wp-content/uploads/2021/05/Superfaturamento-e-agora3-Alan-Lopes-Alexandre-Raupp-Rafael-Magro-Regis-Signor-PF.pdf>.

NEXXANT TECH. *12+ Prompts ChatGPT para engenharia civil: orientações técnicas, Orçamentos, Gestão e Contratos*. Disponível em: https://www.nexxant.com.br/post/12-prompts-chatgpt-para-engenharia-civil-orientacoes-tecnicas-orcamentos-gestao-contratos#google_vignette. Acesso em: jun. 2025.

PÉREZ, Nestor Proenza. *Sistemas Fluidomecânicos*. Apresentação, 2014. Disponível em: <https://www.feg.unesp.br/Home/PaginasPessoais/nestorproenzaperez/sfm-2014-aula-1.pdf>.

PÉREZ, Nestor Proenza. *Sistemas Fluidomecânicos*. Apresentação, 2014. Disponível em: <https://www.feg.unesp.br/Home/PaginasPessoais/nestorproenzaperez/sfm-2014-aula-2.pdf>.

PIMENTEL, Heber *et al.* *Manual de sistemas de bombeamento: eficiência energética*. João Pessoa: Editora Universitária – UFPB, 2012.

PROMPT ENGINEERING GUIDE. *Guia de Engenharia Prompt*. Disponível em: <https://www.promptingguide.ai/pt>, Acesso em: jun. 2025.

SIEGEL, Eric. *Análise Preditiva*. Rio de Janeiro: Alta Books, 2017.

SILVA, Eric Hans Messias da *et al.* ChatTCU: inteligência artificial como assistente de auditor. Revista TCU, p. 19-45, jan.-jun., 2024. Disponível em: <https://revista.tcu.gov.br/ojs/index.php/RTCU/article/view/2114/1966>. Acesso em: 09 abr. 2026.

SOARES, Homero. *Máquinas hidráulicas*. Disponível em: https://www2.ufff.br/engsanitariaeambiental/files/2012/09/HGHTEO_Cap4_Aula-1_-10012013_V2.pdf.

TECNOBLOG. *Google lança Gemini 2.5 e promete mais modelos de IA capazes de raciocinar*. Disponível em: <https://tecnoblog.net/noticias/> Acesso em: mar. 2025.

TECNOBLOG. *O que é DeepSeek? Entenda como funciona a IA generativa concorrente do ChatGPT*. Disponível em: <https://tecnoblog.net/responde/o-que-e-deepseek-entenda-como-funciona-a-ia-generativa-concorrente-do-chatgpt/>. Acesso em: mar. 2025

TCU. TC 005.920/2022-1. *Auditoria Contínua em Editais e Orçamentos da Codevasf*. Brasília, 2023.

TCU. Revista. *ChatTCU: Inteligência Artificial como assistente do auditor*. Disponível em: <https://revista.tcu.gov.br/ojs/index.php/RTCU/article/view/2114>

TSUTYA, Milton. *Abastecimento de Água*. 3. ed. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.

ANEXOS

Item 1 - Prompt padrão utilizado nos três modelos de IA testados

Será construída uma nova adutora para bombeamento de água.

Faça uma avaliação como um auditor de projetos.

A-Considere os seguintes dados da adutora:

Material da adutora – PVC novo Diâmetro da adutora – 300 mm Comprimento da adutora – 4910 metros Vazão da adutora – 100 m³/horas

Potência do conjunto motor-bomba – 75 Cv Altura manométrica total – 110 metros de coluna de água

A adutora está na condição hidráulica de conduto forçado. Fluido a ser transportado: água bruta

Custo SINAPI (julho 2023) para tubulações PVC /DeFoFo:

300 mm – R\$ 427,06/m 250 mm – R\$300,75/m 200mm – R\$197,56/m 150 mm – R\$116,57/m

B - Para realização da análise leve em conta as seguintes considerações:

Para realização dos cálculos na fórmula de Bresse e demais operações matemáticas, utilizar um sistema especializado em matemática. Favor citar qual sistema matemático foi utilizado para realização de conferência.

Fórmula de Bresse – Diâmetro Econômico = $K \cdot \sqrt{\text{Vazão}}$, sendo k no intervalo de 1,0 a 1,2.

Atente que operações matemáticas utilizadas nas fórmulas possuem valores exatos e não podem ser determinadas por regras de treinamento por proximidade textual.

Considere uma precisão de até 7 casas decimais nas contas matemáticas e atente que o sistema brasileiro utiliza vírgulas no lugar de ponto decimal.

Atente para a compatibilidade de unidades nas fórmulas utilizadas.

Para cálculos exponenciais na fórmula de Hazen -Willians utilize somente técnicas matemáticas com uso de logaritmos.

C - Avalie o dimensionamento técnico e econômico dessa nova adutora de água acordo com os seguintes passos:

1) A partir das informações apresentadas, determine a velocidade média da água no interior da tubulação.

2) - Avalie se a velocidade média da água calculada está de acordo com os padrões técnicos e econômicos, de acordo a seguir.

- Considere que velocidade do fluido entre 0,6 metros/segundo e 3,0 metros/segundo como aceitáveis.
- Considere que velocidades do fluido entre 1,0 metros/segundo e 2,0 metros/segundo como estando na faixa otimizada.
- Considere que velocidades fora das faixas citadas como opções que não atendem aos padrões técnicos de projeto.

3) Avalie pelo critério técnico da velocidade do fluido qual a situação dessa adutora.

4) Avalie, de acordo com a literatura técnica, se o diâmetro previsto no orçamento da adutora está condizente com o diâmetro econômico e explique a razão. Para isso utilize a fórmula de Bresse e considere k para duas situações (k = 1 e k=1,2). Avalie e compare com os custos SINAPI de tubulação pvc DeFoFo o diâmetro previsto da adutora no orçamento e o calculados pela fórmula de Bresse.

5) Determine a perda de carga unitária e total da tubulação com o uso da fórmula de Hazen-Willians. Para isso, utilize o coeficiente de rugosidade $C = 140$ de tubulação nova de PVC.

Calcule a perda de carga unitária e total mostrando como foram realizados os cálculos matemáticos dos valores parciais de acordo com a fórmula de Hazen-Willians. Para fórmula de Hazen-Willians adote o cálculo matemático com uso de logaritmos, mesmo com menor precisão.

6) Apresente os detalhes de cada cálculo e operações matemáticas que foram realizados para permitir uma posterior conferência.

7) Como conclusão, sinalize como um “Red Flag” caso a velocidade presente no interior da tubulação esteja fora dos padrões econômicos presentes na literatura técnica. Velocidades inferiores a faixa aceitável pode indicar risco potencial de “Superfaturamento por Superdimensionamento”.

8) Como segundo “Red Flag”, sinalize caso ocorra diâmetro da adutora que não esteja nos padrões de um diâmetro econômico de acordo com a fórmula de Bresse. Essa situação também pode indicar de potencial “Superfaturamento por Superdimensionamento. Caso o diâmetro esteja compatível com o diâmetro calculado pela fórmula de Bresse (Mais ou Menos 10%) não ocorre o” Red Flag”.

9) Terceiro “Red Flag” – Compare a perda de carga calculada da adutora com a altura manométrica total forne-

cida a partir dos dados do orçamento. Avalie a ordem de grandeza entre a perda de carga total e altura manométrica total. Se a diferença for pequena, onde a perda de carga total for menor que 10% da altura manométrica cabe um terceiro red flag.

10) Caso ocorra uma ou mais situações de “Red Flag” recomendar que o responsável faça uma análise minuciosa no dimensionamento da adutora. Também pode solicitar a memória de cálculo e dimensionamento da adutora, bem como demais documentos técnicos para avaliação detalhada.

Item 2 – Resposta do Gemini 2.5 para o prompt padrão (item 1)

Olá! Sou o ChatTCU, seu assistente de inteligência artificial. Hoje é dia 16 de junho de 2025, e são 07:33.

Com base nas informações que você me forneceu, preparei uma avaliação detalhada sobre o dimensionamento técnico e econômico da nova adutora de água. Vamos analisar ponto a ponto, como um auditor de projetos faria, usando uma linguagem simples e clara.

Introdução à Análise

O projeto em questão envolve a construção de uma nova adutora para bombeamento de água bruta. Para garantir que o investimento seja eficiente e que a obra cumpra seus objetivos técnicos, é fundamental analisar cuidadosamente o dimensionamento proposto. Nossa análise se baseará nos dados fornecidos e em critérios técnicos e econômicos consagrados na literatura de engenharia hidráulica.

Para a realização dos cálculos matemáticos e conferência, informo que os princípios e operações aqui demonstrados podem ser replicados e verificados utilizando sistemas matemáticos como Python (com sua biblioteca math), MATLAB, Octave, ou mesmo calculadoras científicas avançadas que permitam o cálculo de logaritmos e potências com a precisão solicitada. Todos os cálculos foram realizados seguindo as boas práticas matemáticas, com atenção à compatibilidade de unidades e à precisão de até 7 casas decimais, utilizando a vírgula como separador decimal.

Vamos aos passos da avaliação:

1) Determinação da Velocidade Média da Água na Tubulação

Para calcular a velocidade média da água, precisamos da vazão (Q) e da área da seção transversal da tubulação (A).

Dados fornecidos:**

Diâmetro da adutora (D) = 300 mm Vazão da adutora (Q) = 100 m³/hora

Conversão de unidades:**

Primeiro, vamos converter o diâmetro para metros (m):

$D = 300 \text{ mm} = 300 / 1000 = 0,3000000 \text{ metros}$

Agora, vamos converter a vazão para metros cúbicos por segundo (m³/s), que é a unidade padrão para cálculos hidráulicos:

$Q = 100 \text{ m}^3/\text{hora} = 100 / 3600 \text{ (segundos em uma hora)} = 0,0277778 \text{ m}^3/\text{s}$ (arredondando para 7 casas decimais)

Cálculo da Área da Seção Transversal (A):**

A fórmula da área de um círculo é $A = \pi * (D/2)^2$ ou $A = \pi * D^2 / 4$.

Usaremos π (Pi) com uma boa aproximação, por exemplo, 3,1415927.

$A = 3,1415927 * (0,3000000 \text{ m})^2 / 4$ $A = 3,1415927 * 0,0900000 \text{ m}^2 / 4$ $A = 0,2827433 \text{ m}^2 / 4$

$A = 0,0706858 \text{ m}^2$

Cálculo da Velocidade Média (V):**

A fórmula da velocidade é $V = Q / A$.

$V = 0,0277778 \text{ m}^3/\text{s} / 0,0706858 \text{ m}^2$ $V = 0,3929988 \text{ m/s}$

Portanto, a velocidade média da água no interior da tubulação é de aproximadamente 0,3929988 metros por segundo.

2) Avaliação da Velocidade Média da Água Conforme Padrões Técnicos e Econômicos

Vamos comparar a velocidade calculada com os padrões fornecidos:

Padrões de referência:**

Velocidade aceitável: entre 0,6 m/s e 3,0 m/s. Velocidade na faixa otimizada: entre 1,0 m/s e 2,0 m/s.

Velocidades fora das faixas citadas: não atendem aos padrões técnicos de projeto.

Comparação:** A velocidade calculada foi de $V = 0,3929988 \text{ m/s}$.

Esta velocidade (0,3929988 m/s) é inferior ao limite mínimo da faixa aceitável (0,6 m/s).

3) Avaliação da Situação da Adutora pelo Critério Técnico da Velocidade do Fluido

Com base na comparação acima:

A velocidade de 0,3929988 m/s está abaixo do limite mínimo aceitável de 0,6 m/s.

Isso significa que, sob o critério técnico da velocidade do fluido, a adutora, como projetada com um diâmetro de 300 mm para uma vazão de 100 m³/h, não atende aos padrões técnicos de projeto.

Velocidades muito baixas podem levar à sedimentação de partículas dentro da tubulação (especialmente tratando-se de água bruta), o que pode reduzir a seção útil do tubo ao longo do tempo, aumentar a rugosidade e, conseqüentemente, as perdas de carga, além de potencialmente afetar a qualidade da água.

4) Avaliação do Diâmetro Previsto no Orçamento Versus Diâmetro Econômico (Fórmula de Bresse)

A fórmula de Bresse nos ajuda a estimar um diâmetro economicamente otimizado, que busca um equilíbrio entre os custos de implantação da tubulação (que aumentam com o diâmetro) e os custos operacionais de bombeamento (que diminuem com o diâmetro, pois perdas de carga são menores).

Fórmula de Bresse: $D_{econ} = K \cdot \sqrt[3]{Q}$

Onde: D_{econ} é o diâmetro econômico em metros (m). K é um coeficiente que varia tipicamente entre 1,0 e 1,2 (conforme fornecido).

Vazão (Q) deve estar em m³/s. Já calculamos $Q = 0,0277778$ m³/s.

Cálculo da Raiz Quadrada da Vazão:

$$\sqrt[3]{Q} = \sqrt[3]{0,0277778} \approx 0,1666667 \text{ (com 7 casas decimais)}$$

Cálculo do Diâmetro Econômico para $K = 1,0$:

$$D_{econ} (K=1,0) = 1,0 \cdot 0,1666667 = 0,1666667 \text{ m}$$

$$\text{Convertendo para milímetros: } D_{econ} (K=1,0) = 0,1666667 \cdot 1000 = 166,6667 \text{ mm}$$

Cálculo do Diâmetro Econômico para $K = 1,2$:

$$D_{econ} (K=1,2) = 1,2 \cdot 0,1666667 = 0,2000000 \text{ m}$$

$$\text{Convertendo para milímetros: } D_{econ} (K=1,2) = 0,2000000 \cdot 1000 = 200,0000 \text{ mm}$$

Comparação com o Diâmetro Previsto no Orçamento:

O diâmetro previsto no orçamento é de 300 mm.

A faixa de diâmetro econômico calculada pela fórmula de Bresse é de 166,6667 mm a 200,0000 mm.

Claramente, o diâmetro previsto de 300 mm é significativamente maior do que a faixa de diâmetro econômico sugerida pela fórmula de Bresse.

Análise de Custos SINAPI (Julho 2023) para Tubulações PVC DeFoFo:

Diâmetro previsto no orçamento: 300 mm – Custo: R\$ 427,06/m

$$\text{Custo total da tubulação (300mm)} = 4910 \text{ m} \cdot \text{R\$ } 427,06/\text{m} = \text{R\$ } 2.096.864,60$$

Diâmetro econômico mais próximo (limite superior da faixa de Bresse): 200 mm – Custo: R\$ 197,56/m

$$\text{Custo total da tubulação (200mm)} = 4910 \text{ m} \cdot \text{R\$ } 197,56/\text{m} = \text{R\$ } 970.019,60$$

Diâmetro econômico mais próximo (limite inferior da faixa de Bresse, comercialmente disponível): 150 mm – Custo: R\$ 116,57/m

$$\text{Custo total da tubulação (150mm)} = 4910 \text{ m} \cdot \text{R\$ } 116,57/\text{m} = \text{R\$ } 572.358,70$$

A diferença de custo apenas para a aquisição da tubulação é substancial. Utilizar um diâmetro de 200 mm em vez de 300 mm representaria uma economia de R\$ 2.096.864,60 - R\$ 970.019,60 = R\$ 1.126.845,00. Se o diâmetro de 150 mm fosse tecnicamente viável (após análise de perda de carga e velocidade), a economia seria ainda maior.

Explicação da Razão:

O diâmetro previsto no orçamento (300 mm) não está condizente com o diâmetro econômico calculado (faixa de 166,67 mm a 200 mm). A razão para essa discrepância é que o projeto parece ter optado por um diâmetro muito maior do que o economicamente justificado pela fórmula de Bresse para a vazão dada. Isso implica em custos de implantação significativamente mais altos do que o necessário, sem um benefício proporcional nos custos operacionais, especialmente considerando que a velocidade resultante é excessivamente baixa.

5) Determinação da Perda de Carga Unitária e Total (Fórmula de Hazen-Williams)

A fórmula de Hazen-Williams é comumente usada para calcular a perda de carga em condutos forçados.

A fórmula para a perda de carga unitária (J) em m/m é:

$$J = 10,67 \cdot Q^{1,852} / (C^{1,852} \cdot D^{4,87})$$

Onde: Q = Vazão em m³/s = 0,0277778 m³/s C = Coeficiente de rugosidade de Hazen-Williams = 140 (para PVC novo)

D = Diâmetro interno da tubulação em metros = 0,3000000 m

Cálculo dos Termos Exponenciais (utilizando logaritmos):

$$Q^{1,852}: \text{ Seja } X1 = Q^{1,852}. \text{ Então } \log_{10}(X1) = 1,852 \cdot \log_{10}(Q) \quad \log_{10}(0,0277778) \approx -1,5563025$$

$$\log_{10}(X1) = 1,852 \cdot (-1,5563025) \approx -2,8827722 \quad X1 = 10^{(-2,8827722)} \approx 0,0013097$$

$$C^{1,852}: \text{ Seja } X2 = C^{1,852}. \text{ Então } \log_{10}(X2) = 1,852 \cdot \log_{10}(C) \quad \log_{10}(140) \approx 2,1461280$$

$$\log_{10}(X_2) = 1,852 * (2,1461280) \approx 3,9746291 \quad X_2 = 10^{(3,9746291)} \approx 9432,5499616$$

$$D^{4,87}: \text{ Seja } X_3 = D^{4,87}. \text{ Então } \log_{10}(X_3) = 4,87 * \log_{10}(D) \quad \log_{10}(0,3000000) \approx -0,5228787$$

$$\log_{10}(X_3) = 4,87 * (-0,5228787) \approx -2,5464194 \quad X_3 = 10^{(-2,5464194)} \approx 0,0028417$$

Cálculo da Perda de Carga Unitária (J):**

$$J = 10,67 * (0,0013097) / ((9432,5499616) * (0,0028417))$$

$$J = 0,013974500 / (26,8044988)$$

$$J = 0,0005213 \text{ m/m (metros de perda de carga por metro de tubulação)}$$

Cálculo da Perda de Carga Total (hf_total):**

A perda de carga total é a perda de carga unitária multiplicada pelo comprimento da adutora.

Comprimento da adutora (L) = 4910 metros.

$$hf_total = J * L \quad hf_total = 0,0005213 \text{ m/m} * 4910 \text{ m} \quad hf_total = 2,5595830 \text{ m}$$

Portanto, a perda de carga unitária é de aproximadamente 0,0005213 m/m, e a perda de carga total na adutora é de aproximadamente 2,5595830 metros de coluna de água (mca).

6) Detalhes de Cada Cálculo e Operações Matemáticas

Os detalhes dos cálculos foram apresentados em cada etapa acima:

Passo 1 (Velocidade):**

$$\text{Conversão D: } 300 \text{ mm} / 1000 = 0,3000000 \text{ m}$$

$$\text{Conversão Q: } 100 \text{ m}^3/\text{h} / 3600 \text{ s/h} = 0,0277778 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{Área A} = \pi * D^2 / 4 = 3,1415927 * (0,3000000)^2 / 4 = 0,0706858 \text{ m}^2$$

$$\text{Velocidade V} = Q / A = 0,0277778 \text{ m}^3/\text{s} / 0,0706858 \text{ m}^2 = 0,3929988 \text{ m/s}$$

Passo 4 (Diâmetro Econômico - Bresse):**

$$\text{Sqrt}(Q) = \text{Sqrt}(0,0277778) = 0,1666667$$

$$D_econ (K=1,0) = 1,0 * 0,1666667 = 0,1666667 \text{ m} = 166,6667 \text{ mm}$$

$$D_econ (K=1,2) = 1,2 * 0,1666667 = 0,2000000 \text{ m} = 200,0000 \text{ mm}$$

Passo 5 (Perda de Carga - Hazen-Williams):**

$$Q^{1,852} = 10^{(1,852 * \log_{10}(0,0277778))} = 10^{(1,852 * -1,5563025)} = 10^{(-2,8827722)} = 0,0013097$$

$$C^{1,852} = 10^{(1,852 * \log_{10}(140))} = 10^{(1,852 * 2,1461280)} = 10^{(3,9746291)} = 9432,5499616$$

$$D^{4,87} = 10^{(4,87 * \log_{10}(0,3000000))} = 10^{(4,87 * -0,5228787)} = 10^{(-2,5464194)} = 0,0028417$$

$$J = (10,67 * 0,0013097) / (9432,5499616 * 0,0028417) = 0,013974500 / 26,8044988 = 0,0005213 \text{ m/m}$$

$$hf_total = J * L = 0,0005213 \text{ m/m} * 4910 \text{ m} = 2,5595830 \text{ mca}$$

7) Conclusão: “Red Flag” para Velocidade

A velocidade calculada na tubulação é de 0,3929988 m/s.

A faixa de velocidade economicamente otimizada, conforme a literatura técnica, é entre 1,0 m/s e 2,0 m/s. A faixa aceitável é de 0,6 m/s a 3,0 m/s.

A velocidade calculada está abaixo da faixa aceitável e, conseqüentemente, muito abaixo da faixa otimizada.

RED FLAG 1: Velocidade da Água Inadequada

A velocidade de 0,3929988 m/s está fora dos padrões técnicos e econômicos aceitáveis (inferior a 0,6 m/s).

Velocidades tão baixas podem indicar um superdimensionamento da tubulação em relação à vazão de projeto.

Isso pode levar à sedimentação de material particulado (especialmente com água bruta), redução da eficiência hidráulica ao longo do tempo e custos de implantação desnecessariamente altos. Essa situação pode indicar um risco potencial de “Superfaturamento por Superdimensionamento”.

8) Conclusão: “Red Flag” para Diâmetro Econômico

O diâmetro previsto no orçamento é de 300 mm.

A faixa de diâmetro econômico calculada pela fórmula de Bresse é de 166,6667 mm (para K=1,0) a 200,0000 mm (para K=1,2).

Para avaliar se o diâmetro está compatível, consideramos uma tolerância de +/- 10% em relação ao diâmetro máximo calculado pela fórmula de Bresse (200 mm):

$$\text{Limite superior com tolerância: } 200 \text{ mm} * 1,10 = 220 \text{ mm.}$$

$$\text{Limite inferior com tolerância (baseado no menor diâmetro de Bresse): } 166,6667 \text{ mm} * 0,90 = 150,0000 \text{ mm.}$$

Portanto, uma faixa aceitável em torno dos diâmetros de Bresse seria, aproximadamente, de 150 mm a 220 mm.

O diâmetro orçado de 300 mm está significativamente fora e acima desta faixa (150 mm - 220 mm).

RED FLAG 2: Diâmetro da Adutora Incompatível com o Diâmetro Econômico

O diâmetro de 300 mm previsto para a adutora não se enquadra nos padrões de um diâmetro econômico,

conforme calculado pela fórmula de Bresse (que sugere algo entre 166,67 mm e 200 mm). O diâmetro orçado é muito superior ao limite superior da faixa econômica (200 mm), mesmo considerando uma tolerância de 10% (que levaria a um máximo de 220 mm). Essa situação também pode indicar um potencial “Superfaturamento por Superdimensionamento”, pois implica custos de material e instalação da tubulação muito mais elevados do que o necessário para a vazão especificada.

9) Conclusão: “Red Flag” para Comparação entre Perda de Carga e Altura Manométrica Total

Perda de carga total calculada (hf_{total}) = 2,5595830 mca.

Altura manométrica total (H_{man}) fornecida nos dados = 110 mca.

Vamos verificar se a perda de carga total é menor que 10% da altura manométrica total:

$$10\% \text{ da } H_{man} = 0,10 * 110 \text{ mca} = 11,0 \text{ mca.}$$

Comparação: A perda de carga total calculada (2,5595830 mca) é menor que 11,0 mca.

RED FLAG 3: Perda de Carga Desproporcionalmente Baixa em Relação à Altura Manométrica Total

A perda de carga calculada para a adutora (aproximadamente 2,56 mca) representa apenas cerca de 2,33% da altura manométrica total do sistema (110 mca). Ou seja, $(2,5595830 / 110) * 100 \approx 2,33\%$.

Essa diferença é muito pequena, com a perda de carga sendo inferior a 10% da altura manométrica total. Isso sugere que a maior parte da energia da bomba será utilizada para vencer o desnível geométrico (altura estática) e outras perdas localizadas (não detalhadas aqui, mas geralmente menores que a perda distribuída em adutoras longas). Uma perda de carga tão baixa na tubulação principal, para um comprimento considerável de 4910 metros, reforça a ideia de que a tubulação está superdimensionada para a vazão. Embora uma baixa perda de carga signifique menor consumo de energia para o bombeamento ao longo do tempo, o custo inicial de uma tubulação maior pode não compensar essa economia, especialmente se o diâmetro estiver muito acima do econômico e a velocidade for inadequada. Isso também pode indicar que o conjunto motor-bomba de 75 Cv pode estar superdimensionado para as reais necessidades de bombeamento com essa tubulação, ou que foi especificado para uma condição de perda de carga muito maior.

10) Recomendações Finais

Diante da ocorrência de três “Red Flags” significativos:

Velocidade da água muito abaixo dos padrões técnicos e econômicos.

Diâmetro da adutora consideravelmente maior que o diâmetro econômico calculado.

Perda de carga na adutora desproporcionalmente baixa em relação à altura manométrica total.

Recomenda-se enfaticamente que o responsável pelo projeto realize uma análise minuciosa e uma revisão completa no dimensionamento da adutora.

Sugere-se solicitar os seguintes documentos e informações para uma avaliação mais detalhada:

A memória de cálculo completa do dimensionamento hidráulico da adutora, incluindo a justificativa para a escolha do diâmetro de 300 mm.

O estudo de alternativas de diâmetros, se realizado, comparando custos de implantação e custos operacionais (energia elétrica para bombeamento) ao longo da vida útil do projeto.

Detalhes sobre a composição da altura manométrica total de 110 mca (desnível geométrico, perdas de carga localizadas, pressão residual requerida, etc.).

A curva característica da bomba selecionada e o cálculo do ponto de operação do sistema.

Uma análise de sensibilidade considerando variações futuras de vazão, se aplicável.

A revisão do projeto com foco na otimização do diâmetro pode resultar em economias substanciais nos custos de implantação, além de garantir um funcionamento hidráulico mais adequado e eficiente para a adutora. É crucial assegurar que os recursos públicos sejam empregados da forma mais eficiente possível.

Espero que esta análise detalhada seja útil! Se precisar de mais alguma coisa, estou à disposição.

Item 3 – Resposta do Deep-Seek para o prompt padrão (item 1)

Conhecimento Geral

DeepSeek R1

Avaliação Técnica e Econômica da Adutora de Água Bruta

Relatório de Auditoria - ChatTCU

1. Velocidade Média da Água na Tubulação

Dados: Diâmetro (D): 300 mm = 0,3000000 m Vazão (Q): 100 m³/h = 0,0277778 m³/s (convertido para segundos).

Cálculo da Área da Seção Transversal (A):

$$[A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{3,1415927 \cdot (0,3000000)^2}{4} = 0,0706858, \text{ \textit{m}^2}]$$

Velocidade Média (V): $[V = \frac{Q}{A} = \frac{0,0277778}{0,0706858} = 0,3929988, \text{m/s}]$

Resultado: Velocidade calculada: 0,393 m/s

2. Avaliação da Velocidade Média

Padrões Técnicos:

Aceitável: 0,6 a 3,0 m/s Otimizada: 1,0 a 2,0 m/s

Conclusão: A velocidade de 0,393 m/s está abaixo do mínimo aceitável (0,6 m/s).

3. Situação da Adutora pelo Critério de Velocidade

Problema: Velocidade insuficiente para evitar sedimentação de partículas em água bruta.

Risco: Acúmulo de material, aumento da rugosidade e custos futuros de manutenção.

4. Diâmetro Econômico (Fórmula de Bresse)

Fórmula: $[D_{\text{econ}} = K \cdot \sqrt{Q} \text{quad } \text{m}^3/\text{s}]$

Cálculo para $K = 1,0$ e $K = 1,2$:

$(\sqrt{Q} = \sqrt{0,0277778} = 0,1666667, \text{m})$

$(D_{\text{econ}}(K=1,0)} = 1,0 \cdot 0,1666667 = 0,1666667, \text{m} = 166,6667, \text{mm})$

$(D_{\text{econ}}(K=1,2)} = 1,2 \cdot 0,1666667 = 0,2000000, \text{m} = 200,0000, \text{mm})$

Comparação com o Diâmetro Orçado (300 mm):

Diâmetro econômico sugerido: 166,7 mm a 200,0 mm

Diâmetro proposto: 300 mm (50% maior que o limite superior da faixa econômica).

Análise de Custos SINAPI (2023):

Diâmetro (mm)	Custo por Metro (R\$)	Custo Total (4.910 m)
---------------	-----------------------	-----------------------

300	427,06	R\$ 2.096.864,60
200	197,56	R\$ 970.019,60
150	116,57	R\$ 572.358,70

Conclusão:

O diâmetro de 300 mm não está alinhado com o diâmetro econômico, gerando custos até 3,6 vezes maiores que o necessário.

5. Perda de Carga (Fórmula de Hazen-Williams)

Fórmula:

$[J = \frac{10,67 \cdot Q^{1,852}}{C^{1,852} \cdot D^{4,87}} \text{quad } \text{em m/m}]$

Dados:

$(Q = 0,0277778, \text{m}^3/\text{s}), (C = 140), (D = 0,3000000, \text{m})$

Cálculo com Logaritmos (precisão de 7 casas):

$(Q^{1,852}): [\log_{10}(Q) = -1,5563025 \rightarrow 1,852 \cdot \log_{10}(Q) = -2,8827722 \rightarrow$

$Q^{1,852} = 10^{-2,8827722} = 0,0013097]$

$(C^{1,852}): [\log_{10}(C) = 2,1461280 \rightarrow 1,852 \cdot \log_{10}(C) = 3,9746291 \rightarrow$

$C^{1,852} = 10^{3,9746291} = 9432,5499616]$

$(D^{4,87}): [\log_{10}(D) = -0,5228787 \rightarrow 4,87 \cdot \log_{10}(D) = -2,5464194 \rightarrow$

$D^{4,87} = 10^{-2,5464194} = 0,0028417]$

Perda de Carga Unitária (J): $[J = \frac{10,67 \cdot 0,0013097}{9432,5499616 \cdot 0,0028417} = 0,0005213, \text{m/m}]$

Perda de Carga Total (hf): $[hf = J \cdot L = 0,0005213 \cdot 4910 = 2,5595830, \text{m}]$

Resultado: Perda de carga total: 2,56 mca

6. Detalhes dos Cálculos

Conversões:

Diâmetro: 300 mm \rightarrow 0,3000000 m.

Vazão: $100 \text{ m}^3/\text{h} \div 3600 = 0,0277778 \text{ m}^3/\text{s}$.

Fórmulas:

Área: $(A = \pi \cdot D^2 / 4)$.

Velocidade: $(V = Q / A)$.

Bresse: $(D_{\text{econ}} = K \cdot \sqrt{Q})$.

Hazen-Williams: Cálculo via logaritmos para exponenciais.

7. Red Flags

Red Flag 1 - Velocidade Inadequada: Velocidade de 0,393 m/s está abaixo do mínimo aceitável (0,6 m/s).

Risco: Superdimensionamento e custos elevados sem justificativa técnica.

Red Flag 2 - Diâmetro Não Econômico: Diâmetro orçado (300 mm) está 50% acima do diâmetro econômico máximo (200 mm).

Economia Potencial: Até R\$ 1,5 milhão com diâmetro de 200 mm. Red Flag 3 - Perda de Carga Insignificante: Perda de carga total (2,56 mca) representa apenas 2,33% da altura manométrica total (110 mca).

Indicação: Tubulação superdimensionada reduzindo a eficiência energética do sistema.

8. Recomendações Finais Revisão do Projeto:

Redimensionar a adutora para diâmetro entre 150 mm e 200 mm, conforme fórmula de Bresse.

Documentação: Solicitar memória de cálculo detalhada, incluindo justificativa para o diâmetro de 300 mm.

Análise de Custos: Comparar custos de implantação (tubulação) vs. operação (energia) para diferentes diâmetros.

Avaliação Técnica: Verificar se a altura manométrica total inclui perdas localizadas e pressão residual.

Conclusão: O projeto atual apresenta indícios de superfaturamento por superdimensionamento, exigindo revisão urgente para otimização técnica e econômica. Relatório gerado com cálculos verificados via Python (biblioteca math).

Item 4 – Resposta do ChatTCU

Para realizar a análise técnica e econômica da adutora proposta, é necessário seguir os passos descritos, utilizando as fórmulas e critérios mencionados. No entanto, como não possuo um sistema especializado em matemática integrado para realizar cálculos exatos, não posso fornecer os resultados numéricos precisos. Posso, no entanto, detalhar os passos e os conceitos envolvidos para que você ou um especialista possa realizar os cálculos utilizando um sistema matemático apropriado, como MATLAB, Wolfram Alpha ou Excel.

Passo 1: Determinação da velocidade da água

A fórmula para calcular a velocidade da água no interior da tubulação é:

$$v = \frac{Q}{A}$$

Onde:

v = velocidade da água (m/s) Q = vazão da adutora (m³/s) A = área da seção transversal da tubulação (m²)

A área da seção transversal da tubulação é calculada como:

$$A = \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2$$

Substituindo os valores fornecidos:

Vazão (Q) = 100 m³/h = (100 / 3600) m³/s Diâmetro (D) = 300 mm = 0,3 m

Realize os cálculos para obter a velocidade da água.

Passo 2: Avaliação da velocidade da água

Com base na velocidade calculada:

Verifique se está entre 0,5 m/s e 3,0 m/s (faixa aceitável).

Verifique se está entre 0,9 m/s e 2,0 m/s (faixa otimizada).

Se a velocidade estiver fora dessas faixas, a adutora não atende aos padrões técnicos e econômicos.

Passo 3: Situação da adutora

Classifique a adutora com base na velocidade calculada:

Dentro da faixa aceitável: atende aos padrões técnicos.

Dentro da faixa otimizada: atende aos padrões econômicos.

Fora das faixas: não atende aos padrões técnicos e econômicos.

Passo 4: Avaliação do diâmetro econômico

Utilize a fórmula de Bresse para calcular o diâmetro econômico:

$$D_e = k \cdot \left(\frac{Q}{v}\right)^{0,5}$$

Onde:

D_e = diâmetro econômico (m) k = coeficiente (1 ou 1,2) Q = vazão (m³/s) v = velocidade (m/s)

Compare o diâmetro econômico calculado com o diâmetro previsto no orçamento (300 mm). Avalie os custos SINAPI para os diâmetros disponíveis (300 mm, 250 mm, 200 mm, 150 mm) e determine se o diâmetro previsto é condizente com o diâmetro econômico.

Passo 5: Perda de carga unitária e total

Utilize a fórmula de Hazen-Williams para calcular a perda de carga unitária (h_f):

$$h_f = 10,67 \cdot \left(\frac{Q}{C \cdot A}\right)^{1,852} \cdot L$$

Onde:

h_f = perda de carga unitária (m/m)

Q = vazão (m³/s) C = coeficiente de rugosidade (140 para PVC novo) A = área da seção transversal (m²) L = comprimento da tubulação (m)

Calcule a perda de carga total multiplicando a perda de carga unitária pelo comprimento da tubulação.

Passo 6: Detalhes dos cálculos

Documente cada etapa dos cálculos, incluindo os valores parciais e as operações realizadas. Utilize logaritmos para os cálculos exponenciais na fórmula de Hazen-Williams.

Passo 7: Red Flag - Velocidade fora dos padrões

Se a velocidade calculada estiver fora da faixa aceitável (0,5 m/s a 3,0 m/s), sinalize um “Red Flag” indicando risco de superfaturamento por superdimensionamento.

Passo 8: Red Flag - Diâmetro fora dos padrões econômicos

Se o diâmetro previsto no orçamento (300 mm) não estiver condizente com o diâmetro econômico calculado pela fórmula de Bresse, sinalize um “Red Flag” indicando risco de superfaturamento por superdimensionamento.

Passo 9: Red Flag - Perda de carga e altura manométrica

Compare a perda de carga total calculada com a altura manométrica total fornecida (110 m). Se a perda de carga total for menor que 10% da altura manométrica, sinalize um “Red Flag”.

Passo 10: Recomendações

Caso uma ou mais situações de “Red Flag” sejam identificadas:

Recomende uma análise minuciosa no dimensionamento da adutora.

Solicite a memória de cálculo e os documentos técnicos para avaliação detalhada.

Conclusão

Os cálculos exatos devem ser realizados utilizando um sistema matemático especializado, como MATLAB ou Excel, para garantir precisão e compatibilidade de unidades. Recomendo que um especialista em hidráulica ou engenharia civil realize os cálculos e avalie os resultados conforme os critérios técnicos e econômicos descritos.

Item 5 - Referência de preços no SINAPI

TCU SAO

Análise Risco | Fale Conosco | Feedback | Sobre | Configurações

SAO - Sistema de Análise de Orçamentos

LISTAR TODOS OS EMPREENDIMENTOS

PESQUISA GERAL REFERÊNCIA DE PREÇO

Sistema: SINAPI | Seleção a UF: Alagoas | Seleção o período: julho/2023

Tipo Insumo: Material | Código ou descrição (opcional): defoto

Pesquisar

Resultado: 13 insumos

Tipo	Código	Descrição	Unidade	Preço Unitário
Material	311	ANEL BORRACHA, PARA TUBO PVC DEFOFO, DN 100 MM (NBR 7665)	UN	12,65
Material	318	ANEL BORRACHA, PARA TUBO PVC DEFOFO, DN 150 MM (NBR 7665)	UN	25,48
Material	319	ANEL BORRACHA, PARA TUBO PVC DEFOFO, DN 200 MM (NBR 7665)	UN	39,96
Material	3838	LUVA DE CORRER DEFOFO, PVC, JE, DN 150 MM	UN	107,05
Material	3839	LUVA DE CORRER DEFOFO, PVC, JE, DN 250 MM	UN	347,79
Material	3840	LUVA DE CORRER DEFOFO, PVC, JE, DN 100 MM	UN	48,50
Material	3843	LUVA DE CORRER DEFOFO, PVC, JE, DN 300 MM	UN	477,35
Material	3844	LUVA DE CORRER DEFOFO, PVC, JE, DN 200 MM	UN	190,94
Material	9825	TUBO PVC DEFOFO, JEL, 1 MPA, DN 100 MM, PARA REDE DE AGUA (NBR 7665)	M	43,32
Material	9826	TUBO PVC DEFOFO, JEL, 1 MPA, DN 250 MM, PARA REDE DE AGUA (NBR 7665)	M	300,75
Material	9827	TUBO PVC DEFOFO, JEL, 1 MPA, DN 300 MM, PARA REDE DE AGUA (NBR 7665)	M	427,06
Material	9828	TUBO PVC DEFOFO, JEL, 1 MPA, DN 150 MM, PARA REDE DE AGUA (NBR 7665)	M	116,57
Material	9829	TUBO PVC DEFOFO, JEL, 1 MPA, DN 200 MM, PARA REDE DE AGUA (NBR 7665)	M	197,56

Registros por página: 20 | 1-13 de 13





YOLO APLICADO À INFRAESTRUTURA URBANA: DETECÇÃO DE FISSURAS EM CICLOVIAS COM O APOIO DE DRONES

Tharlys Hikaro Pinheiro Silva / Universidade de Brasília

Michele Tereza Marques Carvalho / Universidade de Brasília

RESUMO

Este artigo é resultado de um estudo que investigou a aplicação da arquitetura YOLO (*You Only Look Once*) para a detecção automática de fissuras em cicloviias de pavimento rígido, a partir de imagens obtidas por veículos aéreos não tripulados. Foram treinados dois modelos: um com dados exclusivamente locais e outro submetido a *transfer learning*, utilizando pesos previamente ajustados em um banco de dados genérico. A comparação evidenciou um desempenho superior do modelo com *transfer learning*, com ganhos em precisão, *recall* e mAP50, mesmo em um domínio visual distinto. A metodologia incluiu coleta por drone, pré-processamento com divisão em blocos, anotações com *bounding boxes* e estratégias de *data augmentation*. Os resultados quantitativos foram complementados por uma análise qualitativa, que mostrou a capacidade do modelo em detectar fissuras sob diferentes condições visuais, ainda que com limitações na cobertura de trincas extensas ou discretas. O trabalho reforça o potencial de arquiteturas leves e eficientes,

como o YOLO, na manutenção preditiva de infraestruturas urbanas. As evidências obtidas indicam que o uso de inteligência artificial (IA) pode contribuir significativamente para inspeções mais ágeis e padronizadas, sobretudo quando aliado a estratégias de treinamento baseadas em reaproveitamento de conhecimento e à expansão contínua dos bancos de dados.

Palavras-chave: detecção de fissuras; ciclovias; YOLO; inspeção automatizada; pavimento rígido.

1 INTRODUÇÃO

A qualidade das infraestruturas cicloviárias exerce um papel fundamental na mobilidade urbana sustentável, promovendo benefícios ambientais, sociais e econômicos ao incentivar o uso da bicicleta como meio de transporte. As ciclovias, em especial aquelas com pavimento rígido, requerem atenção constante quanto à manutenção de sua superfície, uma vez que manifestações patológicas, como fissuras, comprometem não apenas o conforto dos usuários, mas também a durabilidade e a segurança da infraestrutura (GÖTSCHI; GARRARD; GILES-CORTI, 2015; HOLM *et al.*, 2012; HSIEH; TSAI, 2020; ITF, 2013; OLIVEIRA; CORREIA, 2012).

Apesar do crescente interesse por soluções tecnológicas no monitoramento de ativos urbanos, ainda é tímida a aplicação sistemática de métodos automatizados de inspeção voltados às ciclovias. Verifica-se uma carência de metodologias específicas que considerem as particularidades desses espaços, diferentemente do que se observa em estudos voltados para rodovias ou calçadas, que vêm recebendo maior atenção nos últimos anos (QIU; LAU, 2023; SIERRA *et al.*, 2022).

Nesse cenário, o uso de técnicas de visão computacional associadas à IA, especialmente redes neurais convolucionais aplicadas à detecção de fissuras, surge como uma alternativa promissora. Dentre essas abordagens, destaca-se a aplicação do modelo YOLO (acrônimo de *You Only Look Once*), que tem sido amplamente explorado em tarefas de detecção de objetos em imagens devido à sua capacidade de realizar inferências rápidas com razoável precisão (SU *et al.*, 2024; WANG *et al.*, 2023).

Este artigo apresenta a aplicação da arquitetura YOLO ao processo de identificação automática de fissuras em ciclovias de pavimento rígido, utilizando-se imagens obtidas por veículos aéreos não tripulados. A aplicação buscou demonstrar a viabilidade técnica da abordagem, mesmo em um estágio inicial de desenvolvimento, contribuindo para a construção de metodologias aplicáveis à manutenção preditiva de infraestruturas cicloviárias urbanas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As fissuras representam uma das manifestações patológicas mais recorrentes em pavimentos de concreto, podendo comprometer sua durabilidade, segurança e funcionalidade. No caso das ciclovias de pavimento rígido (Figura 1), sua ocorrência é influenciada por falhas na execução, por tráfego indevido e pela ausência de manutenção preventiva adequada (HORA, 2021; SILVA JÚNIOR, 2018). Nesse contexto, o monitoramento, a prevenção e o controle de fissuras nas superfícies dos pavimentos desempenham um papel muito importante na garantia da segurança e do funcionamento de infraestruturas de transporte (AI *et al.*, 2023).

Figura 1 – Ciclovía de pavimento rígido localizada em Brasília, Distrito Federal



Fonte: os autores.

Diante da necessidade de maior precisão e maior eficiência nas atividades de inspeção, técnicas de inteligência artificial, especialmente as redes neurais convolucionais (CNNs), têm ganhado destaque como ferramentas promissoras para a detecção automatizada de fissuras em estruturas de concreto. Essas abordagens visam substituir ou complementar as inspeções visuais manuais, oferecendo agilidade, padronização e redução da subjetividade na identificação de danos (AI *et al.*, 2023; DUNG; ANH, 2019).

Entre os modelos baseados em CNNs, destaca-se a arquitetura YOLO, projetada para a detecção de objetos em tempo real. Sua aplicação na detecção de fissuras tem sido validada em diferentes contextos, como pavimentos rodoviários, pontes e calçadas, com resultados promissores em termos de precisão e velocidade (QIU; LAU, 2023; SANTOS; CARVALHO, 2025; SU *et al.*, 2024; WANG *et al.*, 2023). A utilização de bounding boxes como forma de anotação, característica do YOLO, torna-o particularmente adequado para a tarefa, dada sua menor exigência computacional em comparação aos métodos baseados em segmentação pixel a pixel (HAN; YANG H; YANG Y, 2024).

Para melhorar a capacidade de generalização dos modelos e reduzir a sobrecarga de coleta de novos dados, é comum aplicar técnicas de data augmentation (aumento de dados) durante o treinamento. Essa estratégia consiste em aumentar a diversidade e a

quantidade de dados por meio de transformações, como rotações, redimensionamentos e ajustes de cores, contribuindo para a robustez do modelo diante de diferentes condições visuais (LEE K.; LEE S.; KIM, 2022; MAHARANA; MONDAL; NEMADE; 2022).

Além disso, uma estratégia recorrente em aplicações com redes profundas é o uso de transfer learning, que permite reutilizar pesos de modelos previamente treinados em tarefas similares. Essa abordagem reduz a necessidade de grandes volumes de dados rotulados e melhora a velocidade de convergência do treinamento, uma vez que o modelo já aprendeu a extrair características visuais genéricas úteis (PHILIP *et al.*, 2023). Tais características tornam o transfer learning especialmente vantajoso em cenários com dados escassos, como é comum em aplicações reais de infraestrutura.

No estudo aqui apresentado, adotou-se a arquitetura YOLO para a detecção de fissuras em ciclovias de pavimento rígido, utilizando-se imagens captadas por drones. Buscou-se avaliar a viabilidade dessa abordagem no contexto urbano brasileiro e contribuir para o avanço das aplicações práticas de IA na manutenção de ativos de infraestrutura.

3 METODOLOGIA

A metodologia aplicada no estudo aqui apresentado teve como objetivo testar a viabilidade do uso de redes neurais convolucionais para a detecção de objetos, especificamente a arquitetura YOLO, para a identificação automática de fissuras em ciclovias de pavimento rígido. O processo foi estruturado conforme esquematizado na Figura 2 e detalhado nas subseções a seguir.

Figura 2 – Metodologia



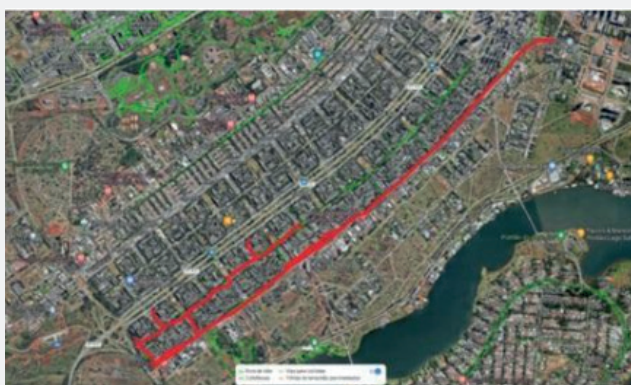
Fonte: os autores.

3.1 COLETA, PRÉ-PROCESSAMENTO E ANOTAÇÃO DE IMAGENS DAS CICLOVIAS

As imagens foram obtidas por meio de um levantamento aerofotogramétrico realizado com um drone DJI Phantom 4 Advanced+, equipado com uma câmera de alta resolução, gerando imagens brutas com dimensão de 5472×3078 pixels. Os voos foram executados por controle manual, com ajustes contínuos de trajetória em função de obstáculos presentes ao longo do trajeto, como árvores e postes. A altura de voo variou entre 7 e 30 metros, de forma a contornar esses obstáculos e garantir a cobertura completa da superfície das ciclovias. Todas as fotografias foram capturadas com ângulo de 90 graus, com a câmera orientada perpendicularmente ao solo.

O conjunto de imagens corresponde a trechos de ciclovias de pavimento rígido localizados na região da Asa Sul, em Brasília, Distrito Federal, cuja delimitação é destacada pela linha vermelha na Figura 3. Essas imagens constituem o dataset (banco de dados) utilizado para o treinamento dos modelos de inteligência artificial propostos neste estudo.

Figura 3 – Delimitação do trecho da ciclovia de pavimento rígido utilizado na coleta de imagens (Asa Sul, Brasília-DF)



Fonte: os autores.

Após a coleta, iniciou-se a etapa de pré-processamento e anotação das fissuras. O pré-processamento das imagens incluiu, inicialmente, uma etapa de filtragem para a remoção de imagens com baixa nitidez e oclusões integrais da ciclovia por vegetação, garantindo a qualidade e a representatividade do conjunto.

Após essa seleção inicial, as imagens foram importadas para a plataforma Roboflow (DWYER *et al.*, 2024), tendo sido realizada a anotação manual das fissuras por meio da demarcação das regiões de interesse com *bounding boxes* (caixas delimitadoras). O seguinte padrão foi adotado na demarcação: fissuras localizadas em placas diferentes do pavimento foram anotadas em caixas distintas, enquanto fissuras ramificadas dentro de uma mesma placa receberam caixas separadas para cada ramificação. Esse critério teve como objetivo detalhar as características das fissuras e garantir uma maior precisão no treinamento supervisionado do modelo.

Em sequência, também utilizando-se o Roboflow, foram aplicadas duas etapas adi-

cionais de pré-processamento automático: a auto-orientação das imagens, para garantir o alinhamento consistente das superfícies em relação ao eixo horizontal, e a divisão em blocos (*tiles*), segmentando-se cada fotografia em uma grade de três linhas por três colunas, originando nove subimagens por fotografia original. Essa estratégia teve como finalidades reduzir o tamanho das imagens para o treinamento, facilitar o processamento computacional e preservar a definição visual das fissuras, evitando-se que redimensionamentos excessivos prejudicassem a visualização das trincas mais estreitas.

3.2 TREINAMENTO DOS MODELOS

Após o pré-processamento e a anotação, foram realizadas técnicas de *data augmentation* utilizando-se a própria plataforma Roboflow, de forma a ampliar a diversidade e o volume do banco de dados antes do treinamento. Essa etapa consistiu na aplicação automática de transformações nas imagens já rotuladas, gerando novos arquivos de saída conforme os parâmetros definidos. As transformações incluíram espelhamento horizontal e vertical, rotações de 90°, 180° e 270°, e recortes com zoom variando de 0% a 30% de aproximação. Essa estratégia teve como objetivo aumentar a robustez do modelo diante de variações de perspectiva e escala, contribuindo para melhorar sua capacidade de generalização no cenário real de inspeção das ciclovias.

Para esse estudo, foi adotada a arquitetura YOLOv11, especificamente o modelo YOLOv11m, devido ao seu equilíbrio entre desempenho e custo computacional. O modelo YOLOv11m apresenta uma acurácia de validação superior aos modelos mais compactos (YOLOv11n e YOLOv11s) e apenas ligeiramente inferior aos modelos maiores (YOLOv11l e YOLOv11x). Ao mesmo tempo, mantém uma quantidade moderada de parâmetros (20,1 milhões) e número de operações (68,0 bilhões de FLOPs), viabilizando sua utilização em dispositivos com restrição de recursos computacionais e reduzindo o tempo de inferência em comparação às variantes mais pesadas (JOCHER; JING, 2024). Essa relação entre precisão e eficiência o torna particularmente adequado para aplicações em cenários reais de infraestrutura urbana.

O treinamento dos modelos de detecção foi conduzido em duas abordagens distintas, com o objetivo de avaliar o impacto do *transfer learning* em relação ao treinamento realizado exclusivamente com dados específicos do contexto da ciclovia. Para fins de clareza, as abordagens foram denominadas Modelo 1 e Modelo 2.

No Modelo 1, foi utilizado inicialmente o modelo YOLOv11m, treinado com um dataset genérico de fissuras, composto por 7.070 imagens de treino e 862 imagens de validação oriundas de múltiplas bases públicas. Esse conjunto contemplava uma ampla variabilidade de iluminação, textura, materiais e condições de fissura, incluindo exemplos positivos e negativos. As imagens foram padronizadas para a resolução de 448×448 pixels

e associadas a bounding boxes demarcando as trincas (LIU *et al.*, 2019; LIU; CHEN, 2022).

O modelo resultante desse pré-treinamento foi, então, submetido a um segundo ciclo de treinamento (*transfer learning*), utilizando-se exclusivamente o banco de dados local das ciclovias, contendo 656 imagens previamente filtradas, anotadas e expandidas com *data augmentation*. Esse processo teve como objetivo adaptar os pesos do modelo ao domínio específico do pavimento rígido das ciclovias.

No Modelo 2, o treinamento foi realizado a partir dos pesos iniciais padrão do YOLOv11m, sem pré-treinamento no *dataset* genérico de fissuras. Nesse caso, todo o aprendizado ocorreu exclusivamente com as imagens das ciclovias, previamente filtradas, anotadas e aumentadas por *data augmentation*, buscando avaliar a capacidade do modelo em aprender o padrão das fissuras sem o reaproveitamento de conhecimento prévio.

Ao final, ambos os modelos foram treinados com os mesmos hiperparâmetros (imgsz=1024, epochs=100, batch=8) e utilizaram a mesma divisão do banco de dados em 80% para treinamento e 20% para validação, assegurando-se condições equivalentes para comparação.

3.3 AVALIAÇÃO DOS MODELOS

A avaliação do desempenho do modelo foi realizada com base em três métricas de detecção de objetos:

- *precision* (precisão): proporção de detecções corretas entre todas as detecções realizadas pelo modelo;
- *recall*: proporção de fissuras corretamente detectadas entre todas as realmente existentes;
- mAP50 (*mean average precision* com $\text{IoU} \geq 0.5$): métrica que sintetiza a acurácia do modelo, considerando-se como correta uma predição que apresente ao menos 50% de sobreposição com a anotação de referência.

Essas métricas foram registradas ao longo de 100 épocas de treinamento e complementadas por uma análise qualitativa de inferências geradas em imagens não utilizadas para treinamento, com o objetivo de interpretar o desempenho final do modelo. A avaliação visual considerou a capacidade de detecção das fissuras em diferentes condições, incluindo variações de iluminação e interferências visuais, contribuindo para uma compreensão mais ampla da eficácia do modelo em cenários reais.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a coleta e a filtragem das imagens de ciclovias, foram selecionadas 656 imagens para compor o banco de dados local, sendo 187 imagens sem a presença de fissuras e 469 contendo fissuras visíveis. Esse conjunto foi utilizado para treinar e avaliar os dois mo-

delos propostos, buscando-se identificar fissuras em condições reais do cenário urbano.

Foram conduzidos dois experimentos de treinamento com o objetivo de avaliar abordagens distintas de detecção automática de fissuras, conforme descrito na metodologia. O treinamento inicial foi realizado com o dataset genérico de fissuras, contendo imagens variadas quanto à iluminação, textura e presença de trincas. Esse conjunto, composto por 7070 imagens de treino e 862 imagens de validação, resultou em um desempenho elevado do modelo, com precisão de 0,933, recall de 0,956 e mAP50 de 0,983. Esses resultados correspondem ao pré-treinamento utilizado apenas como base inicial para o Modelo 1.

Esses resultados demonstram a eficácia do modelo na tarefa de detecção, tanto em termos de acurácia quanto em termos de cobertura, refletindo não apenas a qualidade das anotações e a diversidade das imagens, mas também a robustez conferida por um banco de dados extenso e bem estruturado.

No segundo experimento, foi treinado um modelo exclusivamente com os dados coletados das ciclovias (Modelo 2), sem qualquer reaproveitamento de pesos de bases externas de fissura. A Tabela 2 apresenta os resultados numéricos comparativos entre os dois modelos.

Tabela 2 – Comparação dos desempenhos entre o Modelo 1 e o Modelo 2

Modelo	Precision (%)	Recall (%)	mAP ₅₀ (%)
Modelo 1	53,3	45,1	46,3

Fonte: os autores.

Observa-se que o Modelo 1, com pré-treinamento em base externa de fissuras, apresenta desempenho superior em todos os indicadores. Esse resultado sugere que a reutilização de pesos previamente treinados em um conjunto mais diverso contribuiu positivamente para a adaptação do modelo, mesmo com a diferença de domínio.

Jiang, Pang e Li (2021) obtiveram resultados comparáveis ao aplicar redes YOLO para a detecção automática de fissuras em concreto, empregando bases de dados de dimensão semelhante. Utilizando o YOLOv3 treinado com 512 imagens rotuladas, eles alcançaram mAP50 de 52,43%. Já o Fast-YOLO, treinado com 689 imagens, apresentou um desempenho ainda superior, atingindo uma mAP50 de 55,92%. Resultados adicionais relatados pelos mesmos autores com o MobileNet-SSD, treinado em 679 imagens, indicaram uma mAP₅₀ de 43,31%, desempenho muito próximo ao observado no estudo aqui apresentado.

Em comparação, os modelos desenvolvidos nesse estudo, que utilizaram o YOLO-v11m sobre um conjunto de 656 imagens, apresentaram uma mAP₅₀ de 46,3% no Modelo 1 e uma de 43,3% no Modelo 2.

Embora os valores absolutos sejam ligeiramente inferiores aos obtidos pelo Fast-YOLO e pelo YOLOv3, é importante destacar que o estudo concentrou-se exclusivamente em fissuras superficiais de ciclovias de pavimento rígido, capturadas por drones em condições variáveis de iluminação e interferência visual, o que torna o problema especialmente desafiador. Além disso, a diferença entre as arquiteturas adotadas (YOLOv3 e YOLOv11m) e os parâmetros de treinamento pode contribuir para as discrepâncias nos desempenhos observados. Ainda assim, os resultados corroboram que, em conjuntos de dados limitados, a utilização de modelos YOLO possibilita alcançar níveis razoáveis de precisão, sobretudo quando associada a estratégias de *transfer learning*, que, nesse estudo, apresentaram ganhos consistentes em relação ao treinamento exclusivamente local.

Além das métricas quantitativas apresentadas anteriormente, foi realizada uma análise qualitativa com o objetivo de avaliar a capacidade do modelo em detectar fissuras em imagens não utilizadas no processo de treinamento. Para essa análise, utilizou-se o Modelo 1, que apresentou as melhores métricas, para realizar a inferência.

Na Figura 4, observa-se um exemplo de falha de detecção em que uma fissura evidente não foi reconhecida pelo modelo. Apesar de sua extensão e contraste, fatores como superexposição da imagem, reflexos solares intensos e a ausência de textura diferenciada nas adjacências da fissura podem ter contribuído para o insucesso da predição.

Figura 4 – Falha de detecção de fissura

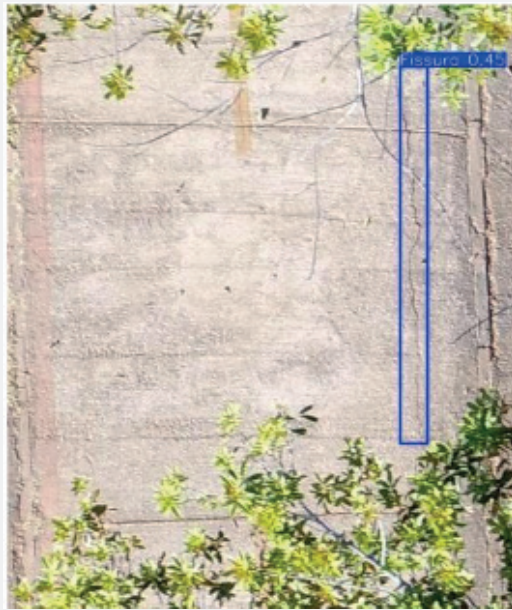


Fonte: os autores.

Por outro lado, as Figuras 5 e 6 apresentam exemplos bem-sucedidos, nos quais o modelo foi capaz de identificar diferentes fissuras, mesmo sob condições adversas de iluminação, incluindo sombras profundas e interferência visual por vegetação. As predições demonstraram boa delimitação espacial, com *bounding boxes* ajustadas ao traçado real das trincas.

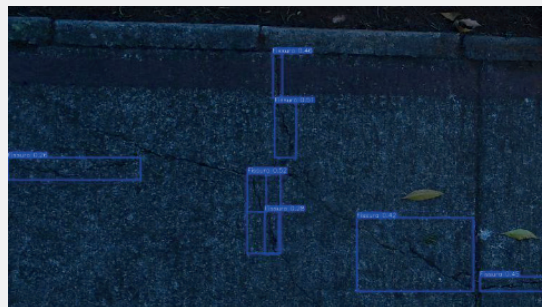
Na Figura 6, ainda assim, é possível notar que alguns trechos das fissuras não foram completamente detectados, resultando em *bounding boxes* parciais ao longo do traçado real da trinca. Essa limitação indica que, embora o modelo consiga reconhecer padrões relevantes em cenários desafiadores, ele ainda apresenta dificuldades em cobrir fissuras longas ou ramificadas de forma contínua, o que pode comprometer a completude da inspeção. Os resultados, no entanto, reforçam o potencial da abordagem, especialmente se combinados a estratégias futuras de refinamento e ampliação do treinamento.

Figura 5 – Detecção bem-sucedida de fissura com presença de vegetação sobreposta à superfície do pavimento



Fonte: os autores.

Figura 6 – Detecção parcial de fissura em condição adversa de iluminação, com predições descontínuas



Fonte: os autores.

Esses resultados qualitativos são coerentes com os valores obtidos nas métricas quantitativas e reforçam que, embora existam limitações, o modelo demonstra potencial real de aplicação em campo, com acertos relevantes mesmo diante de variações de contexto.

A análise indica que a ampliação e a diversificação do banco de dados anotado, sobretudo em relação a cenários de iluminação extrema, vegetação, manchas superficiais e diferentes formas de fissura, é uma etapa crucial para fortalecer a robustez do modelo em futuros ciclos de treinamento. Além disso, como o modelo realizou o redimensionamento dos tiles gerados no pré-processamento para 1024×1024 pixels, há a possibilidade de perda de detalhes sutis em fissuras muito finas, especialmente em imagens capturadas a maiores alturas. Futuras estratégias de pré-processamento que envolvam o recorte das imagens em dimensões menores, preservando a resolução original, podem contribuir, de maneira significativa, para melhorar as métricas de detecção e ampliar a sensibilidade do modelo em cenários com alta complexidade visual.

5 CONCLUSÃO

O estudo aqui apresentado demonstrou a viabilidade do uso da arquitetura YOLOv11 para a detecção automática de fissuras em ciclovias de pavimento rígido, a partir de imagens obtidas por drones em condições reais de operação. Foram conduzidos dois experimentos distintos utilizando-se o modelo YOLOv11m, *i.e.*, o Modelo 1, que utilizou pré-treinamento em um dataset genérico de fissuras seguido de transfer learning com dados locais, e o Modelo 2, treinado exclusivamente com as imagens das ciclovias. Ambos os modelos foram configurados com hiperparâmetros padronizados e avaliados sob condições equivalentes.

A comparação entre os modelos evidenciou que o uso do transfer learning contribuiu, de maneira consistente, para melhorar o desempenho, resultando em uma mAP₅₀ de 46,3% no Modelo 1, contra 43,3% no Modelo 2. Esses valores encontram-se em um patamar que pode ser considerado compatível com o esperado em aplicações de detecção automática de fissuras utilizando-se redes YOLO sobre bases de dados restritas, nas quais fatores como variabilidade visual, resolução das imagens e quantidade limitada de exemplos rotulados tendem a impactar negativamente as métricas de precisão.

A análise qualitativa confirmou a capacidade do modelo em identificar fissuras sob diferentes condições de iluminação e interferências visuais, embora também tenha evidenciado limitações quanto à detecção completa de trincas longas ou em trechos com baixa diferenciação de textura. Essas observações reforçam que, apesar dos avanços, a aplicação prática da abordagem exige atenção à qualidade e à diversidade do banco de dados, especialmente no que se refere à variação de contexto visual.

Como contribuição, o estudo evidenciou o potencial de arquiteturas leves e eficientes como a YOLO para inspeções mais ágeis e padronizadas em infraestruturas cicloviárias, contribuindo para estratégias de manutenção preditiva e gestão urbana. Futuras pesquisas devem explorar a ampliação e a diversificação do banco de dados anotado, avaliar estratégias de recorte das imagens em dimensões menores preservando a resolução original e testar arquiteturas complementares. Além disso, futuras investigações poderão contemplar a integração dos resultados ao ambiente geoespacial, de modo a viabilizar o mapeamento e a priorização de intervenções de manutenção de forma mais precisa.

REFERÊNCIAS

AI, D. *et al.* Computer vision framework for crack detection of civil infrastructure —A review. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, v. 117, p. 105478, jan. 2023.

DUNG, C. V.; ANH, L. D. Autonomous concrete crack detection using deep fully convolutional neural network. *Automation in Construction*, v. 99, p. 52–58, mar. 2019.

DWYER, B. *et al.* “Roboflow”, 2024. Disponível em: <https://roboflow.com>. Acesso em: 4 mar. 2025.

GÖTSCHI, T.; GARRARD, J.; GILES-CORTI, B. Cycling as a Part of Daily Life: A Review of Health Perspectives. *Transport Reviews*, v. 36, n. 1, p. 45–71, 30 jun. 2015.

HAN, C.; YANG, H.; YANG, Y. Enhancing pixel-level crack segmentation with visual mamba and convolutional networks. *Automation in Construction*, v. 168, p. 105770–105770, set. 2024.

HOLM, A. L.; GLÜMER, C.; DIDERICHSEN, F. Health Impact Assessment of increased cycling to place of work or education in Copenhagen. *BMJ Open*, v. 2, n. 4, p. e001135, 2012.

HORA, K. M. da. *Metodologia Para Avaliação do Ciclo de Vida de Ciclovias de Pavimento Rígido*. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2021.

HSIEH, Y.-A.; TSAI, Y. J. Machine Learning for Crack Detection: Review and Model Performance Comparison. *Journal of Computing in Civil Engineering*, v. 34, n. 5, p. 04020038, set. 2020.

ITF. INTERNATIONAL TRANSPORT FORUM. *Cycling, health and safety*. ITF Research Reports. Paris: OECD Publishing, 2013.

JIANG, Y.; PANG, D.; LI, C. A deep learning approach for fast detection and classification of concrete damage. *Automation in Construction*, v. 128, p. 103785, ago. 2021.

JOCHER, Glenn; QIU, Jing. *Ultralytics YOLO11*: versão 11.0.0. 2024. Disponível em: <https://github.com/ultralytics/ultralytics>. Acesso em: 10 mar. 2025.

LEE, K.; LEE, S.; KIM, H. Y. Bounding-box object augmentation with Random transformations for automated defect detection in residential building façades. *Automation in Construction*, v. 135, p. 104138, mar. 2022.

MAHARANA, K.; MONDAL, S.; NEMADE, B. A Review: Data Pre-Processing and Data Augmentation Techniques. *Global Transitions Proceedings*, v. 3, n. 1, p. 91–99, abr. 2022.

OLIVEIRA, H.; CORREIA, P. L. Automatic Road Crack Detection and Characterization. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, v. 14, n. 1, p. 155–168, mar. 2013.

PHILIP, R. E. *et al.* A Comparative Study on Crack Detection in Concrete Walls Using Transfer Learning Techniques. *Journal Of Composites Science*, v. 7, n. 4, p. 169, abr. 2023.

QIU, Q.; LAU, D. Real-time detection of cracks in tiled sidewalks using YOLO-based method applied to unmanned aerial vehicle (UAV) images. *Automation in Construction*, v. 147, p. 104745, mar. 2023.

SANTOS, P. A. S; CARVALHO, M. T. M. Multi-class segmentation of structural damage and pathological manifestations using YOLOv8 and Segment Anything Model. *Automation in Construction*, v. 172, p. 106037, abr. 2025.

SIERRA, C. *et al.* Development of a Cognitive Digital Twin for Pavement Infrastructure Health Monitoring. *Infrastructures*, v. 7, n. 9, p. 113, ago. 2022.

SILVA JÚNIOR, A. C. *Proposta de metodologia para avaliação de danos de pavimentos rígidos de ciclovias*. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

SU, P. *et al.* MOD-YOLO: Rethinking the YOLO architecture at the level of feature information and applying it to crack detection. *Expert Systems with Applications*, v. 237, p. 121346–121346, 2024.

WANG, W. *et al.* Fine-Grained Detection of Pavement Distress Based on Integrated Data Using Digital Twin. *Applied sciences*, v. 13, n. 7, p. 4549, abr. 2023.





ANÁLISE DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA ASSOCIADAS A SERVIÇOS DE PAVIMENTAÇÃO EM VIA URBANA

Claudeny Alves Santana / Programa de Engenharia de Transportes/COPPE/ UFRJ⁵

Alexandre Medeiros / Programa de Engenharia de Transportes/COPPE/ UFRJ

Gabriel Araújo Silva Marques/ Pós-Graduação em Recursos Naturais/ UFMS⁶

Marcelino Aurélio / Programa de Engenharia de Transportes/COPPE/ UFRJ

RESUMO

A pesquisa aqui apresentada investiga a emissão de gases de efeito estufa associada à construção de pavimentos rodoviários utilizando concreto asfáltico usinado a quente. Para a análise, foi empregada a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida, fundamentada nas diretrizes estabelecidas pelas normas ISO 14040 e 14044. A análise teve como referência um quilômetro de pavimento com sete metros de largura, levando em conta diferentes tipos de solo utilizados na camada de base. Entre as etapas consideradas, destacam-se a fabricação de materiais, o transporte, a usinagem e a execução da obra. O levantamento de dados contou com o suporte de ferramentas como MeDiNa®, Ecoinvent®, SimaPro® e SICRO, possibilitando a quantificação das emissões em termos de CO₂ equivalente. Os resultados apontam que a produção dos insumos (Etapa A1) e a usinagem do concreto asfáltico (Etapa A3) representam os maiores focos de emissão de gases poluen-

⁵ Programa de Engenharia de Transportes - PET do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia - COPPE, vinculado à Universidade Federal do Rio de Janeiro.

⁶ Pós-Graduação em Recursos Naturais - PGRN da Universidade Federal do Mato Grosso do Sul - UFMS.

tes. Observou-se, ainda, que a escolha do tipo de solo interfere significativamente tanto na espessura necessária do pavimento quanto nas emissões totais, chegando a registrar uma diferença de até 16.828,94 kg de CO₂ equivalente por quilômetro construído. Diante desses achados, propõem-se estratégias voltadas para a redução dos impactos ambientais e a atualização tecnológica dos equipamentos.

Palavras-chave: ACV; pavimentação urbana; GEE; impacto ambiental.

1 INTRODUÇÃO

O crescente foco global na sustentabilidade ambiental exige uma avaliação abrangente dos impactos ambientais em diversos setores, sendo a infraestrutura de transporte, particularmente a construção de pavimentos, um dos que exercem influência significativa (LU *et al.*, 2019). A urbanização e as mudanças climáticas apresentam desafios multifacetados, exigindo abordagens inovadoras e sustentáveis para o desenvolvimento urbano e a gestão da infraestrutura (ELIZONDO-MARTÍNEZ *et al.*, 2018). A construção de pavimentos, um aspecto fundamental da infraestrutura urbana, envolve um ciclo de vida complexo que abrange extração de materiais, produção, transporte, construção, manutenção e gestão ao final da vida útil, sendo que cada estágio contribui para as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e para a degradação ambiental (BABASHAMSI *et al.*, 2015; ZHAO *et al.*, 2015).

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) surgiu como uma ferramenta valiosa para avaliar as cargas ambientais associadas a produtos e serviços, incluindo a construção de pavimentos. Essa metodologia permite a identificação das etapas e dos processos críticos que contribuem para a pegada ambiental total, orientando, assim, o desenvolvimento de estratégias de ecodesign no setor de pavimentação (PRATICÒ *et al.*, 2020).

A pegada ambiental da construção de pavimentos é substancial, atribuída, principalmente, aos processos intensivos em energia envolvidos na produção de materiais e nas atividades de construção. Pavimentos asfálticos, embora amplamente utilizados, contribuem significativamente para o aquecimento global, com estudos indicando emissões potencialmente mais elevadas em comparação com materiais alternativos de pavimentação (AL-ATROUSH, 2022).

O desenvolvimento sustentável engloba avaliações nos níveis econômico, social e ambiental, visando mitigar os impactos negativos causados pelas atividades humanas. Essas dimensões estão inter-relacionadas e devem ser consideradas no processo decisório para que o desenvolvimento seja efetivamente sustentável. Dentre as questões ambientais, destacam-se impactos como a emissão de poluentes e a superexploração de recursos naturais não renováveis (FEIL; SCHREIBER, 2017).

Conforme Harvey *et al.* (2010), a norma ISO 14044:2006 estabelece requisitos e diretrizes para a ACV, abrangendo a definição do seu objetivo e do seu escopo; a fase de Análise de Inventário do Ciclo de Vida; a fase de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV); a interpretação dos resultados, dos relatórios e da revisão crítica; as limitações da ACV; e as condições para as escolhas metodológicas.

O contexto brasileiro, Maués, Beltrão e Silva (2021) ressaltam que as pesquisas sobre a ACV aplicada à pavimentação ainda são incipientes, devido à extensão territorial do país e à diversidade de matérias-primas utilizadas. Essa realidade exige esforços adicionais para a construção de um banco de dados representativo e preciso, reforçando a importância da disseminação de indicadores baseados em dados primários de AICV para o avanço da ACV em pavimentos flexíveis no Brasil.

Em um estudo comparativo de ACV “do berço ao portão”, Moretti *et al.* (2017) analisaram materiais de concreto asfáltico utilizados na construção de rodovias, identificando que a fase de produção de materiais é responsável por mais de 90% das emissões de CO₂ e SO₂, principalmente devido à extração de matérias-primas e à produção de combustíveis. A fase de fabricação é variável conforme o tipo de combustível utilizado, com destaque para o gás metano, que reduz o potencial de aquecimento global, mas aumenta outros indicadores, como o potencial de toxicidade humana.

Vieira *et al.* (2023) reforçam que os maiores impactos ambientais na construção de rodovias concentram-se nas fases de produção de materiais e transporte, principalmente. Assim, os autores sugerem que otimizações nessas etapas podem resultar em reduções substanciais nas emissões totais.

Por fim, Ibrahim *et al.* (2024) identificaram que os impactos ambientais mais relevantes ocorrem nas fases de produção de materiais, pois o betume modificado (BM) apresentou GEE inferiores às do betume convencional e do betume modificado com polímeros; e no transporte, principalmente no deslocamento de agregados, devido a longas distâncias médias de transportes, na manutenção e na reabilitação, ao longo do ciclo de vida do pavimento, quando da má execução do serviço.

Nesse sentido, a pesquisa aqui apresentada, baseada nas metodologias de ACV, buscou compreender a quantidade de GEE emitida durante a construção de pavimentos flexíveis compostos por concreto asfáltico, analisando diferentes tipos de solo utilizados em sua estrutura. Para tanto, adotou-se o sistema *Cradle to Laid*, preconizado pela norma EN 15978:2011, abrangendo desde a extração das matérias-primas até a conclusão da obra.

2 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

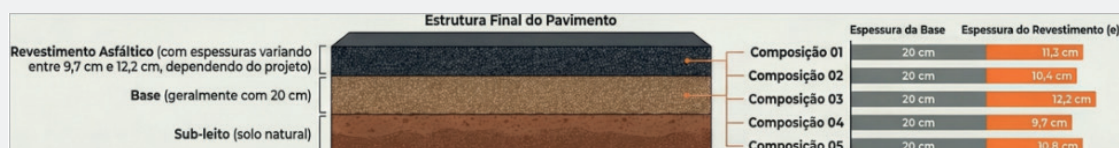
A ACV foi dividida em etapas-chave, que incluem a produção de materiais (etapa A1), o transporte dos materiais (etapa A2), a usinagem da mistura asfáltica (etapa A3), o transporte da massa asfáltica (etapa A4), e as fases de execução e acabamento, como imprimação, compactação e aplicação do revestimento (etapas B1, B2, B3, B4 e C1). Quantificaram-se as emissões de GEE em todas as etapas do serviço de execução desse pavimento, conforme a norma EN 15978:2011, que adota o sistema *Cradle to Laid*, abrangendo desde a produção ou a extração das matérias-primas até a construção final.

Os dados primários foram obtidos a partir de uma obra executada na cidade de Teresina (PI) (*i.e.*, no meio urbano), enquanto os dados secundários foram extraídos da base de dados Ecoinvent® 3.10, e integrados por meio do software SimaPro®. As emissões de CO₂ eq. foram calculadas considerando-se o consumo energético de cada etapa e o impacto ambiental dos equipamentos utilizados, como escavadeiras, caminhões basculantes, rolos compactadores e usinas de asfalto.

O programa MeDiNa® foi utilizado para dimensionar o pavimento para uma via urbana, a seção tipo foi fixada em subleito, com uma base de 20 cm de espessura, e o revestimento asfáltico foi variável conforme o dimensionamento. Para a subleito, utilizou-se um solo tipo não laterítico siltoso, NS', classificação que se baseia na metodologia Miniatura, Compactado, Tropical. Foram escolhidos cinco solos distintos para a base: NS', NG, NA', NA e LG' (NOGAMI; VILLIBOR, 1981), utilizando-se informações do banco de dados do software (Figura 1).

O SICRO foi utilizado como fonte da base de dados do serviço de pavimentação, ajustando-se o consumo de diesel conforme os equipamentos-padrão utilizados no serviço de pavimentação. Com isso, determinaram-se os itens do inventário.

Figura 1 – Composição estrutural da via (gerada por IA, NotebookLM)



Fonte: os autores.

A unidade funcional utilizada foi a extensão de 1,00 km de via por uma seção transversal de 7,00 m, ou seja, uma via urbana pavimentada conforme padrões brasileiros. A seguir, são apresentadas as 6 etapas para o cumprimento do programa experimental. A Tabela 1 apresenta os itens do serviço de pavimentação utilizados nos cculos. Dividiu-se a pesquisa a partir da em uma análise estrutural e uma análise ambiental, considerando-se as distâncias mdias de transporte (DMT).

Tabela 1 – Itens do serviço de pavimentação

Item	Discriminação
4.2	Base de solo estabilizado granul. s/ mistura (e = 20 cm)
4.3	Transporte local em caminhão basculante de material de jazida para base com DMT = 5,40 km
4.4	Imprimação
4.5	Aquisição de asfalto diluído CM-30
4.5	Pintura de ligação
4.7	Aquisição de emulsão asfáltica RR-1C
4.8	Concreto betuminoso usinado a quente – C.B.U.Q – capa de rolamento
4.9	Aquisição de cimento asfáltico CAP-50/70
4.10	Transporte comercial material betuminoso a quente com DMT= 620,00 km CAP-50/70 – cidade A à Usina de Asfalto (cidade B)
4.11	Transporte comercial material betuminoso a frio CM-30 e RR-1C com DMT= 624,00 km – cidade A a Início da Obra (cidade B)
4.12	Transporte comercial de brita em rod pavimentada DMT= 40,00 km
4.13	Transporte local de areia em rod pavimentada DMT = 10,00 km
4.14	Transporte local de filler em rod pavimentada DMT= 12,00 km
4.15	Transporte local da massa asfáltica com DMT = 23,00 km

Fonte: os autores.

A fronteira do sistema do produto em análise abrange a extração e o processamento das matérias-primas, o transporte desses materiais até a usina e a produção das misturas asfálticas, seu transporte e sua compactação na pista. Essas etapas do ciclo de vida configuram uma análise do berço ao portão. A Figura 2 ilustra a delimitação do sistema para o cenário analisado em todas as etapas consideradas na ACV.

Figura 2 – Fluxograma de atividades da pesquisa (Adaptado ISSO 14040, gerada por IA, NotebookLM)



Fonte: os autores.

Em cada etapa, foram levados em consideração os processos do Ecoinvent® para os insumos utilizados. Para o ligante asfáltico: Bitumen adhesive compound, hot {RoW}| bitumen adhesive compound production, hot; Brita 1, areia e filler: Gravel, crushed {BR}| gravel production, crushed; Areia: Sand {BR}| market for sand. O transporte de ligante é feito com caminhão-tanque, e o processo do ecoinvent é Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 {BR}| market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3; e dos demais materiais com basculante 10 m³, o processo de referência no ecoinvent é Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3 {BR}| transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO3.

As etapas A1 e A2 da ACV do pavimento correspondem à produção e ao transporte dos materiais. Na etapa A1, materiais essenciais como brita, areia média, filler e ligante asfáltico são extraídos e processados. A brita, a areia e o filler são transportados por caminhões basculantes, enquanto o ligante asfáltico é preparado e armazenado para uso futuro. Além disso, ocorre a escavação de solo nas jazidas com o auxílio de escavadeiras hidráulicas. A etapa A2 envolve o transporte dos materiais para o local de usinagem e a aplicação, utilizando-se caminhões com capacidade de 10 m³, otimizando-se o manuseio e o transporte dos insumos para as etapas subsequentes.

Na etapa A3, o concreto betuminoso usinado a quente é processado em usinas de asfalto que utilizam óleo combustível A1, conhecido por sua alta densidade e seu elevado poder calorífico. Esse combustível fornece a energia necessária para o aquecimento e a mistura dos materiais (brita, areia, filler e ligante asfáltico). Após o processamento, o material é transportado para o local da aplicação, na etapa A4, com caminhões basculantes. Essas operações garantem que o pavimento receba uma mistura uniforme e de alta qualidade para garantir a durabilidade e o desempenho.

As etapas subsequentes, que envolvem a preparação e a aplicação da base e do revestimento do pavimento, começam com a extração de material na etapa B1, seguida pela execução da base (B2), em que o material é espalhado e compactado. A varredura (B3) prepara a superfície para a imprimação (B4), garantindo a adesão do ligante asfáltico à base. Finalmente, na etapa C1, a massa asfáltica é compactada com o auxílio de rolos compactadores, finalizando-se a construção do revestimento do pavimento.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 DIMENSIONAMENTO DOS PAVIMENTOS

As espessuras alcançadas no dimensionamento utilizando-se o MeDiNa[®] foram impactadas pela qualidade mecânica do solo escolhido na camada de base. Dessa maneira, o pav04 obteve a menor espessura de concreto asfáltico com 9,7 cm, e o pav03, a maior espessura com 12,2 cm. Ademais, os principais dados originados após cada dimensionamento encontram-se na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados do dimensionamento conforme o tipo de solo na camada de base.

Características	pav01 (NS')	pav02 (NG')	pav03 (NA')	pav04 (NA)	pav05 (LG')
Tipo de Via	SAP*	SAP*	SAP*	SAP*	SAP*
Número N inicial	5 x 105	5 x 105	5 x 105	5 x 105	5 x 105
Período de Projeto	10	10	10	10	10
Tx. Crescimento	3%	3%	3%	3%	3%
Número N final	5,73 x 106	5,73 x 106	5,73 x 106	5,73 x 106	5,73 x 106
AT**	29,2%	28,9%	29%	29%	28,9%
ATR***	2,6mm	2,7mm	2,3mm	10,1mm	3,2mm
Contrib. subleito	1,56mm	1,72mm	1,28mm	1,83mm	1,65mm

* Sistema arterial primário ** Área trincada *** Afundamento de trilha de roda

Fonte: os autores.

Ainda em relação ao dimensionamento, observou-se que, sobre o critério de área trincada (AT), não houve uma expressiva alteração no resultado, pois o programa sinalizou que, ao final da vida útil, todas as estruturas alcançariam cerca de 29% de AT, cujo valor máximo é de 30%.

Porém, ao se analisar o afundamento de trilha de roda (ATR) e a contribuição no subleito, o pav03 com o solo NA' na base foi o que menos refletiu essa característica no desempenho do pavimento, e o pav04 com o solo NA na base contribuiu sobremaneira para a deformação do subleito, com um acréscimo de cerca de 440% em comparação com o pav03.

Conforme Franco e Motta (2020), no programa MeDiNa®, o ATR admissível é o de até 13 mm, e o pav04 encontra-se com valor muito próximo do limite desse parâmetro. Pode-se afirmar que essa estrutura do pavimento seria uma opção menos favorável levando-se em consideração a manutenção da via.

3.2 APLICAÇÃO DAS TÉCNICAS DE ACV

A Tabela 3 apresenta resumidamente os quantitativos calculados referentes aos dados por item do serviço de pavimentação. Dessa maneira, foi elaborado o inventário conforme as quantidades de insumos e transporte considerando-se as distâncias médias de transporte (DMT) constantes no projeto de execução.

Tabela 3 - Quantitativos calculados para cada serviço da obra.

4.0 ITEM	UNID	NS' Quant. (1 km)	NG-NL Quant. (1 km)	NA'-NL Quant. (1 km)	NA Quant. (1 km)	LG' Quant. (1 km)
4.2	m ³	2213,07	2213,07	2213,07	2213,07	2213,07
4.3	t.km	21989,02	21989,02	21989,02	21989,02	21989,02
4.4	m ²	7306,39	7306,39	7306,39	7306,39	7306,39
4.5	t	8,77	8,77	8,77	8,77	8,77
4.6	m ²	7306,39	7306,39	7306,39	7306,39	7306,39
4.7	t	3,66	3,66	3,66	3,66	3,66
4.8	t	1714,22	1591,78	1867,28	1484,64	1653
4.9	t	72,34	67,17	78,8	65,25	69,75
4.10	t	72,34	67,17	78,80	65,25	69,75
4.11	t	29,12	27,04	31,72	25,22	28,08
4.12	t.km	5147,85	5147,85	5147,85	5147,85	5147,85
4.13	t.km	5571,90	5571,90	5571,90	5571,90	5571,90
4.14	t.km	245,68	245,68	245,68	245,68	245,68
4.15	t.km	1714,22	1591,78	1867,28	1484,64	1653

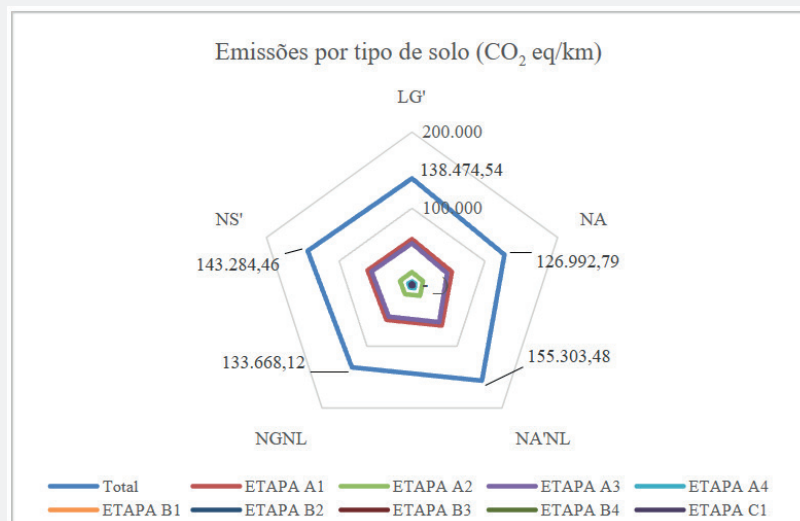
Fonte: os autores.

É possível observar que, como houve um aumento da espessura do revestimento asfáltico, os itens relativos a esse insumo aumentaram proporcionalmente, o que acarreta o aumento do volume de massa transportada e, em consequência, o número de viagens para transporte da massa da usina para a via a ser asfaltada.

O impacto gerado em cada serviço, através do quantitativo calculado de GEE exe-

cutado da obra A, pode ser visto na Figura 3. Para cada item, foi necessário calcular o consumo de combustível de cada equipamento utilizado, por composição do serviço de pavimentação.

Figura 3 - Emissões de GEE para cada tipo de pavimento (em milhares).



Fonte: os autores.

Os resultados da modelagem indicam variações expressivas conforme a composição da base. A base NA'NL apresentou o maior impacto ambiental, com emissões totais calculadas em 155.303,48 kg CO₂ eq/km. Em seguida, situam-se as bases NS' (143.284,46 kg CO₂ eq/km) e LG' (138.474,54 kg CO₂ eq/km). O cenário de menor impacto foi observado na base NA, que emitiu 126.992,79 kg CO₂ eq/km.

A produção de materiais (A1) e a usinagem (A3) concentraram o maior volume de emissões em todas as bases analisadas. A base NA'NL foi a mais poluente nessas etapas, registrando 66.044,98 kg CO₂ eq/km em A1 e 60.673,10 kg CO₂ eq/km em A3.

A etapa A2 representa uma parcela significativa da pegada de carbono, especialmente para a base NA'NL, com 17.831,35 kg CO₂ eq/km. A base NA demonstrou uma maior eficiência nessa fase, com emissões reduzidas para 14.939,23 kg CO₂ eq/km.

Em A4, os valores oscilaram entre a base NS', que apresentou o maior índice (5.087,09 kg CO₂ eq/km), e a base NA, que se manteve como a mais eficiente (4.405,80 kg CO₂ eq/km).

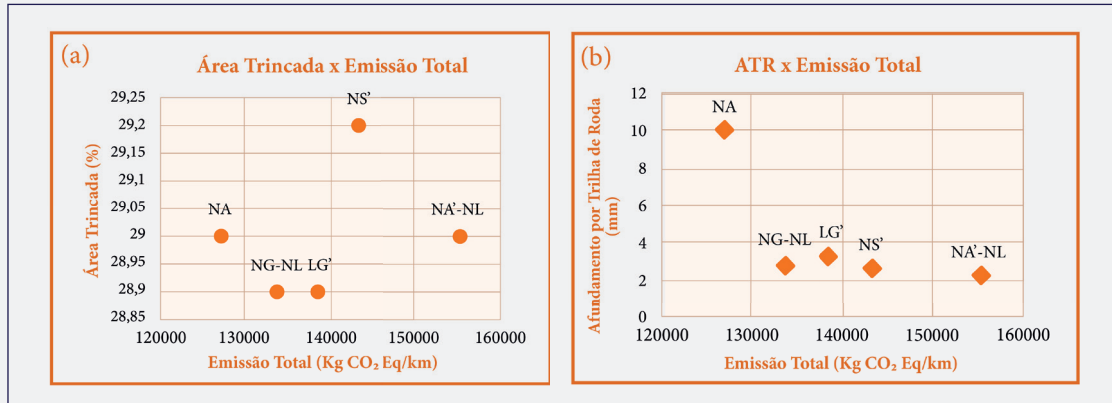
Para finalizar, as etapas B e C mostraram-se mais uniformes entre as bases, com variações reduzidas. No entanto, a etapa C1 ainda revelou certa variabilidade: a base NA'NL registrou as maiores emissões (2.329,12 kg CO₂ eq), enquanto a base NA permaneceu como a opção de melhor desempenho ambiental (1.851,84 kg CO₂ eq).

3.3 INFLUÊNCIA DE EMISSÕES NO DESEMPENHO DOS PAVIMENTOS

A área trincada, como um critério de dimensionamento pelo método mecanicista-empírico, foi avaliada e não foram obtidas quaisquer relações entre os dois parâmetros, mas se pode observar que a base com solo NS' foi a que mais impactou quanto à emissão

de GEE no serviço de pavimentação, conforme a Figura 4a. Em se tratando do ATR, da mesma maneira, não se observou uma relação direta entre o GEE e o ATR, porém o solo NA, apesar de possuir uma menor quantidade de emissão de gases de efeito estufa, é o tipo de solo que mais contribuiu para essa patologia ao fim da vida útil do pavimento (Figura 4b).

Figura 4 – (a) AT e Emissão total e (b) ATR x Emissão Total

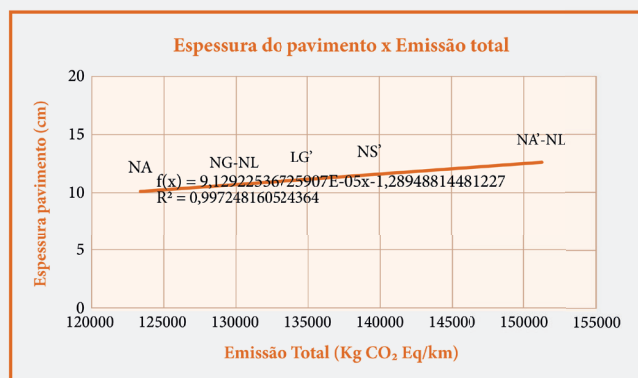


Fonte: os autores.

A variável de emissão de GEE por patologia permite uma avaliação comparativa das emissões de CO₂ associadas ao desempenho dos pavimentos, sendo a AT e o ATR patologias determinantes quanto à qualidade estrutural do pavimento. Solos com menores emissões relativas por patologia, como NG-NL e LG', podem ser mais indicados em termos de sustentabilidade ambiental, tendo em vista que as manutenções, devido à integridade de sua estrutura, serão necessárias em um intervalo maior, ao passo que solos como NA'NL e NS' apresentam um maior impacto ambiental para cada unidade de falha estrutural, exigindo medidas adicionais para reduzir o impacto e intervalos menos espaçados para manutenção.

Uma relação observada de bastante relevância é a apresentada na Figura 5, mostrando que, à medida que a espessura do pavimento aumenta, também há um aumento nas emissões. Isso sugere que pavimentos mais espessos estão associados a maiores impactos, provavelmente devido à maior quantidade de materiais e de processos necessários para a sua construção.

Figura 4 – (a) AT e Emissão total e (b) ATR x Emissão Total



Fonte: os autores.

O solo NA'NL apresenta a maior espessura de revestimento (cerca de 13 cm) e a maior emissão total (~150.000 kg CO₂ eq/km), cerca de 30% superior ao solo NA (~10 cm), e a menor emissão (~125.000 kg CO₂ eq/km). Esse padrão se repete para os demais solos, com NG-NL e LG', apresentando valores intermediários em ambos os parâmetros.

A elevada relação linear ($R^2 = 0,9972$) sugere que a espessura do pavimento é um fator-chave na definição das emissões, reforçando a importância de se considerarem estratégias de otimização da espessura, especialmente em projetos que buscam reduzir o impacto ambiental associado à construção de rodovias.

4 CONCLUSÃO

A pesquisa utilizou a metodologia de ACV para quantificar as emissões de GEE em pavimentos flexíveis, evidenciando como a escolha do solo da base impacta diretamente o meio ambiente.

Sobre as etapas elencadas no estudo de ACV, destaca-se que a produção de materiais (A1) e a usinagem da mistura asfáltica (A3) foram confirmadas como as maiores responsáveis pelas emissões totais. Embora apresentem impacto inferior às fases de produção, as etapas de transporte de insumos (A2) e de transporte da massa (A4) são fundamentais para estratégias de otimização logística. Destaca-se também que as fases de extração (B1), execução da base (B2), varredura (B3), imprimação (B4) e compactação final (C1) demonstraram menor peso ambiental, mas oferecem oportunidades de redução de GEE através da modernização de equipamentos.

Outro ponto importante verificado foi que a qualidade mecânica do solo de base dita a espessura do revestimento, ou seja, solos como NS' e NA'NL exigem estruturas maiores e, conseqüentemente, geram as maiores emissões de CO₂. Em contrapartida, os solos NG-NL e LG' mostraram-se opções mais sustentáveis, apresentando menores emissões associadas a falhas estruturais, como a AT e o ATR.

Com esses pontos verificados, podem-se propor ações que visam à redução de impactos ambientais para o setor, como a adoção de materiais reciclados e o RAP (acrônimo de reclaimed asphalt pavement), na etapa A1 e a substituição de combustíveis fósseis por fontes renováveis ou gás natural na etapa A3. Também é possível racionalizar as distâncias médias de transporte e o uso de veículos elétricos ou híbridos para o transporte (etapas A2 e A4). Além disso, quando possível, é necessário realizar a atualização e/ou manutenção periódica do maquinário de pista para reduzir o consumo de diesel nas etapas de execução (B e C).

Por fim, o estudo aqui apresentado presente estudo ressalta que a precisão das análises de ACV no Brasil ainda é limitada pela falta de um inventário nacional robusto. Recomenda-se que pesquisas futuras foquem técnicas de estabilização de solos e o uso ampliado de materiais reciclados para consolidar soluções de infraestrutura de baixo carbono.

REFERÊNCIAS

- AL-ATROUSH, A. A review of sustainability in hot asphalt production: Greenhouse gas emissions and energy consumption. *Applied Sciences*, v. 14, n. 22, p. 10246, 2022.
- BABASHAMSI, P. *et al.* Evaluation of pavement life cycle cost analysis: review and analysis. *International Journal of Pavement Research and Technology*, v. 9, n. 4, p. 241–254, 2016.
- CEN (Comité Européen de Normalisation). *Sustainability of Construction Works — Assessment of Environmental Performance of Buildings — Calculation Method*. (EN 15978:2011). Brussels: European Committee for Standardization, 2011.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. *Sistema de Custos Referenciais de Obras – SICRO*. Brasília: DNIT, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/custos-e-pagamentos/custos-e-pagamentos-dnit/sistemas-de-custos/sicro>.
- ELIZONDO-MARTÍNEZ, J. *et al.* The behavior of permeable paving properties using different materials in their compositions: a review of the literature. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 19, n. 4, p. 335–341, 2023.
- FRANCO, F. A. C. P.; MOTTA, L. M. G. *MeDiNa – Método de Dimensionamento Nacional*. Manual de utilização. Versão 1.1.4. Rio de Janeiro, 2020.
- HARVEY, J.; KENDALL, A.; LEE, I.-S.; SANTERO, N.; VAN DAM, T.; WANG, T. *Pavement Life Cycle Assessment Workshop: Discussion Summary and Guidelines*. University of California Pavement Research Center - UC Davis. 2010.
- IBRAHIM, H.; MARINI, S.; FARINA, A.; LANOTTE, M. Integrating Mechanistic-Empirical Pavement Analysis in the Life Cycle Assessment Use Phase and Monetization of Environmental Impacts to Promote Low Carbon Transportation Materials. *Transportation Research Record*, p. 1–15, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/03611981241253576>. Acesso em: 19 jun. 2024.
- ISO. *ISO 14040: Environmental Management and Life Cycle Assessment - Principles and Framework*. Geneva: International Organization for Standardization, 2006a.
- ISO. *ISO 14044: Environmental Management and Life Cycle Assessment - Requirements and Guidelines*. Geneva: International Organization for Standardization, 2006b.

LU, G. *et al.* The environmental impact evaluation on the application of permeable pavement based on life cycle analysis. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, v. 6, n. 3, p. 288–296, 2019.

MAUÉS, L.M.; BELTRÃO, N.; SILVA, I. GHG Emissions Assessment of Civil Construction Waste Disposal and Transportation Process in the Eastern Amazon. *Sustainability* 2021, 13, 5666. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su13105666>

MORETTI, L.; MANDRONE, V.; D'ANDREA, A.; CARO, S. Comparative from Cradle to Gate Life Cycle Assessments of Hot Mix Asphalt (HMA) Materials. *Sustainability*, v. 9, n. 3, p. 400, 2017. DOI: 10.3390/su9030400.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. Uma Nova Classificação de Solos para Finalidades Rodoviárias. In: *Anais. Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia*. Rio de Janeiro, 1981.

PRATICÒ, F. G. *et al.* Energy and environmental life cycle assessment of sustainable pavement materials and technologies for urban roads. *International Journal of Pavement Engineering*, v. 21, n. 5, p. 655–670, 2020.

PRÉ SUSTAINABILITY. *SimaPro 9.0* – Software for Life Cycle Assessment. Amersfoort: PRé Sustainability, 2024. Disponível em: <https://simapro.com>.

VIEIRA, D.; BRAVO, A.; VIEIRA, T. Life Cycle Assessment of Road Pavements That Incorporate Waste Reuse. *Sustainability*, v. 15, n. 20, p. 14892, 2023.

ZHAO, Y. *et al.* Sustainable pavement construction: A systematic literature review of environmental impacts, performance, and life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, v. 269, p. 122–129, 2020.



ESTUDO DE IMPACTO AMBIENTAL EM INFRAESTRUTURAS VIÁRIAS: APLICAÇÃO DA ACV EM DIFERENTES TIPOS DE SUPERESTRUTURA DE PONTES

Dayvson Almeida / Universidade Federal de Pernambuco

Arnaldo Carneiro / Universidade Federal de Pernambuco

RESUMO

As mudanças climáticas e a degradação ambiental intensificaram a busca por soluções mais sustentáveis na construção civil. Nesse contexto, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) tem se consolidado como uma ferramenta essencial para quantificar os impactos ambientais de materiais e processos construtivos ao longo do tempo. O estudo aqui apresentado aplicou a ACV, por meio do método ReCiPe 2016 Midpoint (H), para analisar e comparar os impactos ambientais de seis modelos de pontes, incluindo estruturas de concreto armado e mistas de aço e concreto, além de cenários com diferentes proporções de agregados reciclados. Os resultados mostraram que as pontes de concreto armado apresentaram, em geral, menor impacto ambiental, sobretudo nos indicadores de aquecimento global, consumo de água e destruição da camada de ozônio. As pontes mistas demonstraram maior impacto, especialmente devido à produção de aço. Já a incorpora-

ção de agregados reciclados, embora vantajosa em alguns aspectos, indicou um leve aumento na ecotoxicidade em água doce. Conclui-se que a escolha de materiais e técnicas adequadas pode contribuir significativamente para a redução dos impactos ambientais em obras de infraestrutura e que a ACV se mostra uma ferramenta valiosa no apoio à tomada de decisões sustentáveis no setor.

Palavras-chave: avaliação do ciclo de vida; sustentabilidade; pontes; impacto ambiental.

1 INTRODUÇÃO

Conforme o relatório Anuário da Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2022), a extensão total da malha rodoviária brasileira atingiu 1.720.909 km em 2021, sendo que 12,4% dessa extensão era pavimentada, 9,1% era planejada e 78,5% não contava com pavimentação. No que se refere às condições das rodovias, constatou-se que, em 2022, 66% apresentavam algum tipo de problema no estado geral. Além disso, 55,5% dos trechos enfrentavam questões relacionadas ao pavimento, 60,7% revelaram deficiências na sinalização e 64,0% evidenciaram falhas na geometria. Essa deficiência na malha rodoviária não está relacionada apenas ao desgaste do pavimento, mas também às condições em que se encontram as pontes que compõem as rodovias.

Considerando-se as condições de estabilidade apresentadas, é evidente que muitas dessas pontes atingirão o fim de sua vida útil nos próximos anos, demandando intervenções que variam de pequenos reparos até a demolição para a construção de uma nova ponte. Nesse contexto, a Nova Lei de Licitações nº. 14.133/2021 (BRASIL, 2021), vigente à época do estudo, inovou ao incorporar o ciclo de vida como elemento descritivo do objeto no processo licitatório, tornando obrigatório o aspecto de sustentabilidade na escolha do projeto mais vantajoso para a administração pública. Essa perspectiva amplia a relevância de estudos como o aqui apresentado, ao fornecer dados e reflexões capazes de subsidiar os estudos técnicos preliminares, apoiar decisões mais sustentáveis e fundamentar políticas públicas baseadas em evidências.

Considerando-se que a maior parte das pontes faz parte das obras públicas, torna-se relevante promover estudos de avaliação de impactos ambientais dessas estruturas ainda na fase de projeto a fim de assegurar a conformidade com os princípios de desenvolvimento nacional sustentável estabelecidos na legislação vigente.

Visando alcançar esses objetivos, surge a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) como uma metodologia sistemática que quantifica os impactos ambientais de um produto, um processo ou um serviço ao longo de todo o seu ciclo de vida, da extração de matérias-primas até o descarte final. A ACV segue quatro etapas: definição de objetivo e escopo, análise do inventário, avaliação de impactos e interpretação dos resultados (ABNT, 2009).

Na construção civil, essa abordagem permite comparar materiais e sistemas construtivos sob a ótica da sustentabilidade ambiental (FERNANDES *et al.*, 2019). Além disso, a aplicação da ACV contribui para ampliar a durabilidade e a eficiência das estruturas, ao mesmo tempo que promove o alinhamento às diretrizes de sustentabilidade, conforme previsto na legislação vigente.

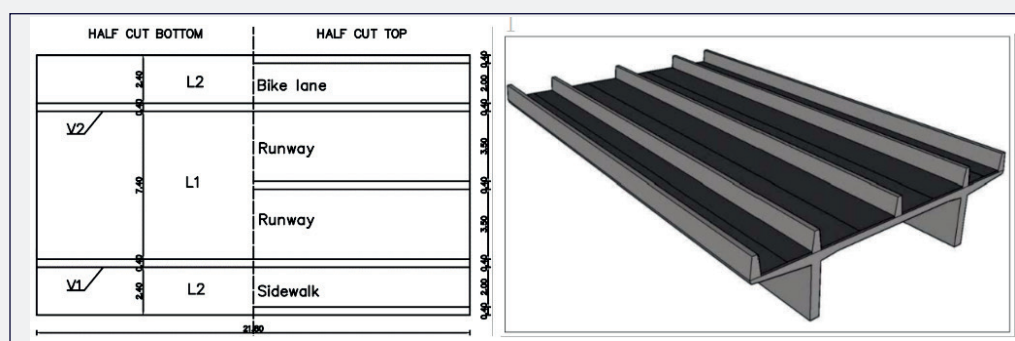
Diante disso, o presente trabalho deriva de um estudo comparativo cujo objetivo central foi identificar os potenciais impactos ambientais por meio da metodologia de ACV, considerando dois tipos de pontes, uma com superestrutura de concreto armado e outra com superestrutura mista de aço e concreto, avaliadas sob diferentes cenários de análise. Com isso, pretende-se apoiar a tomada de decisões sustentáveis na fase de projeto de infraestruturas viárias, promovendo o desenvolvimento de abordagens mais eficazes na avaliação dos impactos ambientais dessas estruturas.

2 METODOLOGIA

2.1 DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

O estudo aqui apresentado deu continuidade a uma pesquisa desenvolvida por Almeida e Carneiro (2025) cujo objeto de estudo foi a superestrutura de uma ponte pré-moldada, com dimensões de 13 metros de largura e 21,8 metros de comprimento. A ponte é composta por duas pistas de rolamento, uma faixa de ciclovia e um passeio, conforme apresentado na Figura 1a. Em termos de classificação, foi considerada uma ponte de classe 45, de acordo com a norma brasileira NBR 7188 (ABNT, 2013), baseada em um veículo-tipo de 450 kN de peso total. Os elementos estruturais são divididos em duas lajes (L1 e L2) do tabuleiro e duas longarinas (V1 e V2). Para as lajes, foram adotados elementos de concreto armado pré-moldado de 35 MPa.

Figura 1 – Vista superior da ponte: (a) Vista superior e de corte da ponte; (b) Vista 3D da superestrutura da ponte com as defensas.



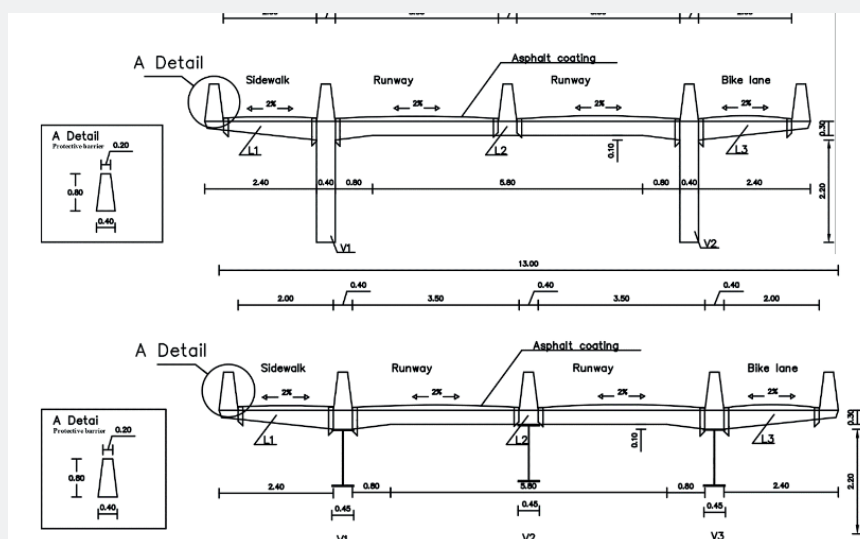
Fonte: Almeida; Carneiro, 2025.

Quanto às vigas, foram selecionados diferentes tipos, variando entre vigas de aço com perfil “I” e vigas de concreto armado pré-moldado de 35 MPa. Além disso, para garantir a segurança e prevenir possíveis acidentes, foram previstas barreiras de proteção utilizando-se o modelo de defesa conhecido como New Jersey, ilustrado na Figura 2.

Com base nessas informações, foram realizados o dimensionamento dos elementos estruturais e a quantificação dos materiais a serem utilizados. Para a análise comparativa dos impactos ambientais, foram formuladas duas soluções para as superestruturas: uma ponte de concreto armado, composta por vigas e lajes de concreto armado, e uma ponte mista de aço e concreto (PMA), composta por vigas de aço e lajes de concreto armado.

Os elementos comuns presentes em ambas as soluções incluem a pintura de ligação entre a laje e o pavimento asfáltico, uma camada de concreto betuminoso usinado a quente de 5,0 cm, um sistema de drenagem por meio de drenos de PVC e defensas de concreto armado. As Figuras 2a e 2b mostram as seções transversais das pontes de concreto armado e das pontes mistas, assim como as dimensões de seus componentes.

Figura 2 – Seção transversal da ponte:
 área superior - de concreto armado;
 área inferior - e mista de aço/concreto



Fonte: Almeida; Carneiro, 2025

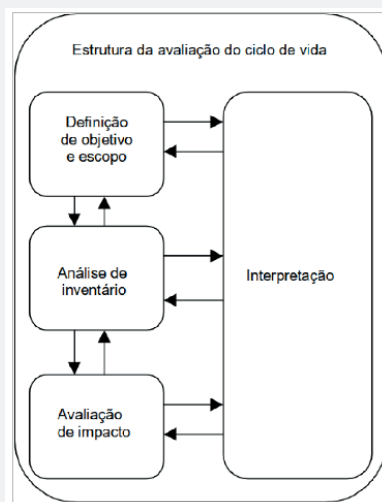
Com o objetivo de avaliar os impactos ambientais em diferentes composições dos elementos estruturais da superestrutura, foram considerados seis modelos de pontes:

1. ponte de vigas e lajes de concreto armado (PCA);
2. ponte de vigas e lajes de concreto armado com substituição de 50% de agregado natural por agregado reciclado (PCA-50%);
3. ponte de vigas e lajes de concreto armado com substituição de 100% de agregado natural por agregado reciclado (PCA-100%);
4. ponte mista de vigas de aço e lajes de concreto armado (PMA);
5. ponte mista de vigas de aço e lajes de concreto armado com substituição de 50% de agregado natural por agregado reciclado (PMA-50%);
6. ponte mista de vigas de aço e lajes de concreto armado com substituição de 100% de agregado natural por agregado reciclado (PMA-100%);

2.2 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

O objetivo da ACV é identificar e quantificar os possíveis impactos ambientais associados à produção de pontes de concreto armado e pontes mistas de aço e concreto, com o intuito de apoiar o projetista na escolha da solução mais sustentável. Para conduzir a ACV, a ISO 14040 (ISO 14040, 2009) ressalta quatro etapas (Figura 3):

Figura 3 – Fases da ACV



Fonte: Almeida; Carneiro, 2025.

1) **Definição de objetivo e escopo:** declaração da aplicação pretendida, as razões para conduzir o estudo e o público-alvo.

2) **Análise de inventário:** coleta de dados e procedimentos de cálculo para quantificar as entradas e saídas pertinentes de um sistema de produto.

3) **Avaliação de impactos:** avaliação da significância de impactos ambientais potenciais, usando-se os resultados da análise de inventário do ciclo de vida.

4) **Interpretação de resultados:** conclusões e recomendações resultantes da análise do inventário e da avaliação de impacto ou, em estudos de inventário do ciclo de vida, apenas os resultados da análise de inventário, consistentes com o objetivo e o escopo definidos.

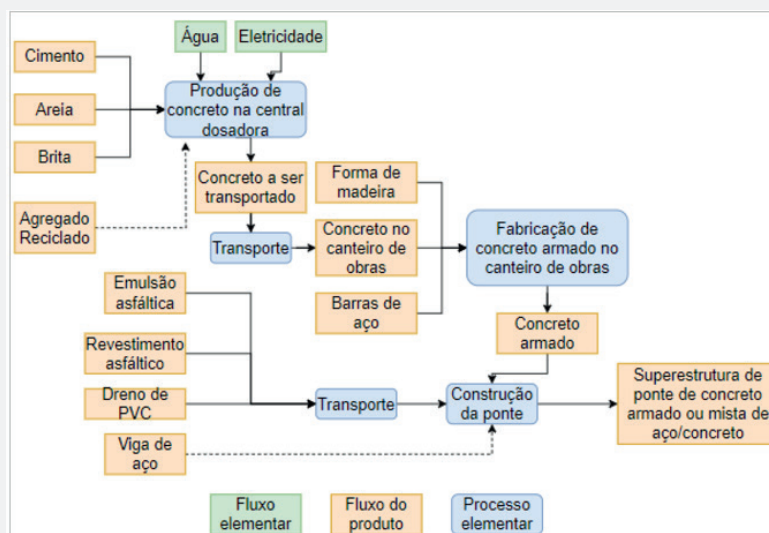
Esses processos ocorrem de forma iterativa, à medida que dados são coletados na análise de inventário, e impactos são avaliados, permitindo-se uma análise crítica que pode exigir a reformulação do objetivo e do escopo.

O escopo da pesquisa abrangeu as etapas do berço-à-porta, incluindo a aquisição de matéria-prima, o transporte, o processamento e a fabricação dos compósitos utilizados na construção das pontes. A unidade funcional de impacto é medida por m³ de ponte construída.

Para a construção do inventário, foi utilizada como fonte principal a base de dados secundária do Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção (SIDAC) (OLIVEIRA *et al.*, 2023), que contém inventários específicos para o contexto brasileiro, extraídos de literaturas nacionais e medições de fábricas, proporcionando uma maior precisão à pesquisa.

A Figura 4 apresenta a modelagem do inventário desse estudo, construída com base nos fluxos elementares e de produto do sistema. A modelagem considera os processos desde a extração das matérias-primas até o transporte para a indústria de pré-fabricação.

Figura 4 – Inventário da superestrutura da ponte



Fonte: Almeida; Carneiro, 2025.

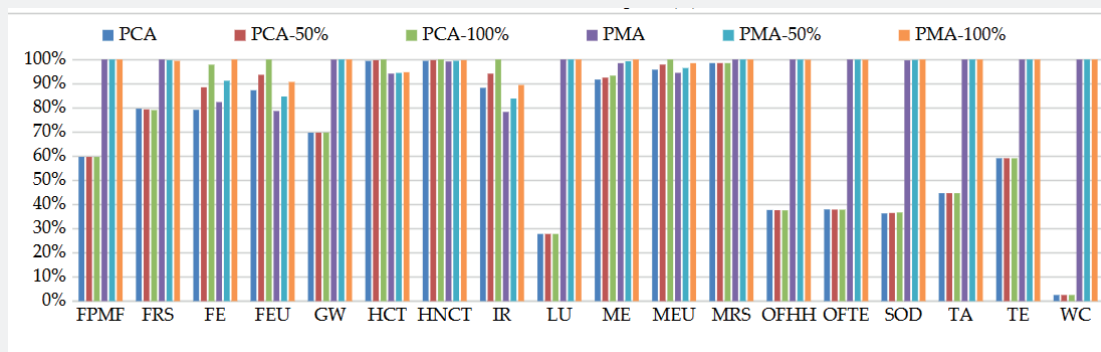
O estudo foi conduzido pela ACV, utilizando-se as diretrizes da ISO 14040 (ABNT, 2009) e da ISO 14044 (ISO, 2014); o Sistema Internacional de Dados do Ciclo de Vida de Referência (EUROPEAN COMMISSION-JOINT RESEARCH CENTRE-INSTITUTE FOR ENVIRONMENT AND SUSTAINABILITY, 2010); o banco de dados Evah OzL-CI2019 (THE EVAH INSTITUTE, 2023); os dados coletados pelo Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção SIDAC (OLIVEIRA *et al.*, 2023); o software OpenLCA versão 2.0 (THE EVAH INSTITUTE, 2023); e o método de avaliação de impacto do ciclo de vida ReCiPe 2016 Midpoint (H) (HUIJBREGTS *et al.*, 2016), que traduz os resultados do inventário em impactos ambientais ao nível de pontos médios (como aquecimento global e toxicidade humana), permitindo comparações quantitativas entre categorias. Ele combina os métodos CML e Eco-Indicator 99, amplamente utilizado por sua robustez e aplicabilidade internacional.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 5 ilustra os resultados relativos dos indicadores para os diferentes modelos de pontes, utilizando-se o método de avaliação ReCiPe 2016 Midpoint (H) (HUIJBREGTS *et al.*, 2016). Os indicadores considerados foram: FPMF (formação de material particulado fino), FRS (escassez de recursos fósseis), FE (ecotoxicidade em água doce), FEU (eutrofização em água doce), GW (aquecimento global), HCT (toxicidade carcinogênica humana), HNCT (toxicidade não carcinogênica humana), IR (radiação ionizante), LU

(uso do solo), ME (ecotoxicidade marinha), MEU (eutrofização marinha), MRS (escassez de recursos minerais), OFHH (formação de ozônio, saúde humana), OFTE (formação de ozônio, ecossistemas terrestres), SOD (degradação da camada de ozônio estratosférica), TA (acidificação terrestre), TE (ecotoxicidade terrestre) e WC (consumo de água). Cada indicador é apresentado em relação ao resultado máximo, que é definido como 100%, e os resultados das demais variantes são exibidos em relação a esse valor de referência.

Figura 5 – Comparação do impacto ambiental por m³ dos diferentes tipos de pontes em análise; método ReCiPe 2016 Midpoint (H)



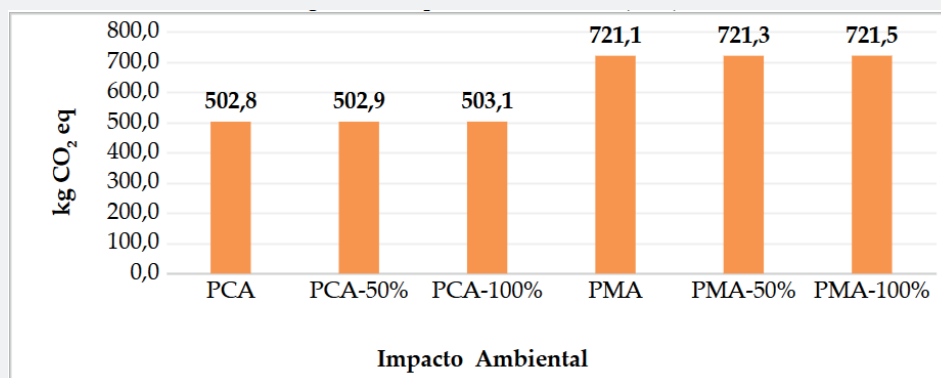
Fonte: Almeida; Carneiro, 2025.

A discussão a seguir se concentrará nos indicadores de impactos ambientais mais relevantes para a construção civil.

3.1 AQUECIMENTO GLOBAL (GW)

A Figura 6 apresenta os resultados relativos ao indicador de Aquecimento Global (GW), expressos em quilogramas de dióxido de carbono equivalente (kg CO₂ eq), para os seis modelos de ponte estudados: PCA, PCA-50%, PCA-100%, PMA, PMA-50%, e PMA-100%. Os resultados demonstram uma diferença significativa entre os modelos de ponte de concreto armado (PCA) e os modelos de ponte mista de aço/concreto (PMA) em termos de emissões de CO₂.

Figura 6 – Aquecimento global



Fonte: Almeida; Carneiro, 2025.

As pontes de concreto armado (PCA, PCA-50%, PCA-100%) apresentam valores consideravelmente menores de impacto em aquecimento global, variando entre 502,8 kg CO₂ eq e 503,1 kg CO₂ eq. Por outro lado, as pontes mistas de aço e concreto (PMA, PMA-50%, PMA-100%) exibem valores mais elevados, próximos a 721 kg CO₂ eq.

Quando comparada a emissão do indicador de aquecimento global entre 1 m³ de viga metálica e 1 m³ de viga de concreto armado, essa diferença torna-se ainda mais evidente (Tabela 1).

Tabela 1 – Análise do impacto GW no comparativo entre 1 m³ viga metálica e 1 m³ de viga de concreto armado

Emissão	Viga metálica	Viga de concreto armado
CO ₂	14.871,40 kg	379,99 kg
CH ₄	27,45 kg	0,44 kg

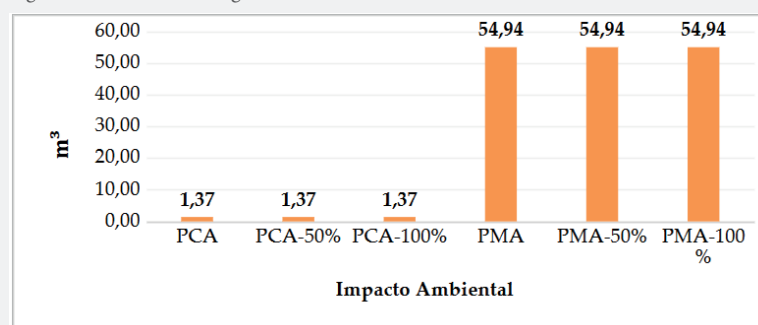
Fonte: Almeida; Carneiro, 2025.

Essa diferença, decorrente da maior emissão de gases de efeito estufa em estruturas metálicas, pode ser explicada pelo elevado consumo de energia e pelas emissões de carbono associadas à produção de aço, um componente predominante nas pontes mistas. A produção de aço envolve processos altamente intensivos em energia, como a fusão do minério de ferro em altos-fornos, a qual libera grandes quantidades de CO₂, contribuindo, de maneira significativa, para o aquecimento global. Por outro lado, a produção de concreto, embora também resulte em emissões de CO₂, apresenta um impacto menor nesse indicador, tornando-se uma opção estrutural mais sustentável em termos de emissões de gases de efeito estufa.

3.2 CONSUMO DE ÁGUA (WC)

A Figura 7 apresenta os resultados referentes ao consumo de água WC para os diferentes modelos de pontes analisados. Observa-se que as pontes mistas de aço e concreto (PMA, PMA-50%, PMA-100%) têm um impacto ambiental significativamente maior em termos de WC, com valores de 54,94 m³. Em contraste, as pontes de concreto armado (PCA, PCA-50%, PCA-100%) apresentam um WC muito menor, registrando apenas 1,37 m³.

Figura 7 – Consumo de Água



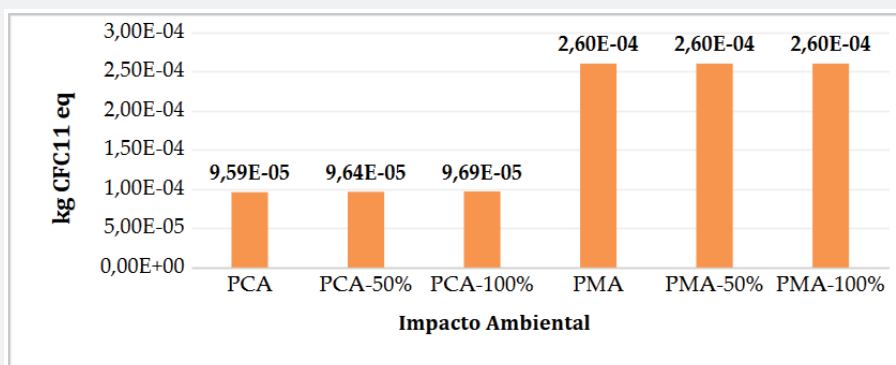
Fonte: Almeida; Carneiro, 2025.

Essa diferença pode ser explicada pela natureza dos processos envolvidos na produção dos materiais, uma vez que a fabricação do aço consome grandes quantidades de água, especialmente para resfriamento e outros procedimentos na siderurgia. Por outro lado, a produção de concreto, embora também consuma água, envolve uma quantidade muito menor desse recurso, resultando em um impacto ambiental mais baixo nesse indicador.

3.3 DESTRUIÇÃO DA CAMADA DE OZÔNIO ESTRATOSFÉRICO (SOD)

A Figura 8 mostra o impacto ambiental relacionado à SOD para os diferentes modelos de pontes analisados. Os resultados indicam que as pontes mistas de aço e concreto (PMA, PMA-50%, PMA-100%) apresentam valores significativamente maiores, com 2,60E-04 quilogramas de cloro-fluorcarboneto-11 equivalente (kg CFC11 eq.), em comparação com as pontes de concreto armado (PCA, PCA-50%, PCA-100%), que exibem valores em torno de 9,59E-05 kg CFC11 eq.

Figura 8 – Destruição da Camada de Ozônio Estratosférico



Fonte: Almeida; Carneiro, 2025.

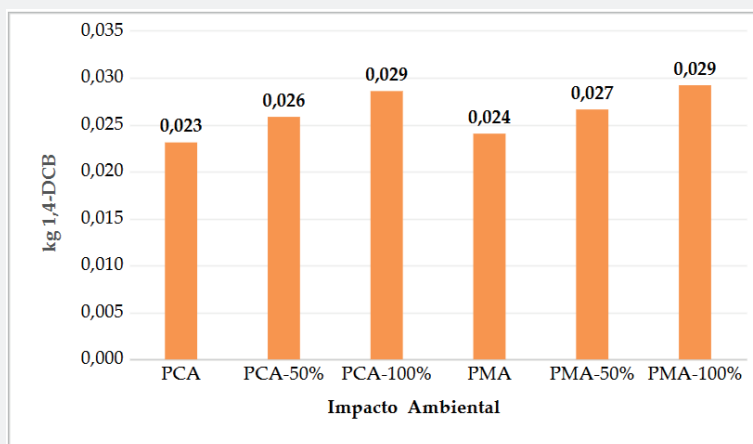
A fabricação de aço, especialmente em processos que utilizam energia intensiva ou insumos químicos emissores de compostos halogenados, pode liberar gases como cloro-fluorcarbonetos ou seus equivalentes, conhecidos por seu alto potencial de destruição da camada de ozônio. A emissão elevada de óxidos nitrosos (0,01367 kg) e triclorofluorometano (0,00011 kg) nas pontes mistas de aço e concreto resulta em um impacto ambiental mais acentuado nesse indicador, quando comparado às pontes de concreto, cujas emissões são significativamente menores, com 0,00768 kg de óxidos nitrosos e 8,58E-6 kg de triclorofluorometano.

3.4 ECOTOXICIDADE EM ÁGUA DOCE (FE)

A Figura 9 apresenta os resultados relativos ao indicador de ecotoxicidade em água doce (FE), expressos em quilogramas de diclorobenzeno equivalente (kg 1,4-DCB eq), para os seis modelos de ponte estudados: PCA, PCA-50%, PCA-100%, PMA, PMA-50%, e PMA-100%. Observa-se que as pontes de concreto armado (PCA, PCA-50%, PCA-

100%) e as pontes mistas de aço e concreto (PMA, PMA-50%, PMA-100%) apresentam valores próximos, variando entre 0,023 kg 1,4-DCB eq para o modelo PCA e 0,029 kg 1,4-DCB eq para os modelos PCA-100% e PMA-100%.

Figura 9 – Ecotoxicidade em Água Doce (FE)



Fonte: Almeida; Carneiro, 2025.

Essa proximidade nos valores indica que, tanto para as pontes de concreto armado quanto para as pontes mistas, a ecotoxicidade em água doce não apresenta grandes variações entre os modelos analisados. No entanto, a ligeira superioridade dos valores nos modelos com elevados percentuais de substituição de agregados naturais por agregados reciclados, como nos casos de PCA-100% e PMA-100%, sugere que o uso de materiais reciclados pode contribuir para um aumento marginal na ecotoxicidade em água doce. Isso pode ocorrer devido à presença de contaminantes ou resíduos associados aos agregados reciclados, que podem ser liberados durante os processos de fabricação e construção. A Tabela 2 apresenta um comparativo de emissões entre 1 kg de agregado reciclado e 1kg de areia natural quanto ao indicador FPMF.

Tabela 2 – Análise comparativa da emissão de FPMF entre agregados reciclado e natural

Emissão	Agregado reciclado	Areia natural
Zinco	2,08E-08 kg	1,50E-10 kg
Cobre	8,61E-09 kg	6,85E-10 kg
Níquel	1,55E-08 kg	2,42E-10 kg
Vanádio	3,73E-09 kg	2,67E-09 kg
Antimônio	1,38E-09 kg	-
Decano	-	3,81E-09 kg
Crômio	-	1,15E-08 kg
Arsênio	-	2,96E-10 kg
Bário	-	3,65E-09 kg
Cádmio	-	2,02E-10 kg

Fonte: Almeida; Carneiro, 2025.

Embora a areia natural emita uma maior variedade de metais pesados, o agregado reciclado emite concentrações mais elevadas de metais com maior impacto na ecotoxicidade em água doce, como zinco, níquel, vanádio e cobre.

4 CONCLUSÃO

O estudo aqui apresentado avaliou os impactos ambientais de diferentes modelos de pontes utilizando a metodologia de ACV, com base no método ReCiPe 2016 Midpoint (H). Foram analisadas seis variações de superestruturas, diferenciadas pelo tipo de material das vigas (de concreto armado ou de aço) e pelo nível de substituição de agregados naturais por reciclados no concreto.

Os resultados indicam que as pontes de concreto armado apresentaram um menor impacto ambiental global, especialmente nos indicadores de aquecimento global, consumo de água e destruição da camada de ozônio, em comparação às pontes mistas de aço e concreto. A produção do aço, intensiva em energia e emissora de compostos prejudiciais ao meio ambiente, foi a principal responsável pelos impactos negativos mais elevados nos modelos mistos.

Embora o uso de agregados reciclados represente uma estratégia promissora para a sustentabilidade, observou-se um leve aumento nos indicadores de ecotoxicidade em água doce (FE), especialmente nos cenários com 100% de substituição, possivelmente devido à presença de metais pesados nos materiais reciclados.

Em resumo, as pontes de concreto armado, de forma geral, apresentaram um impacto ambiental menor em comparação com as pontes mistas, embora com algumas exceções em indicadores específicos. A incorporação do aço às pontes mistas surgiu como uma fonte significativa de impacto ambiental, e a substituição de materiais menos impactantes por estruturas de aço contribuiu para um aumento geral no impacto ambiental.

Esses resultados demonstram o potencial da ACV como ferramenta estratégica no planejamento sustentável de obras públicas e reforçam a necessidade de políticas que incentivem o uso de materiais de menor impacto ambiental.

REFERÊNCIAS

ABNT. (2013). *Norma Brasileira ABNT NBR NBR 7188:2013 - Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas*. Norma Brasileira, 64.

ABNT (2009). *ABNT NBR ISO 14040: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípio e estrutura*. 1–21.

ALMEIDA, D. C. B.; CARNEIRO, A. M. P. Environmental impact of steel/concrete composite bridges and reinforced concrete bridges: a comparative analysis through Life Cycle Assessment. *Ambiente Construído*, 25. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212025000100792>.

BRASIL. (2021). *Lei nº 14.133, de 1º de abril de 2021 - DOU – Imprensa Nacional*.

CNT. (2022). *Anuário CNT do Transporte 2022 - Princiáis Dados*. 1–25.

EUROPEAN COMMISSION-JOINT RESEARCH CENTRE-INSTITUTE FOR ENVIRONMENT AND SUSTAINABILITY. International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook: Review Schemes for Life Cycle Assessment. *In International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook*, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.2788/39791>.

FERNANDES, J.; PEIXOTO, M.; MATEUS, R.; GERVÁSIO, H. Life cycle analysis of environmental impacts of earthen materials in the Portuguese context: Rammed earth and compressed earth blocks. *Journal of Cleaner Production*, 241.2-19. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118286>.

HUIJBREGTS, M.; STEINMANN, Z. J. N.; ELSHOUT, P. M. F. M.; STAM, G.; VERNES, F.; VIEIRA, M. D. M.; ZIJP, M.; van ZELM, R. ReCiPe 2016. *National Institute for Public Health and the Environment*, 194. 2016. Disponível em: <https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2016-0104.pdf>.

ISO 14040. Environmental assessment – life cycle assessment – principles and framework. *International Standard Organisation*, 1997, 1–20.

ISO (International Organization for Standardization). 2014.

ISO 14044. ISO, Environmental management—Life cycle assessment—Requirements and guidelines. *International Organization for Standardization (ISO)*, 2006.

LLANTOY, N.; CHÂFER, M.; CABEZA, L. F. A comparative life cycle assessment (LCA) of different insulation materials for buildings in the continental Mediterranean climate. *In Energy and Buildings*. vol. 225. Elsevier Ltd. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110323>.

LVEL, J.; WATSON, R.; ABBASSI, B.; ABU-HAMATTEH, Z. S. Life cycle analysis of concrete and asphalt used in road pavements. *Environmental Engineering Research*, vol.25, n.1, 2020. 52–61. Disponível em: <https://doi.org/10.4491/eer.2018.399>.

OLIVEIRA, Lidiane Santana; JOHN, V. J. *Sidac - Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção*. Retrieved March 20, 2023. Disponível em: https://sidac.org.br/conteudo_tecnico.

THE EVAH INSTITUTE. (n.d.). *Evah OzLCI2019 Free Database*. Disponível em: <https://nexus.openlca.org/database/OzLCI2019> Acesso em: abr. 11, 2023.





AVALIAÇÃO DO ORÇAMENTO E DO PROJETO BÁSICO DE UMA OBRA FERROVIÁRIA NÃO INICIADA E O POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BENEFÍCIOS EFETIVOS

Rherman Radicchi Teixeira Vieira/ TCU⁷

Pedro Ferreira de Araújo / TCU

Edson Kurokawa/ TCU

RESUMO

Este artigo apresenta um estudo de caso sobre a fiscalização do projeto básico e do orçamento das obras de construção da Ferrovia de Integração Centro-Oeste, focando o trecho entre Mara Rosa (GO) e Água Boa (MT). A análise enfocou o orçamento, a metodologia construtiva e a conformidade do projeto básico com a legislação aplicável na época, ressaltando as principais não conformidades que foram identificadas e as melhorias e correções implementadas posteriormente no projeto básico e no orçamento. Para a análise orçamentária, foi empregado o Sistema de Análise de Orçamentos, uma ferramenta informatizada desenvolvida pelo Tribunal de Contas da União. Por meio da análise orçamentária e da avaliação dos itens de serviços e materiais de maior impacto financeiro, foi possível examinar, de forma detalhada, esses aspectos no projeto básico, incluindo memórias de cálculo, desenhos técnicos, detalhamentos e especificações

7 Tribunal de Contas da União - TCU.

técnicas. Esse processo revelou diversas não conformidades no orçamento e no projeto básico, o que, durante a auditoria, levou o órgão responsável pela obra a revisar e modificar vários itens do orçamento e do projeto. Como resultado, houve uma redução total do orçamento inicial, gerando um benefício efetivo de mais de 400 milhões de reais no âmbito do investimento cruzado previsto para a renovação antecipada da Estrada de Ferro Vitória a Minas.

Palavras-chave: ferrovia; orçamento; deficiência projeto básico; não conformidades.

1 INTRODUÇÃO

O presente artigo se originou de um estudo de caso sobre uma auditoria que gerou uma economia de cerca de R\$ 400 milhões em uma obra ferroviária, a da Ferrovia de Integração Centro-Oeste (FICO). Ao identificar e corrigir inconsistências no projeto e no orçamento, antes do início das obras, foi possível prevenir o potencial desperdício de recursos públicos.

Cabe lembrar que o público que acessa esses resultados por meio dos acompanhamentos das fiscalizações e acórdãos do Tribunal de Contas da União (TCU) é extremamente limitado e, normalmente, restritos às partes envolvidas no processo. Dado o contexto, e considerando-se que a divulgação dos resultados de auditorias do TCU é geralmente limitada, este artigo busca ampliar o conhecimento sobre o tema, apresentando um caso de sucesso e demonstrando a importância da auditoria prévia para a otimização de recursos em obras de grande porte.

O objetivo geral do estudo de caso que foi demonstrar a importância da auditoria prévia na identificação de não conformidades e na otimização de projetos de grande porte, como a FICO. O estudo teve os objetivos específicos de mostrar como o uso de ferramentas automatizadas de análise orçamentária pode auxiliar na identificação de inconsistências e na priorização de ações para correção do projeto básico; demonstrar a possibilidade de sinalização de não conformidades a partir da análise orçamentária, avaliar e propor melhorias na metodologia construtiva antes do início da obra; e mostrar que a integridade e a viabilidade técnica do projeto básico podem ser avaliadas de forma antecipada, evitando problemas futuros.

O artigo destaca, portanto, a importância da fiscalização antes do início de uma obra, em suas etapas iniciais, após a realização do projeto e da elaboração do orçamento, para garantir a aplicação eficiente dos recursos públicos, a conformidade legal do projeto e a possibilidade de detectar não conformidades, evitando-se que potenciais irregularidades possam acontecer durante a execução da obra.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A Ferrovia de Integração Centro-Oeste, especificamente no segmento de Vila Boa (MT) a Mara Rosa (GO), representa um trecho da rede ferroviária que visa conectar as regiões Norte, a partir de Acre e Rondônia, e Centro-Oeste, a partir de Mato Grosso e Goiás, ao litoral da Bahia. O propósito dessa ferrovia é facilitar o escoamento da produção agrícola e mineral dessas áreas para o porto de Ilhéus (BA), no Oceano Atlântico, e permitir a importação de insumos e melhorar a logística para o interior do país reduzindo os custos de transporte.

Vale notar que, atualmente, a maior parte da produção agrícola do norte de Mato Grosso é conduzida por rodovias, um método que gera custos significativamente mais altos do que em comparação com o transporte ferroviário e/ou fluvial por barcas. O transporte rodoviário, devido à sua capacidade limitada de carga e à sua baixa produtividade logística, eleva os custos para os produtores e reduz a competitividade econômica para exportação. Assim, a construção desse trecho ferroviário é um passo essencial para, futuramente, integrar as regiões Norte e Centro-Oeste ao litoral leste, além de promover o aumento da produtividade e a redução de custos na produção agrícola e no setor de mineração.

O investimento na FICO foi previsto como contrapartida pela renovação antecipada do contrato de concessão da Estrada de Ferro Vitória a Minas, administrada pela Vale S.A. O termo aditivo ao contrato estabeleceu que a Vale deve construir a infraestrutura e a superestrutura ferroviária da FICO abrangendo 382,7 km entre os municípios de Água Boa (MT) e Mara Rosa (GO). Esse investimento inclui a elaboração do projeto executivo, o fornecimento de insumos e a execução das obras, conforme parâmetros definidos no projeto básico.

Os órgãos reguladores comprometeram-se a fornecer à concessionária o projeto básico, atendendo aos requisitos da Lei nº 8.666/1993 (BRASIL, 1993), que regula contratações de obras públicas. Assim, a obrigação de investimento se aproxima, em certos aspectos, da contratação de uma obra pública, embora não se preveja um processo licitatório no caso concreto. A modelagem exige que a Vale execute a obra dentro de um prazo definido como contrapartida à prorrogação da concessão, sem vínculo posterior com a ferrovia implementada.

Um elemento importante para o estudo de caso foi o Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO), que, segundo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2008), é uma base de dados essencial para a gestão de custos em obras públicas, especialmente aquelas relacionadas à infraestrutura de transportes. De acordo com o *Manual de Custos de Infraestrutura de Transportes* (DNIT, 2015), o SICRO foi desenvolvido e é gerenciado pelo DNIT e fornece uma base de dados detalhada sobre

custos unitários de materiais, equipamentos e mão de obra, considerando variações regionais do país e uma temporalidade trimestral.

O SICRO é uma base de dados, inicialmente, desenvolvida especificamente para obras rodoviárias. Ele contém informações detalhadas sobre custos unitários de serviços, materiais, equipamentos e mão de obra necessários para a construção e para a manutenção de estradas e rodovias. Contudo, ele pode ser aplicado a obras ferroviárias (Acórdãos 3061/2011 TCU-P, 1023/2011 TCU-P e 1844/2014 TCU-P). Isso é possível porque muitos dos serviços e materiais usados na construção de estradas também são comuns em ferrovias, tais como terraplenagem, drenagem, transporte de materiais, insumos, construção de bases para leito de ferrovias, mão de obra especializada em serviços de obras de transporte e equipamentos. Assim, o SICRO oferece uma base sólida para se estimarem os custos em projetos ferroviários.

Outro elemento importante para o estudo de caso foi o Sistema de Análise de Orçamentos (SAO), uma ferramenta desenvolvida internamente pelo TCU para aprimorar a análise de orçamentos em obras públicas. Esse sistema permite a análise automatizada de orçamentos, comparando, item a item, os serviços e insumos presentes no orçamento com valores referenciais de mercado, como os fornecidos pelo Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil – SINAPI e pelo SICRO, detectando potenciais não conformidades orçamentárias (TC 000.763/2016-0 – TCU). Ao realizar essa comparação detalhada, o SAO contribui, significativamente, para a detecção automatizada de sobrepreços em planilhas orçamentárias com grande quantidade de dados, garantindo que os valores orçados estejam alinhados com os custos de mercado. Além disso, o SAO permite gerar a curva ABC de um orçamento, identificando e priorizando os serviços ou itens que representam os maiores custos dentro de um orçamento, seguindo o princípio de Pareto.

Outra função do SAO é a de servir como uma base de dados históricos de tipologias de potenciais não conformidades que foram detectadas em outras fiscalizações de obras públicas, auxiliando na identificação e sinalização (*red flags*) de padrões que possam indicar riscos de irregularidades orçamentárias ou desvios nas estimativas de custo. Os algoritmos do sistema permitem identificar não conformidades já cadastradas e levantadas anteriormente, ao varrer todos os itens presentes no orçamento, apoiando a auditoria na análise de grandes volumes de dados e na identificação de itens que requerem atenção especial.

Um conceito importante para o estudo de caso é o chamado investimento cruzado, oriundo da Lei Nº 13.448 de 2017 (BRASIL, 2026), que trouxe, como inovação no ordenamento jurídico, a possibilidade de realização de investimentos pelos entes privados em malhas ferroviárias distintas como contrapartida às prorrogações de contratos de concessão. Tal dispositivo passou a ser chamado de investimento cruzado. Eis o trecho da referida lei a esse respeito:

Art. 25. O órgão ou a entidade competente é autorizado a promover alterações nos contratos de parceria no setor ferroviário a fim de solucionar questões operacionais e logísticas, inclusive por meio de prorrogações ou relances da totalidade ou de parte dos empreendimentos contratados.

§ 1º O órgão ou a entidade competente poderá, de comum acordo com os contratados, buscar soluções para todo o sistema e adotar medidas diferenciadas por contrato ou por trecho ferroviário que considerem a reconfiguração de malhas, admitida a previsão de investimentos pelos contratados em malha própria ou naquelas de interesse da administração pública (BRASIL, 2026).

Esse dispositivo possibilita a ampliação da malha e da capacidade do subsistema ferroviário, sem a obrigação direta da União de aportar recursos para tanto. Os empreendimentos ferroviários executados por meio do investimento cruzado são previstos para serem entregues à União após a conclusão pelo ente privado e são objeto de licitação para viabilizar sua operação por meio de contrato de concessão.

3 METODOLOGIA

A fiscalização conduzida pelo TCU teve como objetivo garantir a eficiência, a economicidade e a conformidade legal do projeto, elementos fundamentais para o desenvolvimento logístico e econômico das regiões Norte, Centro-Oeste e Nordeste. O montante fiscalizado pelo TCU atingiu R\$ 3.173.721.371,07 (com data-base em julho de 2018). Esse valor corresponde ao orçamento total para a implantação da FICO no trecho entre Mara Rosa (GO) e Água Boa (MT), que tem uma extensão de 383 km e cujo projeto foi desenvolvido pela Valec, atual Infra S.A. A Figura 1 a seguir mostra o trecho citado.

Figura 1 – Trecho ferroviário no trecho Mara Rosa (GO) e Água Boa (MT)



Fonte: os autores.

Durante a fiscalização, foi inserido no SAO o orçamento completo da FICO, o qual foi encaminhado ao TCU pela Valec (Infra S.A.), empresa estatal responsável pelos projetos, e o qual continha mais de 3.500 itens. Esses itens incluíam serviços, materiais, mão de obra e outros elementos necessários para a execução da ferrovia no trecho analisado, organizados em uma planilha sintética com um total de 65 páginas.

Após a inclusão da planilha no sistema, o SAO processou os dados e gerou relatórios que destacaram os itens mais significativos, bem como aqueles que apresentavam maior risco de não conformidades. Para isso, foi gerada a curva ABC no SAO, ferramenta que auxilia na identificação dos itens de maior relevância. Além disso, foram realizadas buscas automatizadas de padrões, ou seja, tipologias de potenciais irregularidades orçamentárias, desenvolvidas especificamente para diferentes tipos de obras, incluindo ferrovias.

Após a identificação de possíveis problemas no orçamento, os itens foram analisados de forma detalhada e minuciosa, com o cruzamento das informações orçamentárias e as demais documentações técnicas relacionadas ao projeto. Em suma, o uso do SAO na análise do orçamento da FICO possibilitou a identificação dos itens de maior impacto financeiro e de potenciais irregularidades, permitindo também a priorização desses itens devido à limitação de tempo na fiscalização.

Os itens orçamentários sinalizados pelo SAO e os referentes ao projeto básico deficiente se dividem em 3 subitens: uso de métodos expeditos e itens genéricos na planilha orçamentária, quantitativos inadequados e serviços de natureza antieconômica.

A análise inicial com uso do SAO, com o uso da trilha e da tipologia de itens genéricos (uso de verbas e unitário), apontou inconsistências e irregularidades relacionadas ao uso de métodos expeditos e itens genéricos na planilha orçamentária, contrariando os requisitos de projeto básico estabelecidos pela Lei nº 8.666/1993 (BRASIL, 1993). Conforme foi apontado no relatório de fiscalização, os dois serviços mais relevantes em que se verificou a irregularidade foram: (a) elaboração dos projetos executivos, supervisão e controle das obras; e (b) dimensionamento de estruturas de concreto armado.

Com a curva ABC do orçamento, constatou-se que a elaboração do projeto executivo representava em torno de 10% do custo total da obra no trecho avaliado de Goiás. A Figura 2, a seguir, mostra o relatório com apontamento de itens genéricos (unidade ou verbas) após o processamento no SAO.

Figura 2 – Resultado do processamento no SAO. O Projeto executivo representa em torno de 10% do total da obra no trecho de Goiás

Análise de Verba

Cod serv	Serviço	Unidade	Quantidade	Preço Unitário	Preço Parcial	Incidencia %	E verba
VA0030	Projeto executivo, supervisão e controle de obras	UND	1,00	189.719.823,40	189.719.823,40	9,59	-
VA0006	Administração local	UND	1,00	84.336.458,81	84.336.458,81	4,26	-
VW0052	Meio ambiente	UND	1,00	66.710.674,93	66.710.674,93	3,37	-
VA0007	Instalação do canteiro de obras	UND	1,00	13.709.665,30	13.709.665,30	0,69	-
VW0049	Fornecimento e instalação de sinalização náutica (provisória e definitiva)	UND	1,00	3.140.840,27	3.140.840,27	0,16	-
VW0047	Apoio náutico com balsa de convés capacidade de 200t	CJXMÉS	1,00	525.245,37	525.245,37	0,03	-
VU0010	Fornecimento de aparelho de mudança de via (AMV), bitola larga, abertura 1:8, trilho UIC-60	JG	1,00	301.845,34	301.845,34	0,02	-
VD0004	Fornecimento e instalação de parachoque ferroviário	UND	1,00	68.434,78	68.434,78	0,00	-
VU0032	Instalação de aparelho de mudança de via (AMV), bitola larga, abertura 1:8	UND	1,00	16.914,63	16.914,63	0,00	-

Fonte: os autores.

Observa-se que o projeto executivo possuía um valor de quase 190 milhões de reais. Além disso, ele estava presente no orçamento tendo como unidade o valor unitário. Na composição de custos, não foi detalhado como esse valor foi levantado. A empresa responsável, questionada sobre como esse valor foi estimado, informou que a estimativa foi feita a partir de valores expeditos. Não existia nenhuma planilha detalhando a mão de obra de profissionais para a realização do projeto, a produção da equipe de projeto, o dimensionamento da equipe, os profissionais envolvidos e os insumos necessários para a caracterização do custo do projeto executivo.

Após essa resposta, constatou-se que o valor presente no orçamento não atendia aos requisitos legais previstos no art. 6º, inciso IX, da Lei nº 8.666/93 (BRASIL, 1993). Ademais, a falta de detalhamento dos elementos necessários e suficientes para a caracterização do serviço “projeto executivo, supervisão e controle de obras” pode ser qualificada como uso de itens genéricos no orçamento (verbas).

A jurisprudência do Tribunal é farta no sentido de que o uso de “verba” se caracteriza como uma irregularidade, tal como apresentado na Súmula 258⁸. Após o apontamento, o responsável se propôs a detalhar e a corrigir as deficiências apresentadas.

No que diz respeito ao dimensionamento das estruturas de concreto armado e aço de forma expedita, o item mais relevante da curva ABC do orçamento foi o referente ao concreto armado e ao quantitativo de aço utilizado em diversas obras de arte da ferrovia (e.g., pontes, viadutos, bueiros e outras peças estruturais). Esse item representava mais de 12% do valor total da obra. Esse apontamento foi levantado a partir da curva ABC e da conferência dos projetos. A Figura 3, a seguir, mostra o resultado após o processamento, no SAO, do trecho da ferrovia em Goiás.

Figura 3 – Materialidade financeira de aço e concreto armado no trecho da ferrovia em Goiás

Linha	Descrição do Serviço	Und	Quantidade	Preço Unit (com BDI)	Preço Parcial	ABC
0003	Armação em aço CA-50, fornecimento, preparo e colocação	KG	13.808.949,97	10,43	144.027.348,19	7,28
0010	Concreto fck= 20 MPa - confecção em betoneira e lançamento manual - areia extraída e brita comercial	M3	158.908,37	388,82	61.786.752,42	3,12
0016	Concreto fck= 30 MPa - confecção em central dosadora de 30 m³/h - areia extraída e brita comercial	KG	81.011,15	363,34	29.434.591,24	1,49
0051	Armação de estaca escavada ou parede diafragma em aço CA-50 com apoio de guindaste - fornecimento, preparo e colocação	M3	158.908,37	10,66	5.603.109,20	0,28

Fonte: TC 025.638/2019-0 Fiscalização 197/2019 - TCU

8 Disponível em <https://pesquisa.apps.tcu.gov.br/resultado/sumula/258/NUMERO%253A258/sinonimos%253D-true>. Acesso em: 16 abr. 2026.

A análise aprofundada da documentação técnica apresentada (composta de desenhos, planilhas, plantas, relatórios, mapas, entre outros referentes a estruturas de concreto armado) constatou que o projeto não atendia aos preceitos do art. 6º, inciso IX da Lei nº 8.666/1993 (BRASIL, 1993) quanto à suficiência e ao detalhamento dos quantitativos de serviços. Por exemplo, o quantitativo de aço e concreto, itens de alta relevância e materialidade, foram estimados por métodos expeditos, conforme manifestação do auditado, sem o dimensionamento das estruturas de concreto nem o detalhamento do aço utilizado. Ou seja, esses itens não atendiam aos preceitos legais e às exigências mínimas do projeto básico, conforme a legislação vigente na época.

Esse achado de auditoria diz respeito a quantitativos de serviços presentes na planilha orçamentária que não estão consistentes com a obra a ser realizada, nem com o projeto básico. Um dos serviços que ilustram essa situação é o quantitativo de cercas nos trechos dos Estados de Goiás e Mato Grosso. O cercamento da faixa de domínio da ferrovia é necessário para que pessoas e animais não adentrem a área da ferrovia por onde passam os trilhos e imediações e possam ocasionar acidentes.

O SAO utiliza algoritmos que avaliaram o quantitativo de ferrovias a ser construído, com base em valores paramétricos, e identificaram, no orçamento, os itens relacionados ao cercamento da ferrovia. Por exemplo, no trecho da ferrovia localizado no Estado de Goiás, está prevista a construção de 239 km de ferrovia. Isso significa que, para o cercamento dos dois lados da ferrovia, será necessário um quantitativo aproximado de 478 km de cercas. Além disso, é recomendada a inclusão de uma reserva para atender a situações não previstas, como acessos a rodovias, interferências, trechos não lineares e outras possíveis condições que possam surgir durante a execução do projeto. Entretanto, no orçamento avaliado está previsto, para esse trecho de 239 km de ferrovia, um quantitativo de 681 km de cercas. Em outras palavras, o SAO apresentou um *red flag* para a situação encontrada.

Questionou-se a empresa responsável sobre o motivo pelo qual ocorria uma diferença superior a 200 km no quantitativo de cercas, considerando-se o item para os dois lados da ferrovia, somente no trecho de Goiás. Levando-se em conta os dois trechos, *i.e.*, em Goiás e em Mato Grosso, o total de cerca prevista no orçamento será de 1.032 km.

Para ilustrar a situação e o questionamento ao auditado, foi apresentada a tabela a seguir, com os maiores quantitativos de cercas nos locais que possuem as maiores interferências.

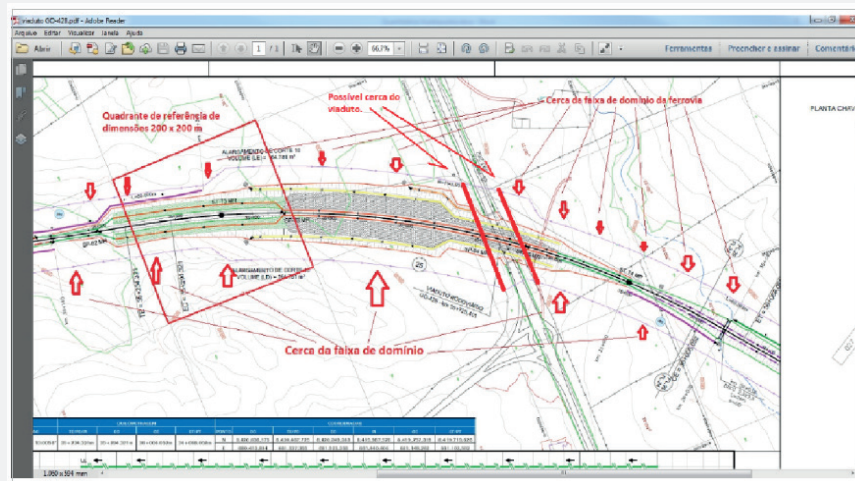
Tabela 1 – Locais com maiores quantidades de cercas além do previsto para cercamento dos dois lados da ferrovia

Tipo	Local	Lote do Projeto	Estado	Extensão das vias	Cerca tipo I empregando mourões de concreto, inclusive transporte (metros)
TOTAL				87.524,83	210.059,59
Viaduto Rodoviário GO-428	35+720	2ES	GO	2.200,00	5.280,00
Passagem em nível - Tipo I	163+020	3ES	GO	2.161,28	5.187,06
Passagem Veicular (5,00x4,55)	107+460	3ES	GO	2.075,68	4.981,62

Fonte: os autores.

Como exemplo, apresentou-se, no questionamento ao responsável, o local no qual existia o maior quantitativo presente no projeto de cercas além da faixa dupla de domínio da ferrovia, o qual correspondia a um quantitativo em torno de 5,28 km, conforme Figura 4, a seguir.

Figura 4 – Local em projeto da ferrovia no qual ocorria o maior quantitativo de cercas além da faixa de domínio



Fonte: os autores.

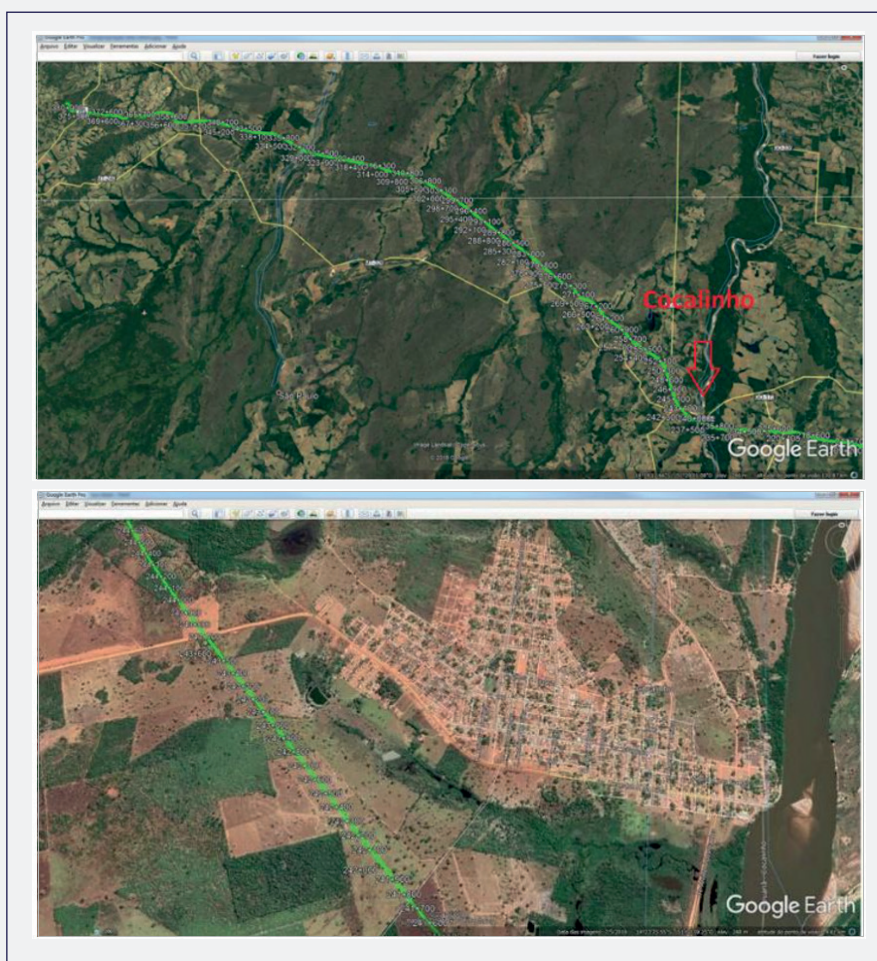
Pelo desenho do projeto, não foi possível identificar o quantitativo de 5,28 km além do cercamento da faixa de domínio. As outras duas situações na tabela também foram apresentadas em conjunto com os desenhos do cercamento, que estavam na mesma situação da Figura 4. Dessa forma, a partir dos projetos da faixa de domínio e das respectivas cercas, não foi possível determinar e nem visualizar o quantitativo de 210 km de cercas além do previsto para cercar os dois lados da ferrovia no trecho de Goiás. Portanto, foi solicitado à equipe responsável que apresentasse as memórias de cálculo que justificassem esse quantitativo de cercas nessas localidades, como nos demais locais onde ocorressem superestimativas.

Em resposta ao questionamento, a equipe responsável apresentou o redimensionamento dos quantitativos de cercas, ajustando o valor total inicialmente previsto no orçamento. O quantitativo de cercamento foi reduzido de 1.032 km para 893 km, refletindo uma revisão mais precisa e alinhada às necessidades reais do projeto.

Avaliando-se a curva ABC, constatou-se que o 13º item mais relevante foi a desapropriação de áreas urbanas. O custo total da desapropriação urbana correspondia a, aproximadamente, R\$70 milhões. O custo unitário da desapropriação urbana é de R\$34,89/m², enquanto no mesmo orçamento a desapropriação rural é de R\$4,36/m².

Para verificar as áreas urbanas presentes no percurso, projetou-se o arquivo vetorial (*i.e.*, arquivo KMZ) com o trajeto da ferrovia em uma imagem de satélite do programa GoogleEarth. Além disso, foram levantadas as coordenadas geográficas das obras civis (pátios e demais construções) dos projetos em CAD. Constatou-se na visualização do trajeto da ferrovia sobre a imagem de satélite que o trajeto da ferrovia não atravessa áreas urbanizadas e está distante dessas áreas, conforme imagem exemplificada a seguir (Figura 5).

Figura 5 – Trajeto da ferrovia no Estado do MT e trajeto nas proximidades de Cocalzinho (MT), local com maior proximidade de área urbana



Fonte: os autores.

Foi questionado ao responsável o motivo da previsão orçamentária para a desapropriação urbana, considerando-se que o trajeto da ferrovia bem como os desenhos detalhados dos pátios de manobras e estações não indicavam a existência de obras ferroviárias dentro de áreas urbanas nos municípios limítrofes à ferrovia.

Em resposta ao questionamento, o responsável realizou ajustes nas especificações do orçamento, suprimindo o quantitativo referente à desapropriação de áreas urbanas. Essa revisão resultou em uma redução financeira significativa, gerando um benefício efetivo de R\$ 74 milhões.

Atualmente, os serviços de desapropriação urbana em orçamentos ferroviários são tratados como uma tipologia de busca orçamentária no SAO. Além disso, o uso de geotecnologias, como a projeção de trajetos em imagens de satélite, foi incorporado como procedimento padrão em trilhas de levantamento de potenciais irregularidades. Esse procedimento é acionado sempre que o orçamento sinaliza a presença de serviços de desapropriação urbana, garantindo uma maior precisão e uma maior eficiência na análise orçamentária.

Após o processamento da planilha orçamentária, constatou-se, em uma análise com o uso do SAO, que diversos serviços relevantes presentes no orçamento possuem natureza antieconômica, conforme esta relação: enrocamento com pedras; escavação manual em material de 1ª categoria na profundidade de até 2 m; e confecção e lançamento manual de brita – material drenante.

Conforme o Relatório de fiscalização automatizada em orçamentos do TCU (2016), essa trilha e essa tipologia de busca de uma potencial irregularidade classificada como “serviços manuais” estão presentes no SAO desde a sua primeira versão.

A Figura 6, a seguir, apresenta relatórios consolidados gerados pelo SAO, que destacam serviços classificados como de natureza antieconômica, especificamente na categoria de serviços realizados manualmente. Os relatórios exibem informações detalhadas, incluindo as quantidades, os valores unitários e os valores totais desses serviços.

Figura 6 – Serviços de natureza antieconômica no trech de Goiás da obra ferroviária

Análise de Verba

Cod serv	Serviço	Unidade	Quantidade	Preço Unitário	Preço Parcial	Incidência %	E verba
VA0030	Projeto executivo, supervisão e controle de obras	UND	1,00	189.719.823,40	189.719.823,40	9,55	-
VA0006	Administração local	UND	1,00	84.336.458,81	84.336.458,81	4,26	-
VW0052	Meio ambiente	UND	1,00	66.710.674,93	66.710.674,93	3,37	-
VA0007	Instalação do canteiro de obras	UND	1,00	13.709.665,30	13.709.665,30	0,69	-
VW0049	Fornecimento e instalação de sinalização náutica (provisória e definitiva)	UND	1,00	3.140.840,27	3.140.840,27	0,16	-
VW0047	Apoio náutico com balsa de convés capacidade de 200t	CJXMES	1,00	525.245,37	525.245,37	0,03	-
VU0010	Fornecimento de aparelho de mudança de via (AMV), bitola larga, abertura 1:8, trilho UIC-60	JG	1,00	301.845,34	301.845,34	0,02	-
VD0004	Fornecimento e instalação de parachoque ferroviário	UND	1,00	68.434,78	68.434,78	0,00	-
VU0032	Instalação de aparelho de mudança de via (AMV), bitola larga, abertura 1:8	UND	1,00	16.914,63	16.914,63	0,00	-

Fonte: os autores.

Todos os itens apresentados previam a execução dos serviços de forma manual, sem o uso de equipamentos mecanizados. É importante destacar que os serviços classificados como “manuais” são aqueles realizados exclusivamente por serventes ou ajudantes, utilizando ferramentas simples, como pás, picaretas, enxadas, carrinhos de transporte manual, entre outras.

Ao observar os grandes volumes de serviços apresentados na Figura 6, verifica-se que os quantitativos previstos para essa modalidade de execução manual são economicamente e operacionalmente inviáveis, considerando-se a utilização exclusiva de mão de obra de serventes. Além disso, foi constatado que os serviços de escavação, nas composições orçamentárias, estão previstos para ser realizados com ferramentas manuais, o que não está alinhado às melhores práticas de planejamento e de execução de obras. Essa abordagem pode comprometer a eficiência e a qualidade dos trabalhos, além de gerar custos desnecessários.

Segundo Baeta (2012), essa situação também pode ser caracterizada durante a execução da obra, por ocorrência de superfaturamento decorrente da alteração da metodologia executiva. Esse superfaturamento ocorre quando é prevista uma modalidade de serviço no orçamento e, durante a execução, ocorre outra. Por exemplo, para o serviço de escavação manual em material de 1ª categoria na profundidade até 2,0 metros, está previsto um quantitativo de 598.383 m³ em toda a obra, com um custo unitário de R\$41,86/m³.

A produtividade de escavação manual de um servente é de 0,4m³/hora (serviço SICRO com código 4805751) ou 3,2 m³/dia. Para atender a todo o quantitativo previsto, seriam necessários 186.994 homens x dias para realização desse serviço. Considerando-se uma frente de 100 homens dedicados à tarefa, seriam necessários mais de 1.870 dias úteis ou, aproximadamente, 8,5 anos para realização dessas atividades com os quantitativos previstos no orçamento. Esse mesmo serviço sendo realizado com retroescavadeira (código SICRO 4805757 - Escavação mecânica de vala em material de 1ª categoria) possui um custo de R\$ 6,03/m³ e produção de 19,59m³/hora e 156 m³/dia. Ou seja, a escavação mecanizada possui um custo unitário por m³ em torno de 14% do valor da escavação manual e possui uma produtividade diária de escavação quase 50 vezes maior.

A partir dessas constatações, a empresa responsável foi questionada sobre o motivo de ter previsto a execução dos serviços manualmente, considerando-se que a execução mecanizada oferece menores custos e maior produtividade em comparação à manual. Após o questionamento, a empresa revisou e ajustou as composições dos serviços.

4 RESULTADOS

Os resultados, nos exemplos apresentados, indicaram a presença de diversas irregularidades no projeto básico, tais como a utilização de métodos expeditos para a

orçamentação e a falta de detalhamento em elementos estruturais críticos.

Além disso, identificou-se a necessidade de revisão da metodologia construtiva para garantir a eficiência e a economicidade do projeto ao se constatarem diversos itens orçamentários com quantitativos inadequados e serviços de categoria antieconômica. Esses fatos e achados de auditoria foram apresentados para a empresa responsável pela elaboração do projeto e do orçamento.

Na manifestação de resposta aos questionamentos técnicos apresentados (TC 025.638/2019-0), os responsáveis reconheceram os erros apontados em relatório e afirmaram que “A metodologia executiva será revista e a CPU será devidamente revisada, atentando-se à melhor técnica e vantajosidade [...]”.

Após a realização da revisão completa do projeto, do orçamento e da metodologia executiva, a empresa responsável apresentou uma nova versão do projeto básico e afirmou que estava realizando estudos técnicos para detalhar as peças estruturais de alta significância financeira e materialidade. A resposta também sinalizou que se buscava uma melhoria com o detalhamento nos serviços que, inicialmente, foram realizados de forma expedita e aproximada, sem a precisão necessária conforme estabelece a legislação.

A Tabela 2, a seguir, mostra comparativamente os resultados consolidados por itens entre o orçamento inicial e o orçamento revisado após a realização da auditoria.

Tabela 2 – Comparação do orçamento do ano de 2019 e do ano de 2020

		Orçamento 2019 (R\$)	Orçamento 2020 (R\$)	Impacto
1.	Custos Indiretos	859.025.784,14	583.992.987,10	-32,0%
2.	Serviços preliminares	54.416.359,92	53.885.971,29	-1,0%
3.	Terraplanagem	536.294.373,21	537.441.080,09	+0,2%
4.	Pavimentação	4.171.502,70	4.488.624,24	+7,6%
5.	Drenagem	261.546.707,50	178.347.605,86	-31,8%
6.	Obras de arte correntes	194.171.571,34	187.853.370,37	-3,3%
7.	Obras complementares	157.573.030,25	155.864.832,73	-1,1%
8.	Superestrutura	731.386.838,87	712.030.746,11	-2,6%
9.	Sinalização	8.198.581,35	8.204.632,54	+0,1%
10.	Interferência viárias	56.475.405,87	49.034.351,70	-13,2%
11.	Obras de arte especiais	310.461.215,92	299.649.378,49	-3,5%
	TOTAL	3.173.721.371,07	2.770.793.580,52	-12,7%

Fonte: Relatório de instrução da auditoria TC 025.638/2019-0, p.11.

Em síntese, o orçamento inicial previsto para a construção da FICO, que totalizava R\$ 3.173.721.371,07, foi revisado e ajustado para R\$ 2.770.793.580,52. Essa revisão resultou em uma redução de, aproximadamente, R\$ 403 milhões, equivalente a 12,7% do valor inicialmente estimado. Considerando-se que esse orçamento revisado serviu como referência para a execução da FICO, por meio de investimento cruzado no contexto da renovação antecipada das ferrovias Estrada de Ferro Vitória a Minas e Estrada de Ferro

Carajás, pode-se afirmar que a atuação do TCU gerou um benefício efetivo significativo.

É importante destacar que a maior parte dos serviços incluídos no orçamento estava compatível com os custos dos sistemas referenciais, como o SICRO. O relatório da fiscalização não identificou achados relacionados a sobrepreços em relação aos custos referenciais, uma vez que os poucos casos encontrados não estavam classificados na faixa A da curva ABC, que representa os itens de maior impacto financeiro.

Os principais apontamentos e achados de materialidade da fiscalização foram relacionados a inconsistências nos quantitativos e nas especificações dos serviços. Esses problemas foram detalhados e exemplificados ao longo do artigo.

5 CONCLUSÃO

A fiscalização realizada pelo TCU sobre o projeto básico e o orçamento da FICO, no contexto do investimento cruzado previsto para a renovação antecipada da Estrada de Ferro Vitória a Minas, revelou diversas irregularidades e apontou áreas com potencial para melhorias nos estudos técnicos e projetos que compõem o projeto básico.

O estudo de caso aqui apresentado destacou a relevância da auditoria prévia à execução de obras de grande porte, evidenciando sua importância na prevenção e na antecipação de possíveis problemas durante a execução. Um exemplo significativo nesse estudo foi a identificação de obras de arte de grande porte cujos serviços de concreto e ferragens foram projetados por métodos expeditos, sem atender aos requisitos legais. Após os apontamentos realizados pela equipe de fiscalização, os responsáveis comprometeram-se a elaborar um projeto básico estrutural detalhado, em conformidade com o que estabelece a Lei nº 8.666/1993 (BRASIL, 1993).

Além disso, a aplicação de ferramentas automatizadas e a análise criteriosa do projeto básico e do orçamento permitiram identificar diversas irregularidades e propor ajustes que resultaram em uma redução dos custos da obra. Conforme Relatório Fiscobras (2020), a auditoria alcançou um benefício efetivo superior a R\$ 400 milhões. Vale notar que a divulgação desses resultados tem como objetivo principal compartilhar boas práticas e desafios enfrentados na fiscalização de projetos ferroviários, contribuindo para o aprimoramento dos processos de controle e avaliação de obras públicas.

Os achados da auditoria podem servir como referência para auditores e técnicos responsáveis pela análise de projetos semelhantes, orientando-os na identificação de potenciais não conformidades e na adoção de medidas preventivas. A utilização de ferramentas, como o SAO, foi essencial para identificar itens com maior impacto financeiro e detectar inconsistências nos projetos. A combinação entre análise automatizada e avaliação técnica detalhada proporcionou uma análise mais precisa e eficiente do orçamento e do projeto básico.

Segundo o Relatório Fiscobras (TCU, 2020⁹), outro ponto relevante dessa fiscalização foi a geração de 21 novas tipologias e trilhas de auditoria orçamentária aplicadas em obras ferroviárias, que agora integram a base histórica de tipologias de potenciais irregularidades do SAO. Esse conhecimento adquirido foi sistematizado e incorporado ao SAO e poderá ser aplicado em futuras auditorias e fiscalizações orçamentárias de obras ferroviárias, na varredura automatizada das planilhas.

Em síntese, a auditoria realizada na FICO evidenciou a importância de uma fiscalização prévia e antecipada de projetos de infraestrutura. Os resultados obtidos demonstram que a auditoria prévia do Projeto Básico e do orçamento pode ser uma ferramenta eficaz para prevenir não conformidades e detectar potenciais irregularidades.

9 - Disponível em https://portal.tcu.gov.br/uploads/Fiscobras_2020_a8b5574669.pdf. Acesso em 13 de abril de 2026.

REFERÊNCIAS

- ATRICON. *Manual de quantificação de benefícios gerados pela atuação dos Tribunais de Contas*. Brasília, DF: Atricon, 2020. Disponível em: https://www.atricon.org.br/wp-content/uploads/2020/06/MQB_Manual.pdf. Acesso em: 01 abr. 2025.
- BAETA, André Pachioni. *Orçamento e controle de preços de obras públicas*. São Paulo: Pini, 2012.
- BRASIL. Lei nº 8.666, de 21 de junho de 1993. Regulamenta o art. 37, inciso XXI, da Constituição Federal, institui normas para licitações e contratos da Administração Pública e dá outras providências. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, 22 jun. 1993.
- BRASIL. Lei nº 13.448 de 05 de junho de 2017. Lei que dispõe sobre o Prorrogação e Relicitação do Programa de Parcerias de Investimentos. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2015-2018/2017/lei/L13448.htm. Acesso em: 15 abr. 2026.
- BRASIL. Tribunal de Contas da União. TC 000.763/2016-0. Relatório de Levantamento. Relator: Ministro Aroldo Cedraz. Brasília, DF: TCU, 2016. Disponível em: <https://pesquisa.apps.tcu.gov.br/redireciona/processo/76320160> Acesso em: 14 abr. 2026.
- DNIT. *Manual de custos de infraestrutura de transportes*. Brasília. Dnit, 2008
- DNIT. *Manual de custos de infraestrutura de transportes*. v. 1. Metodologia e Conceitos. Brasília: Dnit, 2015.
- DNIT, *Sistema de custos referenciais de obras – Sicro*. Brasília: DNIT, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/custos-e-pagamentos/custos-e-pagamentos-dnit/sistemas-de-custos/sicro>. Acesso em: 01 mar. 2025.
- IBRAOP. *Orientação técnica 1/2006, projeto básico*. Disponível em: https://www.ibraop.org.br/wp-content/uploads/2013/06/orientacao_tecnica.pdf. Acesso em: 01 abr. 2025.
- TCU. Tribunal de Contas da União. *Acórdão 3061/2011-P*. 2011. Disponível em: <https://www.tcu.gov.br>. Acesso em: 01 abr. 2025.

TCU. Tribunal de Contas da União. *Acórdão 1023/2011-P*. 2011. Disponível em: <https://www.tcu.gov.br>. Acesso em: 01 abr. 2025.

TCU. Tribunal de Contas da União. *Acórdão 1844/2014-P*. 2014. Disponível em: <https://www.tcu.gov.br>. Acesso em: 01 abr. 2025.

TCU. Tribunal de Contas da União. *Relatório Fiscobras 2020*, 2020. Disponível em: <https://www.tcu.gov.br>. Acesso em: 01 abr. 2025.

TCU. Tribunal de Contas da União. *Portaria nº 37, de 13 de dezembro de 2018*. Regula os procedimentos de identificação, avaliação e registro dos benefícios das ações de controle externo. Brasília: TCU, DF, 2018.

TCU. Tribunal de Contas da União. *Súmula nº 258*. Brasília, 2010. Disponível em: <https://www.tcu.gov.br>. Acesso em: 01 abr. 2025.

TCU. Tribunal de Contas da União. *Roteiro de auditoria de obras públicas*. Instituído pela Portaria Segecex nº 2, de 12 de fevereiro de 2010. Brasília: TCU, 2010. Disponível em: <https://www.tcu.gov.br>. Acesso em: 01 abr. 2025.

TCU. Tribunal de Contas da União. *Primeira revisão do roteiro de auditoria de obras públicas, aprovada pela Portaria Segecex nº 38, de 8 de novembro de 2011*. Brasília, DF: TCU, 2010. Disponível em: <https://www.tcu.gov.br>. Acesso em: 01 abr. 2025.

TCU. Tribunal de Contas da União. *Processo TC nº 025.638/2019-0 Ferrovia de Integração Centro Oeste - Trecho Água Boa/MT – Mara Rosa/GO*. Brasília: TCU, 2025. Disponível em: <https://www.tcu.gov.br>. Acesso em: 01 mar. 2025.

TCU. Tribunal de Contas da União. *Processo TC nº 000.763/2016-0. Levantamento automatizado em orçamentos da CEF*. Brasília: TCU, 2016. Disponível em: <https://www.tcu.gov.br>. Acesso em: 01 mar. 2025.

TISAKA, Maçahico. *Orçamento na construção civil*. São Paulo: Editora Pini, 2006.



CONHEÇA OS AUTORES

O USO DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NO PLANEJAMENTO DA INFRAESTRUTURA DAS CIDADES AMAZÔNICAS

César Augusto Wanderley Oliveira é Subsecretário de Licitações do Município de Porto Velho, Doutorando em Direito (PUC/PR) e Mestre em Amazônia e Políticas de Desenvolvimento (UNIR).

DIAGNÓSTICO E EFICIÊNCIA DOS SERVIÇOS DE SANEAMENTO BÁSICO EM ESCOLAS DO CAMPO EM MINAS GERAIS: UM ESTUDO DE CASO A PARTIR DO PROJETO SEDE DE APRENDER

Douglas Emanuel Nascimento de Oliveira é Coordenador de Auditoria de Obras e Serviços de Engenharia do Tribunal de Contas do Estado de Minas Gerais - TCE/MG, engenheiro civil e mestre em engenharia (UFRJ).

Silvio Cesar Santana Barreto é Auditor de Controle Externo do TCE/MG, engenheiro civil (UFMT), pós-graduado em Gerenciamento de Obras, Qualidade e Desempenho da Construção (IPOG).

VERIFICAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO USO DE IA EM AUDITORIAS: O CASO DE UMA OBRA EM TEOTÔNIO VILELA, ALAGOAS

Edson Kurokawa é Auditor Federal do TCU desde 2009, engenheiro civil (UFG) e mestre em engenharia (UFSC).

VOLO APLICADO À INFRAESTRUTURA URBANA: DETECÇÃO DE FISSURAS EM CICLOVIAS COM O APOIO DE DRONES

Tharlys Hikaro Pinheiro Silva é engenheiro civil pela UFPI, especializado em Gestão e Educação Ambiental (UEPI) e mestrando em Estruturas e Construção Civil (UnB).

Michele Tereza Marques Carvalho é docente do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental e Doutora em Estruturas e Construção Civil (UnB).

ANÁLISE DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA ASSOCIADAS A SERVIÇOS DE PAVIMENTAÇÃO EM VIA URBANA

Claudeny Alves Santana é Assessora Técnica do Tribunal de Contas do Estado do Mato Grosso do Sul - TCE/MS e doutoranda no Programa de Pós-graduação de Engenharia de Transportes (COPPE-UFRJ).

Alexandre Simas de Medeiros é pós-doutorado em andamento no Programa de Engenharia de Transportes (COPPE/UFRJ) e doutor em Engenharia de Transportes (COPPE/UFRJ).

Gabriel Araújo Silva Marques é Assessor de Engenharia de Infraestrutura de Transportes do TCE/MS, engenheiro ambiental e doutorando em Recursos Naturais (UFMS).

Marcelino Aurélio é Professor do Programa de Engenharia de Transportes (COPPE/UFRJ), mestre em Engenharia de Transportes (IME) e Doutor em Engenharia de Transportes (UFRJ).

ESTUDO DE IMPACTO AMBIENTAL EM INFRAESTRUTURAS VIÁRIAS: APLICAÇÃO DA ACV EM DIFERENTES TIPOS DE SUPERESTRUTURA DE PONTES

Dayvson Almeida é Auditor Técnico de Controle Externo – Obras Públicas do Tribunal de Contas do Estado do Amazonas - TCE/AM e doutorando em Engenharia Civil (UFPE).

Arnaldo Carneiro é professor do Centro de Tecnologia e Geociências do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental (UFPE), mestre (UFRS) e doutor em Construção Civil (USP).

AVALIAÇÃO DO ORÇAMENTO E DO PROJETO BÁSICO DE UMA OBRA FERROVIÁRIA NÃO INICIADA E O POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BENEFÍCIOS EFETIVOS

Rherman Radicchi Teixeira Vieira é Auditor Federal de Controle Externo do Tribunal de Contas da União (TCU), atua na Unidade de Auditoria Especializada em Infraestrutura Portuária e Ferroviária (AudPortoFerrovia). Formado em Agronomia pela UnB, com especialização em Controle da Desestatização e Regulação pelo ISC/TCU.

Pedro Ferreira de Araújo é Auditor de Controle Externo do TCU, atua na Unidade de Auditoria Especializada em Defesa Nacional e Segurança Pública (AudDefesa). Graduado em Administração de Empresas, com MBA em Liderança e Gestão de Pessoas e Especialização em Auditoria Financeira.

Edson Kurokawa é Auditor Federal do TCU desde 2009, engenheiro civil (UFG) e mestre em engenharia (UFSC).



Instituto Rui Barbosa

A Casa do Conhecimento dos Tribunais de Contas

Telefone: (71) 3115-4576 | Site: www.irbcontas.org.br

Endereço Sede:

Edifício ION. SGAN 601, Bloco H, Sala 50/71, Térreo – Asa Norte, Brasília – DF CEP: 70.830-018

Endereço Subsede:

Tribunal de Contas do Estado da Bahia – Ed. Cons. Joaquim Batista Neves, nº495, Plataforma 05, Avenida 4 Centro Administrativo da Bahia - CEP: 41745-002 - CAB Salvador/BA





ASSOCIAÇÃO DOS
TRIBUNAIS DE
CONTAS DO BRASIL



APOIO

