

INTEGRAÇÃO DE NUVENS DE PONTOS E BIM NA COMPATIBILIZAÇÃO DE ARRUAMENTOS E INFRAESTRUTURAS COM PATRIMÓNIO HISTÓRICO E ECOLÓGICO: CASO DE ESTUDO DO LOTEAMENTO NORTH GORGE

Bernardino Lima⁽¹⁾, Joana Teixeira⁽²⁾, Romeu Simões⁽³⁾

(1) TECHONIS Lda., Porto, [0009-0003-2787-375X]

(2) TECHONIS Lda., Porto, [0009-0008-0181-2461]

(3) TECHONIS Lda., Porto, [0009-0004-9172-1491]

Resumo

A compatibilização de arruamentos, infraestruturas e fundações em contextos com condicionantes históricas e ambientais exige ferramentas para reduzir a incerteza geométrica durante o desenvolvimento do projeto. Este artigo apresenta o caso de estudo do projeto North Gorge, em Gibraltar, desenvolvido em regime Design & Build num terreno caracterizado por topografia complexa, património histórico e património ambiental.

A metodologia adotada baseou-se na integração progressiva de múltiplas nuvens de pontos com modelos BIM disciplinares num modelo federado georreferenciado. O modelo tridimensional foi utilizado para validação geométrica, deteção de interferências e suporte à tomada de decisão durante o desenvolvimento e execução do projeto.

O caso de estudo demonstra como a utilização combinada de nuvens de pontos e BIM pode apoiar a coordenação de soluções técnicas em contextos territoriais complexos.

1. Introdução

O desenvolvimento de projetos em contextos de elevada complexidade geométrica e patrimonial coloca desafios significativos à coordenação entre especialidades, à tomada de decisão e à gestão de risco técnico. A coexistência de topografia irregular, construções existentes e infraestruturas ativas impõe a necessidade de instrumentos que permitam integrar informação heterogénea de forma progressiva e controlada.

No caso em estudo, o desenvolvimento do projeto decorreu em regime Design & Build, implicando a transição da fase inicial de conceção para uma fase de desenvolvimento integrado com o empreiteiro. Este enquadramento permitiu a incorporação contínua de novos levantamentos e a adaptação das soluções técnicas à medida que a informação geométrica se consolidava durante a obra.

Desde fases preliminares, foram utilizadas nuvens de pontos como base para geração de superfícies topográficas e validação tridimensional, em linha com abordagens Scan-to-BIM e

Scan-vs-BIM aplicadas a contextos existentes e de monitorização de construção [2], [3]. Contudo, a informação disponível evoluiu ao longo do tempo, com sucessivas campanhas de levantamento, demolições e exposição de áreas previamente inacessíveis. O modelo BIM federado assumiu, assim, um papel central na gestão dessa incerteza geométrica, funcionando como plataforma de validação geométrica e coordenação técnica.

O presente artigo tem como objetivo apresentar uma metodologia pragmática de integração progressiva de múltiplas nuvens de pontos num modelo BIM federado, em contexto de elevada incerteza geométrica. O foco não reside na descrição do empreendimento, mas na sistematização dos critérios adotados para validação, atualização e compatibilização geométrica, bem como nas decisões técnicas suportadas por esse processo.

2. Contexto e Condicionantes do Projeto

2.1 Caracterização Territorial e Contexto Histórico

O empreendimento desenvolve-se no terreno do antigo complexo militar de North Gorge, no Sul de Gibraltar, numa área caracterizada por forte encaixe morfológico entre maciços calcários e topografia acidentada. A geometria do terreno configura uma depressão natural inserida no maciço rochoso, com cotas inferiores à envolvente urbana e acessos condicionados.

A área integra sucessivas camadas de ocupação histórica, incluindo estruturas industriais do período vitoriano, grutas naturais e escavações em rocha associadas a utilizações posteriores. Entre os elementos patrimoniais existentes destacam-se as Cold Stores e a gruta Judge's Cave, cuja presença condicionou decisões chave ao longo do desenvolvimento do projeto.

Este contexto combinava complexidade geométrica, sensibilidade patrimonial e restrições operacionais significativas.

2.2 Condicionantes Patrimoniais e Ambientais

A presença de estruturas históricas e cavidades naturais implicou a necessidade de compatibilização tridimensional rigorosa entre novas fundações e elementos existentes. A preservação das Cold Stores e da Judge's Cave condicionou a implantação de microestacas, muros de contenção e redes enterradas.

Paralelamente, o terreno apresentava vegetação consolidada, incluindo exemplares arbóreos sujeitos a restrições ambientais específicas. Em determinados casos, a remoção de árvores implicava medidas compensatórias, enquanto noutras situações apenas intervenções controladas eram admissíveis.

Estas condicionantes introduziram variáveis adicionais na definição altimétrica de arruamentos, plataformas e edificações, exigindo articulação contínua entre modelação digital e decisões de implantação.

2.3 Complexidade de Infraestruturas Existentes

Para além das condicionantes físicas, o terreno encontrava-se inserido num sistema de infraestruturas ativo, envolvendo redes civis e militares em funcionamento. Destacam-se redes elétricas de média tensão, telecomunicações e condutas associadas à central militar de osmose inversa Glenn Rocky Distillery, localizada a sul do empreendimento, incluindo captação de água salgada e distribuição de água doce para instalações militares noutras zonas de Gibraltar.

A necessidade de desvio, proteção e reorganização destas infraestruturas constituiu uma condicionante determinante para a estratégia de coordenação técnica do empreendimento, influenciando a definição de soluções estruturantes para as redes.

2.4 Regime Design & Build e Evolução da Informação

O desenvolvimento do projeto ocorreu em regime Design & Build, permitindo a transição da equipa de projeto para colaboração direta com o empreiteiro geral. Este enquadramento contratual viabilizou a evolução das soluções técnicas em paralelo com a execução, incorporando progressivamente novos levantamentos e informação de obra.

A existência de campanhas sucessivas de levantamento, associadas a demolições, desmatização e exposição de áreas previamente inacessíveis, implicou atualização contínua da base geométrica do projeto. Neste contexto, o modelo BIM federado assumiu um papel ativo na validação, coordenação e adaptação incremental das soluções.

3. Processamento e Gestão das Nuvens de Pontos

3.1 Receção, Georreferenciação e Coerência

Todos os levantamentos foram realizados por entidade externa de topografia, acompanhando o projeto desde fases preliminares até ao final da obra, assegurando continuidade metodológica e estabilidade do referencial. Os levantamentos foram executados no sistema oficial de coordenadas de Gibraltar, garantindo georreferenciação consistente.

Ao longo do projeto não se verificaram desalinhamentos sistemáticos entre campanhas nem foi necessário aplicar correções globais em planimetria ou altimetria. Esta estabilidade permitiu integrar progressivamente novas nuvens de pontos no modelo federado sem recurso a ajustamentos artificiais ou alinhamentos por aproximação estatística, mantendo coerência entre plataformas de modelação e coordenação.

As nuvens eram recebidas maioritariamente em formatos proprietários (RCS), sendo convertidas para E57 e posteriormente integradas nos ambientes Revit e Trimble Connect através de ferramentas específicas de processamento. A gestão de versões foi realizada por campanhas zonais sequenciais, mantendo-se rastreabilidade temporal das atualizações.

3.2 Estratégia Híbrida CAD + Nuvem

Embora as nuvens de pontos estivessem disponíveis desde fases iniciais, a modelação preliminar do terreno foi baseada maioritariamente em superfícies tridimensionais derivadas de levantamento topográfico convertido para CAD. Esta opção permitiu maior controlo paramétrico e desempenho computacional nas fases de estudo altimétrico e volumétrico.

A nuvem de pontos foi utilizada como ferramenta de validação tridimensional, nomeadamente:

- Verificação em corte;
- Confirmação de cotas críticas;
- Análise de interferências em zonas complexas;
- Leitura geométrica em áreas não representadas adequadamente por curvas de nível.

Em fases mais avançadas, nomeadamente na definição de alguns muros de suporte e infraestruturas de drenagem suportadas em sapatas num percurso apoiado em formações rochosas, a modelação foi desenvolvida e validada diretamente sobre a nuvem no modelo BIM.

Esta abordagem híbrida permitiu equilibrar precisão geométrica, robustez do modelo, desempenho computacional e custo, evitando conversões adicionais para CAD 3D quando a utilização direta da nuvem era suficiente para apoio à decisão.

3.3 Modelação Sob Incerteza Controlada

Nas fases iniciais existiam zonas com informação geométrica incompleta, designadamente áreas cobertas por vegetação densa, taludes de difícil leitura e estruturas parcialmente devolutas. Em vez de suspender a modelação até obtenção de dados definitivos, foi adotada uma estratégia consciente de modelação sob incerteza controlada. Esta incluiu:

- Interpolação linear entre crista e base de taludes quando apenas esses pontos estavam medidos;
- Interpretação geométrica baseada em observação *in situ*;
- Simplificação de projeções rochosas (overhangs) cuja representação paramétrica não era possível com as ferramentas de modelação topográfica disponíveis na versão do software utilizada.

A incerteza associada a estas simplificações foi reconhecida implicitamente no dimensionamento preliminar de volumes de escavação e posicionamento altimétrico de arruamentos e edifícios. O modelo funcionou, assim, como ferramenta de teste de hipóteses, sujeito a validação progressiva com novas campanhas de levantamento.

3.4 Integração Progressiva de Novas Campanhas

À medida que a obra avançava, ocorreram demolições, desmatção e exposição de zonas previamente inacessíveis, permitindo a realização de novas campanhas de levantamento por nuvem de pontos e atualização da informação topográfica. Cada campanha introduzia potencialmente alterações relevantes na superfície base e na representação de estruturas e cavidades existentes, exigindo uma estratégia de integração controlada.

A atualização do modelo não consistiu numa substituição automática da informação anterior. Foram priorizadas as zonas em que novos levantamentos alteravam cotas, limites rochosos, fundações, arruamentos ou redes técnicas, mantendo-se as restantes áreas quando já se encontravam consolidadas e coerentes. Esta abordagem permitiu reduzir o risco de introdução de desvios por sobreposição não controlada de versões, assegurando consistência planimétrica e altimétrica ao longo do desenvolvimento.

Em paralelo, manteve-se uma estratégia híbrida entre superfícies 3D e visualização direta das nuvens de pontos: as primeiras serviram de base aos elementos paramétricos no Revit, enquanto as segundas apoiaram a validação tridimensional em zonas irregulares ou intervenções pontuais de obra.

4. Estratégia de Modelação Progressiva

4.1 Modelação inicial do terreno

A modelação inicial do terreno baseou-se nas superfícies tridimensionais derivadas do levantamento topográfico disponível, complementadas por observação direta em campo e análise de registos fotográficos e imagens aéreas.

Em zonas onde apenas estavam disponíveis pontos de crista e base de taludes, a superfície foi gerada por interpolação linear. Esta simplificação permitiu viabilizar estudos preliminares de

implantação, ainda que com reconhecimento explícito de que a morfologia real poderia apresentar variações intermédias não captadas na fase inicial.

O modelo do terreno não foi tratado como representação definitiva, mas como base evolutiva sujeita a refinamento progressivo.

4.2 Estudos de cut/fill

Com base na superfície inicial foram desenvolvidos estudos iterativos de cut/fill com três objetivos principais:

- Uniformização controlada das cotas de implantação das habitações;
- Garantia de declives funcionais nos arruamentos;
- Minimização de volumes excedentários de escavação em rocha.

O modelo tridimensional permitiu testar diferentes cenários altimétricos, avaliando simultaneamente impacto volumétrico, compatibilidade com fundações indiretas e coerência com a morfologia existente. Pequenas variações de cota eram simuladas e comparadas antes de qualquer consolidação da solução (Figura 1).



Figura 1 – Modelo Volumétrico utilizado nos Estudos Preliminares de Implantação e Cut/Fill

Num território onde a remoção de material escavado para vazadouro fora da jurisdição local implica custos elevados, a gestão do volume sobranse assumiu particular relevância. Ao longo de sucessivas afinações altimétricas, o volume estimado de material excedentário reduziu-se aproximadamente de 3000 m³ para cerca de 800 m³, demonstrando o impacto direto da simulação tridimensional na racionalização de recursos.

Este resultado não decorreu de uma decisão isolada, mas de um processo incremental de ajuste e validação geométrica. O modelo funcionou como instrumento de teste de hipóteses, permitindo equilibrar condicionantes topográficas, estruturais e económicas numa lógica de decisão progressiva.

4.3 Avaliação de Condicionantes Ambientais

A integração das nuvens de pontos permitiu representar a vegetação existente com dimensão e volumetria reais, ultrapassando a simplificação inerente à simbologia bidimensional tradicional. A leitura tridimensional das copas arbóreas revelou interferências potenciais entre implantação prevista e dimensão real da vegetação, não evidentes em planta. Esta antecipação permitiu

avaliar, em articulação com especialistas, a viabilidade de intervenções controladas ou a necessidade de ajustes planimétricos em edifícios.

Mais do que um exercício gráfico, esta análise demonstrou o papel do modelo como instrumento de validação espacial em contexto ecológico sensível. A representação tridimensional da realidade permitiu integrar condicionantes ambientais no processo de decisão de forma objetiva, reduzindo o risco de conflitos em fase de obra.

4.4 Modelação Inicial e Estruturação do Sistema de Infraestruturas

Numa fase ainda preliminar do desenvolvimento, o modelo tridimensional começou a ser utilizado não apenas para testar volumes edificados, mas para estruturar o sistema de infraestruturas base do empreendimento.

A modelação inicial incluiu a representação simplificada do terreno, plataformas de escavação, massas edificadas para estudo de implantação e análise solar, bem como a definição preliminar do traçado do Utility Tunnel (Galeria Técnica). Nesta fase, o túnel não era ainda modelado com elementos construtivos definitivos, mas já se encontrava conceptualizado como volume escavado necessário para garantir a passagem estruturada das infraestruturas principais.

Este modelo embrionário permitiu simultaneamente:

- testar cenários de cut/fill;
- avaliar a exposição solar das coberturas para integração de painéis fotovoltaicos;
- estudar o posicionamento de guias e logística de obra;
- compreender as relações espaciais entre escavações, arruamentos e edificações.

O Utility Tunnel surge, assim, não como solução tardia, mas como elemento estruturante desde as fases iniciais de modelação, evoluindo posteriormente para definição construtiva detalhada.

A sua conceção precoce permitiu evitar soluções dispersas de infraestruturas enterradas e consolidar uma espinha dorsal técnica coerente com a topografia condicionada do local.

5. Integração Técnica de Infraestruturas, Fundações e Terreno

A coexistência de património histórico, cavidades naturais e infraestruturas ativas exigiu um processo contínuo de compatibilização tridimensional entre novas fundações, redes técnicas e elementos existentes. A utilização combinada de modelos BIM e nuvens de pontos permitiu antecipar interferências potenciais e suportar decisões de implantação em zonas de elevada complexidade geométrica.

O modelo federado funcionou como plataforma de validação espacial, permitindo articular progressivamente informação proveniente de levantamento topográfico, observação em obra e contributos das diferentes especialidades.

5.1 Microestacas e Património Subterrâneo

A implantação das fundações indiretas (microestacas) revelou-se particularmente sensível nas zonas adjacentes à Judge's Cave, onde coexistem cavidades naturais e estruturas históricas.

O posicionamento das microestacas foi previamente modelado tridimensionalmente, permitindo avaliar interferências potenciais com as geometrias levantadas das cavidades. Contudo, durante a execução verificou-se, em alguns pontos localizados, comportamento anómalo na perfuração associado à presença de vazios. No projeto estavam definidos critérios de recusa, incluindo limites admissíveis para atravessamento de vazios durante a furação. A

deteção destes vazios, superiores ao limite estabelecido, levou à reavaliação local da solução estrutural. A análise conjunta do modelo tridimensional e da informação recolhida em obra permitiu ajustar o posicionamento de determinadas microestacas e introduzir elementos adicionais de reforço onde necessário. Este processo evidenciou os limites da representação geométrica de cavidades naturais complexas, mas demonstrou igualmente a utilidade do modelo como suporte à adaptação controlada da solução estrutural. Estas ocorrências representaram menos de 5% do total de microestacas na zona adjacente à Judge's Cave.

Situação distinta ocorreu na zona das Cold Stores, um conjunto de estruturas industriais históricas construídas sobre o maciço rochoso. Neste caso, a geometria existente encontrava-se bem caracterizada através de levantamento por nuvem de pontos, permitindo representar tridimensionalmente os volumes interiores das estruturas.

A modelação das microestacas permitiu verificar que os elementos de fundação atravessavam as paredes das Cold Stores até chegar ao maciço rochoso, sem introduzir cargas na estrutura existente, garantindo que o sistema de fundações do novo empreendimento permanecia estruturalmente independente. Esta verificação tridimensional revelou-se particularmente útil para demonstrar a compatibilidade entre a nova intervenção e a preservação do património industrial existente (Figura 2).

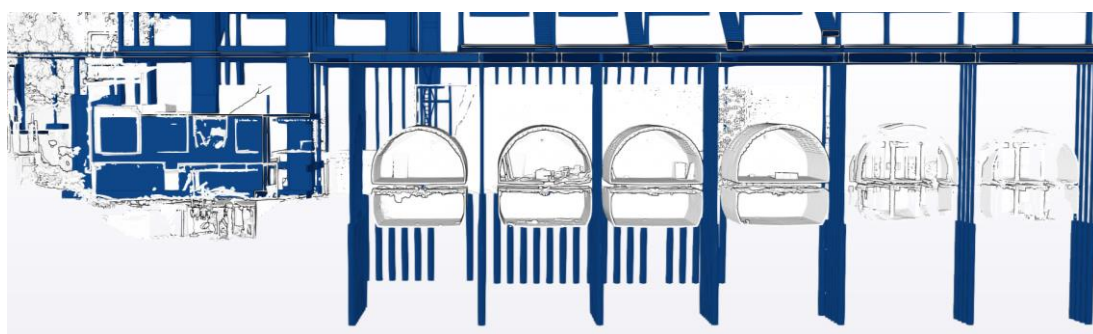


Figura 2 – Modelo de Estruturas (microestacas) vs. Nuvem de Pontos das Cold Stores

5.2 Sistema de Drenagem e Integração com Infraestruturas Existentes

A definição do sistema de drenagem pluvial constituiu um dos desafios técnicos mais relevantes do projeto. O empreendimento localiza-se numa depressão natural do maciço rochoso, com cotas médias de implantação inferiores ao arruamento de acesso.

Uma solução convencional baseada em bombagem para o coletor público implicaria não apenas consumo energético permanente, mas também intervenções extensivas na rede existente devido à limitada capacidade hidráulica do coletor a montante.

Em articulação com o Technical Services Department e com o Ministry of Defence foi estudada uma solução alternativa baseada na utilização de infraestruturas existentes associadas à central militar de osmose inversa Glenn Rocky Distillery, localizada a sul do empreendimento. Esta instalação dispunha de um percurso hidráulico gravítico que conduzia o efluente de salmoura da dessalinização (brine) até à vertente poente do maciço rochoso, através de câmaras e galerias escavadas na rocha que descarregam numa cascata artificial, a Europa Waterfall. A solução final consistiu na integração da drenagem pluvial do loteamento nesse corredor hidráulico, conduzindo as águas de forma gravítica desde North Gorge até às galerias existentes, seguindo posteriormente até ao tanque de atenuação localizado a cota inferior e daí até ao mar.

A modelação deste sistema exigiu a integração de levantamentos por nuvem de pontos da Glenn Rocky Distillery e das galerias escavadas no maciço rochoso. Estes levantamentos permitiram compreender a geometria real das câmaras subterrâneas e validar o traçado da nova rede de drenagem em articulação com as infraestruturas existentes.

Para além de evitar sistemas de bombagem, esta solução permitiu minimizar intervenções na rede pública e transformar um conjunto de infraestruturas dispersas num sistema hidráulico coerente e energeticamente passivo.

5.3 Implantação adaptativa em terreno rochoso

Após as primeiras demolições e operações de desmatização, novas superfícies rochosas tornaram-se visíveis em zonas do empreendimento anteriormente ocultas pela vegetação e por estruturas existentes. Uma destas áreas correspondia ao local previsto para a futura Family Pool.

A nuvem de pontos obtida nesta fase revelou a geometria real de um afloramento rochoso significativo cuja cota se situava acima dos arruamentos circundantes. Em vez de proceder à sua regularização integral, optou-se por utilizar esta morfologia como elemento estruturante da solução paisagística.

Em articulação com a equipa de arquitetura e paisagismo, o modelo tridimensional foi utilizado para estudar a implantação das piscinas e dos passadiços de acesso, procurando compatibilizar os requisitos funcionais com a preservação das formas naturais do terreno e das árvores existentes (Figura 3).

Este processo permitiu desenvolver uma solução de implantação adaptativa, na qual o desenho final resultou diretamente da leitura da morfologia existente representada no modelo digital.

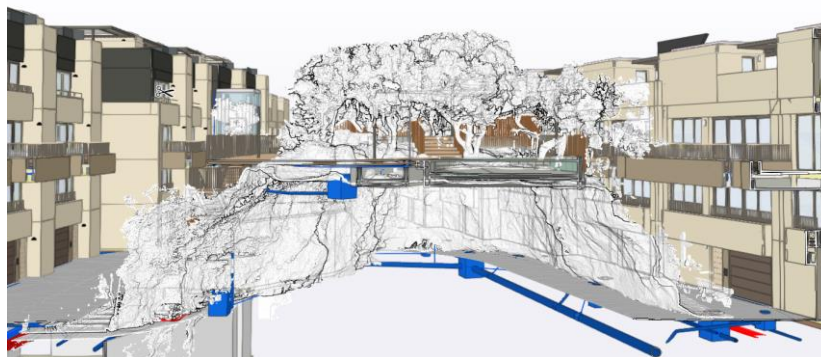


Figura 3 – Corte pela Family Pool em sobreposição com Nuvem de Pontos

5.4 Utility Tunnel como estrutura técnica

O Utility Tunnel constituiu elemento estruturante do sistema técnico do empreendimento desde fases preliminares.

Inicialmente concebido como solução para reorganização e desvio de infraestruturas externas, evoluiu para espinha dorsal das redes internas do loteamento, concentrando esteiras elétricas, canalizações principais e percursos técnicos estruturantes.

A sua modelação tridimensional desde fases iniciais permitiu coordenar redes elétricas e hidráulicas num espaço técnico controlado, minimizando interferências superficiais e reduzindo a dispersão de caixas de visita ao longo do empreendimento (Figura 4).

A existência de um eixo técnico contínuo simplificou a coordenação e contribuiu para uma organização mais coerente das infraestruturas, permitindo também facilitar futuras operações de manutenção sem necessidade de intervenções destrutivas no espaço exterior.

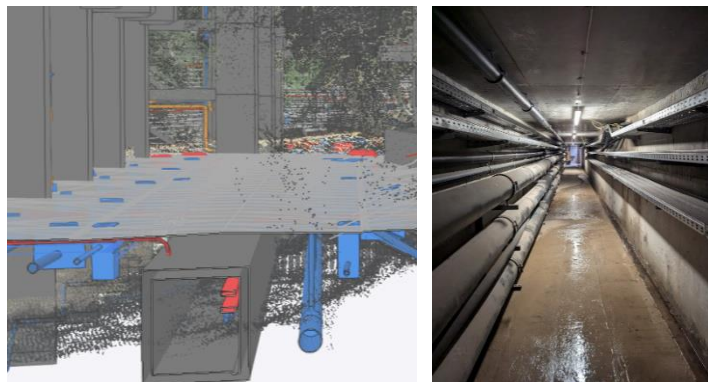


Figura 4 – Modelo federado de coordenação e interior do Utility Tunnel.

6. Discussão

O caso de North Gorge demonstra que a integração de nuvens de pontos em ambiente BIM pode ultrapassar a função tradicional de mera representação geométrica, assumindo um papel ativo na coordenação e validação técnica de projetos desenvolvidos em contextos complexos. Nos exemplos apresentados, o modelo tridimensional permitiu antecipar conflitos potenciais entre fundações indiretas, património existente e infraestruturas enterradas, bem como apoiar decisões de implantação e definição de traçados. A atualização da informação geométrica não foi automática, sendo priorizadas zonas onde novos levantamentos alteravam cotas, limites rochosos, fundações, arruamentos ou redes técnicas.

A experiência demonstrou que a modelação baseada em informação parcial pode constituir uma abordagem viável quando acompanhada por mecanismos de validação progressiva e integração incremental de novos levantamentos. Neste enquadramento, o modelo não é tratado como representação definitiva da realidade, mas como instrumento de suporte à decisão sujeito a refinamento contínuo.

Embora o processo colaborativo não tenha sido estruturado como exercício formal de conformidade com a ISO 19650, privilegiou-se um fluxo funcional de coordenação, centrado na atualização de modelos, validação visual e suporte à decisão em contexto real de obra [1]. Este processo contribuiu também para a valorização progressiva do modelo BIM pelas equipas de obra, reforçando a utilização da informação digital como suporte complementar à documentação tradicional.

Por outro lado, o projeto evidenciou os limites da modelação digital. A representação tridimensional de cavidades naturais ou formações geológicas complexas não substitui a interpretação especializada nem elimina a necessidade de observação direta em obra. A integração futura com modelos geológicos e geotécnicos poderá reforçar este tipo de abordagem, desde que exista densidade de dados suficiente para evitar uma falsa perceção de precisão.

7. Conclusões

O caso de estudo de North Gorge demonstrou que a integração progressiva de múltiplas campanhas de levantamento por nuvem de pontos num modelo BIM federado pode constituir uma estratégia eficaz para o desenvolvimento de projetos em contextos territoriais complexos. A coexistência de cavidades naturais, património histórico, infraestruturas ativas e topografia irregular exigiu uma abordagem de coordenação tridimensional contínua entre fundações indiretas, redes técnicas e soluções de implantação. A utilização combinada de modelação BIM e nuvens de pontos permitiu antecipar interferências potenciais, testar cenários alternativos e apoiar decisões técnicas ao longo das diferentes fases do projeto.

Entre os principais contributos metodológicos observados destacam-se:

- Utilização consciente de modelação preliminar baseada em informação geométrica incompleta;
- Integração incremental de novas campanhas de levantamento sem substituição indiscriminada da informação existente;
- Utilização do modelo tridimensional como instrumento de validação espacial em proximidade de património e formações naturais;
- Coordenação estruturada de infraestruturas através de elementos técnicos integradores, como o Utility Tunnel;
- Reconhecimento explícito dos limites da representação digital em contextos geológicos complexos.

O modelo BIM funcionou não apenas como representação da solução final, mas como plataforma de evolução controlada da informação ao longo do desenvolvimento do projeto. Neste contexto, a integração progressiva de nuvens de pontos em ambiente BIM assumiu um papel comparável ao de modelos digitais de terreno em projetos convencionais, mas com maior capacidade de representação geométrica e validação tridimensional, contribuindo para reduzir o risco técnico associado à intervenção em territórios com forte condicionamento geométrico e patrimonial.

Agradecimentos

Os autores agradecem a North Gorge Properties, à SITUS Construction e aos gabinetes ARC Designs e AZO pelo enquadramento institucional, colaboração técnica e contributos de coordenação ao longo do projeto.

Referências

- [1] ISO 19650-1:2018, "Information management using BIM — Part 1: Concepts and principles," ISO, 2018.
- [2] F. Bosché et al., "Integrating Scan-to-BIM and Scan-vs-BIM techniques for construction monitoring," *Autom. Constr.*, 2015.
- [3] R. Volk, J. Stengel, and F. Schultmann, "BIM for existing buildings — Literature review and future needs," *Automation in Construction*, vol. 38, 2014.