

## ENSANCHE DEL PUENTE DE CABRIANES NO RIO "LLOBREGAT" (BARCELONA, ESPANHA)

Benjamim Dominguez Santana e Begoña Martín Cabezón

<sup>1</sup>Comsa SAU, Departamento Técnico. Unidade de Infraestructuras. , Avda Roma 25, Barcelona, 08029, Espanha.

E-mail: benjamin.dominguez@comsa.com <http://www.comsa.com>

<sup>2</sup> Comsa SAU, Departamento Técnico. Unidade Infraestructuras Avda Roma 25, Barcelona, 08029, Espanha.

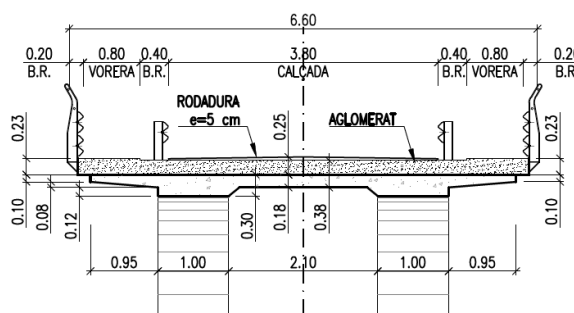
### Resumo

Uma ponte de arco de betão armado com quase 100 anos sobre o rio Llobregat, em Cabrianes, faz parte da mais antiga tipologia tradicional da ponte espanhola. O aumento das necessidades de capacidade de tráfego da ponte e as exigências dos peões/ciclovias, leva ao alargamento do pavimento à dupla largura, que juntamente com um mau estado de manutenção da ponte, surgem os principais objetivos de nível de serviço, custos de segurança e manutenção da ponte: reparar, fortalecer e alargar a velha ponte? ou demolir e construir um novo? Este artigo aborda os principais fatores de tomada de decisão sobre a questão acima referida, juntamente com as diferentes soluções estruturais examinadas.

**Palavras-chave:** Ponte; reabilitação; serviço; segurança estrutural; BIM.

## 1 INTRODUÇÃO, MOTIVAÇÃO E METODOLOGIA

Uma ponte de arco de betão armado com quase 100 anos com tabuleiro superior (veja a Figura 2), está localizada do outro lado do rio Llobregat, na cidade de Cabrianes (Barcelona, Espanha), na estrada local B-430. A ponte de arco é constituída por 3 vãos de cerca de 22,00 m de comprimento cada, e 6,60 m de largura (veja a Figura 1), que atualmente mal permite que os carros circulem numa faixa de rodagem para cada sentido e um caminho pedestre muito estreito de um lado, além de grades de segurança.

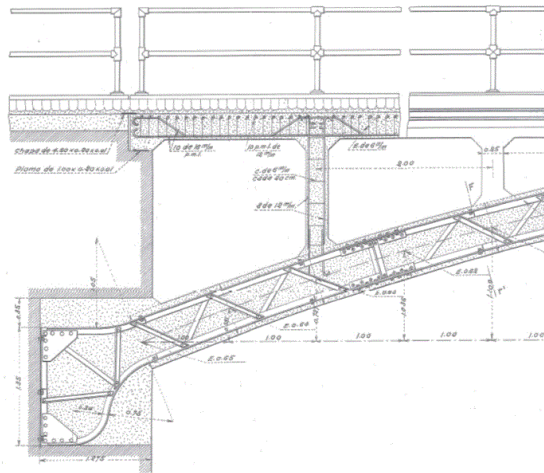


**Figura 1. Seção transversal da antiga ponte existente (fonte: Ribera, 1923)**



**Figura 2. Vista geral da antiga Ponte de Cabrianes (fonte: Autores)**

Esta ponte de arco faz parte das primeiras pontes de arco de betão armado em Espanha, que seguiam um sistema estrutural formado por dois arcos de betão de baixa altura (sag/comprimento = 1/10) com secção transversal retangular, onde o reforço é composto por duas treliças de aço liso com uma função adicional onde, e em primeiro lugar, tinham a função de falsos apoios durante a construção do arco (Ribera, 1923) (ver Figura 3).



**Figura 3. Secção longitudinal do antigo reforço da ponte (fonte: Ribera, 1923)**

O aumento das necessidades de capacidade de tráfego da ponte e as exigências dos peões/ciclovias, leva ao alargamento do tabuleiro para o dobro da sua largura, o que, juntamente com o mau estado de manutenção da ponte, nos faz pensar se: reparar, fortalecer e ampliar a antiga ponte ou demolir e construir uma nova?

Este artigo discute os principais fatores para a tomada de decisão sobre a questão acima:

- diagnóstico e avaliação estrutural da ponte existente, estimando os níveis de segurança estrutural
- diferentes soluções estruturais que vão ao encontro das limitações técnicas, económicas, de segurança e de prazos.

Posteriormente, discute-se o desenho conceptual do sistema estrutural finalmente adotado. O sistema estático da ponte é formado por um único arco de betão armado novo, de (apenas) 2 m de desenvolvimento, colocado ao centro do par de arcos antigos existentes e com uma largura de 12,15 m. Além disso, são introduzidos outros elementos-chave inovadores de construção, tais como lajes de placas bidirecionais pré-fabricadas e sistemas de ligação de placas de longa duração desenvolvidos ad hoc.

Além disso, são também apresentadas fases de demolição parcial e processos de construção com medidas temporárias específicas tomadas, incluindo as obras de reparação finais dos elementos existentes da ponte e outros problemas normais ocorridos durante as obras.

Por último, é introduzida a Metodologia BIM, que foi implementada para analisar a geometria proposta do projeto e para a realização de um acompanhamento mensal dos progressos in situ, juntamente com o modelo BIM As-built que também foi elaborado e alimentado pelos dados recolhidos in situ, considerando famílias e parâmetros específicos para compatibilidade com o Sistema de Gestão de Pontes implementado pela Generalitat da Catalunya.

## 2 DIAGNÓSTICO E AVALIAÇÃO DA PONTE ANTIGA

O projeto de reabilitação original, desenvolvido pela empresa de consultoria Pedelta, incluiu o diagnóstico completo de elementos estruturais e equipamentos da ponte onde foram detetados e registados estados avançados de deterioração e falta de manutenção. Assim, de acordo com os índices de classificação de gravidade propostos no projeto acima referido, foi atribuído um índice de deterioração 3 à ponte atual, o que significa danos graves com ações de reparação necessárias a curto prazo, a fim de evitar riscos de instabilidade estrutural.

De acordo com o projeto da Pedelta, as principais patologias estruturais detetadas foram:

- Perda significativa de massa da superfície do betão onde se destaca o estado de oxidação avançada do aço em arcos próximos de secções transversais presas em estribos.

- Fissuração longitudinal e transversal causada pela corrosão das barras de reforço, deformação e efeitos reológicos nos anéis de arco, na face inferior da laje do tabuleiro e nas vigas laterais do tabuleiro.
- Perda de placas de betão com exposição das barras de reforço, com avançado estado de corrosão, na face inferior do tabuleiro.
- Fissuração generalizada na parte inferior da secção de junção do arco e laje do tabuleiro, provavelmente devido a efeitos reológicos.
- Perda significativa de secção de betão por infiltração de água e eflorescências devido a uma drenagem inadequada em áreas próximas das juntas do tabuleiro.
- Rachas na base das escoras verticais devido ao movimento reológico e térmico diferencial.
- Perda de revestimentos exteriores em pilares e estribos de betão causados pela ação de descongelação da água acumulada dentro das bolhas de ar.
- Fissuras verticais e inclinadas em estribos e pilares, devido a tensões de compressão excessivas, e cinzelamento em torno das áreas de suporte do tabuleiro.

Uma vez nas fases anteriores da fase de construção, a Área de Direção Técnica da COMSA realizou uma nova inspeção e diagnóstico do estado real da manutenção e segurança da ponte, confirmando a avaliação do projeto, como se pode ver na figura seguinte (veja a Figura 4).



**Figura 4. Vista da área do arco inicial no estribo Este (fonte: Autores)**

Por outro lado, a partir de alguns ensaios destrutivos realizados no âmbito do projeto para caracterizar as características e o estado dos materiais estruturais, estimou-se a capacidade de suporte dos arcos, assumindo a hipótese de uma boa união de betão de aço devido à presença de armaduras horizontais, juntamente com diagonais, onde, ambos os elementos tipo, foram formados por perfis de aço em ‘L’ laminados a quente.

Por conseguinte, a capacidade máxima de flexão da secção transversal do arco inicial poderia ser estimada a partir da análise da secção transversal, considerando uma resistência média do betão de 28 MPa a partir dos resultados dos ensaios, a ligação perfeita entre os materiais e a não redução das dimensões da secção devido a perdas de cobertura de betão, obtendo um valor final de carga de resistência de cerca de 800 kN·m, como se pode ver na figura abaixo.

Os novos requisitos de largura do tabuleiro da ponte e o aumento dos valores de carga associados ao tráfego, para adaptar o desenho ao Modelo de Carga EC 1 (LM1), implicaram um aumento das forças internas dos arcos de cerca de quatro vezes em comparação com a configuração do tabuleiro da ponte anterior. Além disso, surgiram novos mecanismos de resistência, como a torção, que não ocorriam com as cargas quase simétricas da antiga ponte.

Assim, uma vez que os arcos de suporte existentes não tinham capacidade suficiente para suportar novas e substancialmente aumentadas forças internas, surgiram dois cenários diferentes para analisar:

- Construção de uma nova ponte paralela à antiga com duas alternativas possíveis de largura e utilização: largura do tabuleiro para circulação rodoviária e via pedonal/ciclovias; ou nova ponte para vias de trânsito

rodoviário e barreiras de segurança, complementada pela reabilitação da antiga ponte que se mantém apenas para uso pedonal/ciclovia.

- Construção de novos elementos estruturais de suporte de carga integrados na estrutura da antiga ponte.

### 3 PRINCIPAIS CONSTRANGIMENTOS E FACTOS DE DESIGN

A tomada de decisão foi fortemente marcada por restrições de conceção e factos fundamentais que resumem os relacionados na lista seguinte:

1. Preservação cultural de antigas obras de arte e estética:

A ponte com 100 anos fazia parte das primeiras pontes de arco de betão armado de Espanha e da vista paisagística do rio Llobregat, na cidade de Cabrianes, que convidam a preservar em qualquer ação a realizar:

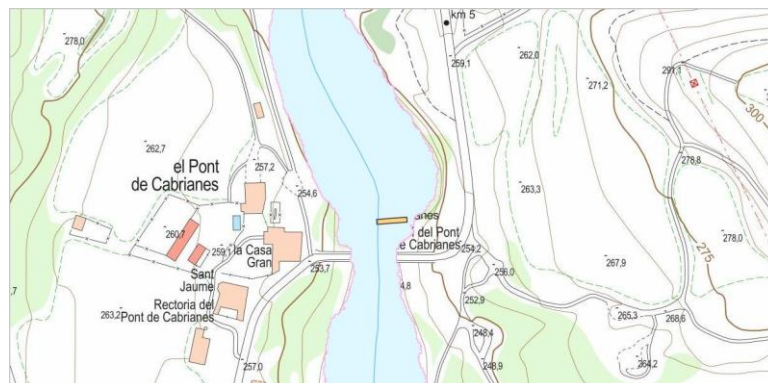
- o as principais formas existentes de ponte
- o não bloquear a sua vista
- o propor tipologias com alguns valores estéticos.

2. Minimizar o corte de tráfego da estrada B-430:

Foi uma necessidade no contrato para minimizar a disrupção no tráfego da ligação à cidade de Cabrianes com a estrada C-16 fechada.

3. Requisitos hidráulicos do Gabinete catalão de Gestão da Água (ACA):

Os pilares de qualquer nova ponte devem estar longe da inundação máxima do período de retorno de 100 anos.



**Figura 5. Plano máximo de inundação para um período de regresso de 100 anos (fonte: ACA)**

Este regulamento implicava que a nova ponte tinha de atingir um comprimento total mínimo de 200 m, enquanto a ponte antiga poderia manter o seu comprimento atual.

4. Parâmetros geotécnicos das fundações

A localização da ponte sobre o rio Llobregat assenta numa sucessão de estratos macios sobre uma camada resistente de marga branda.

Assim, qualquer novo apoio ou reforço do antigo deve ser estabelecido em fundações profundas.

5. Perfil longitudinal da ponte

Qualquer alternativa deve manter um comprimento do vão mínimo de 22 m para manter a limpeza da água do rio e evitar a erosão hidrodinâmica entre os suportes não alinhados.

6. Secção transversal do tabuleiro

Qualquer alternativa deve ter 2 faixas de rodagem de 3,5 m de largura, bermas de 1,5 m de largura, grades de separação e faixa pedonal de 2,5 m de largura.

7. Sistema estrutural

A proposta deve ser simples, de baixa e fácil manutenção, sendo desejável a tipologia que mantém as formas originais.

O aumento das cargas e o mecanismo de resistência adicional, por precaução, devem conduzir à conceção de novos elementos suficientemente robustos, uma vez que qualquer reparação e fortalecimento dos elementos antigos não foi capaz de suportar as novas forças.

8. Durabilidade

Os novos elementos estruturais devem ser concebidos para uma vida útil de 100 anos, utilizando novos materiais e estratégias de conceção para maximizar a durabilidade.

9. Prazo

Como consequência da minimização dos cortes de trânsito e do incómodo para os residentes, a par de minimizar os efeitos das obras no rio Llobregat durante a construção, será necessário reduzir os tempos de construção.

10. Economia

Como qualquer projeto público de engenharia, a poupança de custos foi um facto importante na tomada de decisões.

## 4 ANÁLISE

A análise de todas as alternativas foi realizada de acordo com as principais restrições e factos tidos em conta, atribuindo diferentes pesos a cada uma delas de acordo com a sua importância.

Finalmente, a estética e a preservação cultural, juntamente com o traçado da estrada e a elevação longitudinal da ponte foram vencedores a taxas económicas e prazos semelhantes, enquanto outros fatores permaneceram idênticos, como a durabilidade.

Uma vez selecionados conceptualmente, outro fator importante na solução final adotada foi o sistema de ligação dos elementos estruturais, que correspondem a uma análise ótima da resposta estrutural. Assim, foram encontradas as seguintes restrições ideais entre os elementos:

- Arco – Escoras: fixo
- Escoras – Tabuleiro: fixação simples

## 5 DESIGN CONCEPTUAL DA SOLUÇÃO ESTRUTURAL

A solução estrutural finalmente adotada para satisfazer todas as restrições e requisitos consistia em construir um novo arco único no meio do par dos antigos existentes.

Este arco de 1,90 m de largura e espessura de 1,00 m a 0,70 m de secção média é suportado por grupos de microestacas perfuradas através da subestrutura existente que transmitem cargas de reação do tabuleiro transmitidas à camada de rocha de suporte em profundidade. As reações horizontais do arco nos pilares levaram ao arranjo de microestacas inclinadas.

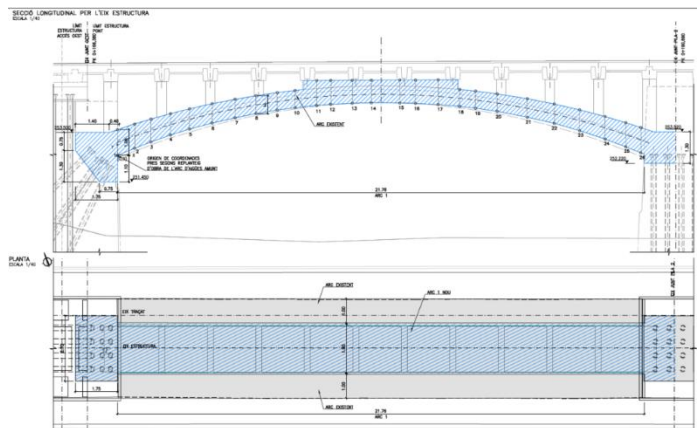


Figura 6. Elevação e plano do novo arco (fonte: Projeto de construção modificado)

O sistema estático dos arcos é contínuo através de suportes médios e restrições fixas em ambas as extremidades, que foram materializadas por estacas de RC colocadas no lugar, dispostas no interior de caixas perfuradas nas subestruturas existentes. O arco está solidamente ligado à laje do tabuleiro no seu terceiro tramo central.

As escoras interiores verticais RC de 1,90 m de largura e 40 cm de espessura, começam fixas na sua base num arco e, simplesmente, suportam, na direção longitudinal, a laje do tabuleiro de 12,15 m de largura total. Enquanto as escoras verticais laterais, em cada extremidade do arco sobre a subestrutura existente, são fixadas nas bordas curtas, inferiores e superiores.

O tabuleiro é moldado por placas pré-fabricadas RC bidirecionais onde, no local, é colocado o betão para dar forma à secção transversal final. São compostas por vigas longitudinais de núcleo longitudinal e lajes nervuradas de cada lado.

Note-se que, para minimizar os efeitos das deformações sobrepostas, o tabuleiro é interrompido sobre a secção dos pilares através de juntas estruturais ocultas.

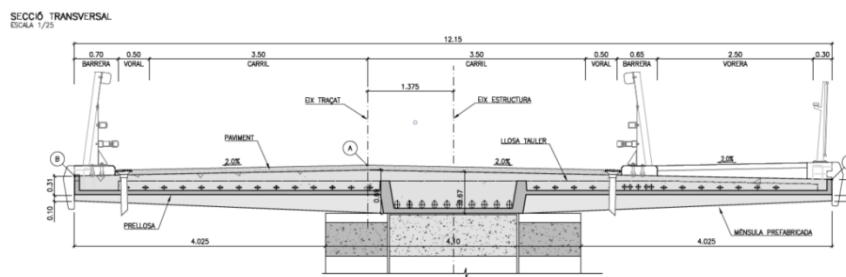


Figura 7. Secção transversal da ponte (fonte: Planos de Projeto Modificados)

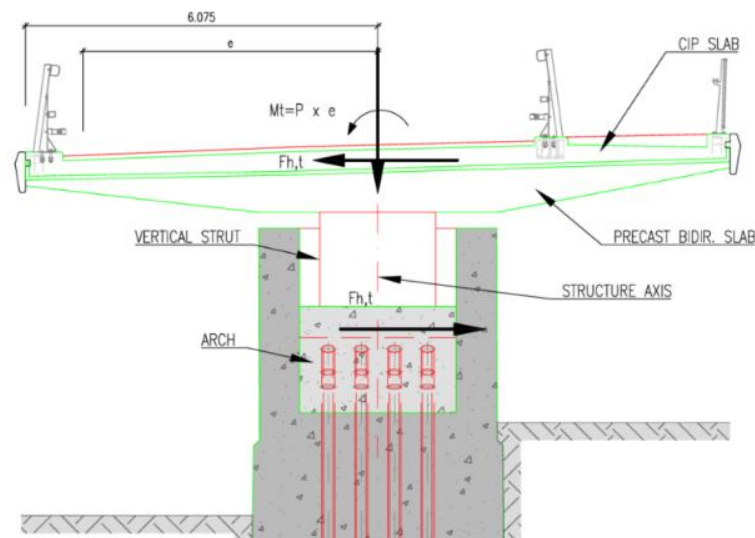
Todo o sistema assim projetado, formado por arcos – escoras e tabuleiro, comporta-se estruturalmente de uma forma muito eficiente, principalmente devido a:

- sua elevada rigidez à flexão longitudinal
- distribuição adequada da rigidez à flexão entre o arco e a tabuleiro
- mecanismo de capacidade torsional eficiente
- sistemas de ligação adequados e duráveis entre os diferentes elementos estruturais

O sistema estrutural tem um mecanismo de capacidade torsional muito eficiente (Millanes & Matute, 1999), cuja operação é resumida da seguinte forma:

- A laje do tabuleiro recebe e distribui cargas excêntricas através de costelas transversais
- O núcleo da laje do tabuleiro suporta e transfere as forças torsionais para as escoras verticais

- Um par de forças horizontais ao nível do tabuleiro e arco são suportados por ambos os elementos ligados por escoras verticais, como mostrado no diagrama seguinte.



**Figura 8. Esquema do mecanismo de capacidade torsional (fonte: Autores)**

Além disso, a torção também transmite forças para os suportes.

## 6 DESENVOLVIMENTOS INOVADORES AD-HOC

Como mencionado acima, os principais elementos inovadores ad-hoc foram estabelecidos durante a conceção e ajustados durante os trabalhos, a fim de cumprir as principais restrições, tais como redução de prazos e melhorias na durabilidade.

Assim, os principais elementos estruturais inovadores desenvolvidos para este projeto foram:

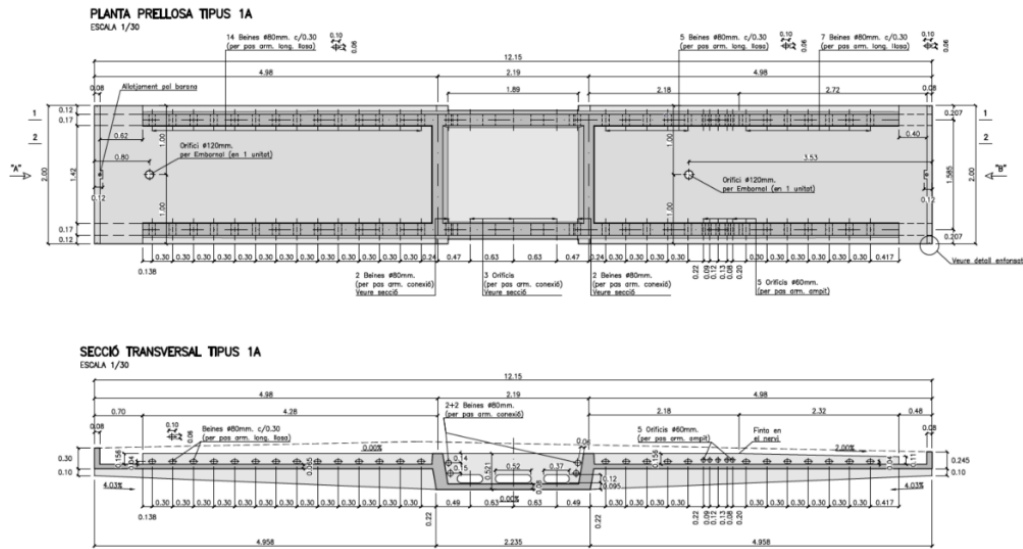
- Placas de RC pré-fabricadas bidirecionais: permitindo a construção de lajes de forma fácil e rápida sem a necessidade de cofragem, andaimes e cimbra.
- Ligações duradouras entre escoras e tabuleiro: para simplificar e tornar duradoura e rígida a ligação fixa entre as escoras verticais e a laje de tabuleiro.

A construção da laje foi originalmente concebida, nos planos do projeto, por vigas cruzadas pré-esforçadas fixadas em escoras para apoiar lajes de forma pré-fabricadas onde o betão da laje foi colocado e endurecido.

No entanto, alguns problemas detetados durante a análise do projeto, no que diz respeito à execução das vigas cruzadas e com as barras de ligação de alinhamento, o seu posicionamento e durabilidade, levaram ao desenvolvimento de uma laje de RC pré-fabricada bidirecional com uma função tripla de:

- Formação do betão in situ
- Fortes costelas transversais para reforço de laje do tabuleiro.
- Simplificar o suporte nas escoras verticais, melhorando a ligação, durabilidade e restrições estáticas do sistema estrutural.

As seguintes figuras mostram os esquemas bidirecionais e o fabrico de lajes pré-fabricadas.



**Figura 9. Planos da pré-laje tipo (fonte: Projeto de construção modificado)**



**Figura 10. Placa pré-fabricada tipo bidirecional (fonte: Alvipre Factory S.L.)**



**Figura 11. Vista durante a execução do tabuleiro no vão central (fonte: Autores)**

Analisadas várias configurações de restrições entre as secções transversais do arco, escoras e interface com o tabuleiro, sendo a solução ideal encontrada considerar fixa na parte inferior e articulada no topo das escoras para forças longitudinais e deslocamentos, enquanto sendo fixas em ambas as secções para forças transversais.

## 7 METODOLOGIA E FERRAMENTAS BIM

A metodologia BIM foi implementada pela COMSA durante a monitorização e desenvolvimento do trabalho de projeto. A informação do projeto foi gerida centralmente e acessível a todas as partes interessadas envolvidas num ambiente comum e aberto de dados gerido de acordo com as normas oficiais: UNE-EN ISO 19650-1 e UNE-EN ISO 19650-2.



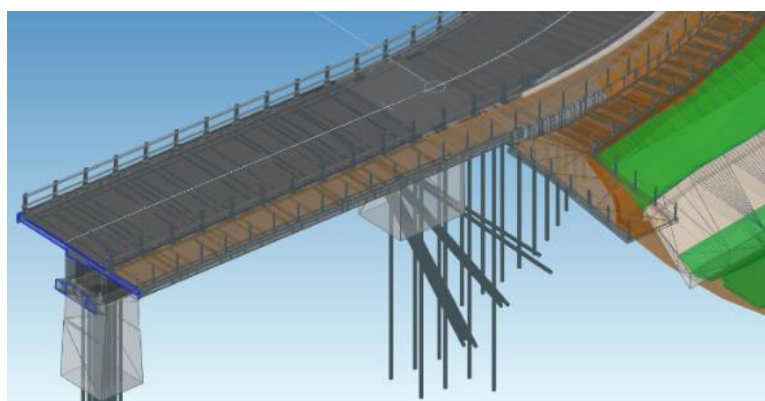
O objetivo da implementação da Metodologia BIM foi o de detetar antecipadamente possíveis problemas e recolher a informação da obra executada num modelo 3D enriquecido com metadados, bem como monitorizar o progresso da obra de forma visual.



**Figura 12. Modelo BIM integrado da ponte (fonte: Autores)**

O modelo original de estruturas preexistentes e terreno envolvente foi implementado através da análise do modelo 3D BIM gerado a partir de desenhos de projetos para a procura precoce de inconsistências. Portanto, a estrutura existente e projetada foram incluídas, juntamente com os troços do eixo rodoviário e da plataforma.

Elementos estruturais, drenagem, sinalização vertical e instalações de serviços afetados foram modelados utilizando REVIT, enquanto elementos de estrada, como plataforma, terreno e sinalização horizontal, foram introduzidos através do OPENROADS, um software específico de conceção de infraestruturas.



**Figura 13. Vista das secções e fundações no modelo BIM (fonte: Autores)**

O modelo as-built foi desenvolvido durante a progressão das obras, recolhendo, centralmente, toda a informação relevante sobre o processo de execução. Este modelo combina a geração de elementos de acordo com a secção tipo verificada no local com a modelação de superfícies geradas a partir de levantamentos topográficos realizados diretamente in situ.

A compatibilidade entre modelos gerados por diferentes softwares foi garantida exportando a informação para formatos IFC e, depois, integrada num único modelo em formato BIM aberto. Assim, a gestão digital da informação tem sido possível através da utilização de modelos integrados em formato BIM aberto, através do qual o Cliente público tem sido capaz de monitorizar mensalmente e virtualmente a evolução das obras, sem ter de se deslocar à obra.

Desenvolveu-se e atualizou-se mensalmente o modelo BIM paramétrico, indicando graficamente através de filtros de cores (vistas inteligentes): tarefas executadas, em execução e pendentes. O que permitiu não só ver o avanço mensal, mas ter a comparação visual entre meses.

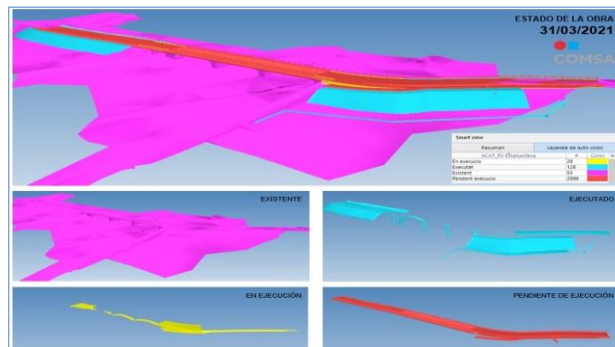


Figura 14. Modelo BIM integrado da ponte perto do estado final (fonte: Autores)

Adicionalmente, foram introduzidos nos modelos os metadados solicitados pela propriedade da infraestrutura, incluindo informações específicas sobre o sistema de Inventário e Gestão de Estruturas detido pelo Diretor-geral Adjunto de Exploração Rodoviária, anexado à Generalitat da Catalunya.

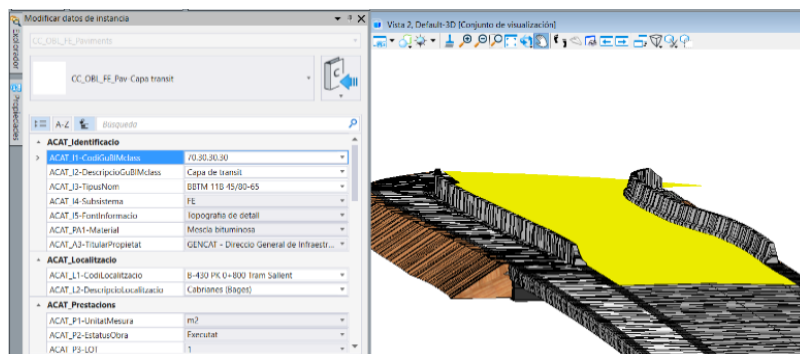


Figura 15. Vista da informação de metadados do modelo BIM (fonte: Autores)

Em resumo, este projeto apontou o valor dos pilares da metodologia BIM: transparência, colaboração e comunicação.

## 8 CONCLUSÕES

Este artigo apresenta, descreve e mostra a evolução dos trabalhos de alargamento da ponte Cabrianes através do rio Llobregat (Barcelona, Espanha), desde a fase inicial do diagnóstico da ponte antiga até à ampliação da tomada de decisão e do projeto conceptual.

Por último, foi demonstrada a implementação dos modelos BIM e das ferramentas aplicadas, salientando o valor dos pilares da metodologia BIM: transparência, colaboração e comunicação.

## 9 REFERÊNCIAS

1. F. Millanes em L. Matute, *Extensão de uma ponte histórica em Castelló de la Ribera*, Revista *Concreto y Acero*, nº 232, 2º trimestre, 1.999.
2. J.E. Ribera, *Modelos Oficiais de Pontes De Arco para Estradas e Estradas de Bairro*, *Jornal de Obras Públicas*, Volume I, 1.923.