

Implementação da metodologia BIM no projeto de obras de arte

<https://doi.org/10.21814/uminho.ed.142.15>

**Paulo Soares¹, Pedro Serra¹, Eva Jerónimo¹,
Cristina Costa¹, Gonçalo Mateus¹**

¹ COBA – Consultores de Engenharia e Ambiente SA, Lisboa

Resumo

A presente publicação pretende descrever as diferentes etapas de desenvolvimento e implementação da metodologia BIM ao projeto de obras de arte e a forma como a ferramenta BIM poderá evoluir o *modus operandi* do projeto. São analisadas 3 ferramentas de modelação BIM diferentes, sendo aplicada a um projeto real aquela que mais satisfaz as necessidades do projeto. Mesmo com os avanços tecnológicos das diferentes plataformas, é necessário recorrer a soluções criativas e originais para ultrapassar algumas das limitações identificadas. O objetivo do trabalho passa por, no final, obter um processo de trabalho digital que integre as etapas de modelação BIM, documentação do projeto, coordenação e cálculo estrutural.

1. Introdução

Atualmente assiste-se a uma transformação profunda na indústria da construção civil. O aumento do grau de exigência na concepção, construção e manutenção de infraestruturas aliado aos avanços tecnológicos registados no domínio da informática, têm motivado uma aposta na digitalização de processos com o objetivo de aumentar os níveis de eficiência e de qualidade na prestação de serviços, bem como na gestão do ciclo de vida.

Neste âmbito, a metodologia BIM (“Building Information Modelling”) que preconiza um processo de trabalho colaborativo centrado num modelo de informação digital que acompanha todo o ciclo de vida da infraestrutura, tem estado na génese do desenvolvimento de avançadas soluções de gestão integrada de projetos [1].

Com efeito, esta metodologia de gestão de projetos de construção tem registado resultados interessantes, com aplicações pontuais sobretudo nos países nórdicos [2] [3], EUA [4] e Austrália [5].

Neste enquadramento de crescente exigência, a COBA decidiu procurar e implementar soluções tecnológicas e processos de trabalho alicerçados na metodologia BIM, para a concepção de pontes e viadutos através da produção e manipulação de digital twins – representações digitais da obra de arte. O desenvolvimento desta nova metodologia teve como principal objetivo o incremento de qualidade dos projetos desta área através da integração das diferentes atividades de projeto: concepção, dimensionamento e documentação, tendo em consideração o potencial de aplicação ao restante ciclo de vida da infraestrutura, nomeadamente na monitorização, gestão e manutenção.

A presente publicação pretende descrever pormenorizadamente as diferentes etapas de desenvolvimento e implementação decorridas até ao momento na COBA, e apresentar os avanços e desafios identificados, descrevendo metodologias para ultrapassar estes desafios e potenciar todas as vantagens da utilização de digital twins no ciclo de vida das obras de arte.

A introdução desta nova metodologia de trabalho no projeto de obras de arte representa uma transformação a dois níveis: tecnológica – aquisição e desenvolvimento de ferramentas que respondam às necessidades do projeto – e processual – desenvolvimento e consolidação de novos métodos de trabalho apoiados nas novas tecnologias [6]. Tendo em vista estas duas vertentes, o trabalho foi organizado em três fases distintas. A primeira consistiu na identificação de ferramentas e tecnologias com potencial para responder às necessidades de projeto. Foram identificadas três soluções diferentes, que foram analisadas com o objetivo de identificar a solução que permitisse responder às necessidades de projeto de forma mais satisfatória. Ultrapassada esta etapa, partiu-se para a implementação em projetos piloto, perspetivando-se o estabelecimento de um novo método de trabalho para o desenvolvimento de obras de arte, alicerçado em ferramentas e processos digitais. A última

fase consistirá na consolidação deste método de trabalho com o objetivo de o tornar o padrão no desenvolvimento deste tipo de projetos dentro da empresa.

Antevê-se ainda uma quarta fase futura que possibilite a interação do modelo de cálculo integrado com o modelo BIM. Esta potencialidade, para além de um salto tecnológico da forma de realizar o projeto, permitirá em tempo real a adaptação da verificação da estrutura aos resultados da monitorização da mesma ao longo do tempo.

2. Avaliação de soluções

Como foi referido no capítulo anterior, o objetivo da primeira parte do trabalho consistiu na pesquisa de uma solução tecnológica que permita responder de forma adequada às necessidades do projeto de pontes e viadutos assim como de obras de arte correntes. Estas necessidades não diferem muito dos restantes projetos, e passam não só pela criação de modelos 3D, mas sobretudo pela sua utilização para incrementar a qualidade do projeto, nomeadamente através da documentação produzida (obtenção de peças desenhadas e quantificação), coordenação/integração com outras especialidades (em particular com o traçado de via que constitui um dado de base no projeto da obra de arte), e integração com os trabalhos de cálculo e dimensionamento estrutural.

Numa primeira análise ao software disponível no mercado, identificou-se um conjunto relativamente pequeno de ferramentas com real potencial para utilização no domínio das obras de arte. Das soluções identificadas foram analisadas as 3 que apresentavam características e abordagens mais interessantes:

- i) **Allplan** – Programa recente, desenvolvido especificamente para pontes, e com uma proposta inovadora sobre a integração do modelo de cálculo com o modelo BIM;
- ii) **Autodesk** – Reconhecidamente a maior softwarehouse de programas CAD e BIM, apresenta uma proposta para as obras de arte que envolve a utilização de diferentes programas e add-ons, alguns dos quais já em uso na empresa;
- iii) **Bentley** – A empresa utiliza já um conjunto alargado de programas desenvolvidos por esta softwarehouse, o que perspectivava uma simplificação no processo de aprendizagem e implementação. À semelhança do Allplan, a proposta da Bentley assenta numa solução desenvolvida especificamente para as obras de arte.

Assim, foram estabelecidos alguns parâmetros de avaliação para cada um dos programas, de forma a abranger as várias necessidades de projeto às quais é necessário dar resposta, nomeadamente:

- Capacidade das ferramentas de modelação na resolução dos problemas geométricos das obras, facilidade de utilização e adequabilidade às diferentes tipologias de obras em análise;

- Ferramentas e mecanismos disponíveis para a produção de documentação do projeto da obra, nomeadamente a extração de desenhos e de quantidades, bem como a qualidade destes outputs;
- Interação do modelo produzido com outros elementos de projeto (traçado da via, outras especialidades como a pavimentação e a drenagem, topografia e modelo digital de terreno);
- Interação entre o modelo físico (BIM) e modelo analítico para cálculo estrutural;
- Capacidade de integração numa metodologia BIM (adequação a possíveis requisitos BIM de donos de obra, e interoperabilidade via IFC).

O tipo de obras em análise apresenta uma variabilidade muito elevada no que diz respeito às soluções construtivas disponíveis ou aos materiais utilizados. Como tal, e com o intuito de avaliar qual o programa mais adequado às necessidades da empresa, foi escolhido um projeto já concluído, representativo do trabalho mais comum na empresa. Este projeto era composto por uma passagem superior de três vãos, com vigas de secção em I pré fabricadas, e que se desenvolvia sobre um traçado curvo tanto em planta como em perfil. Apresentam-se de seguida as principais valências e limitações dos programas analisados.

2.1. Allplan

A proposta da Allplan para as obras de arte especiais é inovadora, utilizando um fluxo de trabalho totalmente diferente dos restantes programas. Ao contrário da maioria das soluções, no Allplan, o trabalho de modelação desenvolve-se quase integralmente na plataforma de cálculo (AllplanBridge), com a criação do modelo analítico da obra de arte. Apenas posteriormente é obtido o modelo BIM, que surge como um output do modelo de cálculo. O modelo BIM é integrado na plataforma de modelação paramétrica generalista, o Allplan Engineering, onde são adicionados detalhes construtivos, é integrada a topografia de projeto, e são obtidas as peças desenhadas e listas de quantidades para documentação do projeto.

Em relação ao cálculo estrutural o programa apresenta uma interface simples e intuitiva, com um conjunto de passos sequenciais lógicos para a criação do modelo analítico da ponte, e que vão desde a definição planimétrica e altimétrica do traçado, até à programação da sequência construtiva, passando pela definição de secções, aplicação de cargas e pré-esforço ao longo do tempo. Apesar das valências, e à data em que a análise foi efetuada, o programa apresenta uma limitação relevante na modelação de elementos pré-fabricados.

Em virtude das dificuldades de modelação dos elementos pré-fabricados, foi necessário assumir uma simplificação do modelo de teste para prosseguir com a análise do software.

No que se refere à modelação, o programa Allplan Engineering conta com várias ferramentas, tanto paramétricas como de produção de formas livres, que permitem de forma eficaz complementar o trabalho de modelação necessário (produção de

elementos de outras especialidades como as drenagens, ou a integração da topografia para obter movimentos de terras). Estes elementos contêm toda a informação geométrica necessária, e são ainda complementados com os metadados típicos de elementos BIM como o material de que são compostos, propriedades físicas, variáveis geométricas, e até informação relativamente à operação e manutenção dos vários sistemas.

Foi também avaliada a capacidade de interação entre as duas plataformas: o Allplan Bridge e o Allplan Engineering (Figura 1). É importante conhecer os mecanismos que estas soluções oferecem na eventualidade de, durante o projeto, ocorrerem alterações relevantes na estrutura como uma mudança do alinhamento, uma alteração na dimensão dos vãos ou uma simples mudança da secção das vigas ou do tabuleiro. De acordo com o fluxo de trabalho, estas alterações terão de ser efetuadas no Allplan Bridge, seguidas de uma atualização do modelo físico (BIM) no Allplan Engineering. Apesar da ligação entre estas duas plataformas ser garantida internamente pelo software (ligação direta, sem recurso a ficheiros intermédios), verificou-se que se trata de uma simples operação de exportação/importação. Como consequência, todas as operações de modelação efetuadas no Allplan Engineering (como por exemplo a abertura de negativos para incorporar infraestruturas enterradas) são “perdidas” durante o processo. Esta situação representa uma menor eficiência no processo de modelação.

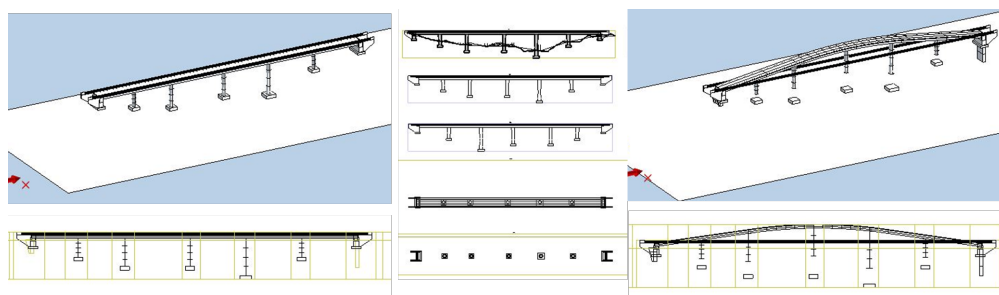


Figura 1
Modelo no Allplan – à esquerda o original, à direita uma alteração ao traçado.

O programa apresenta ferramentas adequadas, com várias opções de customização, que permitem extrair as bases de desenho e as listas de quantidades.

Em conclusão, o Allplan apresenta duas ferramentas abrangendo todas as etapas do projeto, com resultados bastante satisfatórios em particular para pontes betoadas in-situ. No entanto, foram identificadas duas grandes limitações: a dificuldade na modelação de elementos prefabricados, e a incapacidade de interoperabilidade entre as duas plataformas de trabalho que coloca obstáculos na gestão do projeto.

2.2. Autodesk

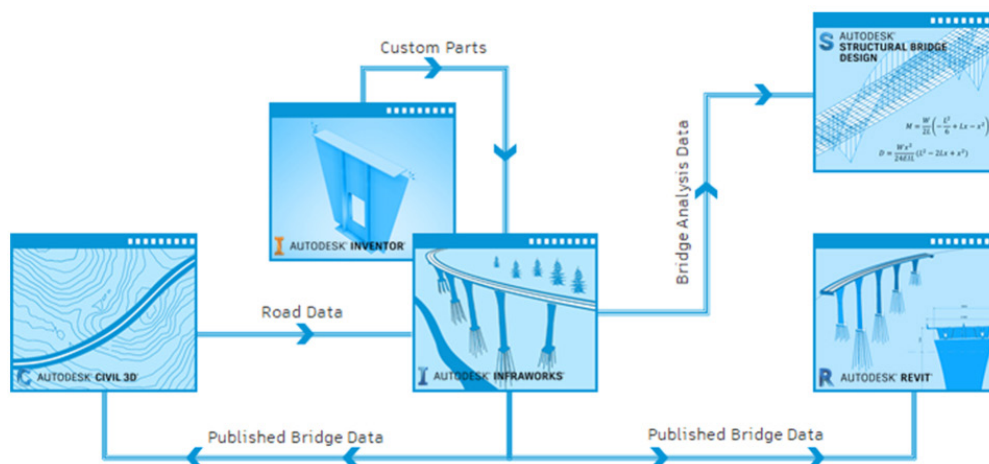
A Autodesk é provavelmente o maior fornecedor de software para a indústria AEC, com o Autocad e o Revit dois dos programas mais reconhecidos nas áreas do CAD e do BIM, respetivamente. Em relação às obras de arte, a Autodesk lançou recentemente uma proposta de abordagem baseada no funcionamento conjunto de vários

programas, nomeadamente: Civil 3D, Infraworks, Revit, Inventor e Autodesk Structural Bridge Designer.

A solução Autodesk apresentada aparenta ser complexa devido ao elevado número de programas a implementar para o desenvolvimento da obra de arte (Figura 2).

Figura 2

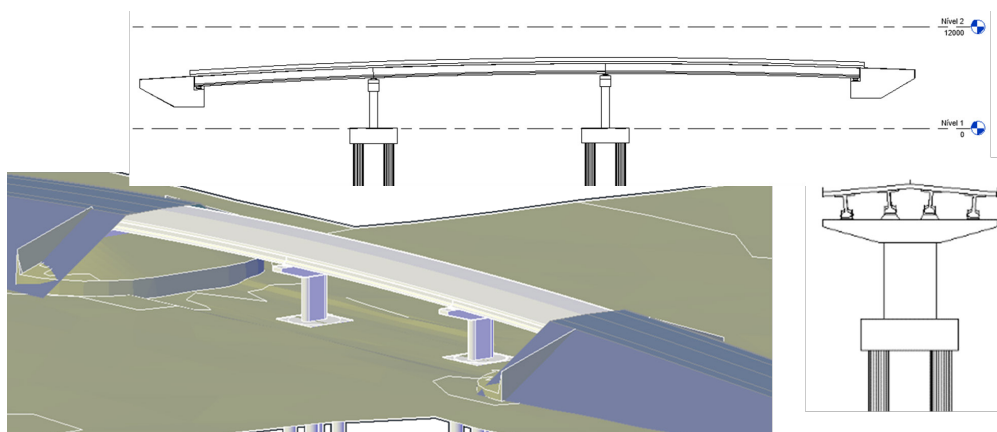
Solução da Autodesk – Programas e fluxo de trabalho. Adaptado de [7].



Aproveitando o facto de o alinhamento da ponte de teste, ter sido desenvolvido precisamente no Civil 3D, o primeiro passo da avaliação passou pela ligação entre este software e o Infraworks. A interoperabilidade entre os dois programas é direta, e com uma adequada capacidade de atualização na eventualidade de existirem alterações ao traçado. Nesta fase foram obtidos de forma correta o alinhamento, “corredores” da via, superfície da estrada e definição da secção transversal. O Infraworks permite integrar toda esta informação juntamente com a topografia resultante de um levantamento no local, ou em alternativa, a partir de uma base de dados própria da Autodesk, gerando não só uma superfície topográfica, mas também um conjunto de elementos reconhecidos de forma automática e que traduzem as estradas existentes, caminhos de água, edificações, etc. Apesar da baixa resolução, estes elementos podem servir como um ponto de partida para o trabalho de implantação da obra, sobretudo em fases de projeto muito iniciais.

Uma vez obtidos os elementos base para trabalho, foram testadas as ferramentas disponíveis para a modelação da obra de arte. Para o efeito, o programa conta com uma biblioteca relativamente extensa de objetos paramétricos, que permitem modelar de forma expedita o tabuleiro, a secção da ponte tanto para obras betonadas in-situ como em vigas pré-fabricadas, os pilares e os encontros. No entanto, e à semelhança do que se verificou no Allplan, para pontes de vigas pré-fabricadas, o programa apresenta alguns desafios na adaptação das vigas de forma satisfatória a traçados curvos, em particular em altimetria.

O passo seguinte no fluxo de trabalho proposto, é o de transpor a ponte para o Revit de forma a pormenorizar e complementar o modelo criado. Do ponto de vista geométrico a transposição para o Revit funciona corretamente, com todos os elementos da ponte traduzidos na integra (Figura 3).

**Figura 3**

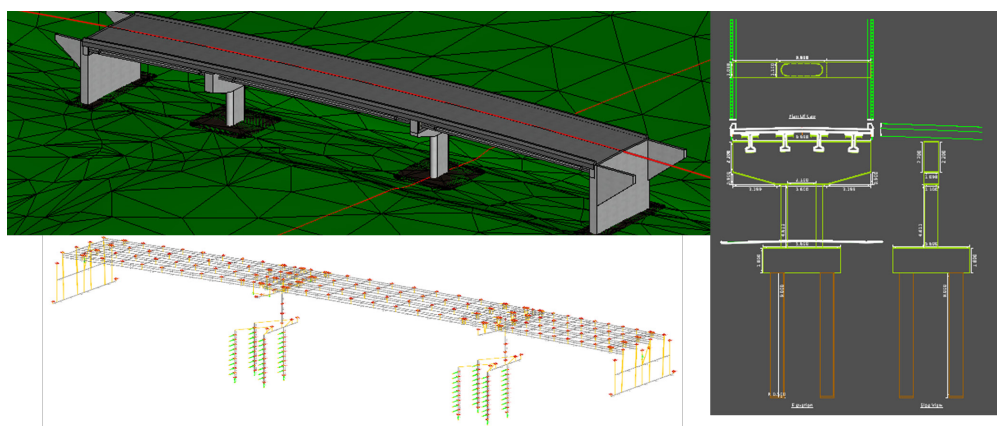
Modelo 3D (Civil 3D) – vista frontal e corte na zona do pilar (Revit).

Devido à limitação do programa Revit em gerar cortes ao longo de alinhamentos curvos, os desenhos que traduzem o perfil longitudinal da ponte têm de ser obtidos através do Civil 3D. Para o efeito é necessário obter o modelo da obra de arte neste software, o que pode ser feito a partir do Infracore (como sugere o fluxo de trabalho proposto pela Autodesk, e para o qual existe uma ligação direta entre os dois programas) ou do Revit (sendo necessário utilizar um ficheiro intermédio como o IFC ou o DWG). No caso em análise foram avaliadas as duas hipóteses, ambas com sucesso, verificando-se que em ambos os casos a geometria é obtida de forma correta no Civil 3D.

Em conclusão, a solução da Autodesk resolve apenas em parte, um dos principais problemas identificados no Allplan, relacionado com a geometria da obra de arte quando esta é suportada por elementos prefabricados. Ainda assim o programa mantém esta limitação quando o traçado da via apresenta elementos curvos em altimetria, sem oferecer qualquer workaround para a sua resolução. A integração do Civil 3D e do Revit no fluxo de trabalho proposto é uma mais valia desta solução, pela qualidade reconhecida dos programas amplamente utilizados na indústria.

2.3. Bentley

Por último, foi analisada a solução proposta pela Bentley (Figura 4).

**Figura 4**

Em cima: modelo BIM no OpenBridge;
À direita: cortes na zona do pilar;
Em baixo: modelo analítico no RM obtido automaticamente do modelo BIM.

A Bentley apresenta uma solução específica num pacote de software designado OpenBridge Designer, que inclui o OpenBridge Modeler (OBM) – ambiente de trabalho para modelação paramétrica da ponte – e o RM Bridge (RM) – software de cálculo estrutural específico para pontes. A proposta da Bentley para as obras de arte passa pela criação do modelo BIM no OpenBridge Modeler, e posterior análise no RM, em que o modelo de cálculo é obtido do modelo físico através de uma ligação direta interna entre os dois programas.

A análise do programa teve início com a definição do traçado da via onde a obra de arte está inserida. À semelhança das soluções anteriores, o programa conta com um conjunto de ferramentas de modelação, apoiadas em objetos paramétricos, mas neste caso, permitindo a correta adaptação da geometria das vigas pré-fabricadas retas, ao alinhamento curvo da via, tanto altimetricamente como planimetricamente.

A biblioteca de objetos paramétricos é relativamente extensa, e permite ainda a criação de novos objetos diretamente dentro do programa (ainda que seja uma tarefa reservada a utilizadores experientes). Também a interatividade entre alinhamento, obra de arte e DTM é muito elevada, bastando alterar por exemplo, as dimensões da fundação, para que o volume de escavação associado seja atualizado em conformidade automaticamente. De facto, a facilidade na modelação da obra de arte com as ferramentas paramétricas do OpenBridge Modeler permitiu aprofundar as capacidades do software, que nas outras soluções não foi possível.

Resumidamente, a solução da Bentley foi a que permitiu resolver o problema das pontes prefabricadas de forma mais eficaz. Dada a limitação relevante relativamente à forma como a secção das vigas é extrudida é simples a substituição destes elementos por vigas reais. A resposta mais eficaz do software a este problema permitiu que fossem testadas situações novas e consequentemente, detetar novos problemas. Estes apenas são ultrapassados através da modelação não paramétrica.

Apesar de serem muito diferentes nas abordagens ao problema, as três soluções apresentam algumas características comuns, nomeadamente naquela que parece ser a maior dificuldade técnica: a correta modelação de soluções prefabricadas. Ainda assim, a solução da Bentley destacou-se das restantes por ser a que produzia o modelo mais aproximado à realidade. Este foi um dos motivos que levou à escolha deste programa para a fase seguinte de implementação em projeto piloto que irá ser apresentada de seguida.

3. Projeto piloto

Concluída a fase de avaliação das soluções, foi escolhido um projeto em curso para implementação do novo processo de trabalho suportado pelo OpenBridge Designer. O projeto escolhido contemplava 4 passagens superiores com soluções construtivas de vigas pré-fabricadas (representativas do tipo de obra de arte mais comum nos projetos desenvolvidos na empresa). As 4 passagens superiores eram obras com muitas semelhanças no que diz respeito à sua implantação com 3 vãos de dimensões

idênticas, à solução estrutural do tabuleiro integrando vigas de betão pré fabricadas e à geometria (secções de tabuleiro e vigas semelhantes, encontros e pilares também com uma geometria idêntica entre as 3 obras de arte).

Apesar do risco associado, apenas é possível ter uma real perceção das valências e limitações da ferramenta, numa situação real de projeto. Por esse motivo, e numa ótica de otimização de recursos, optou-se por aplicar esta nova metodologia de trabalho ao projeto em curso, utilizando os modelos para, no imediato, documentar o projeto em desenvolvimento.

O desenvolvimento da primeira obra veio confirmar algumas das conclusões retiradas da fase de avaliação, nomeadamente as melhorias que a ferramenta permite obter na forma como a obra de arte é implantada, mesmo com as limitações apresentadas anteriormente. O facto de os modelos estarem a ser utilizados para o projeto real gerou a necessidade de criar um processo de trabalho novo que permitisse contornar as limitações da ferramenta. Nem todos os elementos puderam ser modelados de forma paramétrica, o que cria alguns constrangimentos quando o utilizador é confrontado com uma alteração. Delinearam-se por isso dois momentos distintos de modelação: o primeiro, designado por “paramétrico” onde se procura modelar com a maior exatidão possível, todos os elementos da ponte que podem ser obtidos com as ferramentas paramétricas; e um segundo momento, onde este modelo é arquivado, e se passa à modelação livre dos restantes elementos, corrigindo os objetos paramétricos e adicionado a pormenorização necessária. Quando existe uma alteração ao projeto que se reflete na geometria da obra de arte, o utilizador deve avaliar o impacto dessa alteração e decidir se a implementa apenas no modelo final, ou se necessita de modificar o modelo paramétrico (grandes alterações como a modificação do traçado da via), e reiniciar o processo. Neste segundo caso, a manutenção do antigo modelo final, permite recuperar muitos dos detalhes e da geometria que foi modelada de forma livre, para a nova solução, com ganhos de eficiência relevantes.

A aplicação num projeto real (Figura 5) fez surgir novas questões, como por exemplo, o impacto das sobrelevações da via na obra de arte, e a sua modelação. Para este caso, o software deu uma resposta eficaz, permitindo introduzir estes efeitos de uma forma relativamente simples, em que a parametrização das secções transversais das vigas e do tabuleiro, reagiam de forma adequada a uma variação da posição da secção em função da sobrelevação.



Figura 5
Modelo BIM no
OpenBridge.

Durante este projeto, foi efetuado em simultâneo, um esforço de modelação analítica com o RM. Os resultados desta análise foram posteriormente comparados com a análise efetuada durante o projeto através das ferramentas habitualmente utilizadas. Este trabalho teve como objetivo familiarizar os utilizadores nesta nova ferramenta, e aumentar o grau de confiança da equipa de Engenharia neste novo programa, antes de uma aplicação generalizada do mesmo às obras em análise. Neste momento, o projeto das 4 obras está completo e entregue ao dono de obra, tendo sido produzidos 32 desenhos de projeto totalmente a partir do BIM e 56 bases de desenho para produção de armaduras, totalizando 88 peças desenhadas, resultando em 80% do desenho do projeto oficialmente apresentado realizado a partir do modelo BIM.

4. Conclusões

O processo de análise de soluções tecnológicas para o problema abordado, evidenciou o nível de complexidade que as obras de arte apresentam, tanto pela geometria complexa que as compõe, como pela multiplicidade de soluções estruturais/construtivas e de materiais utilizados na sua execução. Importa referir que, atualmente, este tipo de software evolui rapidamente, e muitas das limitações encontradas, serão provavelmente resolvidas em versões futuras.

Mesmo com as limitações identificadas, podemos concluir que a utilização de modelos digitais nas obras de arte representa um avanço significativo para este tipo de projetos. O rigor e fiabilidade das soluções obtidas aumenta, através da implementação de uma metodologia de trabalho tipo BIM, suportada por um digital twin da obra de arte. Até à data, este novo processo de trabalho não representa ainda um aumento de eficiência quando comparado com o processo tradicional. No entanto, nesta fase, foi investido tempo e recursos consideráveis na formação de utilizadores e na adaptação às novas ferramentas de trabalho, pelo que se perspetiva que este indicador venha a melhorar em aplicações futuras.

A partir deste projeto piloto formaram-se novas capacidades, tendo então sido adotadas novas metodologias de trabalho por forma a fazer face ao desafio da realização de Digital Twins. Um dos principais desafios foi a necessidade de criar novos métodos por forma a estabilizar os processos de engenharia que alimentam a realização do modelo BIM. Verificou-se também que a realização de partes do modelo de forma modular permite tirar melhor desempenho do todo o processo. Concluiu-se ainda que, ao contrário do que inicialmente se previu, os modelos BIM são uma ferramenta muito eficaz em fases preliminares da elaboração dos projetos e que englobam outras frentes de projeto como a integração viária e paisagística (ver Figuras 6 e 7).



Figura 6
Modelos OpenBridge
em BIM – Ponte de
avanços sucessivos
integrado no DTM e
Passagem Superior
Pedonal.

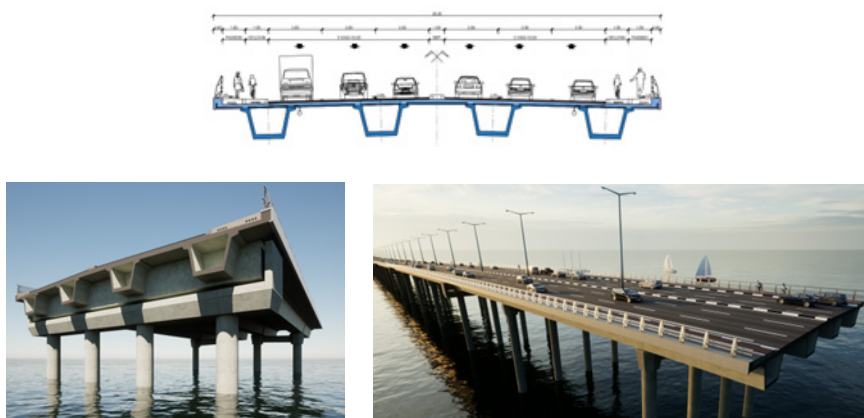


Figura 7
Modelo OpenBridge
exportado para um
programa de tratamento
de imagem.

Mais recentemente a equipa de BIM da COBA tem estado envolvida em novos desafios que respeitam a implementação do registo de dados de instrumentação instalada em pontes para o Modelo de gestão BIM em tempo real.

Desafios do futuro do Digital Twin – BIM

Os primeiros registos de um plano de representação à escala em pedra calcária com 80cm por 32cm foi encontrado na Jordânia por arqueólogos e datam de há nove mil anos atrás[8]. Parece assim provável que, com a utilização de um modelo digital tridimensional, muita da documentação habitualmente utilizada para transmitir a imagem da obra de arte, se torne obsoleta. A utilização de, por exemplo, alçados desenvolvidos ou secções-tipo, pode deixar de fazer sentido neste novo contexto. Estes elementos têm pouca adesão ao rigor geométrico da obra e são representações esquemáticas que pretendem facilitar a compreensão da obra em vez de a definir. Com a generalização dos modelos digitais, esta necessidade deixa de existir, podendo as representações esquemáticas ser substituídas por imagens do modelo 3D da obra de arte. Neste novo processo de trabalho, a obtenção deste tipo de elementos, sem adesão à realidade, é, inclusive, muito difícil de executar. Este tipo de situações estende-se a outras situações, como por exemplo na obtenção de mapas de quantidades de trabalho. A extração de quantidades apoiada pelo modelo 3D, torna igualmente obsoleta a representação detalhada que atualmente é utilizada, para rastrear e verificar a correção da medição. Há ainda a reter que o conceito do Digital Twin ultrapassa em muito o projeto de construção. Permite capacitar o Dono de Obra de uma ferramenta de gestão, manutenção e exploração do empreendimento.

No entanto, esta transformação dos outputs do projeto só poderá ocorrer quando a utilização destas metodologias for generalizada tanto por Projetistas, como Empreiteiros e Donos de Obra.

Referências

- [1] C. M. Eastman, P. Teicholz, R. Sacks, and K. Liston, *BIM handbook : a guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers, and contractors*. Hoboken, NJ.: Wiley, 2011.
- [2] J. Johansen, "BIM in Bridge Design," Norwegian University of Science and Technology, 2013.
- [3] T. Kivimaki and R. Heikkila, "Bridge Information Modeling (BrIM) and model utilization at worksite in Finland," 27th Int. Symp. Autom. Robot. Constr., 2010.
- [4] Beyond Design, "Bay Bridge Construction". [Online]. Disponível em: <https://beyonddesign.typepad.com/posts/2013/09/bay-bridge-construction.html>
- [5] Bentley Systems, Incorporated, "2021 Infrastructure Yearbook " Bentley, 2022
- [6] S. Chen and et al., "Accelerating the Design and Delivery of Bridges with 3D Bridge Information Modeling: Pilot Study of 3D-Centric Modeling Processes for Integrated Design and Construction of Highway Bridges," Transp. Research Board Natl. Acad., 2006.
- [7] Autodesk, "Bridge Design – Customer Success Hub". [Online]. Disponível em: <https://customersuccess.autodesk.com/challenges/bridge-design>
- [8] <https://newatlas.com/science/worlds-oldest-blueprints-desert-kites/>