XXI ENTAC – Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
14 a 16 de outubro de 2026 | Goiânia-Brasil
DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8272

Otimizando a ventilação de túneis rodoviários: BIM e escaneamento a laser nos Contornos de Caraguatatuba e São Sebastião

Optimizing Road Tunnel Ventilation with BIM and Laser Scanning in the Caraguatatuba and São Sebastião Bypasses

Bruno Germano de Oliveira
Universidade de São Paulo| São Paulo | Brasil | bgermano@usp.br
Sérgio Leal Ferreira
Universidade de São Paulo| São Paulo | Brasil | sergio.leal@usp.br
Rodolfo Santos Rodrigues Barbosa
EGTC Infra| São Paulo | Brasil | rbarbosa@egtc.com.br

Resumo

Apresenta-se neste artigo a aplicação e a avaliação dos benefícios do uso integrado de modelos e ferramentas BIM no projeto de ventilação de túneis rodoviários. A aplicação foi realizada nos túneis dos Contornos Viários de Caraguatatuba e São Sebastião (SP-099), utilizando escaneamento a laser para verificação da seção real de escavação em conjunto com os modelos BIM das seções. Considerando as irregularidades típicas de escavações em NATM, o método apoiou a compatibilização com o gabarito dinâmico e o posicionamento do sistema de ventilação. A obra foi acompanhada e os benefícios foram avaliados por comparação com dados históricos, evidenciando as vantagens do método proposto.

Palavras-chave: BIM. Escaneamento a Laser. Ventilação de Túneis. NATM. Contorno Viário.

Abstract

This paper presents the application and assessment of the benefits of the integrated use of BIM models and tools in the ventilation design of road tunnels. The application was carried out in the Caraguatatuba and São Sebastião bypass tunnels (SP-099), using laser scanning to verify the as-built excavation cross-section together with BIM models of the tunnel sections. Considering the typical irregularities of NATM excavations, the method supported compatibility checks with the tunnel dynamic envelope and the positioning of the ventilation system. The project was monitored and the benefits were assessed by comparison with historical data, highlighting the advantages of the proposed method.

Keywords: BIM. Laser Scanning. Tunnel Ventilation. NATM. Highway Bypass.

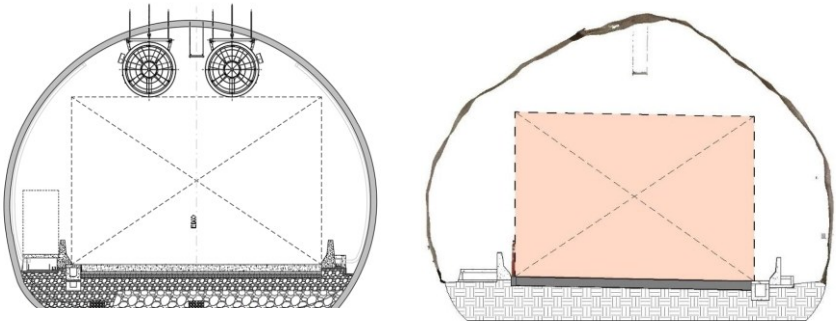
Como citar:
Germano et al. Otimizando a ventilação de túneis rodoviários: BIM e escaneamento a laser nos Contornos de Caraguatatuba e São Sebastião. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 21, 2026, Goiânia. **Anais**... Goiânia: ANTAC, 2026.

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8272

INTRODUÇÃO

Em túneis rodoviários, a geometria executada após a escavação condiciona diretamente a instalação de sistemas eletromecânicos, pois pequenas variações de contorno podem gerar interferências com o gabarito e impor retrabalhos de alto risco e custo. Isto ocorre especialmente em túneis em regiões de alta complexidade geológica e os escavados por metodologia NATM (New Austrian Tunnelling Method). O projeto dos Contornos Viários de Caraguatatuba e São Sebastião, inserido na Rodovia dos Tamoios (SP-099) e executado pela EGTC Infra, reúne um complexo de túneis rodoviários em rocha no qual o controle geométrico do contorno escavado é determinante para a segurança, a funcionalidade e a viabilidade de sistemas eletromecânicos que, embora inaugurados em novembro de 2024, já apresentam conformidade antecipada à Instrução Técnica nº 35/2025 do Corpo de Bombeiros, em vigor desde 20 de março de 2025 [1]. Durante o desenvolvimento do projeto executivo, a equipe de engenharia identificou uma oportunidade de otimização do sistema de ventilação ao aumentar o diâmetro dos jatos ventiladores de 1400 mm para 1600 mm, com potencial de reduzir recursos do sistema. No entanto, essa decisão dependia da compatibilidade entre a seção real do túnel e a seção teórica de projeto, uma vez que a disponibilidade de envelope para instalação e operação é condicionada pelas variações do contorno ao longo do desenvolvimento. A Figura 1 apresenta o comparativo entre a seção teórica do túnel e a seção real levantada em campo, evidenciando diferenças geométricas que podem implicar restrições ao envelope disponível. Em túneis escavados por desmonte, variações locais de geometria podem decorrer do desempenho do desmonte de contorno e resultar em irregularidades que afetam o gabarito e exigem intervenções corretivas como o reperfilamento da seção, atividade que se torna complexa em calotas já estabilizadas, com impacto direto em risco, prazo e custo. A literatura destaca que o controle do carregamento, da sequência de detonação e do confinamento é decisivo para minimizar danos ao contorno e reduzir retrabalhos [2].

Figura 1: Seção Teórica (esquerda) vs. Real (direita)



Fonte: o autor

Apesar da ampla adoção de soluções digitais, na prática de obra ainda predominam verificações geométricas baseadas em levantamentos discretos por estação total para subsidiar decisões de compatibilização, o que limita a densidade espacial de informação e eleva o esforço quando aplicado a extensões quilométricas, especialmente quando se busca justificar a instalação de equipamentos sensíveis ao

envelope disponível. Nesse contexto, persiste uma lacuna prática na obtenção de informações geométricas contínuas e verificáveis do as-built que suportem decisões de compatibilização com menor incerteza, particularmente quando alterações de projeto dependem de folgas distribuídas ao longo do túnel. Como alternativa, a integração entre escaneamento a laser terrestre e modelagem BIM (Building Information Modeling) se apoia no entendimento de que o BIM estrutura e coordena informações do ativo para apoiar verificações de compatibilidade e decisões de projeto e execução, conforme sistematizado por Eastman et al. [3]. Assim, este artigo apresenta e avalia um fluxo integrado de escaneamento a laser terrestre e BIM para validar a geometria executada do túnel e verificar a compatibilidade do envelope de instalação dos jatos ventiladores de 1600 mm com o gabarito dinâmico e as restrições de instalação, comparando o procedimento ao levantamento convencional adotado em campo e demonstrando como a sobreposição da nuvem de pontos a modelos paramétricos reduz incertezas na decisão de otimização da ventilação com base no executado. Na sequência, são descritos o contexto técnico, os procedimentos de levantamento e processamento, o fluxo de compatibilização no ambiente BIM e os resultados obtidos, seguidos de discussão, limitações e conclusões.

FUNDAMENTAÇÃO

BIM E GESTÃO DE TÚNEIS NATM

O NATM fundamenta-se no princípio de que o maciço rochoso atua como elemento estrutural portante, exigindo um ciclo construtivo rigoroso composto por escavação controlada, aplicação imediata de suporte primário e monitoramento contínuo das deformações [2]. Essa abordagem observacional permite ajustes progressivos nas soluções de contenção à medida que as condições geotécnicas se revelam ao longo do avanço da escavação. Embora tal flexibilidade represente uma vantagem operacional, ela também introduz elevada complexidade técnica e administrativa, especialmente no que se refere à gestão integrada das informações provenientes de diferentes disciplinas, como geotecnia, estruturas e sistemas eletromecânicos [2]. Nesse contexto, o BIM surge como suporte estratégico para a centralização e integração dessas informações em um ambiente digital colaborativo. No âmbito de túneis, frequentemente denominada Tunnel Information Modeling (TIM), a abordagem BIM permite consolidar dados geométricos, geotécnicos e temporais em um modelo tridimensional rico em metadados, favorecendo a detecção de conflitos, a otimização de recursos e a comunicação entre equipes multidisciplinares [4]. Por outro lado, estudos apontam que métodos tradicionais de levantamento geométrico, baseados na medição manual de seções discretas do túnel, constituem um procedimento demorado e suscetível a erros humanos, apresentando limitações quanto à eficiência e à precisão do controle do overbreak (sobre-escavações) e do underbreak (subescavações) [5]. Essa limitação reforça a necessidade de técnicas de captura da realidade com maior densidade e precisão espacial, como o Escaneamento a Laser Terrestre (Terrestrial Laser Scanning - TLS) [6].

PRINCÍPIOS DO LASER SCANNING

O TLS baseia-se na emissão de pulsos de laser que, ao atingirem superfícies, retornam ao sensor permitindo o cálculo das coordenadas espaciais de uma quantidade muito grande de pontos tridimensionais por segundo. O resultado desse processo bem realizado é uma nuvem de pontos capaz de representar com elevada fidelidade a geometria do ambiente escaneado, atingindo precisão de ordem milimétrica [6]. Diferentemente das estações totais, que registram apenas pontos discretos previamente definidos, o TLS possibilita uma análise contínua da superfície escavada, capturando irregularidades geométricas de forma abrangente [6]. A qualidade e a densidade da nuvem de pontos são influenciadas por parâmetros operacionais, como resolução angular, distância de medição e divergência do feixe de laser [7]. Estudos demonstram que essa técnica é especialmente eficaz na identificação de overbreak e underbreak, possibilitando análises volumétricas muito precisas e subsidiando com bastante segurança as decisões técnicas relacionadas ao consumo de concreto projetado, estabilidade do maciço e custos de execução [5][8].

FLUXO SCAN-TO-BIM E SCAN-VS-BIM

O processo denominado Scan-to-BIM consiste na conversão da nuvem de pontos em modelos paramétricos inteligentes. Inicialmente, as varreduras realizadas em diferentes posições devem ser registradas em um sistema único de coordenadas, utilizando algoritmos matemáticos como a Decomposição de Valor Singular (SVD) e o Iterative Closest Point (ICP) para alinhamento espacial [6]. Após o registro, a nuvem de pontos passa por etapas de filtragem, segmentação e interpretação geométrica, culminando na criação de um modelo BIM as-built. Complementarmente, o fluxo Scan-vs-BIM baseia-se na comparação direta entre a geometria real capturada pela nuvem de pontos e o modelo de projeto, permitindo a identificação imediata de desvios construtivos [8][9]. Essa abordagem possibilita a detecção precoce de inconsistências geométricas, fornecendo subsídios para ajustes no plano de fogo e nos ciclos de detonação em túneis NATM. Como consequência, observa-se a redução de desperdícios de material, retrabalhos e riscos associados a instabilidades estruturais [5][9].

VENTILAÇÃO DE TÚNEIS

A ventilação em túneis rodoviários constitui um sistema crítico de segurança, responsável pelo controle da qualidade do ar em operação normal e pela gestão de fumaça em situações de incêndio [10]. De acordo com diretrizes da Associação Mundial de Estradas (PIARC), os sistemas longitudinais com ventiladores de jato (jet fans) são amplamente empregados em túneis rodoviários, em função de sua simplicidade construtiva e eficiência operacional [11]. O posicionamento desses equipamentos deve respeitar rigorosamente o gabarito dinâmico, definido como um envelope tridimensional que considera oscilações do veículo, superelevação em curvas e tolerâncias geométricas inerentes à via [3][7]. No ambiente BIM, esse gabarito pode ser modelado como um volume de exclusão, assegurando que nenhum elemento do sistema de ventilação interfira na circulação segura dos veículos. Adicionalmente, a

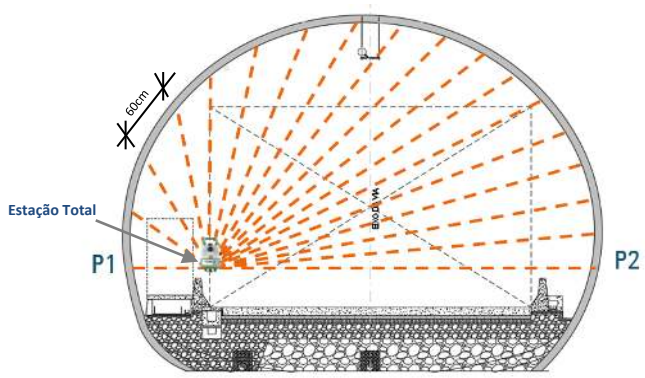
eficiência aerodinâmica dos ventiladores é fortemente influenciada pelo fator de instalação, também conhecido como coeficiente de Kempf. Esse parâmetro representa a fração do empuxo teórico efetivamente transferida à massa de ar do túnel, sendo diretamente afetado pela proximidade do equipamento ao teto e às paredes laterais [12][13]. Assim, a correta coordenação espacial entre estrutura e sistemas eletromecânicos, viabilizada pelo BIM, torna-se determinante para o desempenho global do sistema de ventilação.

COMPARATIVO DE MÉTODOS DE LEVANTAMENTO

TOPOGRÁFICO

O levantamento da seção real de escavação para a alocação dos jatos ventiladores estava inicialmente previsto para ser executado por equipe de topografia, com uso de estação total. O procedimento consistia em posicionar o equipamento em um ponto do túnel e realizar medições dentro do alcance definido, correspondente ao trecho entre os pontos 1 e 2, conforme ilustrado na Figura 2. Ao longo do desenvolvimento longitudinal, as seções seriam levantadas a cada 2 m, com leituras transversais a cada 0,60 m ao longo da seção do túnel. Para cada posicionamento da estação total, o tempo de leitura (montagem, orientação, visada e aquisição do conjunto de pontos necessários à seção) foi de aproximadamente 5 minutos, conforme verificado in-loco durante levantamentos similares. Os resultados do planejamento indicaram que esse método seria operacionalmente oneroso para cobertura de todo o complexo de túneis aplicável à instalação dos jatos (aproximadamente 12,2 km), pois demandaria 5 minutos para cada 2 m, totalizando cerca de 30.000 minutos (aproximadamente 500 horas) e, portanto, cerca de 64 dias de trabalho (considerando 8 horas diárias). Além do prazo elevado, a amostragem resultante com malha aproximada de 2,0 × 0,60 m implicaria baixa densidade de pontos para representação da geometria real. Diante deste cenário, verificou-se e optou-se pela aplicação de escaneamento a laser terrestre nos túneis, conforme detalhado a seguir.

Figura 2: Levantamento Topográfico



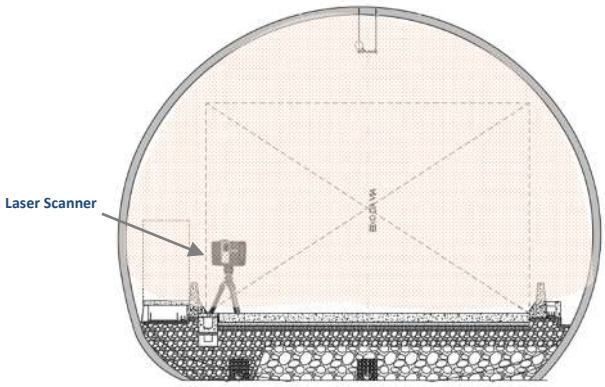
Fonte: o autor

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8272

ESCANEAMENTO A LASER

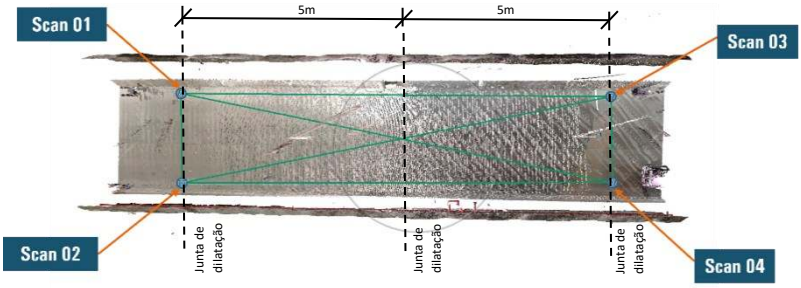
Para o levantamento dos túneis foi adquirido um Laser Scanner 3D terrestre Faro Focus Premium 150, com 150 m de alcance, taxa de aquisição de até 2 milhões de pontos/s e precisão de 1 mm. O equipamento foi configurado com perfil de resolução 1/4 e qualidade 3×, adotando-se distância entre posicionamentos de aproximadamente 10 m no sentido da via (figura 3). Como referência para o posicionamento na estaca definida, utilizou-se a junta de dilatação do pavimento rígido, conforme ilustrado na Figura 4. Foi realizado o planejamento do levantamento, prevendo-se a execução de 4 cenas (posicionamentos do equipamento) para cobrir 60 m de túnel, com tempo médio de 15 minutos por ciclo. Assim, o tempo estimado para o escaneamento dos 12 km foi de 3.050 minutos (aproximadamente 50,8 horas), o equivalente a 7 dias de trabalho (considerando 8 horas/dia pela equipe). Ou seja, além de obter um levantamento com maior precisão, observou-se também redução de aproximadamente 10 vezes no tempo necessário para o levantamento dos túneis, conforme apresentado no Quadro 1.

Figura 3: Escaneamento a Laser



Fonte: o autor

Figura 4: Plano de Varredura



Fonte: o autor

Quadro 1: Comparação entre métodos de levantamento

Indicador	Topografia (convencional)	Escaneamento a laser + BIM
Extensão coberta	≈ 12,2 km	≈ 12,2 km
Unidade de medição	Seção a cada 2 m; pontos a cada 0,60 m	4 cenas a cada 60 m
Tempo total (8 h/dia)	≈ 64 dias (≈ 512 h)	≈ 7 dias (≈ 50,8 h)

Precisão	Métrica (malha discreta)	Milimétrica (±1 mm; nuvem contínua)
Resultado para locação	Processo lento; maior incerteza	Validação ágil; base para compatibilização
Entregáveis	Plantas 2D e seções transversais (sujeito a interpolação)	Nuvem de pontos de alta fidelidade
Confiabilidade	Maior risco de omissão de detalhes	Alta fidelidade e base para compatibilização

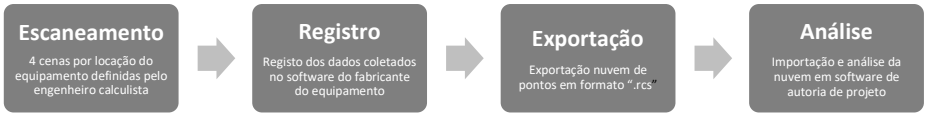
Fonte: o autor.

Para sustentar a comparação de desempenho de forma empírica, foram utilizados alvos (targets) preexistentes no túnel, já empregados rotineiramente pela produção e pela equipe de topografia no controle geométrico convencional. Esses alvos foram verificados por estação total e adotados como pontos de controle para a amarração/ajuste do registro do levantamento TLS e para o georreferenciamento da nuvem de pontos, assegurando que ambos os métodos estivessem referenciados ao mesmo sistema de controle do empreendimento. Por fim, foi implementado um procedimento de controle de viés e padronização da coleta, incluindo: verificação/calibração do equipamento conforme recomendações do fabricante; operador treinado e procedimento operacional único; registro das condições ambientais e operacionais (umidade, poeira, presença de água/aerossol e interferências); manutenção das configurações do scanner (resolução 1/4 e qualidade 3×) e do espaçamento entre cenas (~10 m). O procedimento foi aplicado em duas rodadas: na primeira, a nuvem de pontos foi utilizada para análise e definição da locação dos jatos ventiladores no ambiente BIM. Na segunda, após a instalação, realizou-se nova rodada de verificação no software para confirmar se os equipamentos foram instalados conforme as especificações e o posicionamento definido na etapa anterior, comparando-se à condição executada à solução revisada.

SCAN-TO-BIM

Com os registros obtidos por laser scanning e processados no software Faro SCENE para registro e consolidação das cenas, os dados foram exportados no formato ".RCS". O RCS (ReCap Scan) é um formato de arquivo utilizado para armazenar e indexar nuvens de pontos provenientes de varredura 3D, representando superfícies físicas em coordenadas tridimensionais e permitindo sua visualização e uso em ambientes de modelagem e coordenação digital (figura 5).

Figura 5: Fluxo de Trabalho

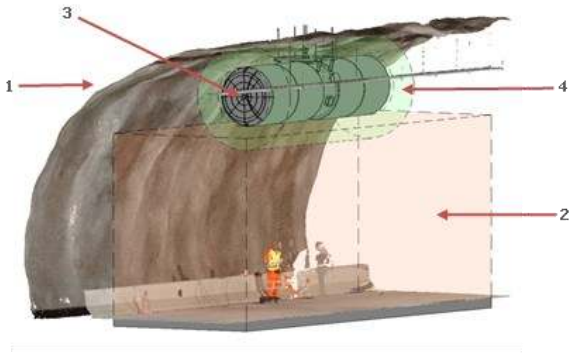


Fonte: o autor

Para uma análise completa e precisa, foram considerados os seguintes elementos apresentados na Figura 6**:**

1 Nuvem de pontos: Utilizada como base da análise do local de instalação do equipamento.
2 Gabarito Dinâmico (Laranja): Delimita a área de segurança necessária para a passagem dos veículos em movimento.
3 Jato Ventilador: Equipamento com diâmetro de 1600mm e seus elementos de fixação.
4 Fator de Instalação (verde): Parâmetro de eficiência da instalação baseado na memória de cálculo de ventilação.

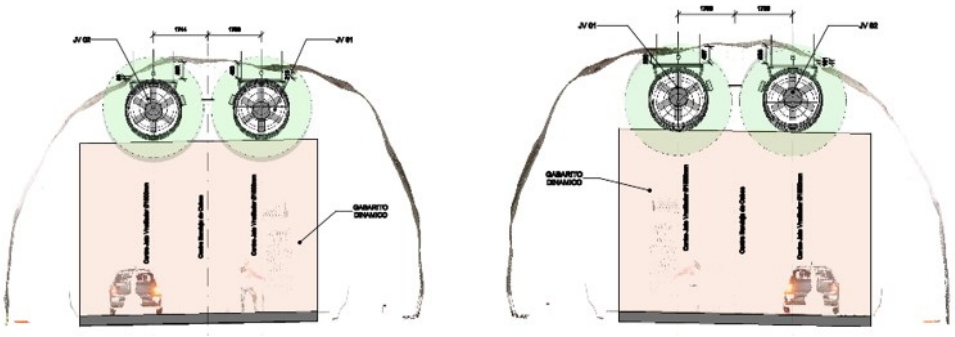
Figura 6: Coordenação espacial



Fonte: o autor

A verificação de interferências foi realizada de forma visual no software, por meio da geração de vistas e seções ortogonais nas posições de instalação (figura 7), com sobreposição entre a nuvem de pontos (condição existente), o gabarito dinâmico e o envelope do equipamento (incluindo o fator de instalação). Considerou-se “conflito” quando era observada qualquer interseção entre esses elementos na visualização. Quando identificado conflito, o jato ventilador era deslocado longitudinalmente, repetindo-se a verificação até que não houvesse interseção. Para cada posição analisada, registrou-se (i) a ocorrência inicial de conflito (sim/não) e (ii) a necessidade de ajuste de posicionamento para eliminação da interferência.

Figura 7: Seções ortogonais



Fonte: o autor

RESULTADOS

A aplicação do método Scan-to-BIM permitiu analisar 35 posições de instalação dos ventiladores no ambiente BIM, em tempo reduzido, substituindo um processo topográfico tradicional que demandaria múltiplos dias de trabalho. A verificação foi realizada por inspeção visual no software de autoria, com geração de seções ortogonais e sobreposição entre a nuvem de pontos, o gabarito dinâmico e o envelope de instalação do equipamento (incluindo o fator de instalação). Quando era identificada interferência entre a condição existente do túnel, o gabarito dinâmico e o envelope de instalação, o ventilador era deslocado para uma posição mais favorável, até eliminar a interseção, respeitando as restrições de projeto. Esse procedimento foi aplicado a todas as 35 posições, totalizando 70 equipamentos. Em todos os casos em que foi necessário reposicionamento, o deslocamento longitudinal requerido foi inferior a 5 m, resultando em posicionamentos compatíveis no modelo. A redução aproximada de 90% no tempo total de levantamento evidencia um ganho expressivo de produtividade quando comparado ao método convencional, corroborando achados de estudos internacionais sobre a aplicação de TLS em obras subterrâneas [8]. Além disso, a precisão milimétrica dos dados elevou significativamente a confiabilidade das decisões de projeto, permitindo a otimização do sistema de ventilação e a redução do número total de equipamentos necessários, impactando positivamente os custos de implantação (CAPEX) e operação (OPEX).

Outro aspecto relevante refere-se à segurança ocupacional. A diminuição do tempo de permanência das equipes no interior do túnel contribuiu para a redução da exposição a riscos associados a quedas de blocos, circulação de equipamentos pesados e atmosferas potencialmente contaminadas, alinhando-se à literatura que aponta o BIM como ferramenta estratégica para prevenção de riscos em ambientes de construção complexos [3][7]. Adicionalmente, a geração de um modelo BIM as-built criou uma base de dados confiável para futuras intervenções, manutenção e operação do ativo, ampliando os benefícios da metodologia ao longo do ciclo de vida do empreendimento. A integração do modelo com o cronograma 4D permitiu simular interferências entre frentes de obra, aumentando a previsibilidade do planejamento executivo. De forma geral, os resultados obtidos demonstram que a integração entre escaneamento a laser e BIM não apenas otimiza processos de compatibilização geométrica, mas também estabelece um novo patamar de tomada de decisão na engenharia subterrânea, aproximando o projeto da realidade construtiva e reduzindo incertezas inerentes às obras em NATM.

LIMITAÇÕES

Apesar dos benefícios observados com a aplicação do escaneamento a laser integrado ao BIM, a metodologia apresenta limitações técnicas e operacionais que devem ser consideradas. A primeira refere-se ao elevado custo inicial associado à aquisição de equipamentos de varredura, licenças de software e capacitação de equipes especializadas, o que pode inviabilizar sua adoção em empreendimentos de pequeno porte. Outro fator limitante relaciona-se às condições ambientais típicas de túneis

NATM. A presença de poeira em suspensão, umidade elevada e névoa proveniente do concreto projetado pode comprometer a qualidade dos dados capturados, gerando ruídos na nuvem de pontos e exigindo etapas adicionais de filtragem e pós-processamento [7][9].

Além disso, o grande volume de dados gerado demanda infraestrutura computacional robusta para armazenamento e processamento, impactando o tempo total de análise [14]. Adicionalmente, embora o tempo de campo seja significativamente reduzido, o processamento das nuvens pode consumir períodos consideráveis, especialmente quando não se dispõe de fluxos automatizados ou processamento em nuvem. Do ponto de vista analítico, a verificação de interferências no ambiente BIM foi realizada por inspeção visual, o que pode introduzir subjetividade e depender da experiência do operador. Por fim, destaca-se que a metodologia não elimina a necessidade de inspeções convencionais em campo, devendo ser compreendida como ferramenta complementar de alta precisão para suporte à tomada de decisão.

CONCLUSÃO

A implementação desse novo processo resultou em ganhos mensuráveis para o projeto. Em termos de produtividade, o planejamento do método convencional indicou aproximadamente 500 horas (≈64 dias) para cobrir a extensão aplicável (≈12,2 km), enquanto o escaneamento a laser terrestre apresentou tempo estimado de 3.050 minutos (≈50,8 horas; ≈7 dias), conforme Quadro 1. Do ponto de vista geométrico, a nuvem de pontos permitiu validar 35 posições de instalação, sem identificação de conflitos geométricos, apoiando a decisão de otimização do sistema de ventilação com equipamentos de maior diâmetro. Adicionalmente, a redução de horas-homem necessárias contribuiu para reduzir o tempo de exposição da equipe em ambiente de túnel durante a etapa de levantamento. Esses resultados corroboram, em um caso real de túnel rodoviário, a efetivação do potencial do BIM integrado ao levantamento as-built para apoiar decisões de compatibilização e instalação em projetos de infraestrutura com maior confiabilidade e menor esforço de campo. Como desdobramento direto deste estudo, a verificação as-built pós-instalação pode evoluir da inspeção visual para uma abordagem métrica e quantitativa, na qual o desvio entre a posição projetada e a executada de cada equipamento é medido a partir da nuvem de pontos, tratado estatisticamente em termos de desvios médios e dispersão e confrontado com critérios de tolerância previamente definidos. Essa quantificação permite não apenas atestar a conformidade da instalação, mas também identificar e documentar modos de falha de execução, como inversões de posicionamento decorrentes de interpretação equivocada do sentido da via que, dada a assimetria dos afastamentos em relação aos elementos da seção, podem gerar interferências com o contorno escavado. O registro sistemático desses casos e das respectivas soluções de projeto adotadas para reposicionamento consolida uma base de conhecimento útil à prevenção de retrabalhos em obras futuras. Em maior alcance, o fluxo Scan-vs-BIM pode ainda ser estendido ao controle de overbreak e underbreak durante a escavação

e à transferência do modelo as-built às fases de operação e manutenção, ampliando os benefícios da metodologia ao longo do ciclo de vida do ativo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fábio Figueiredo, responsável pelo contrato e patrocinador da iniciativa, pelo apoio e pela confiança no potencial do estudo. Agradecem também à EGTC Infra por viabilizar o desenvolvimento do estudo no contexto da obra, bem como às equipes de topografia e de montagem eletromecânica pelo suporte em campo e pelas contribuições técnicas.

REFERÊNCIAS

[1] Secretaria da Segurança Pública. Polícia Militar do Estado de São Paulo. Corpo de Bombeiros. **Instrução Técnica nº 35/2025: Túnel rodoviário**. São Paulo: Corpo de Bombeiros, 2025. Disponível em: https://guiasegci.com.br/wp-content/uploads/2025/03/IT-35-25-Tu%C2%B4nel-rodovia%C2%B4rio.pdf. Acesso em: 12 mar. 2026.

[2] NIEBLE, Carlos Manoel. **Desmontes cuidadosos com explosivos: aspectos de engenharia e ambientais.** São Paulo: Oficina de Textos, 2017.

[3] EASTMAN, C.; TEICHOLZ, P.; SACKS, R.; LISTON, K. **BIM Handbook: a guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors**. 2. ed. Nova Iorque: John Wiley & Sons, 2011.

[4] KOCH, Christian; VONTHRON, André; KÖNIG, Markus. **A tunnel information modelling framework to support management, simulations and visualisations in mechanised tunnelling projects.** Automation in Construction, [S. l.], v. 83, p. 78-90, nov. 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.07.006.

[5] PAN, Zhiyang; ZHANG, Yichong; LU, Yujie; TANG, Bing. **A Digital Twin-Driven Approach for Detecting Overbreak and Underbreak in Drill-and-Blast Tunnels**. EPiC Series in Computing, [S. l.], v. 82, p. 118-126. Disponível em: https://easychair.org/publications/paper/zfFW/open. Acesso em: 05 jan. 2026.

[6] PEJIĆ, Marko. **Design and optimisation of laser scanning for tunnels geometry inspection**. Tunnelling and Underground Space Technology, [S. l.], v. 37, p. 199-206, ago. 2013. DOI https://doi.org/10.1016/j.tust.2013.04.004.

[7] POINTSCAN. **Challenges in 3D Laser Scanning**. [S. l.]: PointSCAN, 2024. Disponível em: https://www.pointscan.co.uk/challenges-in-3d-laser-scanning/. Acesso em: 8 jan. 2026.

[8] KIM, Taewan; YOON, Youngjoon; LEE, Byeongdo; HAM, Namhyuk; KIM, Jae-Jun. **Cost–Benefit Analysis of Scan-vs-BIM-Based Quality Management.** Buildings, [S. l.], v. 12, n. 12, 2052, dez. 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/buildings12122052.

[9] DESIGNING BUILDINGS. **Scan to BIM Workflow and Deliverables: A Technical Guide.** [S. l.]: Designing Buildings, 2025. Disponível em: https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Scan_to_BIM_Workflow_and_Deliverables:_A_Technical_Guide. Acesso em: 12 jan. 2026.

[10] LIU, Zhuo; GU, Xin; HONG, Rui. **Fire protection and evacuation analysis in underground interchange tunnels by integrating BIM and numerical**

simulation. Fire, [s. l.], v. 6, n. 4, p. 139, abr. 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/fire6040139.

[11] PIARC - World Road Association. **Tunnel ventilation system**. In: PIARC. **Road Tunnels Manual**. [S. l.], 2024. Disponível em: https://tunnelsmanual.piarc.org/en/equipment-systems-general-support/tunnel-ventilation-system. Acesso em: 12 jan. 2026.

[12] SODECA. **Sistemas de ventilação para túneis**: CT 28. [S. l.]: Sodeca, [2022]. Disponível em: https://www.sodeca.com/files/catalogs/pt/SODECA_CT28_SISTEMAS_DE_VENTILACAO_PARA_TUNEIS_PT.pdf. Acesso em: 12 jan. 2026.

[13] BEYER, M.; STURM, P. J.; SAURWEIN, M.; BACHER, M. **Evaluation of Jet Fan Performance in Tunnels**. In: 8TH INTERNATIONAL CONFERENCE 'TUNNEL SAFETY AND VENTILATION', 2016, Graz. Anais... Graz: Graz University of Technology, 2016.

[14] TECHNOSTRUCT. **3D Laser Scanning in Construction: Benefits and Challenges.** Redwood City: TechnoStruct, 22 jan. 2025. Disponível em: https://www.technostruct.com/blog/2025/01/22/3d-laser-scanning-in-construction/. Acesso em: 12 jan. 2026.