

BIM NA PORMENORIZAÇÃO DE ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO PRÉ-ESFORÇADO

José Granja⁽¹⁾⁽²⁾, Patrícia Silva⁽¹⁾, Miguel Azenha⁽²⁾, José Carlos Lino⁽³⁾, João Flores⁽⁴⁾

(1) Zeta Engineers, Porto

(2) ISISE, Universidade do Minho, Guimarães

(3) NEWTON - Consultores de Engenharia, Porto

(3) Mota-Engil Pré-esforço, Maia

Resumo

Neste artigo são apresentados exemplos práticos da utilização de modelos BIM para a pormenorização de sistemas de pré-esforço com cabos pós-tensionados e das respetivas armaduras de reforço nas zonas de aplicação de cargas concentradas. São discutidos os processos utilizados para a modelação, com especial enfoque para as particularidades trazidas pelos sistemas de pré-esforço. Os modelos obtidos permitem deteção de incompatibilidades assim como auxiliar a preparação de obra, nomeadamente obter mapas de quantidades e dobragem das armaduras de reforço. Deste modo, a informação extraída de um modelo BIM poderá permitir aumentar a produtividade da aplicação destes sistemas.

1. Introdução

As estruturas de betão armado e pré-esforçado apresentam complexidades de execução, normalmente superiores àquelas que são de esperar em estruturas de betão armado, nomeadamente: ao nível da concentração de armaduras de reforço na vizinhança das zonas de ancoragem; pela presença de cabos de pré-esforço com traçados que podem assumir complexidade elevada. Em Portugal, por norma, o projeto de estruturas e o projeto de aplicação de pré-esforço (PAP) são realizados por entidades distintas, e em fases distintas, surgindo por vezes incompatibilidades em obra que obrigam a atenção urgente e ajustes in-situ.

O uso de metodologias BIM na fase de preparação deste tipo de obras pode trazer importantes mais valias, através da visualização do traçado em 3D, avaliação combinada das armaduras ordinárias definidas no projeto e armaduras de reforço definidas no PAP e a possibilidade de planejar o faseamento da montagem dos sistemas, bem como o de aplicação do pré-esforço. Para além disso, o recurso a metodologias BIM também proporciona uma comunicação eficiente e transferência de informações entre todos os atores envolvidos no processo.

O desenvolvimento da modelação de pré-esforço em contexto BIM foi já alvo de investigação em trabalhos científicos, incluindo aplicação a estudos de caso [1, 2]. Existem inclusive em Portugal relatos de projetos de estruturas de betão armado pré-esforçado modelados em BIM, com inclusão explícita das componentes dos sistemas de pré-esforço. Com efeito, no 1º congresso PTBIM, realizado em 2016, este tema foi abordado nos trabalhos desenvolvidos por Lino e Pires [3] e Fernandes *et al.* [4].

No entanto nestes trabalhos não foi explorada a criação de objetos paramétricos dos elementos dos sistemas de pré-esforço necessários à modelação em BIM. Desta forma, neste artigo, desenvolvido em parceria entre a ZetaEngineers, a Newton Consultores e a Mota-Engil Pré-esforço, o principal objetivo é a aplicação da metodologia BIM no projeto de aplicação de pré-esforço em estruturas de betão armado pré-esforçado com especial enfoque na criação de objetos BIM. Primeiramente será realizado o enquadramento do projeto de aplicação do pré-esforço, seguindo os passos tomados para a aplicação da metodologia BIM, assim como os usos BIM neste tipo de projeto.

2. O projeto de aplicação de pré-esforço

O projeto de aplicação de pré-esforço é essencialmente um projeto de preparação de obra através do qual o subempreiteiro responsável pela colocação e aplicação do pré-esforço pormenoriza e especifica os aspetos relativos ao traçado, armaduras de reforço e faseamento construtivo do sistema de pré-esforço. O PAP é realizado a partir de um projeto de estruturas existente a montante que normalmente define a posição/traçado da resultante do pré-esforço pretendido (e áreas de pré-esforço pretendidas), bem como as forças que deverão ser satisfeitas em instantes relevantes do faseamento construtivo e operação. Cabe ao projetista de pré-esforço realizar a definição concreta dos traçados dos cabos reais, bem como a sua divisão em número de cordões, diâmetro de bainhas e outros parâmetros que poderão ser específicos ao sistema de pré-esforço em uso. Conforme referido acima, o PAP inclui a definição das armaduras de reforço a acrescentar às previstas no projeto de estruturas, compatibilizando-as de forma adequada.

Após ser estabelecida uma solução que responda a todos os critérios estabelecidos, são efetuados os desenhos dos elementos estruturais aos quais o pré-esforço irá ser aplicado, representando todas as armaduras de reforço, cabos (bainhas e cordões) e cabeças de ancoragem (passivas e/ou ativas).

Com o objetivo de tirar partido da tecnologia utilizada atualmente e com uma visão para projetos futuros, iniciou-se a realização de PAPs aplicando a metodologia BIM. A plataforma BIM utilizada para a modelação foi o software REVIT®. Por vezes o projeto de estruturas não é fornecido em formato BIM (existindo apenas em CAD), o que dificulta a passagem de informação. Nestes casos, é necessário modelar a estrutura respeitante à parcela do edifício onde se pretende aplicar o pré-esforço (ver dois casos típicos de modelação parcial de edifícios na figura 1). Nas subsecções seguintes será abordado a criação de objetos BIM necessários para

a realização do projeto, assim como as dificuldades que surgiram ao longo do processo de aplicação do cabo e armaduras de reforço.

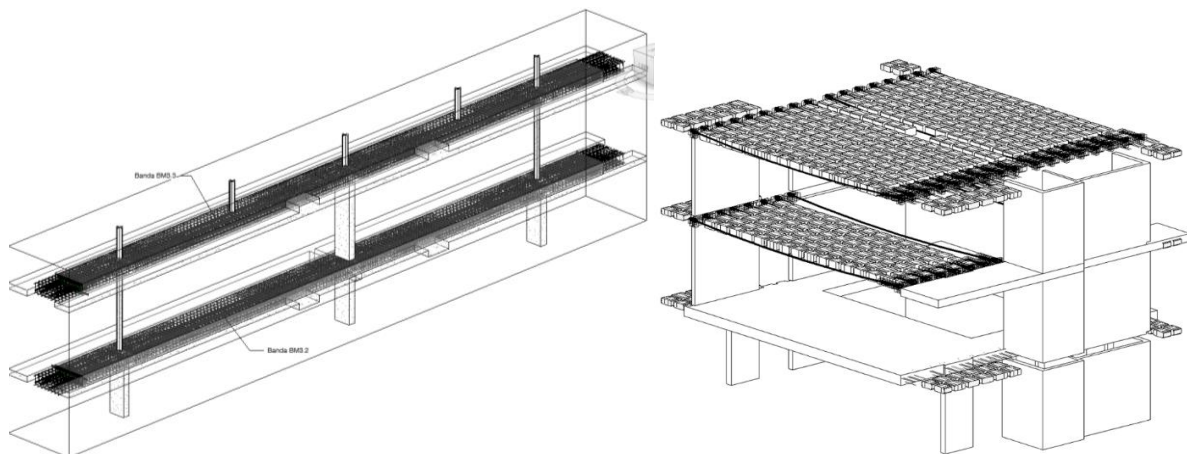


Figura 1: Parcela de dois edifícios constituídos por elementos de betão armado pré-esforçado.

3. Criação de objetos BIM para sistemas de pré-esforço

A modelação da aplicação do pré-esforço implica o recurso a classes de objetos BIM que não constam nas bibliotecas de famílias disponibilizadas no software utilizado, ou em bibliotecas online de classes de objetos, tais como: BIMObject [6] ou NBS [7]. O contacto direto com vários fornecedores de sistemas de pré-esforço permitiu também constatar que não dispunham de tais bibliotecas de objetos, encontrando-se limitados à capacidade de fornecer pormenores CAD dos seus sistemas. Perante esta situação e tendo em vista projetos futuros, optou-se por criar nova biblioteca contendo os objetos necessários para a realização do PAP, através do editor de classes (ou famílias) de objetos disponível no software usado.

Com base nos desenhos CAD enviados e na geometria definida nos catálogos dos sistemas, desenvolveu-se modelos de objetos de ancoragens ativas e passivas. Nos projetos de aplicação de pré-esforço desenvolvidos, optou-se pelos sistemas DYWIDAG[®] [8]. No primeiro PAP desenvolvido em BIM, foram utilizadas as ancoragens ativas do tipo “*multiplan*” (sistemas DYWIDAG[®]). As ancoragens passivas, que pertencem também aos sistemas DYWIDAG[®], foram do tipo “*bond*” com a utilização de bolbos.

As dimensões da ancoragem ativa variam relativamente ao número de cordões que constituem o cabo. Desta forma, a família foi modelada com base num modelo de estilos existente denominado “modelo genérico métrico com base na face” com o objetivo de uma face da ancoragem estar paralela à superfície onde esta será colocada e com a face do cabo, como se observa no modelo 3D representado na figura 2. A família de ancoragens ativas contém diferentes tipos, sendo estes tipos os discriminados em catálogo, cujo o principal parâmetro é o número de cordões existentes. Apesar da grande complexidade geométrica destas ancoragens a modelação do objeto é relativamente simples, não sendo necessária a utilização de qualquer ferramenta adicional para além do editor de classes/famílias nativo.

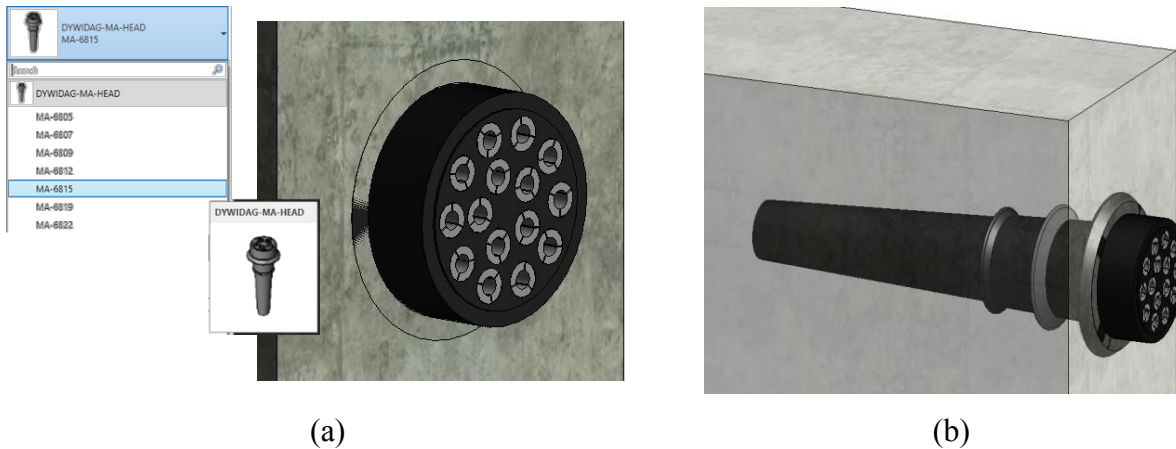


Figura 2: Modelação do objeto BIM – cabeça de ancoragem ativa: (a) zona da ancoragem em contacto com a face; (b) vista da ancoragem na sua totalidade.

A família das ancoragens passivas tipo “*bond*”, representada na figura 3, foi modelada através do modelo de estilos “adaptativo”. Por forma a facilitar a sua introdução no modelo foi colocado o ponto de inserção na ligação entre a ancoragem passiva e a extremidade do cabo de pré-esforço. Esta família varia tendo em consideração: o número de cordões; a disposição e localização dos bolbos dos cordões em secção transversal do cabo (consoante o número de cordões) como recomendado no catálogo do fabricante. Esta família, apresenta já uma complexidade bastante maior do que a anterior. Para criar este tipo de família é necessário modelar os cabos que possuem caminhos tridimensionais, os quais têm de ser modelados com recurso a famílias adaptativas. Para além desta dificuldade adicional, existem também os bolbos com uma geometria bastante complexa. Estes bolbos foram modelados num software de desenho tridimensional e exportados para a família como o objeto genérico, sendo, no entanto, acrescentadas todas as informações ‘não-gráficas’ relevantes.

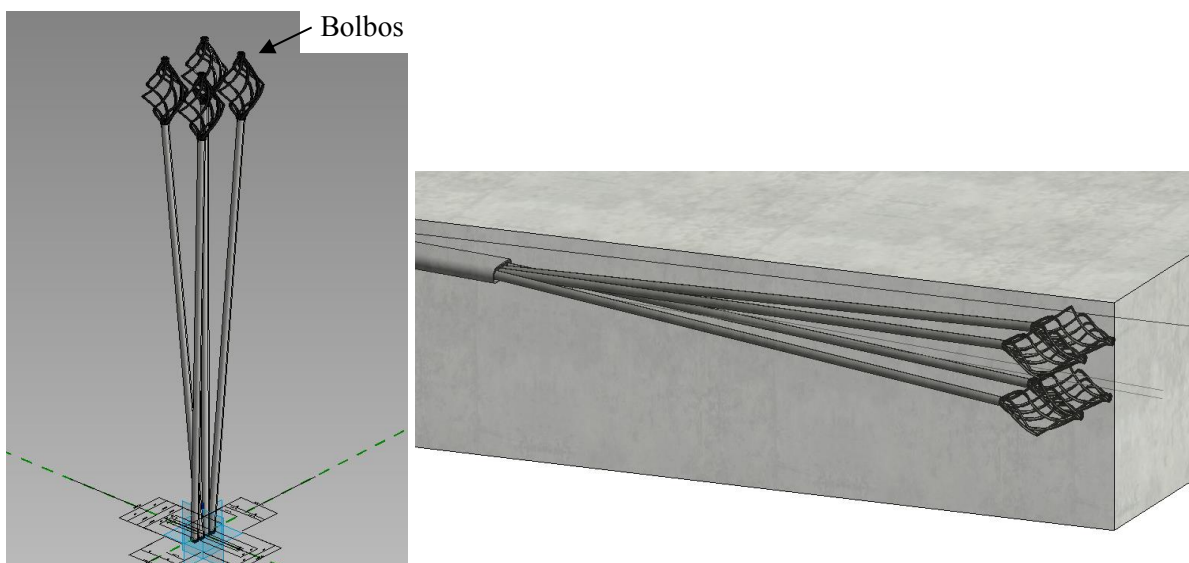


Figura 3: Modelação do objeto BIM – cabeça de ancoragem passiva.

Foi também necessário desenvolver classes de objetos para os nichos onde se inserem as ancoragens ativas tipo “*multiplan*”. Os nichos são modelados com base no modelo de estilos já mencionado anteriormente - “modelo genérico métrico com base na face” - uma vez que os nichos são alojados no elemento estrutural (elemento hospedeiro - elemento base de acolhimento). As dimensões do nicho são dependentes das dimensões das ancoragens que vão suportar e são constituídos por 5 planos com uma inclinação também recomendada no catálogo do sistema de pré-esforço [8]. Na figura 4 observa-se a representação 3D do nicho. Apesar de aparentemente simples, este tipo de família tem uma complexidade adicional devido a inclinação normalmente existente entre o eixo cabo e a superfície do betão que aloja o nicho (é frequentemente diferente de 90°).

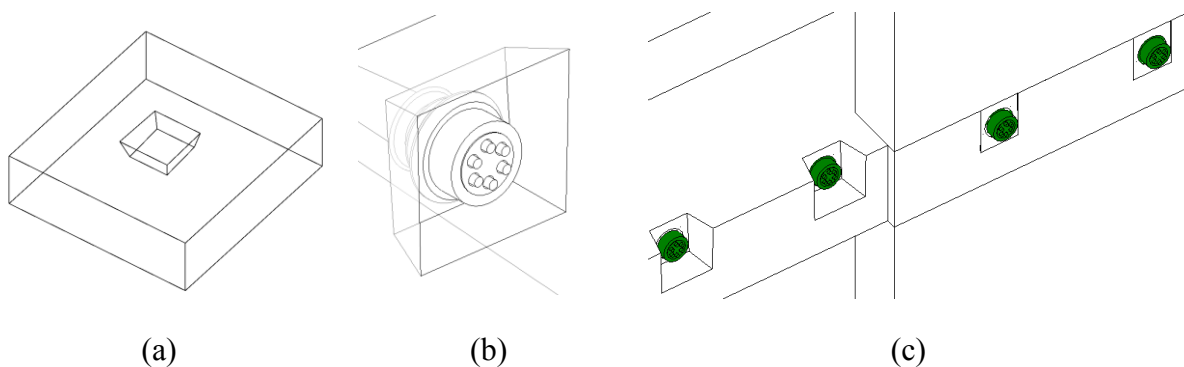


Figura 4: Modelação do objeto BIM –nichos: (a) objeto Nicho; (b) vista do nicho colocado numa viga com a cabeça de pré-esforço ativa; (c) vista após a aplicação do pré-esforço.

Para os cabos de pré-esforço também foi necessário desenvolver novas famílias de objetos BIM. A secção do cabo tem em consideração as dimensões da bainha e forma (circular ou oval) fornecida no catálogo do sistema de pré-esforço usado. O objeto ‘cabo’ pode ser desenvolvido por várias vias distintas. No contexto deste trabalho, foram exploradas três formas, nomeadamente: (i) usando apenas o editor de famílias nativo; (ii) usando a plataforma de programação visual DYNAMO®; e (iii) desenvolvimento de software em Python para gerar os cabos de pré-esforço. Através do editor de famílias (nos modelos genéricos), apenas é possível modelar cabos cujas coordenadas apenas variem em duas dimensões, uma vez que o caminho do cabo é definido recorrendo à importação de uma poli-linha 2D definida em CAD. Uma solução simplificada para quando se pretende desenvolver cabos em que as coordenadas do cabo variam tridimensionalmente, é recorrer ao plug-in de programação visual DYNAMO®. Para isso, é necessário desenvolver uma rotina que envolve: criação de pontos, de uma linha que une esses mesmos pontos e, por último, a criação dos sólidos necessários. Nesta rotina os pontos podem ser importados de um ficheiro externo, o que facilita o manuseamento dos traçados dos cabos. No entanto, os objetos desenvolvidos por este método não podem ser editados diretamente na plataforma BIM utilizada, o que se configura como uma limitação. Por outro lado, um dos principais inconvenientes adicionais é o facto de não ser possível cotar pontos ao longo do traçado do cabo dificultando a criação de peças desenhadas com grande qualidade/quantidade de informação. Por este motivo, foi desenvolvido um software em *Python* na api da plataforma de modelação que permite a partir de um conjunto de coordenadas dos

cabos de pré-esforço gerar os respetivos objetos BIM. Este software, para além de permitir agilizar a criação dos objetos dos cabos de pré-esforço (ver exemplos na figura 5), permite que os objetos sejam reconhecidos como entidades nativas da plataforma de modelação, o que permite a sua manipulação tanto dentro do editor de famílias como no próprio projeto BIM. Desta forma, é possível gerar peças desenhadas contendo toda a informação necessária ao apoio à obra, e proceder a ajustes rápidos de traçado que são automaticamente reconhecidos em todas as peças desenhadas e em toda a informação guardada de forma ‘não-gráfica’.

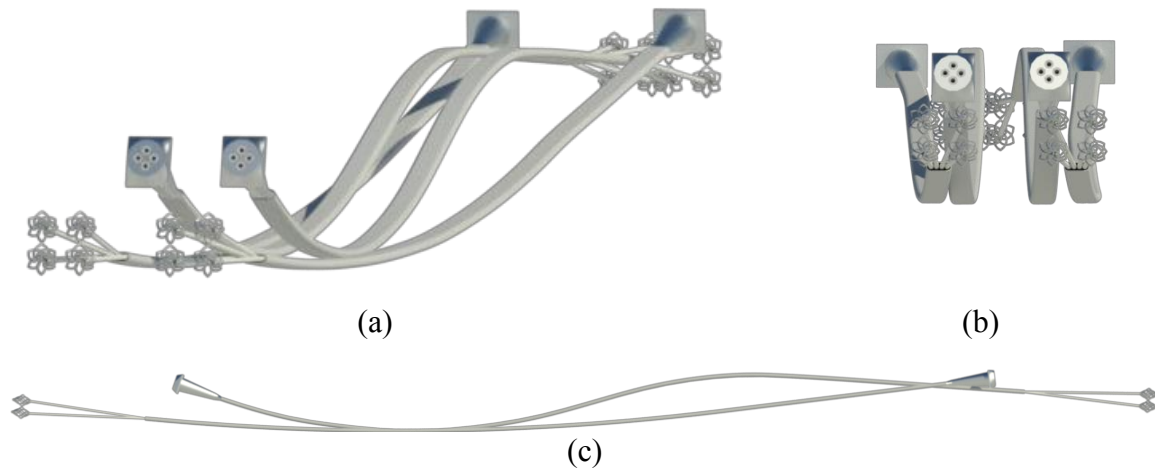


Figura 5: Exemplo de objetos BIM de cabos com traçados tridimensionais: (a) vista 3D; (b) vista de lado; (c) alçado.

4. Modelação das armaduras de reforço

O projeto de aplicação do pré-esforço envolve o dimensionamento de armaduras de reforço de forma a que as zonas onde o sistema de pré-esforço introduz cargas concentradas resistam aos esforços gerados pela tensão aplicada nos cabos. Estas armaduras normalmente são constituídas por cintas de diferentes geometrias para absorverem esforços horizontais e verticais, armaduras longitudinais, um varão em espiral a envolver o betão mais solicitado, e varões colocados à superfície do betão para lidar com trações geradas nessa região. Estas armaduras são modeladas recorrendo às livrarias de objetos existentes na plataforma BIM utilizada.

A modelação em BIM das armaduras de reforço é um processo relativamente complexo devido à grande densidade de armadura (ver figura 6). Os típicos problemas que costumam ser identificados em obra (em situações em que o projeto CAD não permitiu garantir adequada compatibilização de todas as armaduras) são por vezes solucionados de forma imperfeita ao forçar a localização das armaduras com meios mecânicos, introduzindo-lhes deformações e tensões indesejadas. Durante a modelação das armaduras é já possível fazer escolhas de soluções para as armaduras mais eficazes tendo em conta todas as armaduras existentes nos elementos de betão armado.

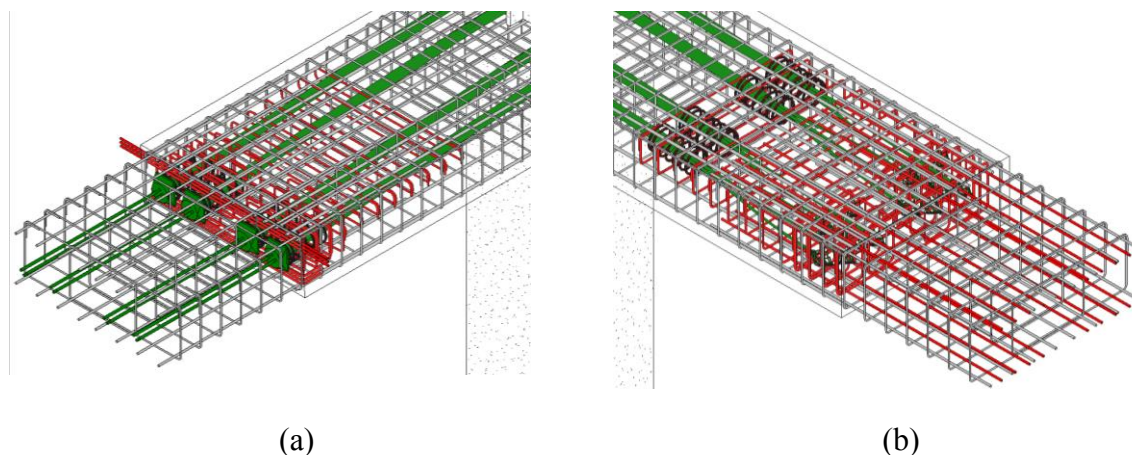


Figura 6: Modelação do objeto BIM –nichos: (a) vista com armaduras de reforço; (b) vista após a aplicação do pré-esforço. Armaduras de reforço a vermelho e ordinárias a cinzento.

Durante o desenvolvimento dos PAPs foram também detetados alguns problemas que se observam neste tipo de softwares quando o nível de detalhe do modelo aumenta. Quando se substitui ou se altera a geometria de algum objeto hospedeiro, a geometria da armadura sofre adaptações automáticas. Desta forma é imperativo que o modelador BIM esteja bastante ciente deste facto e a cada alteração de geometria no modelo BIM faça uma verificação expedita para verificar se não ocorreu nenhum problema relevante.

5. USOS BIM em projetos de aplicação de pré-esforço

Nos últimos anos, o BIM tem mostrado a sua potencialidade em todas as especialidades intervenientes na construção, essencialmente quando todas se encontram integradas no modelo [9]. No caso do projeto de aplicação de pré-esforço é possível tirar grandes vantagens do BIM.

Um dos primeiros usos mais relevantes da aplicação do BIM a um PAP é a compatibilização geométrica de todos os elementos dos sistemas de pré-esforço e das armaduras de reforço com os elementos existentes no projeto de estruturas. Como é possível observar na figura 7 os sistemas de pré-esforço possuem diversos elementos com dimensões consideráveis (cabeças de ancoragem, ancoragens passivas, cabos e nichos das cabeças) que tornam a compatibilização geométrica um trabalho árduo quando apenas se representa os elementos estruturais em desenhos bidimensionais. Para além destes elementos, as armaduras de reforço das zonas de cargas concentradas (extremidades dos cabos de pré-esforço) aumentam ainda mais a complexidade do problema. Assim o BIM através da representação de todos os elementos com a geometria real vem facilitar o processo.

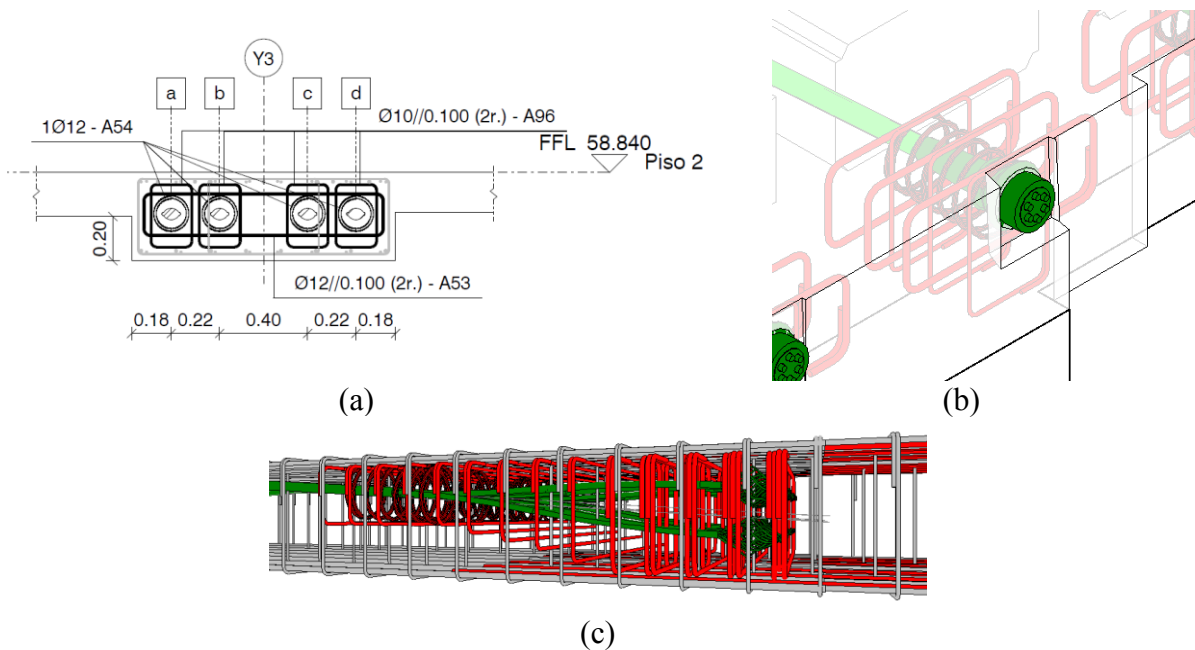


Figura 7: Exemplos de compatibilização geométrica de PAPs em BIM: (a) Compatibilização de armaduras de reforço com existentes do projeto de estruturas; (b) Compatibilização das cabeças de pré-esforço e dos nichos com a geometria dos elementos estruturais; (c) vista 3D da extremidade passiva.

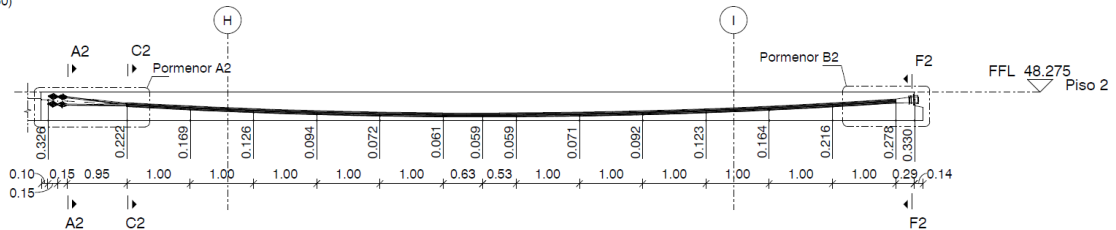
Um outro uso convencional do BIM aplicável no PAP, é no desenvolvimento de informações ao nível da construção, como por exemplo os mapas dobragens e de quantidades das armaduras. Normalmente os PAPs englobam quantidades significativas de armaduras de reforço e com dimensões variáveis. Um exemplo de um quadro de dobragem de armaduras é apresentado na Tabela 1. Estes mapas oferecem um apoio relevante para a preparação de obra com informação de todas as armaduras necessárias assim como a sua forma/geometria. Este tipo de mapas também permite apoiar a estimativa de custos devido às quantidades e comprimentos totais que são calculados.

Tabela 1: Exemplo de parte do mapa de dobragem de armaduras

Mapa de quantidades e de dobragem das armaduras de reforço										
Designação dos varões	Diâmetro do varão	Comprimento de cada varão	Quantidade	Comprimento total	Forma do varão	A	B	C	D	Diâmetro de dobragem
A02	12 mm	1375 mm	66	90.75 m		250 mm	390 mm	100 mm	100 mm	48 mm
A03	16 mm	4175 mm	22	91.85 m		210 mm	50 mm			64 mm
A04	12 mm	5225 mm	39	203.78 m		180 mm	50 mm			48 mm
A05	12 mm	1300 mm	152	197.60 m		345 mm	260 mm	100 mm	100 mm	48 mm

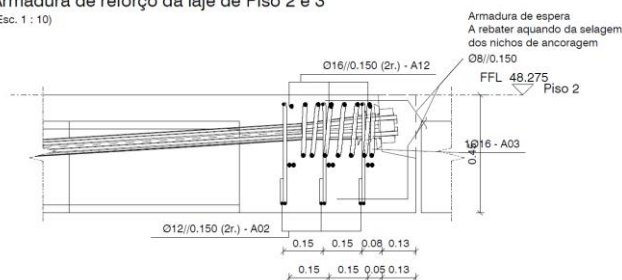
Para além das vantagens já mencionadas, também se salienta o facto de se extraírem peças desenhadas (cortes e vistas) de uma forma mais eficaz e com menos propensão para erros, principalmente quando se executam alterações do modelo. Apresenta-se na figura 8 dois exemplos de peças desenhadas extraídas diretamente do modelo BIM. Como é possível observar, as peças desenhadas apresentam grande detalhe e bastante informação. De salientar ainda que no que toca às armaduras de reforço modeladas, todas elas possuem um código único ligado ao quadro de dobragem das armaduras para que o processo de aplicação em obração seja mais eficiente. Estes desenhos automáticos eliminam também todos os erros potenciais de representação entre os diversos pormenores.

Alçado dos cabos P.a, P.f, P.g, P.h, P.j e P.k do Piso 2 e 3
(Esc. 1 : 50)



a)

Pormenor B2
Armadura de reforço da laje de Piso 2 e 3
(Esc. 1 : 10)



b)

Figura 8: Exemplo de peças desenhadas geradas pelo modelo BIM: (a) alçado de um cabo de pré-esforço; (b) pormenor das armaduras de reforço junto a uma cabeça ativa.

6. Discussão crítica e Conclusões

No presente artigo foram apresentados e discutidos vários desafios e soluções no contexto da preparação de projetos de aplicação de pré-esforço em estruturas de betão armado pré-esforçado aplicando a metodologia BIM.

Um dos primeiros problemas enfrentados pela equipa foi a inexistência de objetos BIM relativos a sistemas de pré-esforço em bibliotecas online, ou no próprio software usado. Por este motivo, foi necessário o desenvolvimento das famílias de objetos para cabeças de ancoragem ativas, ancoragens passivas e para os nichos das ancoragens. A segunda dificuldade surge na inserção do cabo de pré-esforço, cujo o traçado deve seguir devidamente as coordenadas determinadas no projeto de estruturas. A solução pelo desenvolvimento de um software em *Python* para geração automática de objetos nativos com base num conjunto de

coordenadas. Relativamente às armaduras de reforço, praticamente não existiu dificuldade na sua implementação, tendo sido utilizadas as famílias disponíveis de forma nativa no software utilizado.

Após ser atingido o objetivo de aplicar BIM na execução dos PAPs, os usos BIM foram bastante evidentes e satisfatórios, incentivando por isso a continuidade de aplicação desta estratégia no futuro. As peças desenhadas são desenvolvidas de forma mais rápida e com menor propensão para erros nos cortes e vistas, facilitando bastante os trabalhos de revisão de projeto. Para além disso, sendo o PAP um projeto exigente para a preparação de obra, a extração do mapa de dobragens e quantidades para todas as armaduras ordinárias, assim como o próprio modelo 3D, tornam-se mais valias importantes no processo de execução dos trabalhos em obra.

Referências

- [1] S.M.B.d. Silva, "A integração de técnicas BIM nos elementos de projeto de aplicação de sistemas de pré-esforço", in *Departamento de Engenharia Civil*. 2015, Universidade do Minho.
- [2] H. Fontes, "Aplicação das técnicas "Building Information Modelling" (BIM) a estruturas de Engenharia Civil e transmissão de conhecimento", in *Departamento de Engenharia Civil*. 2010, Universidade do Minho.
- [3] J.C.P. Lino, Nuno, "Do modelo à obra - caso internacional de prática colaborativa", in *1º Congresso Português de Building Information Modelling*. 2016: Universidade do Minho, Guimarães.
- [4] J.L. Fernandes, José Carlos; Santos, Ricardo, "Modelação BIM de armaduras em estruturas de betão armado: possibilidades, desafios e interoperabilidade", in *1º Congresso Português de Building Information Modelling*. 2016: Universidade do Minho, Guimarães.
- [5] R.R.d.E. de Betão, "Armado e Pré-Esforçado, Dec". Lei.
- [6] BIMObject. "<https://bimobject.com/pt>". 2018.
- [7] NBS. "<https://www.nationalbimlibrary.com/find-bim-objects>". 2018.
- [8] E.T. Approval, "Dywidag Systems. Bonded Post-Tensioning Kit for Prestressing of Structures with 3 to 55 Strands. ETA-13/0815". 2013, Post-Tensioning Systems.
- [9] M. Azenha, J. Poças Martins, and J.L.D. Granja. "1º Congresso Português de Building Information Modelling". in *1º Congresso Português de Building Information Modelling*. 2016. Universidade do Minho. Departamento de Engenharia Civil (DEC).