Industrialização, Digitalização, Desempenho

5º Simpósio Brasileiro de Tecnologia da Informação e Comunicação na Construção e 5º Workshop de Tecnologia de Processos e Sistemas Construtivos

FLORIANÓPOLIS-SC | 20 a 22 de agosto

[1]MODELAGEM DE SPACEPROOFINGS PARA EFICIÊNCIA ESPACIAL NA COORDENAÇÃO BIM NO CONTEXTO DA CONSTRUÇÃO 4.0

Spaceproofing modeling for spatial efficiency in BIM coordination in the context of construction 4.0

Bruna Bezerra Vieira
Acciona Construcción Brasil | São Paulo, São Paulo | bbezerravieira@acciona.com

Pedro Rey Antón
Acciona Construcción Brasil | São Paulo, São Paulo | pedro.rey.anton@acciona.com

Abighail do Nascimento
Acciona Construcción Brasil | São Paulo, São Paulo | anascimentosantos@acciona.com

Isabela Marques de Lima
Acciona Construcción Brasil | São Paulo, São Paulo | imarqueslima@acciona.com

Mayara Palladino de Paula
Acciona Construcción Brasil | São Paulo, São Paulo | mpalladinopaula@acciona.com

Alessandra Barbetta
Acciona Construcción Brasil | São Paulo, São Paulo | abarbettalima@acciona.com

Bruna Gonçalves
Acciona Construcción Brasil | São Paulo, São Paulo | bgoncalvessilva@acciona.com

RESUMO

O artigo explora a construção da Linha 6 do Metrô de São Paulo, destacando os desafios impostos pela construção em um ambiente urbano denso. O objetivo é apresentar como a integração entre metodologias de construção e avanços tecnológicos pode otimizar os espaços, a eficiência energética, garantindo segurança e o conforto dos usuários. Utilizando a metodologia *Fast-Track* e técnicas de indústria da construção 4.0, incluindo BIM, potencializado com a modelagem das *spacesproofings*, o projeto foi capaz de avançar com a simultaneidade de *design* e construção, permitindo uma execução eficiente enquanto atende às rigorosas demandas arquitetônicas, estruturais, energéticas e sustentáveis. Os resultados mostraram que a utilização dessas tecnologias foi imprescindível para superar as limitações geotécnicas e urbanísticas com a estação Itaberaba-Hospital Vila Penteado, emergindo como um marco de inovação tecnológica e de profundidade. Este estudo demonstra como a integração de tecnologias digitais e práticas construtivas inovadoras pode resolver complexidades de engenharia em projetos de grande escala, servindo de referência para futuras construções metroviárias em grandes metrópoles. A colaboração entre fornecedores e equipes de projeto desde o início garantiu a precisão e a adequação dos sistemas, enfatizando a importância de um planejamento detalhado e a integração eficaz entre disciplinas.

Palavras-chave: BIM; Sistema Ventilação; Verificação de espaço; Metrô; Construção 4.0;

ABSTRACT

The article explores the construction of São Paulo Metro Line 6, highlighting the challenges posed by the dense urban environment construction. It aims to demonstrate how the integration of construction methodologies and technological advancements can optimize space utilization and energy efficiency while ensuring user safety and comfort. By employing the Fast-Track methodology and Construction Industry 4.0 techniques, including BIM enhanced with Space Proofing modeling, the project advanced with the simultaneous execution of design and construction. This approach enables an efficient implementation while meeting stringent architectural, structural, and sustainability requirements. The results indicate that these technologies were essential in overcoming geotechnical and urban constraints, with the Itaberaba-Hospital Vila Penteado Station emerging as a benchmark in technological innovation and deep excavation. This study illustrates how the integration of digital technologies and innovative construction practices can address engineering complexities in large-scale projects, serving as a reference for future metro system developments in major metropolitan areas. Early collaboration between suppliers and project teams ensured system accuracy and suitability, underscoring the importance of detailed planning and effective interdisciplinary integration.

Keywords: BIM; *Ventilation System*; *Spaceproofing*; *Metro*; *Construction 4.0*;

[1]VIEIRA, B. B.; ANTON, P. R; NASCIMENTO, A.; LIMA, I. M.; PAULA, M. P.; BARBETTA, A.; GONCALVES, B. Modelagem de Spaceproofings para Eficiência Espacial na Coordenação BIM no Contexto da Construção 4.0. In: 5º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO, 4., 2025, Florianópolis. **Anais [...].** Porto Alegre: ANTAC, 2025.

1 INTRODUÇÃO

A construção da Linha 6 do Metrô de São Paulo, situada na região metropolitana da cidade, é um dos projetos metroviários mais complexos em desenvolvimento no cenário global. O empreendimento abrange a execução simultânea de 15 estações subterrâneas, 15,3 km de túneis, 15 km de via operacional, além de um pátio para manutenção e operação dos trens. O projeto também inclui dois estacionamentos operacionais e duas subestações responsáveis pelo fornecimento de energia para a linha (Antón et al., 2022).

A Linha 6 Laranja está sendo desenvolvida por meio de uma parceria público-privada (PPP) e no modelo *Design, Build & Operate* (DBO), o que permitiu reformulação dos processos arquitetônicos, geotécnicos e estruturais. Esse modelo contratual garante o atendimento aos requisitos funcionais e ao nível de serviço na fase operacional, ao mesmo tempo em que possibilita a implementação de melhorias durante a construção. Para viabilizar essa abordagem, adotou-se a metodologia *fast-track*, que permite a execução simultânea dos projetos e das obras (Antón et al., 2024). Além disso, a aplicação dos princípios da construção 4.0 impulsionou a adoção de tecnologias para otimizar cada etapa do processo (Cavalcante; Corrêa, 2021). Nesse contexto, o uso do BIM (*Building Information Modeling*) tornou-se essencial para centralizar informações e agilizar a tomada de decisões, garantindo maior eficiência e integração entre as disciplinas envolvidas.

O desenvolvimento e a execução de um projeto metroviário apresentam desafios significativos de coordenação multidisciplinar, acentuados pela distribuição global de projetistas e subcontratados. Na Linha 6, esses desafios são ainda mais intensificados pela construção simultânea de diversas frentes de trabalho, especialmente devido à inserção da obra em áreas densamente urbanizadas. Isso exigiu a implantação das estações em espaços reduzidos e a grandes profundidades, alinhando-se às demandas operacionais da linha (Antón et al., 2024). Diante dessas restrições, estudos avançados de otimização espacial foram fundamentais para a integração eficiente entre arquitetura e sistemas metroferroviários.

Um exemplo desses estudos foi o projeto de ventilação, essencial para a manutenção da qualidade ambiental interna dessas infraestruturas. Esse sistema oferece tanto benefícios quanto desafios: enquanto garante conforto térmico e qualidade do ar, também pode favorecer a propagação de poluentes e ruídos contínuos, além de impactar a eficiência energética da infraestrutura (Wen et al., 2020). Para atender a essas necessidades, foram utilizados *softwares* de modelagem BIM para a análise e definição prévia dos espaços de ventilação, conhecidas como *spaceproofings* (definições espaciais).

Portanto, este estudo contribui para a literatura técnica/científica o demonstrar como a modelagem dos *spaceproofings* pode otimizar a coordenação entre disciplinas em projetos metroviários de grande escala. Embora o uso do BIM na infraestrutura de transportes seja amplamente discutido, a aplicação específica desses espaços pré-definidos ainda carece de documentação acadêmica detalhada. O artigo propõe uma abordagem metodológica estruturada para sua implementação, destacando os benefícios em termos de eficiência espacial, redução de conflitos de projeto e melhoria na coordenação, além de integrar os fornecedores ao processo. Dessa forma, este trabalho não apenas preenche uma lacuna na pesquisa sobre Construção 4.0, mas também oferece um modelo replicável para futuras aplicações em projetos similares.

2 METODOLOGIA

Este artigo tem como objetivo apresentar um estudo de caso de natureza descritiva sobre a implantação da metodologia BIM (*Building Information Modeling*) na Linha 6 do Metrô de São Paulo. As informações analisadas foram extraídas dos processos de trabalho e dos resultados positivos observados na obra, atribuídos ao uso eficaz do BIM na coordenação entre as diferentes disciplinas.

O desenvolvimento do trabalho teve início a partir dos *inputs* fornecidos pelas disciplinas de sistemas, o que possibilitou a criação e o aprimoramento dos modelos BIM utilizados ao longo de quatro anos de obra. Foram observados os processos de trabalho, as etapas de fabricação dos sistemas de ventilação e os níveis de detalhamento (LOD) aplicados nos modelos. Além disso, foram coletados indicadores de desempenho relacionados à coordenação e à execução.

A abordagem metodológica foi estruturada em três fases principais: (i) modelagem dos inputs iniciais (arquitetura e estrutura), (ii) avaliação da modelagem dos *spaceproofings* quanto à viabilidade de instalação e manutenção, e (iii) compatibilização final com os dados dos fornecedores e preparação para a pré-fabricação.

Essa abordagem permitiu documentar com precisão os ganhos obtidos na compatibilização entre disciplinas, contribuindo para a melhoria de processos em obras de infraestrutura complexas.

3 ESTRATÉGIA DE GESTÃO DA TRANSFORMAÇÃO DIGITAL DA LINHA 6

O projeto da Linha 6 do Metrô adota a metodologia *fast-track* devido ao seu cronograma restrito e à alta complexidade da obra. Para viabilizar essa abordagem, foi essencial otimizar as etapas construtivas e definir com precisão os limites de construção, exigindo coordenação e comunicação eficientes entre todos os envolvidos. Essa sincronia foi fundamental para acelerar o cronograma. Além disso, o edital do metrô já previa requisitos mínimos sobre o uso do BIM; no entanto, estes requisitos menores foram desenvolvidos a um nível muito elevado na implementação da metodologia no projeto como se explica a seguir, reforçando a necessidade de integrar os mundos físico e digital no projeto.

A Construção 4.0, adaptação da Indústria 4.0 ao setor, é caracterizada pela integração entre ambientes físico e digital, impulsionada por uma comunicação eficaz (Folador e Haito, 2023; Zimmermann; Oviedo-Haito, 2022). Nesse contexto, o BIM desempenha um papel central, atuando como um preditor de potenciais erros executivos e operacionais.

Na Linha 6 do Metrô, o BIM se destaca pela eficácia dos processos e pelo uso intensivo de dados. Os modelos BIM antecipam necessidades, enquanto tecnologias de verificação de dados demonstram como as ferramentas digitais podem potencializar a eficiência em projetos de alta complexidade. Além disso, o uso de tecnologias avançadas, como *laser scanning* e o Ambiente Comum de Dados (CDE), aliado ao BIM como processo de trabalho, possibilitou a criação de uma réplica digital. Essa réplica, enriquecida com parâmetros técnicos, gera informações aprimoradas que elevam a qualidade do projeto e permitem análises precisas para atender às demandas específicas de desenvolvimento, planejamento, logística e operação de equipamentos essenciais, como o sistema de ventilação das estações.

4 COMPLEXIDADE DO SISTEMA DE VENTILAÇÃO EM ESTAÇÕES DE METRÔ

O controle da circulação de ar em edifícios públicos movimentados, como estações de metrô é fundamental para reduzir o acúmulo de calor e umidade, prevenindo a proliferação de microrganismos e a deterioração da qualidade do ar. Para isso, utilizam-se sistemas mecânicos de ventilação que regulam os fluxos de ar e minimizam os riscos à saúde dos usuários e da equipe operacional (Kim et al., 2015; Liu et al., 2017). Esses sistemas também precisam conter poluentes gerados pelo próprio sistema metroviário, como o material particulado proveniente do desgaste de trilhos e freios (Wen et al., 2020), garantindo a renovação do ar e a dissipação do calor gerado pelos trens.

O planejamento dos sistemas de ventilação em uma estação de metrô exige uma abordagem integrada e multidisciplinar, que considere aspectos de infraestrutura, operação e manutenção. A implementação de sistemas como ventilação primária e pressurização de escadas demanda um dimensionamento preciso e uma compatibilização rigorosa com os projetos arquitetônicos e estruturais, assegurando funcionalidade, segurança e eficiência ao longo do ciclo de vida da estação.

Além disso, os estudos devem antecipar possíveis impactos futuros na execução do projeto e facilitar a gestão do ativo após a entrega. A instalação dos sistemas de ventilação requer um planejamento cuidadoso para evitar interferências entre disciplinas e garantir acessibilidade para futuras manutenções. Questões logísticas, como transporte e manuseio de equipamentos, devem ser planejadas com antecedência para mitigar riscos de atrasos e assegurar que a execução esteja dentro do cronograma estabelecido.

A instalação de equipamentos pesados, como ventiladores axiais, centrífugos e sistemas de exaustão, demanda estudos detalhados sobre logística, acessibilidade e restrições estruturais, a fim de garantir eficiência operacional e minimizar impactos na infraestrutura existente. A operação integrada desses sistemas exige monitoramento contínuo, automação de processos e mecanismos eficazes de resposta a emergências. A confiabilidade operacional depende da colaboração entre os subsistemas, assegurando a continuidade do serviço metroviário mesmo em condições adversas.

Para sua manutenção, a previsão de espaços técnicos bem dimensionados e corredores de serviço estrategicamente posicionados facilita o acesso aos equipamentos, reduzindo o tempo de inatividade e os custos operacionais. Essas soluções também favorecem inspeções periódicas e manutenções preventivas e corretivas, contribuindo para a eficiência e prolongando a vida útil dos equipamentos.

4.1 SISTEMA DE VENTILAÇÃO NA LINHA 6

Na Linha 6-Laranja, o sistema de ventilação principal deve assegurar a remoção do calor dissipado por diversas fontes, como os trens e o ar nos ambientes subterrâneos. Em emergências, como incêndios ou outros acidentes, é essencial que o sistema direcione e remova calor, fumaça e outros poluentes, mantendo a velocidade do ar nos túneis dentro dos parâmetros adequados. Além disso, a mitigação dos efeitos de pressão gerados pela movimentação dos trens é fundamental para garantir o conforto e a segurança dos usuários e da equipe operacional (São Paulo, 2013).

Para atender a essas necessidades, deve ser implementado um sistema mecanizado de exaustão e insuflação em todas as estações, com exaustão sob as plataformas e insuflação no nível das plataformas. O sistema conta com ventiladores axiais e centrífugos de grande porte, operando em diferentes vazões para atender tanto às condições normais quanto a cenários de emergência (São Paulo, 2013). Sensores de temperatura e detectores de fumaça permitem o acionamento automatizado desses equipamentos, garantindo uma resposta rápida e eficiente em situações críticas, como incêndios, manutenções ou treinamentos operacionais.

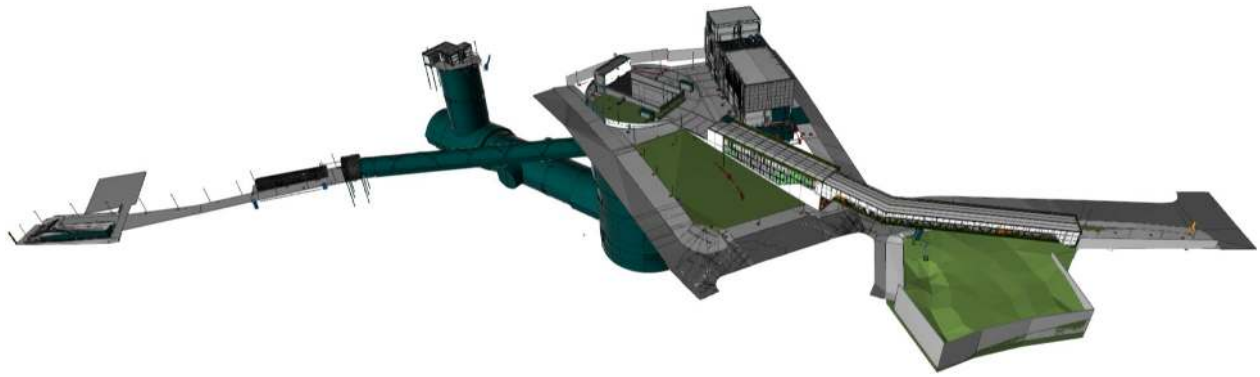
Diante desses desafios, a equipe de sistemas e os fornecedores desempenharam um papel estratégico no planejamento do projeto, garantindo que ele reflita as condições operacionais necessárias para as estações, impactando diretamente sua dinâmica funcional e eficiência ao longo do ciclo de vida do empreendimento.

Um exemplo prático dessa abordagem é a estação Itaberaba-Hospital Vila Penteado, integrada na obra da Linha 6-Laranja. Nesta estação, a integração entre o projeto arquitetônico, estrutural e os sistemas de ventilação permitiu uma solução adaptada às exigências específicas do local, garantindo não apenas o conforto e a segurança dos usuários, mas também a facilidade de manutenção e a eficácia do controle ambiental.

4.2 ESTAÇÃO ITABERABA-HOSPITAL VILA PENTEADO

A Estação Itaberaba-Hospital Vila Penteado, localizada na região norte de São Paulo, no distrito da Brasilândia, bairro Vila Itaberaba, é a mais profunda da América Latina, atingindo 66 metros de profundidade. Seu posicionamento estratégico busca atender duas importantes demandas da região: o Hospital Vila Penteado, um dos principais polos de locomoção na área, e a Avenida Itaberaba, um eixo comercial tradicional que se inicia no centro histórico da Freguesia do Ó e se estende até o bairro.; e o terceiro, na Avenida Ministro Petrônio Portela, situado em um nível inferior, que será construído em túnel e se conectará lateralmente ao poço principal, no terceiro nível do subsolo (Figura 1).

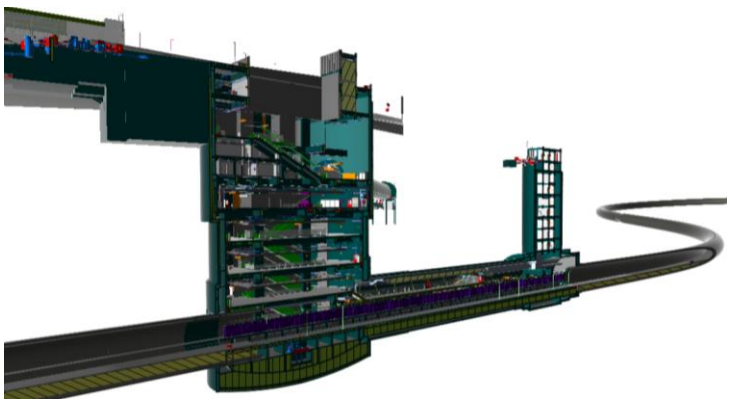
Figura 1: Itaberaba-Hospital Vila Penteado.



Fonte: Autor.

Devido à variação dos tipos de solo ao longo de toda a estação, a construção está sendo realizada por meio da metodologia NATM (*New Austrian Tunneling Method*), ideal para escavações em maciços rochosos, garantindo maior eficiência e segurança no processo de escavação. Em função da complexidade da geologia do local e das exigências construtivas, a estação foi projetada com dois poços, diferenciando-se dos projetos convencionais que normalmente adotam apenas um poço central com uma caverna no nível da plataforma. O poço principal, com aproximadamente 40 metros de diâmetro, será a entrada principal da estação e destinado ao fluxo de passageiros. Este poço compreenderá um trajeto de nove pavimentos, com a linha de bloqueios no quinto pavimento, correspondente ao quarto nível do subsolo. O segundo poço, com cerca de 15 metros de diâmetro, será dedicado exclusivamente à ventilação e passagem de cabos, sem acesso público (Figura 2).

Figura 2: Corte da Estação Itaberaba-Hospital Vila Penteado.



Fonte: Autor.

4.3 SISTEMA DE VENTILAÇÃO PRINCIPAL DA ESTAÇÃO

Como mencionado anteriormente, a Estação Itaberaba-Hospital Vila Penteado foi projetada com dois poços devido à complexidade geológica do local e às exigências normativas e operacionais. Essas condições impactaram diretamente o projeto, levando à reavaliação da configuração da estação, uma vez que o poço principal não comportaria os quatro canais de ventilação inicialmente planejados. Diante desse cenário, foi necessário redistribuir os canais, alocando dois no poço principal e os outros dois no poço secundário. Essa redistribuição teve um impacto significativo, especialmente no poço secundário, que precisou ser dimensionado com o menor diâmetro possível devido às restrições de espaço no terreno, garantindo, ao mesmo tempo, a viabilidade da instalação e a manutenção dos equipamentos.

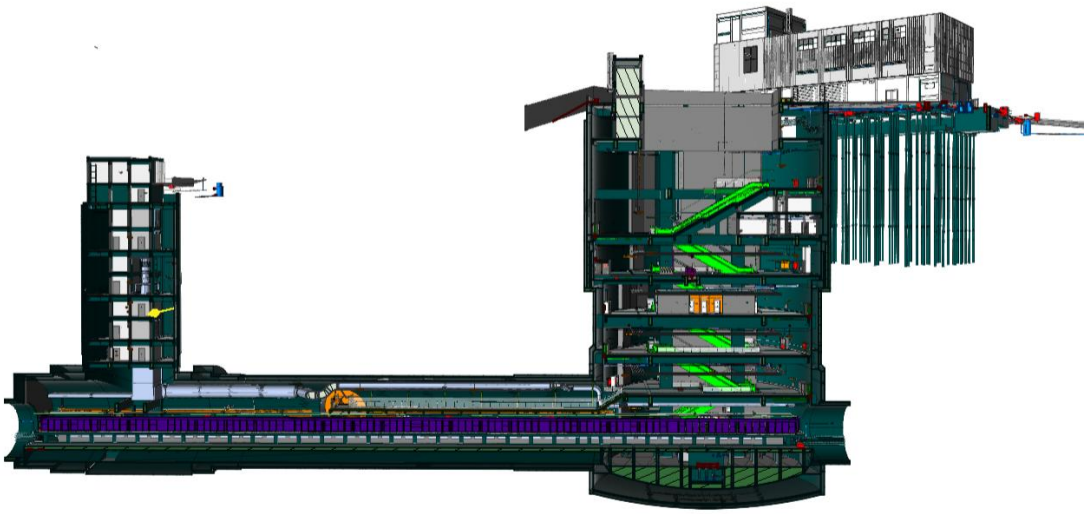
Na distribuição do sistema principal, definiu-se que, no poço principal, será implementado um sistema mecanizado de exaustão, enquanto, no poço secundário, será instalado o sistema de insuflação. A exaustão ocorrerá sob as plataformas, e a insuflação será realizada no nível das plataformas (Figura 3 e 4).

Figura 3: Planta da Estação Itaberaba-Hospital Vila Penteado.



Fonte: Autor.

Figura 4: Corte da Estação Itaberaba-Hospital Vila Penteado.



Fonte: Autor.

Essa demanda exigiu uma colaboração intensa entre todas as partes envolvidas, com contribuições fundamentais da equipe de sistemas de ventilação para a definição precisa de seus requisitos. Dessa forma, tornou-se necessário desenvolver estratégias de modelagem que apoiassem efetivamente o processo de coordenação. Essas estratégias abrangeram não apenas o planejamento dos espaços destinados à instalação e operação dos equipamentos, mas também a consideração das folgas necessárias para a montagem, manutenção e integração adequada dos componentes.

Essa estratégia de modelagem para a criação de modelos BIM autorais e sua visualização integrada com outras disciplinas em um CDE possibilitaram o desenvolvimento de soluções avançadas para esclarecer, precisamente as necessidades do sistema de ventilação principal, trazendo ganhos significativos para a Linha 6-Laranja.

4.4 PROCESSO DE COORDENAÇÃO (SISTEMAS & FORNECEDORES)

Durante as etapas iniciais do projeto, a equipe de arquitetura identificou dificuldades em atender à área mínima exigida pelo edital, enquanto a equipe interna enfrentava desafios na análise detalhada dos canais de ventilação e dos dutos de pressurização. Essa verificação era essencial para garantir a conformidade com os requisitos mínimos estabelecidos, pelo Edital, para a ventilação principal e a pressurização das escadas da estação.

Diante dessa complexidade, tornou-se necessário iniciar o processo de coordenação entre sistemas e fornecedores na Estação Itaberaba, que, conforme mencionado anteriormente, apresentava espaços reduzidos para atender às necessidades específicas. Por essa razão, foi escolhida como a primeira a passar por esse processo. Essa coordenação exigia uma comunicação estruturada para garantir a troca eficiente de informações técnicas e a definição clara das interfaces entre disciplinas, possibilitando a revisão e a adequação dos espaços projetados. Como resposta a esse desafio, propôs-se à equipe responsável pela disciplina de ventilação principal a adoção da estratégia de *spaceproofing*. Essa abordagem consiste na modelagem tridimensional dos espaços destinados a necessidades específicas, permitindo a validação espacial dos dutos, canais de ventilação e pressurização (*Australian Tunnelling Society*, 2022).

O processo teve início com a definição dos espaços iniciais para os sistemas de ventilação pela equipe de arquitetura e estrutura. A partir dessa definição, a equipe de sistemas utilizou os espaços como base para desenvolver a modelagem dos *spaceproofings*. Esta modelagem foi essencial para verificar se o sistema de ventilação atenderia às exigências do edital e às normativas pertinentes, incluindo potência, dimensões dos ventiladores e outros parâmetros técnicos. Detalhes adicionais sobre esses modelos serão apresentados no capítulo seguinte, intitulado "Estratégia de modelagem dos *spaceproofing*". Durante esse processo, também

ocorreu a revisão das áreas de arquitetura e estrutura, a fim de garantir que o produto estivesse adequado para avançar às etapas subsequentes.

Após essa etapa concluída, as informações eram encaminhadas ao fornecedor, responsável pelo detalhamento dos equipamentos. O fornecedor refinava os dados disponibilizados, gerando um elemento de modelagem inteligente preciso dos equipamentos e encaminhando esse modelo detalhado ao projetista de sistemas para que ele incorporasse essas informações em seu modelo. Dessa forma, o projetista colaborava diretamente no processo de coordenação junto ao cliente, analisando tecnicamente as inconsistências e fornecendo uma análise crítica das informações geradas pelo fornecedor. O cliente, por sua vez, realizava o alinhamento entre todas as partes envolvidas no processo (Figura 5).

Figura 5: Evolução dos modelos.



Fonte: Autor.

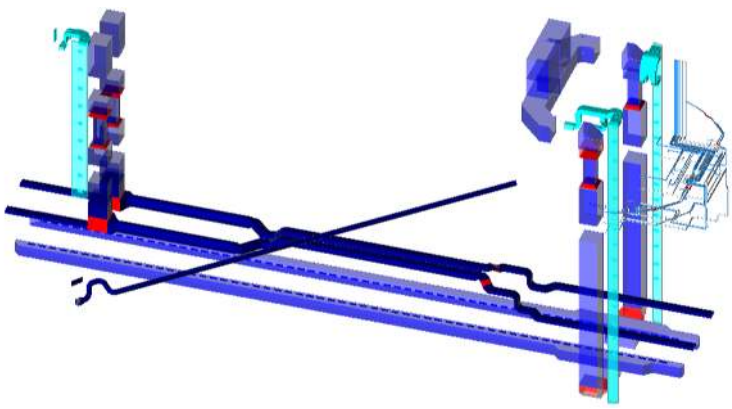
4.5 ESTRATÉGIA DE MODELAGEM DOS *SPACEPROOFINGS*

Após a concepção dos *spaceproofings* no modelo, identificou-se a oportunidade de ampliar ainda mais os benefícios dessa abordagem, uma vez que a representação visual aprimorada potencializou a análise técnica. Com isso, novas estratégias foram desenvolvidas para otimizar a coordenação interdisciplinar e facilitar as verificações de compatibilidade.

Dentre as principais estratégias adotadas, destacam-se três propostas. A primeira consistiu na aplicação de transparência e cores distintas para os sistemas quem compõem a ventilação principal, diferenciando os sistemas de exaustão, insuflação e pressurizações de escadas. A segunda proposta envolveu a sinalização, em vermelho, das áreas onde os requisitos do edital não eram atendidos, permitindo a identificação imediata de inadequações no dimensionamento dos equipamentos, dificuldades de instalação ou restrições de manutenção. A terceira proposta incorporou a representação precisa das posições e dimensões das venezianas (Figura 6), assegurando sua correta disposição no projeto.

A análise dos pontos de estrangulamento foi fundamental para garantir o desempenho do sistema, pois influencia diretamente a velocidade e o volume do fluxo de ar. Esses parâmetros são determinantes na seleção dos equipamentos de ventilação, exigindo cálculos rigorosos de vazão, perda de carga e eficiência aerodinâmica. Esse processo assegura um dimensionamento preciso, maior eficiência energética, conforto térmico e segurança operacional.

Figura 6: Aplicações dos *spaceproofings* nos modelos BIM.



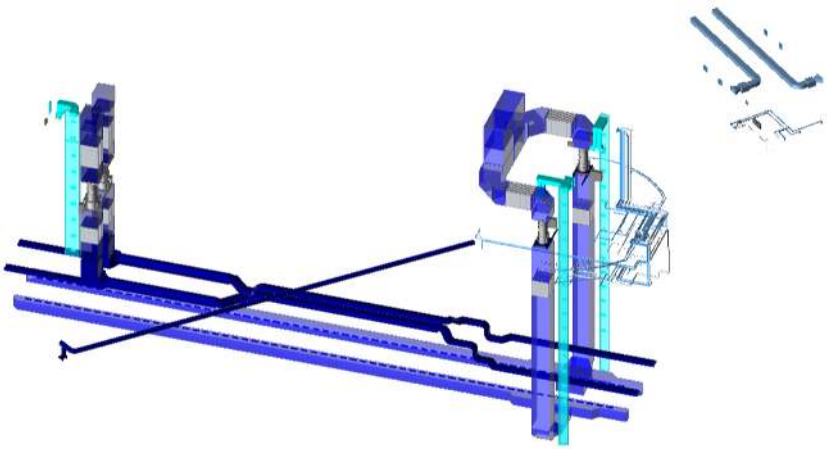
Fonte: Autor.

O modelo foi continuamente aprimorado com a inserção dos equipamentos, ajustando-os às posições e dimensões reais, incluindo atenuadores acústicos (dispositivos de alvenaria para redução de ruídos). Esse refinamento permitiu um planejamento mais preciso da fixação desses elementos na estrutura, assegurando maior precisão na execução do projeto.

Além disso, os espaços inicialmente definidos foram revisados e ajustados com base em dados técnicos mais detalhados, garantindo maior precisão no processo de fabricação e total conformidade com as exigências do projeto. Essa abordagem possibilitou a validação espacial dos equipamentos e infraestruturas, antecipando interferências, otimizando a disposição dos elementos e garantindo a viabilidade técnica e operacional do empreendimento.

Com essa definição clara das interfaces entre disciplinas e a revisão criteriosa dos espaços projetados reduziram significativamente a necessidade de retrabalho. Como resultado, o projeto alcançou um nível elevado de compatibilização, garantindo funcionalidade, eficiência e total aderência às demandas operacionais e estruturais da estação (Figura 7).

Figura 7: Aplicações dos *spaceproofings* nos modelos BIM.



Fonte: Autor.

4.6 MODELAGEM DE PRÉ-FABRICAÇÃO

A pré-construção digital assegura a coordenação entre disciplinas antes da fabricação, garantindo conformidade com as especificações. Ela oferece informações cruciais para uma execução eficiente, rápida e sustentável, conforme os requisitos do projeto da Estação (Antón et al., 2024; Estman et al., 2014), alinhando-se aos princípios da construção 4.0. O resultado disso foi o desenvolvimento de elementos de modelagem inteligente, criados para atender não apenas à pré-fabricação, mas também a todos os outros usos que terão na operação futura (Figura 8).

Figura 8: Representação do elemento BIM do fornecedor e seu nível necessário de informação.



Fonte: Autor.

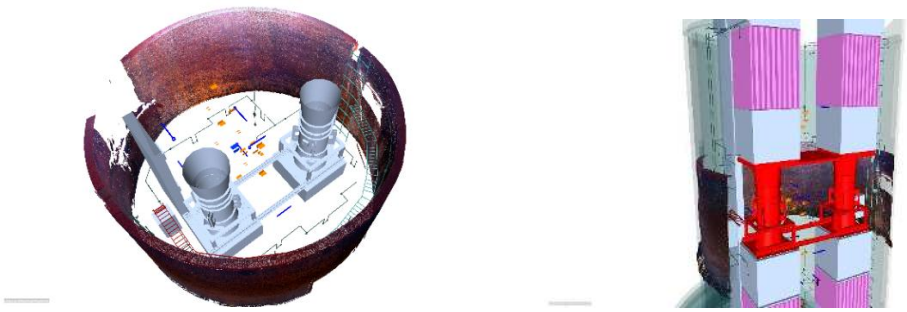
Em obras subterrâneas, as margens para mudanças durante a construção são quase inexistentes. Por isso, é essencial mapear o que foi construído e integrar essas informações aos projetistas, evitando divergências que não podem ser resolvidas posteriormente (Antón et al., 2024).

O exemplo da estação Itaberaba-Hospital Vila Penteado, onde o poço secundário tinha um diâmetro reduzido, suficiente apenas para a manutenção, demonstra uma solução eficiente para a otimização do espaço. Como os dois ventiladores cabiam no local, mas havia restrições para a área de manutenção, a solução adotada foi a divisão do mesmo espaço de manutenção. Essa estratégia permitiu otimizar o espaço sem causar impacto no cronograma da obra, mostrando como identificar retrabalhos potenciais evita interrupções no planejamento e no desenvolvimento.

Essa análise foi viabilizada graças à integração das nuvens de pontos, combinada ao modelo de *spaceproofing* e aos elementos modelados pelos fabricantes, permitindo uma abordagem mais precisa e fundamentada na tomada de decisões. Além disso, a compreensão detalhada do projeto resultou em melhorias tanto no seu funcionamento quanto na sua viabilidade construtiva.

A obtenção de imagens do andamento da obra, combinadas com os modelos de projeto e os modelos de *spaceproofing*, facilita a comunicação e a resolução de problemas. Portanto, a retroalimentação contínua entre o projeto e a obra assegura uma coordenação eficaz, proporcionando uma visualização precisa do *as-built* à medida que o projeto avança (Figura 9).

Figura 9: Representação do elemento BIM do fornecedor e seu nível necessário de informação.



Fonte: Autor.

5 RESULTADOS

Esse processo resultou em três fases de coordenação bem definidas: a fase inicial, dedicada à modelagem dos inputs iniciais, que incluem os modelos da arquitetura e da estrutura, permitindo a análise da capacidade espacial e a identificação de possíveis restrições no projeto; a fase intermediária, focada na avaliação da modelagem dos *spaceproofings* e no impacto dos equipamentos, garantindo que sua instalação, manutenção e eventual substituição fossem viáveis dentro das limitações do espaço disponível; e, por fim, a fase avançada de pré-fabricação, onde os inputs dos fornecedores consistiram na revalidação e compatibilização das informações, assegurando que as soluções adotadas estivessem alinhadas com os requisitos técnicos e operacionais.

Devido à eficácia desse processo, implementado inicialmente na Estação Itaberaba-Hospital Vila Penteado, foi possível replicá-lo nas demais estações, bem como nos poços de ventilação e nas saídas de emergência. Além disso, isso permitiu compreender e definir o nível necessário de informação (*Level of Information Need* – LoIN) para apoiar a tomada de decisão no gerenciamento de informações por meio do BIM. Esse entendimento possibilitou estabelecer com precisão quais informações devem ser incluídas em cada fase de entrega para todas as partes envolvidas (ISO 7817-2:2023).

5.1 PROCESSO

A seguir, apresento os resultados do mapeamento de todo o processo desenvolvido, detalhando as etapas e as principais análises realizadas ao longo do projeto. O processo foi estruturado em três fases: modelagem inicial, voltada para a análise espacial e verificação da conformidade com os requisitos do projeto; avaliação dos *spaceproofings*, garantindo a viabilidade da instalação e manutenção dos equipamentos; e

compatibilização final, assegurando a integração com os fornecedores. Essa abordagem permitiu sua replicação em todas as outras unidades construtivas da Linha 6 (Figura 10).

5.1.1 Fase inicial - Modelagem dos Inputs Iniciais:

Nessa fase, o foco é a criação dos modelos iniciais da arquitetura e da estrutura do projeto. Isso inclui a modelagem de todos os componentes essenciais, como paredes, pisos e estrutura. Essa abordagem possibilitou os seguintes pontos:

- Análise da capacidade espacial necessária;
- Verificação da conformidade das premissas iniciais com as demandas operacionais e de fluxo de passageiros;
- Identificação antecipada de possíveis pontos de estrangulamento, onde o espaço disponível não atendia aos requisitos mínimos estabelecidos no edital;
- Ajustes no modelo para garantir a conformidade normativa e funcional da estação.

A sequência de etapas seguidas nesta fase foram:

1. Análise da capacidade espacial designada nos projetos de arquitetura;
2. Identificação de não conformidades relacionadas à área mínima exigida;
3. Validação da adequação da capacidade prevista às demandas operacionais e de manutenção da estação.

5.1.2 Fase Intermediária – Avaliação da Modelagem dos *spaceproofings*

Na segunda fase, o foco está na análise dos *spaceproofings* (modelagem de requisitos espaciais) e no impacto dos equipamentos previstos no projeto. Esse processo envolveu:

- Análise da logística de instalação dos equipamentos na estação;
- Consideração dos aspectos de manutenção e eventuais substituições em situações críticas e/ou emergenciais;
- Garantir de que o redimensionamento não comprometesse a acessibilidade e a funcionalidade ao longo do ciclo de vida da estação.

As principais ações tomadas foram:

4. Avaliação do impacto logístico, incluindo instalação, manutenção e troca de equipamentos em casos críticos. Implementação de possíveis melhorias, tanto funcionais como na capacidade de construção do projeto.

5.1.3 Fase Avançada – Pré-Fabricação e Compatibilização das Informações:

Na terceira fase, a projetista realizou uma revalidação detalhada de todas as informações junto ao fornecedor selecionado. Esse processo incluiu:

- Verificação das dimensões exatas dos equipamentos e suas respectivas cargas, informações essenciais para a equipe de estrutura;
- Avaliação da área necessária para instalação, considerando os limites de folga adequados;
- Definição das posições e especificações da monovia e dos ganchos, fundamentais para a instalação, manutenção e substituição do equipamento.

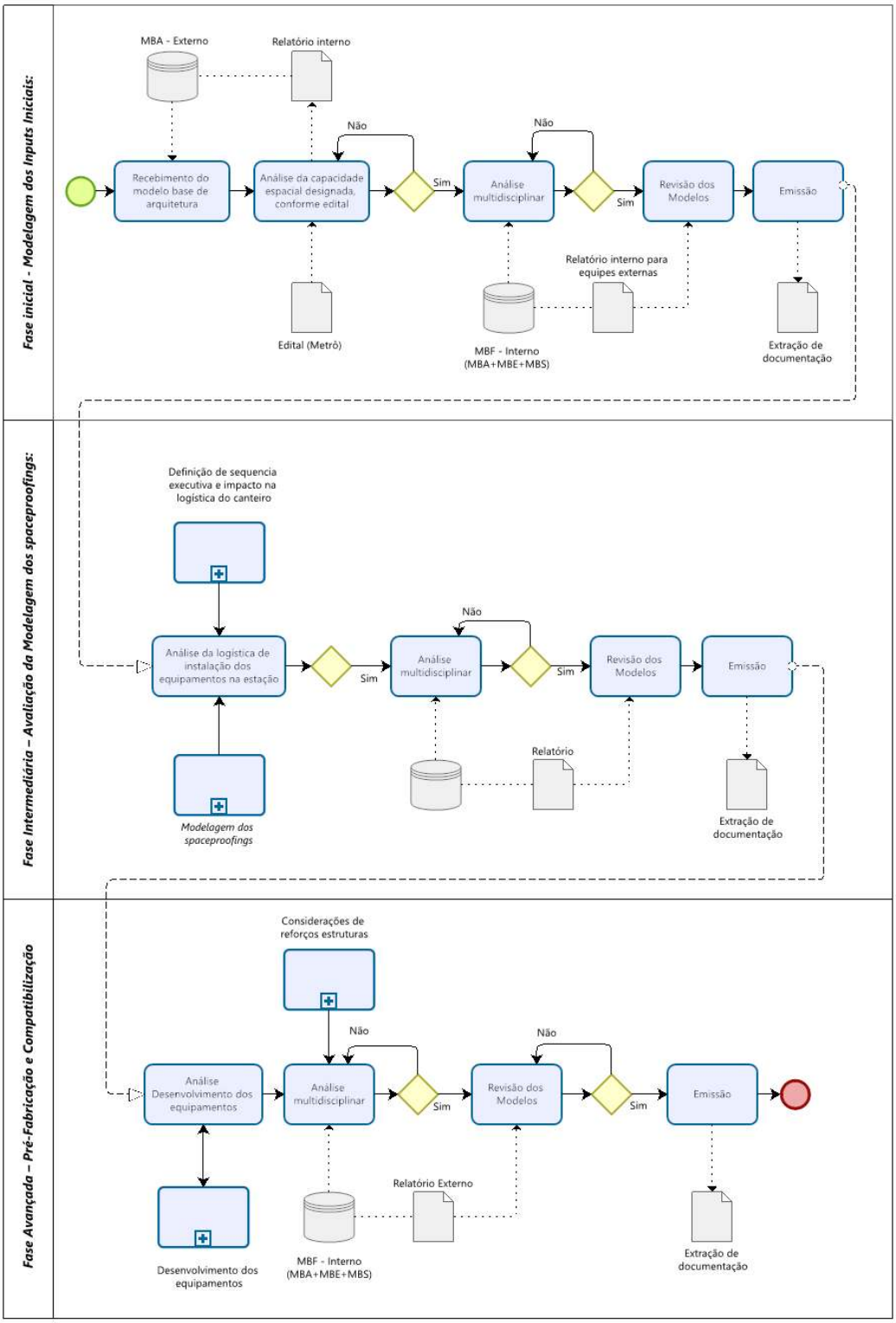
Nesta etapa, foram seguidos os seguintes passos:

5. Revalidação com o fornecedor: recepção de dados detalhados e representações BIM dos equipamentos;
6. Enriquecimento dos objetos BIM com propriedades e informações úteis para a fase de operação, garantindo sua aplicação ao longo do ciclo de vida do projeto.

Além disso, essa fase também envolveu a reavaliação dos impactos nas estruturas internas e no canteiro de obras. Esse processo visou garantir que todas as intervenções estivessem alinhadas com os planos de construção, evitando impactos na integridade da obra.

7. Readequação dos impactos pela equipe de estrutura e produção, incluindo reforço estrutural, análise da sequência construtiva e otimização do fluxo de trabalho no canteiro de obras.

Figura 10: Fluxo do processo.



Fonte: Autor.

5.2 NÍVEL NECESSÁRIO DE INFORMAÇÃO (LOIN)

De acordo com a EN 17412-1:2020, o LoIN tem como objetivo determinar a qualidade, a quantidade e a granularidade das informações que serão entregues em cada fase de um projeto, com base no propósito específico de cada entrega. Ele deve atender, principalmente, aos requisitos de tomada de decisão de todos os envolvidos. Ou seja, é fundamental ter clareza sobre os objetivos finais para garantir que os dados sejam realmente relevantes e gerem informações úteis dentro do contexto de uso. Vale a pena salientar a controvérsia que este conceito (tanto LOIN como, no passado, LOD/LOI) suscitou anteriormente, tanto em artigos como foros, chegando a pontos de vista muito diferentes sobre a necessidade do seu desenvolvimento nos projetos, de acordo com a sua utilização e a fase do próprio projeto.

Esse entendimento permitiu estabelecer com precisão quais informações devem ser incluídas em cada fase de entrega:

5.2.1 Fase inicial – modelagem dos inputs iniciais:

Tabela 1: LoIN da fase inicial: modelagem dos inputs iniciais.

TIPO DE INFORMAÇÃO	DETALHE	DESCRIÇÃO
INFORMAÇÃO GEOMÉTRICA	Detalhe	Simplificado
	Dimensionalidade	3D
	Localização	Absoluta (coordenadas)
	Aparência	Simbólica (representação simplificada)
	Comportamento Paramétrico	Não Solicitado (geometria fixa)
INFORMAÇÃO ALFANUMÉRICA	Identificação	Nome
	Conteúdo da Informação	Informações de projeto
DOCUMENTAÇÃO	Conjunto de Documentos	Edital técnico

Fonte: Adaptado pelo Autor da EN 17412-1:2020.

5.2.2 Fase intermediária - Avaliação da modelagem dos *spaceproofings*

Tabela 2: LoIN da fase Intermediária: Avaliação da modelagem dos *spaceproofings*.

TIPO DE INFORMAÇÃO	DETALHE	DESCRIÇÃO
INFORMAÇÃO GEOMÉTRICA	Detalhe	Volumetria dos espaços
	Dimensionalidade	3D
	Localização	Absoluta (coordenadas)
	Aparência	Representação dever ser identificada por cores
	Comportamento Paramétrico	Altura, largura, comprimento e profundidade
INFORMAÇÃO ALFANUMÉRICA	Identificação	Exaustão, insuflação, pressurização e ar-condicionado
	Conteúdo da Informação	Propriedades físicas, dados técnicos, informações de projeto
DOCUMENTAÇÃO	Conjunto de Documentos	Desenhos técnicos, especificações, manuais, requisitos

Fonte: Adaptado pelo Autor da EN 17412-1:2020.

5.2.3 Fase avançada - Pré-fabricação e compatibilização das informações

Tabela 3: LoIN da fase avançada: Pré-fabricação e compatibilização das informações.

TIPO DE INFORMAÇÃO	DETALHE	DESCRIÇÃO
INFORMAÇÃO GEOMÉTRICA	Detalhe	Volumes + elementos pré-fabricados
	Dimensionalidade	3D
	Localização	Absoluta (coordenadas)
	Aparência	Representação detalhada,
	Comportamento Paramétrico	Altura, largura, comprimento e profundidade
INFORMAÇÃO ALFANUMÉRICA	Identificação	Nome, sistema, código
	Conteúdo da Informação	Dados técnicos do fabricante, informações operacionais
DOCUMENTAÇÃO	Conjunto de Documentos	Desenhos técnicos, especificações, manuais, requisitos

Fonte: Adaptado pelo Autor da EN 17412-1:2020.

6 LIÇÕES APRENDIDAS

A introdução da modelagem dos *spaceproofings* provou ser uma estratégia significativa na gestão e execução do projeto da Linha 6 do Metrô de São Paulo. Esta técnica permitiu uma representação tridimensional dos espaços necessários para o detalhamento dos equipamentos, facilitando a coordenação entre as diversas disciplinas envolvidas e ajudando a identificar e resolver potenciais conflitos de espaço e design. Dessa forma, foi possível prevenir problemas futuros, na instalação e manutenção dos sistemas.

Principais lições aprendidas:

1. Otimização do uso do espaço: Através dessa abordagem, foi possível maximizar a eficiência do uso dos espaços confinados nas estações subterrâneas, garantindo que todos os equipamentos essenciais coubessem nos locais designados sem comprometer a acessibilidade ou a manutenção futura;

2. Melhoria na comunicação e colaboração interdisciplinar: O uso dos *spaceproofings* como parte do processo BIM facilitou uma comunicação mais clara e eficaz entre arquitetos, engenheiros e construtores, assegurando que todas as partes estivessem alinhadas e informadas sobre as necessidades e limitações espaciais desde o início do projeto;

3. Aprimoramento na tomada de decisão**:** A visualização avançada proporcionada pelos *spaceproofings* permitiu que as decisões de projeto fossem mais informadas, baseadas em análises precisas do ambiente digital, resultando em soluções mais eficientes e menos propensas a erros.

4. Redução de conflitos e retrabalhos: A modelagem dos *spaceproofings* permitiu a detecção precoce de interferências entre diferentes disciplinas, reduzindo significativamente a necessidade de mudanças durante as fases de construção e instalação;

5. Facilidade na integração entre projeto e execução: A modelagem digital ajudou a reduzir discrepâncias entre o que foi planejado e o que foi executado, garantindo maior previsibilidade e controle durante a construção

6. Potencial de replicação: A abordagem desenvolvida para a Linha 6 do Metrô pode ser adaptada para outros projetos metroviários e de infraestrutura urbana, estabelecendo um modelo eficiente para coordenação multidisciplinar e otimização de processos.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A adoção da modelagem de *spaceproofings* foi essencial para a otimização do uso do espaço, garantindo a coordenação entre disciplinas e a prevenção ou resolução de interferências. Além disso, assegurou a priorização da segurança e do conforto ambiental, resultando em uma infraestrutura que não apenas atende, mas supera as expectativas e os padrões regulatórios.

Essas inovações não apenas aprimoraram a comunicação entre as equipes técnicas, como também otimizaram significativamente os processos e o uso de recursos. As práticas adotadas estabelecem um modelo de referência que pode ser replicado em outros projetos de grande escala, reforçando a eficiência, a sustentabilidade e os benefícios para as comunidades atendidas.

Este estudo contribui significativamente para a área metroviária, demonstrando como a integração de inovações tecnológicas e práticas de gestão pode superar desafios em ambientes urbanos densamente povoados. Além disso, fornece insights valiosos para a evolução das metodologias de engenharia, destacando a importância da inovação contínua na melhoria dos padrões de segurança e qualidade em projetos de infraestrutura.

REFERÊNCIAS

ANTÓN, Pedro Rey; SEDÓ, María. Line 6 São Paulo Metro Brazil: Resuming the largest infrastructure project in LATAM. In: AUTODESK UNIVERSITY, 2022. Disponível em: https://www.autodesk.com/autodesk-university. Acesso em: 10 fev. 2024.

ANTÓN, Pedro Rey; VIEIRA, Bruna Bezerra; BARBETTA, Alessandra; GONÇALVES, Bruna; PALLADINO, Mayara; MARQUES, Isabela; MONTIEL, Manuel Mena; MARTINS, Cristhiano L.; YOSHIKAWA, Tatiana; CHUECA, Carlos Peña; VIEIRA, Tiago. Uso de nuvem de pontos e modelos BIM para controle de obras subterrâneas. In: CONGRESSO AERABIM, 7., 2022, São Paulo. Anais [...]. São Paulo: Sinaenco, 2024. p. 613. Disponível em: https://sinaenco.com.br/ANAIS-7-CONGRESSO-AERABIM.pdf. Acesso em: 9 fev. 2024.

CAVALCANTE, C. S. C.; CORRÊA, F. R. Elaboração de modelo de maturidade (Indústria 4.0) para fabricantes de componentes industrializados. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO, 3., 2021, Uberlândia. Anais [...]. Porto Alegre: ANTAC, 2021. p. 1–13. Disponível em: https://eventos.antac.org.br/index.php/sbtic/article/view/569. Acesso em: 05 fev. 2025.

WEN, Y.; LENG, J.; SHEN, X.; HAN, G.; SUN, L.; YU, F. Environmental and health effects of ventilation in subway stations: a literature review. International Journal of Environmental Research and Public Health, Basel, v. 17, n. 3, p. 1–37, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.3390/ijerph17031084. Acesso em: 05 fev. 2025.

FOLADOR, B. M.; OVIEDO-HAITO, R. J. J. Potenciais aplicações das tecnologias da Indústria 4.0 na construção modular. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GESTÃO E ECONOMIA DA CONSTRUÇÃO, 13.; SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO, 4., 2023, Aracaju. Anais [...]. Porto Alegre: ANTAC, 2023.

ZIMMERMANN, J.; OVIEDO-HAITO, R. J. J. Fontes internas de vantagem competitiva vinculadas com a Construção 4.0 em empresas de construção. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 19., 2022, Canela. Anais [...]. Porto Alegre: ANTAC, 2022. p. 1–13.

WU, Z.; JI, X.; ZHOU, X.; TONG, S. Research on environmental suitability evaluation of the transfer spaces in urban subway stations. Buildings, Basel, v. 12, n. 12, p. 1–25, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.3390/buildings12122209. Acesso em: 05 fev. 2025

LI, J.; LU, S.; WANG, Q.; TIAN, S.; JIN, Y. Study of passive adjustment performance of tubular space in subway station building complexes. Applied Sciences, Basel, v. 9, n. 5, p. 1–30, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.3390/app9050834. Acesso em: 05 fev. 2025

SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Transportes Metropolitanos. Edital de Licitação nº 01/2013 – PPP da Linha 6–Laranja do Metrô de São Paulo. São Paulo: STM, 2013. Disponível em: https://www.parcerias.sp.gov.br/Parcerias/Projetos/Detalhes/116. Acesso em: 05 fev. 2025.

AUSTRALIAN TUNNELLING SOCIETY. ATS QLD – Spaceproofing for tunnels. Brisbane, 2022. Disponível em: https://www.ats.org.au/ats-event/ats-qld-spaceproofing-for-tunnels/. Acesso em: 05 fev. 2025

EASTMAN, Chuck; TEICHOLZ, Paul; SACKS, Rafael; LISTON, Kathleen. Manual de BIM: um guia de modelagem da informação da construção para arquitetos, engenheiros, gerentes, construtores e incorporadores. Tradução de Cervantes Gonçalves Ayres Filho et al. Porto Alegre: Bookman, 2014. 500 p. ISBN 978-85-8260-117-4.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT ISO 19650-2:2018. Organização e digitalização de informações sobre edifícios e obras de engenharia civil, incluindo modelagem da informação da construção (BIM) – Gestão da informação usando modelagem da informação da construção – Parte 2: Fase de entrega dos ativos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 17412-1:2020 – Building Information Modelling – Level of Information Need – Part 1: Concepts and principles. Brussels: CEN, 2020.