

MODELAÇÃO DE ARMADURAS DE BETÃO ARMADO E GERAÇÃO DE BAR BENDING SCHEDULES PARA PRÉ-FABRICAÇÃO EM AMBIENTE BIM

Bernardino Lima ⁽¹⁾, António Mateus ⁽²⁾, Joana Teixeira ⁽³⁾

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

(2) TECHONIS Lda., Porto, [0009-0004-6728-5749]

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

Resumo

A modelação tridimensional de armaduras em estruturas de betão armado permanece, em muitos contextos, dependente de processos 2D, com impacto direto na fiabilidade de quantidades, na verificação de colisões e na viabilidade construtiva em zonas densamente armadas. Este trabalho apresenta a metodologia desenvolvida na TECHONIS para detalhe de armaduras em ambiente BIM, suportada por interoperabilidade com modelos estruturais geométricos exportados em IFC e subsequentemente detalhados em TEKLA Structures. O fluxo de trabalho inicia-se na modelação BIM da geometria estrutural, seguida da modelação paramétrica de armaduras por tipologia estrutural (lajes, vigas, pilares e fundações). Em fase de detalhe são realizados controlos tridimensionais de colisões entre armaduras e negativos, bem como validações de espaçamentos regulamentares. A partir do modelo final são extraídas Bar Bending Schedules, listagens de armaduras segundo a British Standard e documentação orientada à pré-fabricação, assegurando rastreabilidade entre projeto, produção e montagem. O estudo discute os ganhos práticos observados, nomeadamente a redução de revisões em obra, a melhoria na comunicação com equipas de produção e a maior previsibilidade na montagem, bem como limitações encontradas na interoperabilidade e estratégias adotadas para as mitigar. Conclui-se que a modelação de armaduras em BIM permite estabelecer uma ligação direta entre o modelo estrutural, o detalhe de armaduras e os processos de fabrico e montagem em obra, constituindo uma solução robusta para detalhe estrutural orientado à produção.

1. Introdução

Nas últimas décadas, a adoção crescente de metodologia Building Information Modelling (BIM) na engenharia de estruturas tem contribuído para melhorar a coordenação interdisciplinar, a consistência da informação geométrica e a produção de documentação técnica [5]. No entanto, o detalhe de armaduras de betão armado continua, em muitos contextos,

a ser desenvolvido com base em processos bidimensionais [6], frequentemente dissociados de modelos tridimensionais completos da estrutura.

A modelação tridimensional de armaduras introduz desafios específicos associados à representação geométrica das barras, às regras de dobragem, à verificação de espaçamentos e à compatibilização entre diferentes elementos estruturais. Quando integrada em fluxos de trabalho orientados à produção, esta abordagem permite antecipar problemas de viabilidade construtiva e estabelecer uma ligação mais direta entre o projeto de estruturas, a preparação de obra e os processos de fabrico de armaduras.

O presente artigo apresenta a experiência da TECHONIS na aplicação de processos de modelação tridimensional de armaduras em ambiente BIM, desenvolvidos no contexto de projetos estruturais executados segundo regulamentação britânica. A partir de casos reais são discutidos os principais desafios encontrados, bem como os benefícios e limitações associados à utilização deste tipo de abordagem no detalhe estrutural.

2. Enquadramento Técnico e Normativo

Na engenharia de estruturas, o detalhe de armaduras constitui uma etapa fundamental para a transposição do projeto de estruturas para a execução em obra. Para além da definição geométrica dos elementos estruturais, o processo de detalhamento envolve a definição das características das barras, regras de dobragem, comprimentos de ancoragem e de sobreposição, bem como a organização da informação necessária para fabrico e montagem em obra.

Em vários contextos internacionais, nomeadamente no Reino Unido, Alemanha ou Brasil, é prática corrente a produção de Bar Bending Schedules (BBS) como parte integrante da documentação de projeto. Estas listagens permitem identificar individualmente cada barra de armadura, incluindo dimensões, forma de dobragem, quantidade e elemento estrutural associado [1]. A normalização destes processos é frequentemente suportada por normas específicas de fabrico e dobragem de armaduras, como a BS 8666 [2], amplamente utilizada em projetos desenvolvidos segundo regulamentação britânica.

Tradicionalmente, o detalhe de armaduras tem sido desenvolvido com base em desenhos bidimensionais, complementados por listagens de barras destinadas ao fabrico [3]. No entanto, o desenvolvimento de ferramentas de modelação tridimensional tem permitido integrar o detalhe de armaduras diretamente em modelos digitais da estrutura, possibilitando uma ligação mais direta entre o projeto, a preparação de obra e os processos de fabrico.

A modelação tridimensional de armaduras permite representar explicitamente a geometria das barras e a sua interação espacial dentro dos elementos estruturais, facilitando a verificação de espaçamentos mínimos, a análise de zonas de elevada densidade de armadura e a compatibilização entre diferentes elementos estruturais. Quando utilizada em contextos orientados à produção, esta abordagem contribui para melhorar a consistência da informação entre modelo, desenhos e listagens de fabrico.

Nos projetos analisados não existia um EIR/OIR ou BEP imposto pelo dono de obra. O processo BIM foi definido internamente pela equipa, com requisitos práticos orientados à produção e montagem, assegurando a informação necessária para a modelação das armaduras, geração de BBS e preparação de obra.

3. Metodologia de Modelação de Armaduras em Ambiente BIM

3.1. Fluxo de Trabalho de Modelação BIM

O processo de modelação de armaduras desenvolvido baseia-se na separação entre o modelo estrutural geométrico e o modelo dedicado ao detalhe de armaduras. Esta abordagem permite manter a estabilidade do processo de detalhamento e facilitar a gestão de alterações ao longo do desenvolvimento do projeto. A Figura 1 sintetiza o fluxo de trabalho adotado, desde o modelo estrutural BIM até à geração de BBS para fabrico.

Numa primeira fase é desenvolvido o modelo tridimensional da estrutura em ambiente BIM, contendo a geometria dos elementos estruturais principais. Esta informação é posteriormente transferida para o ambiente de modelação de armaduras através da exportação de um modelo em formato IFC [4,7], que serve de base para o desenvolvimento do modelo específico de armaduras.

O modelo de armaduras é então desenvolvido de forma independente, utilizando a geometria estrutural como referência para o posicionamento e definição das barras. Sempre que ocorrem alterações relevantes na geometria da estrutura, o modelo de referência pode ser atualizado, permitindo manter a coerência geométrica entre o modelo estrutural e o modelo de armaduras. Esta separação entre modelos permite reduzir interferências entre diferentes fases de trabalho e facilita a gestão do processo de detalhamento, garantindo simultaneamente uma ligação direta entre a geometria estrutural, o modelo de armaduras e a documentação produzida para fabrico.

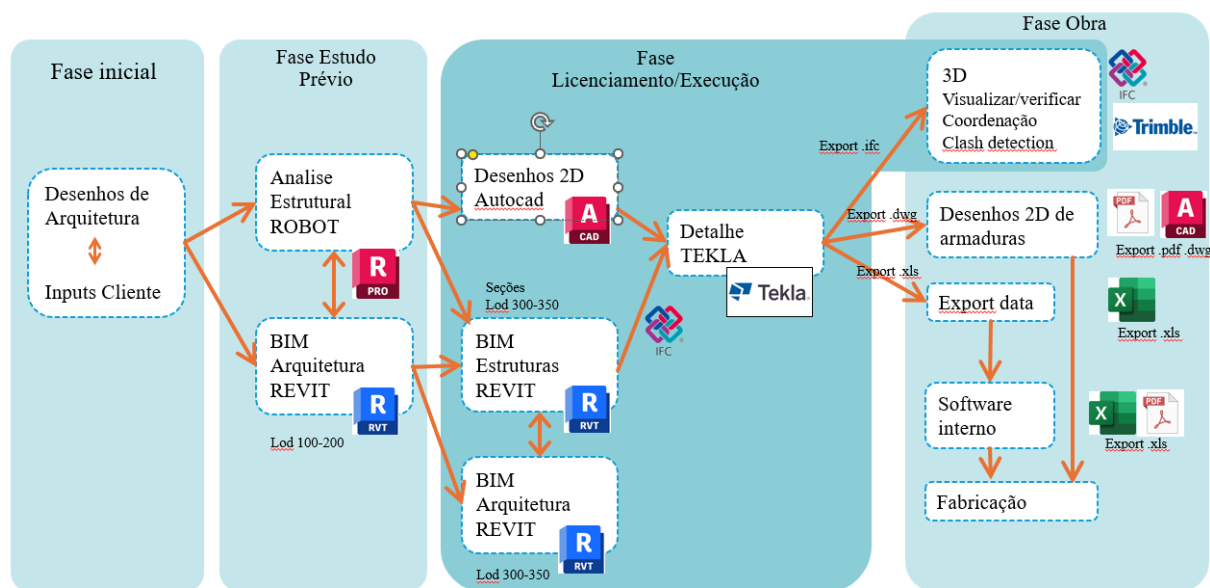


Figura 1 - Esquema do workflow global: Modelo estrutural BIM → IFC → Modelação de armaduras → BBS → Pré-fabricação

3.2. Modelação Orientada à Produção

A modelação de armaduras foi desenvolvida com uma abordagem orientada à produção, na qual cada varão é representado no modelo tridimensional com a sua geometria real de dobragem e posicionamento final na estrutura (Figura 2). Esta abordagem permite que o modelo não

represente apenas a intenção de projeto, mas constitua também um suporte direto à preparação de obra e aos processos de fabrico de armaduras.

Durante a modelação são consideradas explicitamente as regras geométricas associadas ao detalhe de armaduras, incluindo comprimentos de ancoragem, zonas de sobreposição, empalmes entre elementos estruturais e continuidade vertical das armaduras entre pisos. Em elementos como pilares, por exemplo, a modelação inclui desde início as zonas de transição necessárias para garantir a ligação com as armaduras do piso superior.

A representação tridimensional das barras permite ainda avaliar a viabilidade construtiva das soluções adotadas, particularmente em zonas onde diferentes elementos estruturais convergem e onde a densidade de armadura pode dificultar a montagem ou a betonagem.

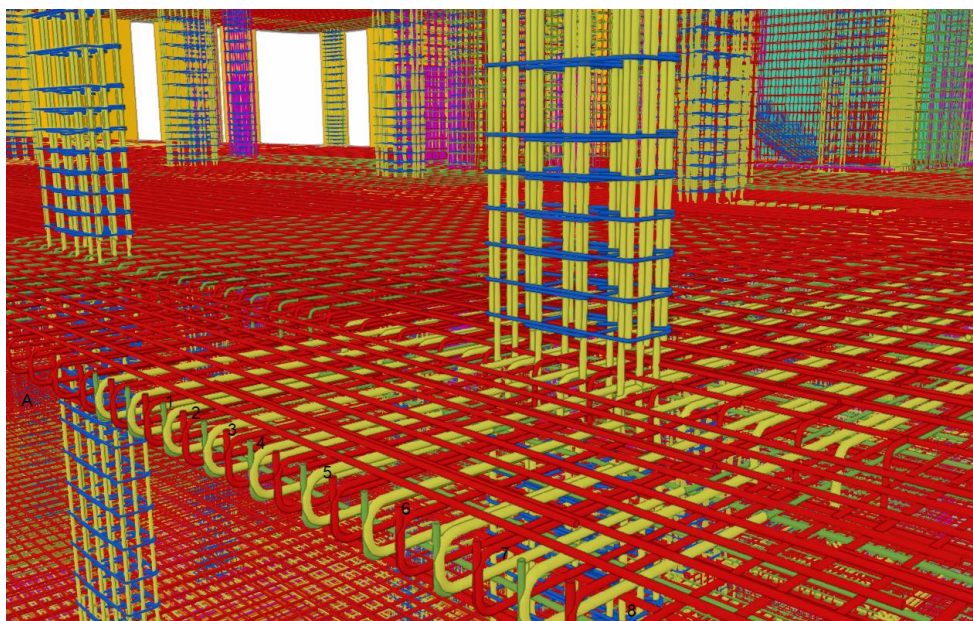


Figura 2 - Exemplo de modelação tridimensional de armaduras num elemento estrutural

3.3. Problemas Identificados Durante a Modelação

Durante o desenvolvimento dos modelos de armaduras foram identificados diversos tipos de situações em que a representação tridimensional permitiu evidenciar dificuldades de execução que dificilmente seriam detetadas através de desenhos bidimensionais.

Um dos casos mais frequentes corresponde a zonas de elevada densidade de armadura, particularmente em regiões de ligação entre elementos estruturais ou em zonas de descontinuidade geométrica. Nestes contextos, a disposição inicial das barras, embora compatível com os requisitos de dimensionamento estrutural, revelava-se por vezes impraticável do ponto de vista da montagem ou da betonagem. A visualização tridimensional permitiu avaliar a viabilidade construtiva destas zonas e testar diferentes alternativas de disposição das armaduras, incluindo redistribuição de varões, ajustes de espaçamentos ou alterações pontuais de diâmetros.

Foram também identificadas situações em que a geometria das barras exigia formas de dobragem não convencionais, frequentemente associadas a shape codes especiais definidos segundo a regulamentação aplicável. Nestes casos, a modelação tridimensional permitiu validar

a geometria das barras antes da emissão das listagens de fabrico, reduzindo a probabilidade de erros durante o processo de dobragem.

Outro aspeto observado durante o processo de modelação relaciona-se com a fragmentação excessiva da codificação das armaduras em determinados elementos estruturais, nomeadamente em lajes com elevada densidade de varões. A geração de um número elevado de códigos distintos pode dificultar a gestão das listagens de fabrico e aumentar a complexidade do processo de produção e posterior instalação em obra. A análise do modelo tridimensional permitiu identificar estas situações e promover uma racionalização da codificação das armaduras sempre que tal era compatível com os requisitos estruturais.

3.4. Ajustes ao Processo de Revisão

A experiência acumulada ao longo dos primeiros trabalhos permitiu identificar a necessidade de ajustar o processo interno de verificação do modelo de armaduras.

Inicialmente, a revisão da informação era realizada sobretudo na fase final do processo de detalhamento, no momento de emissão das Bar Bending Schedules e da documentação associada. No entanto, verificou-se que este procedimento podia conduzir à identificação tardia de inconsistências ou dificuldades geométricas, implicando revisões extensas numa fase avançada do trabalho.

Com base nesta experiência, passou a ser adotado um processo de verificação progressiva do modelo. Para além da revisão final associada à emissão das listagens de fabrico, foram introduzidas análises intermédias ao modelo tridimensional, permitindo validar antecipadamente a coerência da modelação e a compatibilidade entre diferentes elementos estruturais.

Estas verificações incluíam igualmente exportações preliminares de desenhos a partir do modelo, permitindo avaliar a legibilidade da informação e detetar eventuais problemas de codificação ou organização das armaduras antes da numeração final das barras. Este procedimento contribuiu para reduzir o número de revisões necessárias nas fases finais do processo e melhorar a consistência da documentação produzida.

3.5. Interação com Obra e Fabrico

Durante a fase de execução das estruturas, em obra, verificou-se que a utilização de modelos tridimensionais de armaduras contribuiu para melhorar a comunicação entre as equipas de projeto, preparação de obra e produção de armaduras.

A ligação direta entre o modelo e as Bar Bending Schedules permitiu garantir maior consistência entre a geometria das barras, os desenhos de preparação e as listagens utilizadas em fábrica. Esta rastreabilidade facilitou a identificação de varões específicos e reduziu a ocorrência de dúvidas associadas à interpretação da documentação.

Em algumas situações surgiram também alterações durante a fase de execução que implicaram ajustes na modelação das armaduras. Estas alterações estavam frequentemente associadas à necessidade de introduzir negativos ou elementos de fixação adicionais relacionados com outros sistemas construtivos. Embora em processos tradicionais baseados exclusivamente em desenhos estas modificações pudessem ser resolvidas através de pormenores locais, no contexto de um modelo orientado à produção tornou-se necessário rever a modelação das armaduras afetadas de forma a garantir a coerência entre o modelo tridimensional e as listagens de fabrico. Apesar do esforço adicional associado a estas revisões, a existência de um modelo tridimensional permitiu compreender de forma mais clara o impacto das alterações introduzidas

e assegurar que a documentação final permanecia consistente com a solução efetivamente executada.

4. Estrutura de Codificação e Organização das Armaduras

A codificação das armaduras constitui um dos elementos fundamentais para assegurar a ligação entre o modelo tridimensional, as listagens de fabrico e a execução em obra. A existência de uma lógica de codificação consistente permite garantir a rastreabilidade das barras desde a fase de projeto até à produção e montagem.

4.1 Lógica de Codificação

Na metodologia adotada, cada código corresponde a uma geometria específica de varão. Barras que apresentam diferenças de diâmetro, comprimento ou forma de dobragem são tratadas como elementos distintos, sendo-lhes atribuído um código próprio nas Bar Bending Schedules.

Este princípio permite garantir que a informação transmitida às equipas de produção corresponde exatamente à geometria modelada. A correspondência direta entre código, geometria e quantidade de varões constitui um aspeto essencial para assegurar a consistência entre o modelo tridimensional, os desenhos de preparação e as listagens utilizadas em fábrica. A definição de regras claras de codificação revelou-se particularmente importante em elementos com elevado número de barras, nos quais pequenas diferenças geométricas podem originar múltiplos códigos distintos.

4.2 Organização do Modelo

Para facilitar a gestão do processo de modelação e revisão, o modelo de armaduras é organizado segundo critérios que permitem estruturar a informação de forma clara e consistente. A organização interna do modelo considera a separação por níveis estruturais e por tipologia de elementos, nomeadamente pilares, vigas, lajes e fundações.

Esta estrutura permite simplificar a navegação no modelo e facilitar a verificação da informação antes da extração das Bar Bending Schedules. A organização por tipologia estrutural permite ainda identificar rapidamente zonas críticas do ponto de vista da densidade de armadura ou da complexidade geométrica.

A definição de regras internas para organização do modelo revelou-se igualmente importante para assegurar a coerência entre diferentes fases de desenvolvimento do trabalho, nomeadamente entre a fase de modelação inicial, as revisões intermédias e a emissão final da documentação de fabrico.

4.3 Impacto na geração de BBS

A experiência prática demonstrou que a forma como as armaduras são codificadas pode ter impacto direto na gestão do processo de fabrico. Em determinados casos, uma fragmentação excessiva de códigos pode conduzir a um aumento significativo do número de varões distintos, dificultando a gestão das listagens de produção.

A análise do modelo tridimensional permitiu identificar situações em que pequenas variações geométricas originavam múltiplos códigos semelhantes. Sempre que possível, e desde que compatível com os requisitos estruturais, foram adotadas soluções que permitiram racionalizar a codificação das armaduras, reduzindo a complexidade das listagens de fabrico.

Esta racionalização revelou-se particularmente relevante em elementos com elevada densidade de armaduras, contribuindo para simplificar a produção e melhorar a clareza da informação transmitida às equipas de fabrico.

5. Controlo Tridimensional e Resolução de Conflitos

A modelação tridimensional de armaduras permite realizar um controlo geométrico detalhado da disposição das barras antes da emissão da documentação para fabrico. Esta verificação constitui uma das principais vantagens da utilização de modelos tridimensionais no detalhe estrutural.

5.1 Conflitos geométricos entre armaduras

Em ambiente tridimensional tornam-se evidentes situações de interferência entre armaduras de diferentes elementos estruturais ou entre armaduras e aberturas ou negativos no betão. Estas situações são frequentemente difíceis de identificar através de desenhos bidimensionais, sobretudo em zonas onde convergem vários elementos estruturais.

A verificação geométrica do modelo permite analisar estas interferências de forma antecipada e avaliar a viabilidade da solução adotada antes da emissão da documentação para fabrico.

5.2 Zonas de elevada densidade

Para além de interferências geométricas diretas entre barras, a modelação tridimensional permite identificar zonas com elevada densidade de armadura nas quais a execução em obra pode tornar-se difícil. Mesmo quando não existem colisões explícitas entre varões, o espaço disponível pode ser insuficiente para permitir a correta colocação ou vibração do betão (Figura 3).

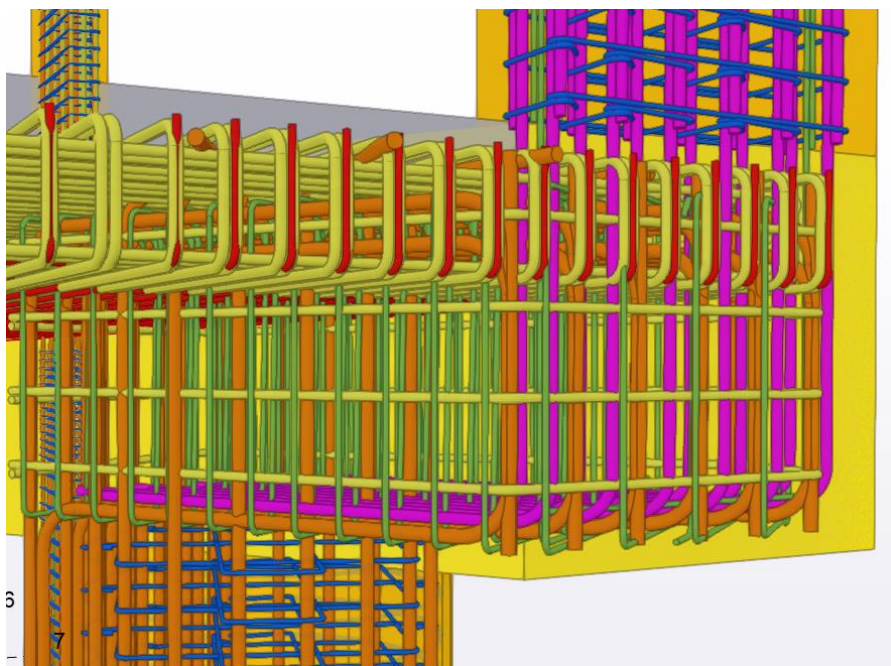


Figura 3 - Exemplo de zona de elevada densidade de armaduras

A visualização destas situações no modelo tridimensional permite avaliar a viabilidade da solução e introduzir ajustes na disposição das armaduras, nomeadamente através da redistribuição de varões, alteração de diâmetros ou revisão local dos espaçamentos.

5.3 Ajustes de modelação para viabilidade construtiva

Quando são identificadas situações de interferência ou densidade excessiva de armaduras, o modelo tridimensional permite testar diferentes soluções de forma relativamente rápida. Entre as estratégias adotadas incluem-se a redistribuição de varões, a alteração de diâmetros, o ajuste de espaçamentos ou a reformulação local da disposição das armaduras.

Este processo de ajuste permite melhorar a viabilidade construtiva das soluções adotadas, assegurando simultaneamente o cumprimento dos requisitos estruturais e regulamentares. A possibilidade de analisar estas alternativas diretamente no modelo tridimensional constitui um contributo relevante para a redução de problemas durante a execução em obra.

A utilização do modelo tridimensional como ferramenta de verificação permite assim não apenas representar o detalhe estrutural, mas também apoiar a tomada de decisões durante o processo de desenvolvimento do projeto.

6. Geração de Bar Bending Schedules e Documentação para Pré-fabricação

A modelação tridimensional de armaduras permite estabelecer uma ligação direta e rastreável entre o modelo digital da estrutura e a documentação utilizada no processo de fabrico. A partir do modelo final são extraídas automaticamente as Bar Bending Schedules (BBS), garantindo coerência entre a geometria modelada, os desenhos de preparação e as listagens utilizadas em produção (Figura 4).

Drawing Number:		510-541				Foundations		prepared by:		AM		date prepared:		30/06/2025	
Revision:		A				level:		checked by:		NC/JT		date revised:		30/06/2025	
Member	BAR MARK	TYPE AND SIZE	No. of MBRS	No. of BARS IN EACH	TOTAL No.	LENGTH of EACH BAR mm *	BAR SHAPE CODE	*A [mm]	*B [mm]	*C [mm]	*D [mm]	*E/R [mm]	TOTAL WEIGHT [kg]	REV.	
B1-1	FBR81	H16	1	1	1	2737	11	200	2573				4		
	FBR82	H16	1	1	1	2711	11	200	2548				4		
	FBR83	H16	1	1	1	2686	11	200	2522				4		
	FBR84	H16	1	1	1	2159	21	200	1832	200			3		
	FBR85	H16	1	1	1	2184	21	200	1858	200			3		
	FBR86	H16	1	1	1	2210	21	200	1883	200			3		
	FBS14	H8	1	10	10	840	52	100	275	61	61		3		
B1-10	FBR37	H16	2	3	6	5680	0	5680					54		
	FBR38	H16	2	3	6	6320	0	6320					60		
	FBS1	H8	2	22	44	1440	52	150	525	61	61		25		
B1-11	FBR43	H16	1	3	3	5909	0	5909					28		
	FBR44	H16	1	3	3	5269	0	5269					25		
	FBS1	H8	1	20	20	1440	52	150	525	61	61		11		
B1-12	FBR41	H16	1	3	3	4057	0	4057					19		
	FBR42	H16	1	3	3	5997	0	5997					28		
	FBS1	H8	1	14	14	1440	52	150	525	61	61		8		
	WSR8	H10	1	10	10	1587	11	114	1496				10		

Figura 4 - Excerto de Bar Bending Schedule extraída diretamente do modelo

As BBS constituem o principal documento de referência para o fabrico de armaduras, contendo a identificação de cada varão, o diâmetro, o comprimento total, a forma de dobragem e a quantidade necessária. A informação é organizada segundo códigos individuais associados a

cada geometria de barra, permitindo garantir a rastreabilidade entre o modelo tridimensional e os elementos produzidos em fábrica.

A extração direta das BBS a partir do modelo reduz o risco de erros associados à transcrição manual de informação e permite atualizar automaticamente as listagens sempre que são introduzidas alterações na modelação das armaduras.

Para além das listagens de barras, o modelo tridimensional permite gerar desenhos de preparação que representam a disposição das armaduras nos diferentes elementos estruturais. Estes desenhos constituem um complemento importante às BBS, facilitando a interpretação da informação pelas equipas de fabrico e montagem.

A utilização conjunta do modelo tridimensional, das BBS e dos desenhos de preparação contribui para melhorar a comunicação entre as equipas de projeto, produção e obra, reduzindo ambiguidades na interpretação da documentação e facilitando a identificação de varões específicos durante o processo de montagem.

A Figura 5 ilustra esta correspondência entre o modelo tridimensional de armaduras e a sua materialização em obra.

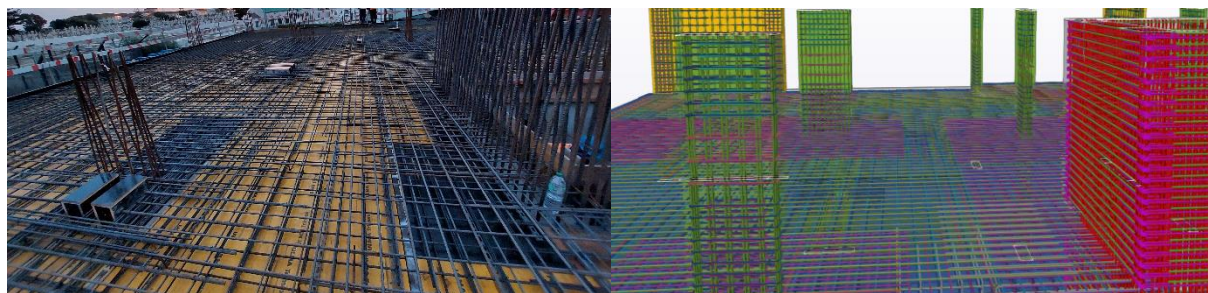


Figura 5 – (a) Armaduras em Obra | (b) Modelo BIM de armaduras

7. Resultados e Discussão

A aplicação da metodologia descrita permitiu observar benefícios relevantes ao nível da qualidade da documentação produzida e da gestão do processo construtivo. Nos projetos analisados, foram identificadas em média 3 a 4 situações críticas por piso associadas a conflitos geométricos, elevada densidade de armadura ou dificuldades de montagem, permitindo avaliar a viabilidade das soluções e introduzir ajustes antes da emissão da documentação para fabrico. A ligação direta entre o modelo tridimensional e a extração automática de BBS contribuiu para melhorar a consistência entre o modelo, os desenhos de preparação e as listagens utilizadas em produção, reduzindo potenciais erros associados à transcrição manual de informação e aumentando a fiabilidade das quantidades fornecidas para fabrico.

Contudo, a adoção desta abordagem implica um investimento inicial superior em termos de tempo quando comparada com processos baseados exclusivamente em desenho bidimensional. Para além disso, a implementação eficaz desta metodologia requer a definição de regras internas claras de modelação e codificação, bem como experiência na gestão da interoperabilidade entre diferentes plataformas BIM.

De forma global, a experiência obtida indica que os benefícios desta abordagem se tornam mais evidentes em estruturas com maior complexidade geométrica, elevada densidade de armadura ou em contextos onde o fabrico de armaduras assume um papel central na organização da obra.

Embora aplicada em contexto regulamentar britânico, a abordagem é transferível para outros enquadramentos normativos, desde que adaptada aos respetivos códigos de dobragem, formatos de listagem e requisitos de fabrico.

8. Conclusões e Trabalho Futuro

O trabalho apresentado demonstra que a modelação tridimensional de armaduras em ambiente BIM pode constituir uma ferramenta eficaz para o detalhe estrutural orientado à produção. A integração entre o modelo geométrico da estrutura, o controlo tridimensional da disposição das armaduras e a extração automática de BBS permite reforçar a consistência da informação transmitida às equipas de fabrico e montagem.

A experiência prática descrita no artigo evidencia que esta abordagem contribui para melhorar a previsibilidade do processo construtivo, permitindo identificar antecipadamente conflitos geométricos, zonas de elevada densidade de armadura e dificuldades potenciais de execução. A utilização do modelo tridimensional como suporte ao processo de decisão revelou-se particularmente útil na fase de detalhamento, facilitando a avaliação de diferentes soluções antes da emissão da documentação final.

Apesar dos benefícios observados, a implementação desta metodologia exige um esforço inicial de desenvolvimento de processos internos, bem como uma adaptação das equipas de projeto a novas formas de trabalho baseadas em modelação tridimensional detalhada.

Como trabalho futuro, destaca-se o potencial de desenvolvimento de processos mais automatizados de geração e verificação de armaduras, incluindo a integração com resultados de análise estrutural e ferramentas de programação visual. Testes preliminares realizados em contexto de aprendizagem, com ligação entre Rhino/Grasshopper e ambientes de modelação orientados à produção, indicam potencial para automatizar tarefas repetitivas e tornar o processo de detalhe estrutural progressivamente mais eficiente.

A experiência descrita demonstra que a utilização de modelos tridimensionais de armaduras pode constituir uma ferramenta relevante para aproximar o processo de projeto de estruturas das necessidades reais do fabrico e da execução em obra.

Referências

- [1] BS 8666:2020, Scheduling, dimensioning, bending and cutting of steel reinforcement for concrete, BSI, 2020.
- [2] BS EN 1992-1-1:2004 + A1:2014 Eurocode 2: Design of concrete structures — Part 1-1: General rules and rules for buildings.
- [3] BS EN ISO 3766:2003, Construction drawings – Simplified representation of concrete reinforcement.
- [4] buildingSMART International, Industry Foundation Classes (IFC) Specification, 2022.
- [5] C. Eastman et al., BIM Handbook, 3rd ed., Wiley, 2018.
- [6] J. P. Silva, L. C. Neves e J. C. Lino, “Incorporação das Armaduras no Projeto de Estruturas em BIM”, *ptBIM*, 2019.
- [7] A. R. Maciel and F. R. Correa, “Interoperability with IFC in the Automated Rebar Fabrication”, *Proceedings of the 33rd ISARC*, pp. 872–880, 2016.