

Uso da metodologia BIM em projetos geotécnicos. Caso de estudo: Construção de reservatórios enterrados

<https://doi.org/10.21814/uminho.ed.142.6>

André Henriques¹, Nuno Silva², Miriam Lopes³

¹ *JET_{sl} Geotecnia Lda, Lisboa, 0009-0001-2499-1051*

² *JET_{sl} Geotecnia Lda, Lisboa, 0009-0007-7102-2601*

³ *JET_{sl} Geotecnia Lda, Lisboa, 0009-0003-4161-3786*

Resumo

A Modelação de Informação da Construção (BIM) é uma metodologia baseada em tecnologia digital amplamente usada na indústria da Arquitetura, Engenharia e Construção. A aplicação do BIM em projetos geotécnicos pode proporcionar benefícios significativos, pois permite tirar partido de uma melhor visualização e de uma análise mais completa dos dados geotécnicos, conduzindo a soluções mais realistas e otimizadas, tendo em conta a caracterização geológica e geotécnica existente.

Este artigo tem como objetivo apresentar o uso desta metodologia no projeto geotécnico e estrutural de dois reservatórios em Belo Horizonte, Brasil, com uma área de aproximadamente 3500 m². A análise das soluções geotécnicas e estruturais foi realizada num modelo de elementos finitos, gerado através da importação de um modelo geológico-geotécnico através do formato IFC com superfícies geológicas definidas através da interpolação dos resultados de ensaios de campo. Além disso, foi desenvolvido um modelo geométrico, o qual possibilitou evitar a colisão entre diferentes elementos e estruturas existentes e conduziu a uma melhor visualização e interpretação das diversas fases de construção. Tendo em conta os requisitos iniciais, todas as armaduras do reservatório foram modeladas e detalhadas, o que proporcionou uma melhor precisão no posicionamento de armaduras, contribuindo para melhorar a eficiência das condições de fabrico e de montagem em obra.

1. Introdução

No presente artigo apresenta-se a aplicação da metodologia BIM para a execução do projeto referente à construção dos reservatórios “Nado 1” e “Vilarinho 2” inseridos no conjunto de obras de mitigação das inundações recorrentes dos Córregos Vilarinho, Nado e Ribeirão Isidoro, integradas na bacia hidrográfica do Ribeirão do Onça. A presente obra insere-se na reestruturação do sistema de escoamento e macro drenagem da cidade de Belo Horizonte, estado de Minas Gerais, Brasil (Figura 1).

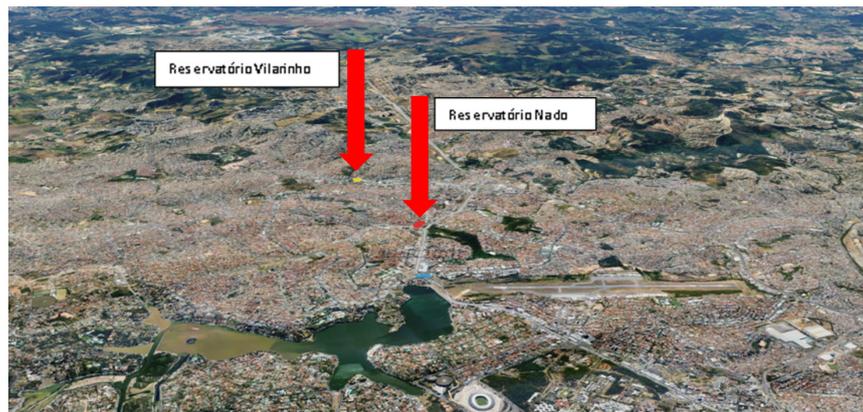


Figura 1
Município de Belo Horizonte e localização dos dois reservatórios.

A cidade tem aproximadamente 90 áreas de risco, classificadas de acordo com o número de pontos por município, sendo a região de Venda Nova, onde se inserem ambos os reservatórios, a região de maior incidência de registros de inundação, com aproximadamente 20 pontos classificados (Figura 2).

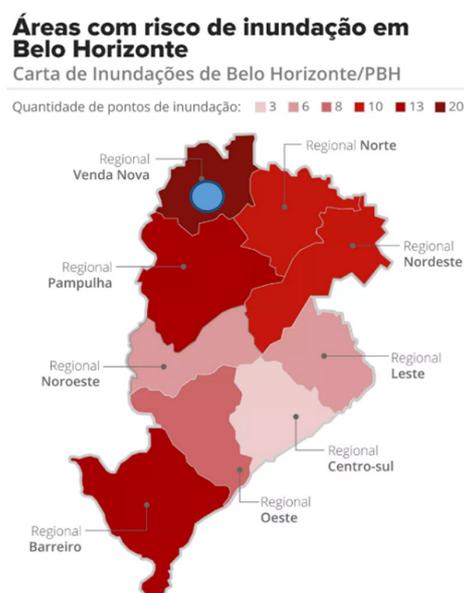


Figura 2
Mapa de Risco de inundações [1] e identificação da localização dos reservatórios (a azul).

A execução de dois reservatórios enterrados de grandes dimensões (cerca de 3500 m²) e profundidade (cerca de 35 m) na área de Vilarinho (Figura 3) e Nado

(Figura 4), inseridos numa região densamente ocupada da cidade de Belo Horizonte, resulta num processo de dimensionamento marcado por uma complexa interação solo-estrutura influenciada por diversos fatores tais como: simetria estrutural, assimetria geológica-geotécnica, análise de fluxo e estabilidade do fundo de escavação (rotura hidráulica) através de formações permeáveis, faseamento construtivo da obra e um exigente controlo da bacia de assentamentos do espaço envolvente. Neste contexto foram realizadas análises tridimensionais de modo a obter resultados com maior confiabilidade, capturando a interação solo-estrutura de um modo adequado. A realização destas análises foi concebida através do uso da metodologia BIM com a realização e integração de modelos geotécnicos, numéricos e geométricos dos elementos estruturais constituintes dos reservatórios.



Figura 3
Reservatório Vilarinho e envolventes.

Figura 4
Reservatório Nado e envolventes.

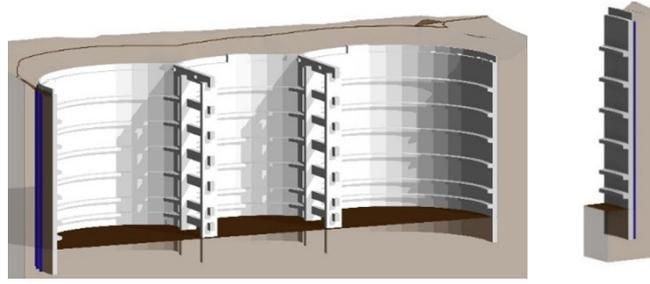
2. Solução estrutural

A conceção base para o projeto teve como objetivo o controlo de deformações na área de influência da escavação, visando a minimização do impacto da mesma nas infraestruturas existentes, bem como nos edifícios vizinhos.

Assim, dada a elevada profundidade de escavação projetada e a natureza das formações geológicas atravessadas (solos aluvionares, residuais e rochas fraturadas), optou-se por uma solução em paredes moldadas, materializada por 3 poços circulares que se intersectam. Nos pontos de interseção previu-se a execução de dois pórticos em betão armado, materializados por um conjunto de pilares e escoras travados em diversos níveis, procurando reduzir os respetivos comprimentos de encurvadura.

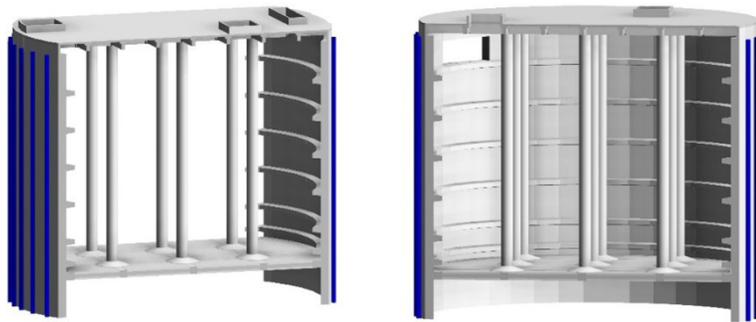
Visando garantir um adequado funcionamento da estrutura de contenção na presença de eventuais desvios da verticalidade dos painéis de parede moldada foram projetados diversos anéis de travamento, igualmente em betão armado, ao longo do perímetro da parede, responsáveis por transmitir as cargas para os diferentes níveis de escoras dos pórticos (Figura 5). Os impulsos e sobrecargas regulamentares atuantes sobre a face das paredes moldadas são por sua vez transmitidas por flexão/corte para os anéis e, por esforços axiais dos anéis e plano da parede para os dois pórticos de betão armado, ficando assim a estrutura em equilíbrio.

Figura 5
Pórticos e anéis de travamento dos reservatórios.



A estrutura da cobertura do reservatório consiste essencialmente em pré-lajes apoiadas em vigas pré-fabricadas, que por sua vez apoiam em pilares de betão armado com altura igual à altura do reservatório (Figura 6).

Figura 6
Pilares de apoio à cobertura do reservatório.



As vigas principais assentam nos pilares interiores, simplesmente apoiadas, e na viga de coroamento perimetral do reservatório (Figura 7). Transversalmente às vigas principais, existem as vigas secundárias, em forma de T, que apoiam nas vigas principais e nos pilares interiores, bem como na viga de coroamento da parede moldada.

As pré-lajes, de comprimento variável, encontram-se dispostas segundo o eixo perpendicular ao alinhamento das vigas secundárias, apoiando no topo das mesmas, bem como na viga de coroamento da parede moldada.

Figura 7
Vigas da cobertura do reservatório.



3. Utilização de ferramentas BIM

3.1. Introdução

Tendo em conta o desenvolvimento e a importância do uso de ferramentas BIM na construção civil em especial em projetos geotécnicos [2], e apesar do uso desta metodologia não constituir um requisito obrigatório por parte do dono de obra optou-se, desde início, em realizar este projeto em ambiente colaborativo, integrando e compatibilizando a geometria da estrutura do reservatório e estruturas anexas com a sua armadura, e compatibilizando a estrutura com o ambiente geológico-geotécnico circundante (Figura 8).

O desenvolvimento do projeto através da metodologia BIM permitiu ainda identificar diversas incompatibilizações entre os diferentes elementos estruturais constituintes do reservatório, as quais foram atempadamente corrigidas em projeto, previamente à execução em obra.

De referir que o projeto das restantes especialidades envolvidas foi realizado através da metodologia convencional *CAD*, pelo que a troca de informação foi efetuada através de plantas e cortes.

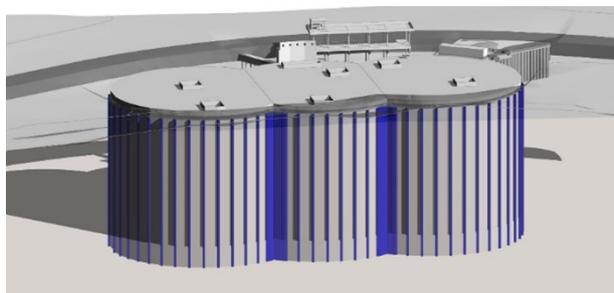


Figura 8
Integração dos modelos BIM das diversas estruturas e infraestruturas adjacentes.

3.2. Modelação geotécnica

Visando a identificação da natureza, da consistência e da estrutura das formações geológicas constituintes do substrato a intersectar pela escavação associada à construção de ambos os reservatórios, bem como das suas características geomecânicas, foram realizadas, em ambos os locais interessados, campanhas de prospeção compreendendo a realização de sondagens mecânicas, prospeção geofísica, ensaios *in situ* e de laboratório.

A análise do conjunto de informação proporcionada pelas campanhas de prospeção implementadas, convenientemente enquadrado pela consulta da carta geológica de Belo Horizonte, folha SE.23-Z-C-V1 [3], permitiu sistematizar as diferentes unidades lito-estratigráficas interferidas pelos terrenos onde se pretende proceder à implantação dos reservatórios “Nado 1” e “Vilarinho 2”.

Verifica-se assim que o ambiente geológico local envolve, em geral, uma camada superficial de materiais modernos de origem antrópica, aluvionar e coluvionar, denominados como “depósitos de aterro” e “depósitos aluvionares/coluvionares” respectivamente. Subjacente a estas formações, encontra-se um substrato datado do Arqueano, representando a unidade lito-estratigráfica designada por “Complexo Belo Horizonte” (Ab), composto superficialmente por solos residuais/saprólitos que recobrem um maciço rochoso de gnaiss com um grau de alteração que varia de são a muito alterado

De um modo geral, para efeitos de dimensionamento, a cada uma das unidades geológicas existentes no terreno estudado, fez-se corresponder uma zona geotécnica, permitindo uma fácil associação dos resultados dos ensaios com as variações geológicas detetadas nas sondagens.

Por forma a realizar uma avaliação mais correta dos materiais intersetados pelas paredes moldadas [4], assim como aferir os diversos volumes de escavação desses materiais e a posição do nível freático existente, optou-se por efetuar uma modelação tridimensional da estrutura geológica tendo por base a informação proporcionada pelo extenso plano de prospeção realizado.

Esta modelação foi desenvolvida através da ferramenta de Estratigrafia do *software GEO5*, a qual permite, através da introdução de diversos dados de ensaios de campo pontuais (sondagens, poços, CPT, DPT, SPT, DMT e PMT), representando um conjunto de pontos que assinalem transições entre as várias formações, e do levantamento topográfico, interpretar e gerar um modelo geológico composto por um conjunto de superfícies de transição entre as diversas formações que constituem o terreno na zona dos reservatórios (Figura 9 e Figura 10). A realização deste modelo é efetuada de uma forma iterativa, envolvendo a interpretação e análise do modelo obtido até que este possua os resultados fiáveis e em conformidade com o estudo geológico-geotécnico.

Figura 9

Estratigrafia gerada pelo GEO5 após a inserção dos dados dos ensaios geotécnicos.

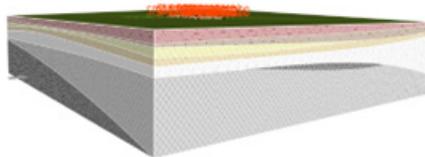
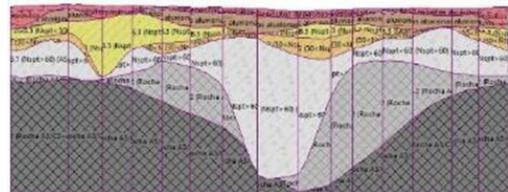


Figura 10

Corte longitudinal da estratigrafia existente na zona do reservatório.



Toda esta informação foi colocada no programa através da georreferenciação com coordenadas X, Y e Z, por forma a possibilitar a exportação posterior para os programas de modelação numérica e geométrica da estrutura através do formato universal IFC (Figura 11). De referir que esta exportação apenas continha a informação geométrica das interfaces, assim como a indicação da camada superior e inferior de cada interface, não tendo sido possível a exportação de informação geotécnica.

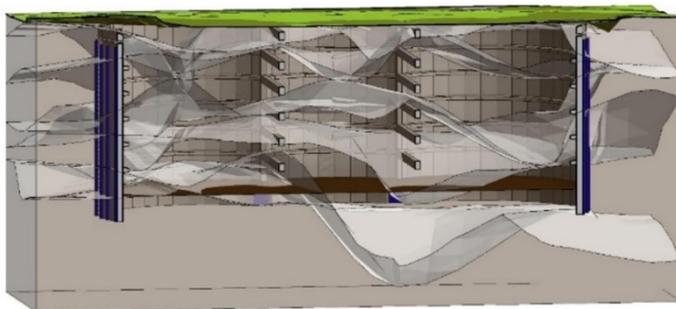


Figura 11
Interfaces entre unidades geotécnicas realizadas no *GEO5* e exportadas para o modelo geométrico *REVIT* em formato *IFC*.

3.3. Modelação numérica

Procurando avaliar o efeito da assimetria geológica-geotécnica, da assimetria estrutural e da presença das estruturas e infraestruturas vizinhas, e deste modo estimar da melhor forma possível a variação espacial de impulsos atuantes nas paredes de contenção e, conseqüentemente, dos esforços e deformações atuantes na estrutura, procedeu-se à realização de análises de elementos finitos tridimensionais, recorrendo-se ao *software PLAXIS 3D*, simulando as principais fases construtivas.

As referidas análises consistiram na realização de modelos tridimensionais que englobam a totalidade da estrutura de contenção, bem como as estruturas e infraestruturas vizinhas (Figura 12). A geometria dos modelos de cálculo numérico, em particular, no que concerne à definição espacial da estrutura geológica, foi definida tendo por base os modelos geológicos tridimensionais apresentados no capítulo anterior.

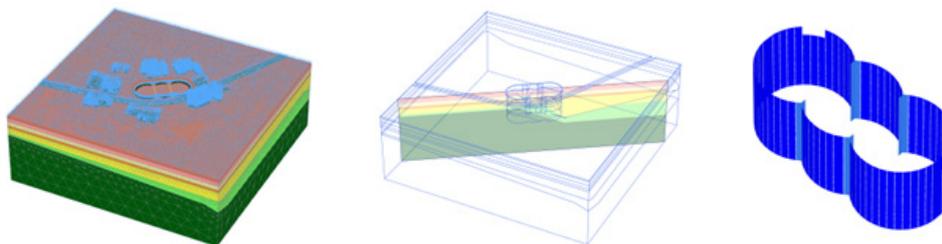
Para este efeito, visando a geração de malhas de elementos finitos adequadas, primeiramente foram importados os pontos das fronteiras geotécnicas (gerados no modelo *GEO 5*) para o *AutoCAD 3D*, seguindo-se a criação de superfícies NURBS (*Non Uniform Rational Basis Spline*) na transição entre as diversas formações que constituem o terreno na zona dos reservatórios e, por fim, a importação destas superfícies para o programa de cálculo numérico *PLAXIS 3D*. Todo este processo foi realizado de uma forma iterativa até que se gerasse uma malha de elementos finitos com qualidade suficiente para a análise de todos os elementos estruturais e infraestruturas vizinhas.

A informação geométrica relacionada com a estrutura do reservatório, em particular os painéis da parede moldada, foi importada para o modelo numérico de uma forma simplista com linhas representativas do eixo dos painéis através de uma planta em formato *DXF* para que, posteriormente, no modelo numérico, fosse realizada a extrusão das mesmas criando assim os diversos painéis constituintes da parede moldada. Esta abordagem, embora limitativa, permitiu reduzir erros numéricos aquando da interação dos diferentes softwares, por estes possuírem diferentes tolerâncias de modelação.

O domínio de análise, em planta, correspondeu a uma área de 385 m x 365 m, alcançando uma profundidade máxima de 133 m.

Figura 12

Geometria e malha de elementos finitos do modelo tridimensional de cálculo de um reservatório e seus elementos estruturais (PLAXIS 3D).



3.3. Modelação geométrica

Tendo por base os desenhos do anteprojeto estrutural realizado em *AutoCAD*, optou-se por realizar a modelação geométrica da estrutura do reservatório e estruturas acessórias no *REVIT*, compatibilizadas através de georreferenciação.

Por forma a tornar o projeto mais completo, ajudar a ter uma melhor perceção de todos os elementos constituintes dos modelos e a extrair de uma forma mais simples as quantidades de materiais dos diversos elementos constituintes do reservatório, nomeadamente a cofragem, o betão e as armaduras, foram criadas diversas fases, simulando de uma forma simples a construção do reservatório. Assim, foram definidas as seguintes fases:

1. Existente (Figura 13a) – Topografia existente modelada no *Civil3D* e importada no *REVIT* através das ferramentas constituintes do programa;
2. Escavação (Figura 13b) – Escavação necessária para atingir a plataforma de trabalho de execução dos painéis da parede moldada;
3. Muro guia (Figura 13c) – Escavação da zona do muro guia e execução do mesmo por forma a guiar a execução dos painéis da parede moldada no troço inicial e, assim, garantir uma maior verticalidade;
4. Painéis e *jet grouting* (Figura 13d) – Execução dos painéis da parede moldada e das colunas de *jet grouting*;
5. Viga de coroamento (Figura 13e) – Execução da viga de coroamento que liga todos os painéis da parede moldada e permite um funcionamento em conjunto dos mesmos;
6. Anéis e escoras (Figura 13f) – Execução faseada dos anéis de contenção dos vários níveis e respetivas escoras;
7. Fundações e pilares (Figura 13g) – Execução das fundações e respetivos pilares interiores de apoio à cobertura;
8. Vigas de cobertura (Figura 13h) – Colocação das vigas de cobertura pré-fabricadas;
9. Lajes de cobertura (Figura 13i) – Colocação das pré-lajes e betonagem da lâmina de compressão.

De referir ainda que a realização do modelo utilizando estas fases foi fundamental para que todos os intervenientes na execução dos reservatórios (projetistas, construtores, fiscalização e dono de obra) pudessem entender de uma forma clara o planeamento e a execução da obra.

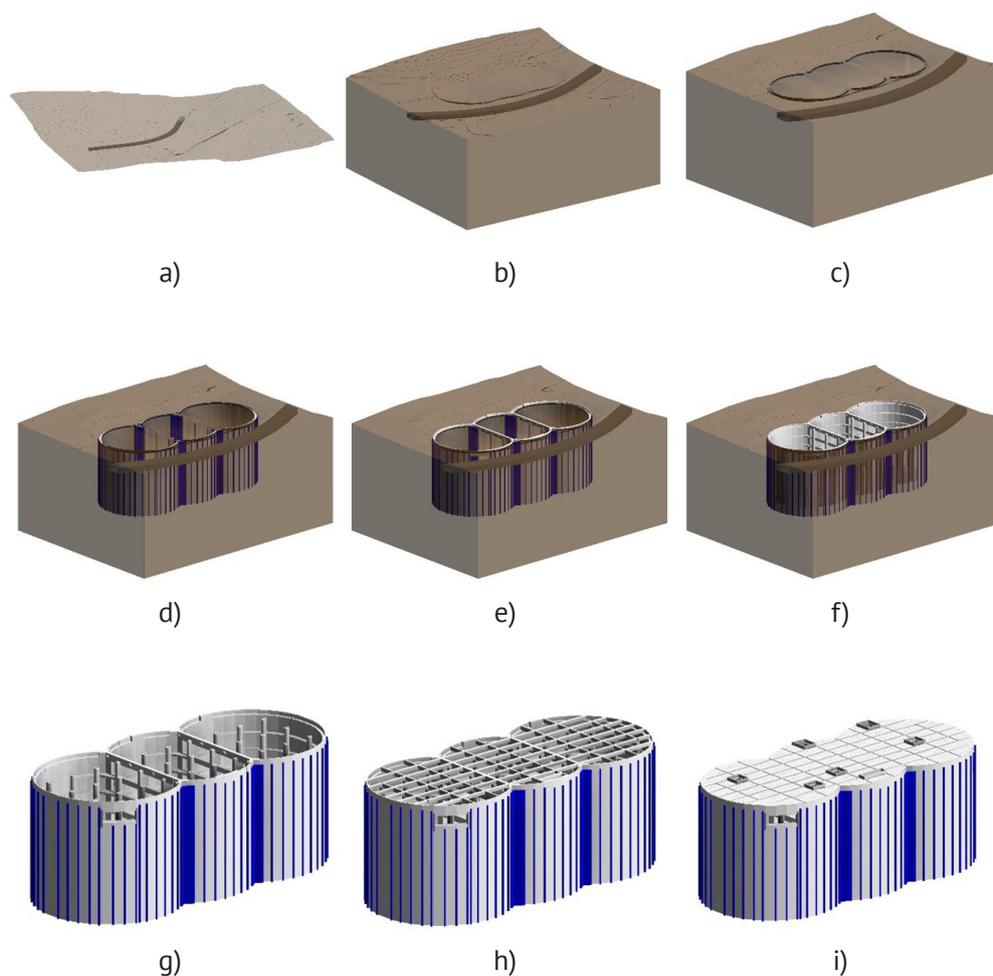


Figura 13
Fases para a execução da estrutura: a) existente; b) escavação; c) muro guia; d) painéis e *jet grouting*; e) viga de coroamento; f) anéis e estroncas; h) vigas de cobertura; i) lajes de cobertura.

3.4. Modelação das armaduras

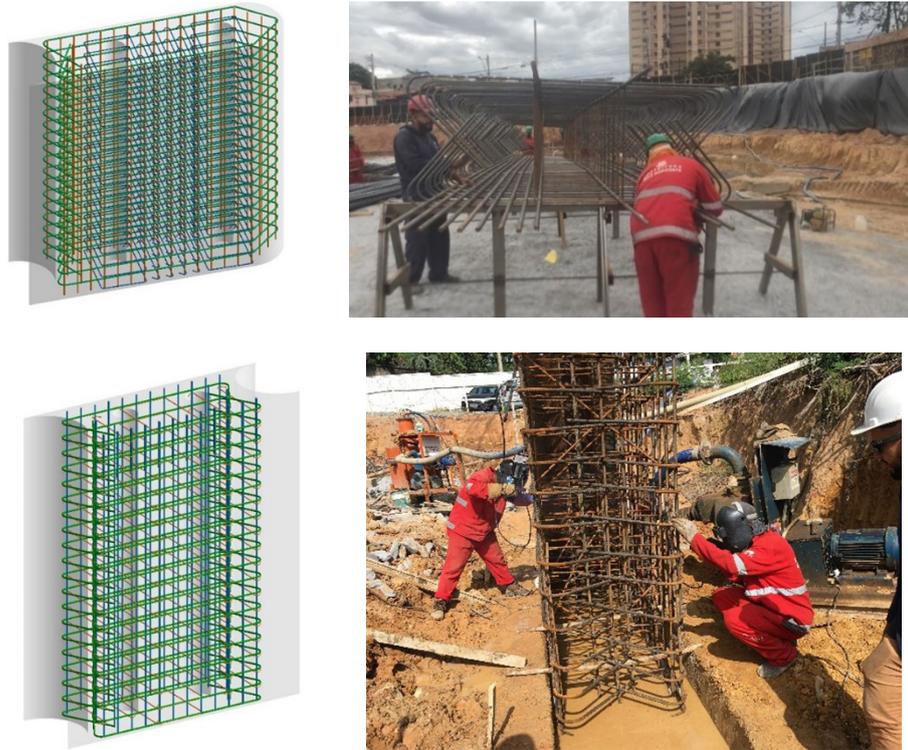
Os varões dos elementos constituintes do reservatório foram modelados nos *softwares REVIT* e *TEKLA* possibilitando a perfeita e total compatibilização entre elementos para que, em fase de obra, não existissem quaisquer dúvidas ou erros na montagem das armaduras.

A modelação dos elementos mais simples e com um maior desenvolvimento em comprimento, como os painéis da parede moldada foi desenvolvida no *REVIT* (Figura 14) enquanto a modelação dos elementos mais complexos como as vigas e lajes da cobertura foi executada no *TEKLA* (Figura 15). Para cada tipo de elemento foram representados todos os tipos de varões utilizados, incluindo o diâmetro, comprimento, quantidade e ainda uma tabela resumo com as quantidades de aço para cada diâmetro.

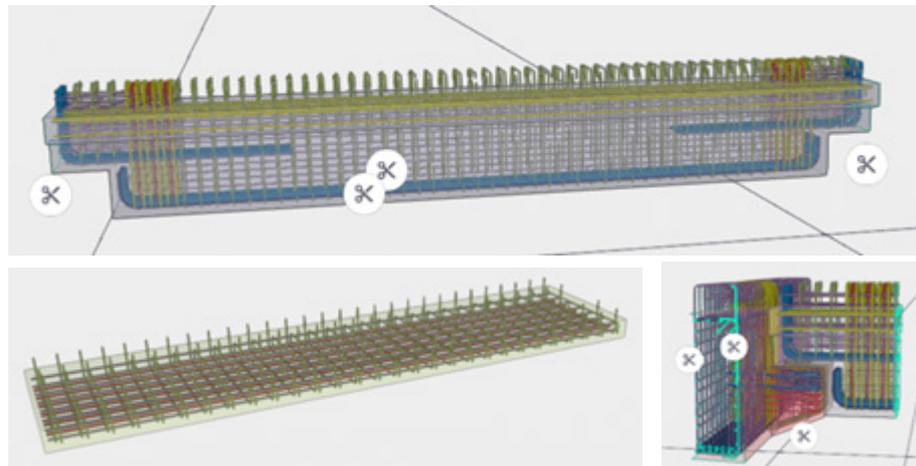
De referir que uma vez que a modelação geométrica foi apenas desenvolvida no *software REVIT*, foi necessário exportar o modelo geométrico realizado através do formato universal *IFC* para que fosse possível, posteriormente, a modelação de armaduras no *TEKLA*.

Figura 14

Modelação das armaduras de diferentes painéis e montagem das mesmas em obra.

**Figura 15**

Modelação das armaduras de diferentes painéis e montagem das mesmas em obra.



Esta modelação, apesar de morosa, apresenta inúmeras vantagens para os projetos geotécnicos, em especial para os projetistas e para os construtores, nomeadamente:

- Redução dos desperdícios de aço da obra;
- Redução do tempo despendido na apresentação e medição das armaduras quando comparado com os métodos tradicionais via CAD;
- Correção dos erros e incompatibilizações entre armaduras numa fase preliminar;
- Avaliação de todos os detalhes necessários para uma boa execução;
- Medições adaptativas e automáticas;
- Otimização do transporte das armaduras.

4. Considerações finais

O presente artigo abordou o uso da metodologia BIM para a execução do projeto de fundações e estruturas de dois reservatórios subterrâneos com cerca de 35 m de profundidade inseridos no sistema de controlo de cheias da cidade de Belo Horizonte, no Brasil.

Os modelos geológico-geotécnicos realizados bem como a sua integração (de uma forma iterativa) com os modelos numéricos e geométricos permitiram tirar partido de uma melhor visualização e de uma análise mais completa dos dados geotécnicos, conduzindo a uma correta simulação da interação solo-estrutura e, conseqüentemente, a soluções mais realistas e otimizadas.

A aplicação da metodologia BIM no presente projeto geotécnico facilitou a coordenação entre os diversos elementos constituintes do reservatório e as estruturas adjacentes a este, proporcionando uma melhor e mais eficaz interpretação das diferentes fases da construção desde o início da fase de projeto, evitando erros de compatibilização durante a fase de execução.

Apesar de não ter existido uma completa coordenação com as diferentes especialidades envolvidas no processo, em particular a arquitetura e drenagem, a realização do projeto de contenção e de estruturas segundo esta metodologia trouxe benefícios à entidade executante, pois permitiu, através da análise dos modelos realizados, esclarecer durante o período de obra diversas dúvidas relacionadas com a geometria bem como a posição das armaduras dos diversos elementos e suas ligações.

Conclui-se por fim que esta metodologia representa uma evolução significativa na abordagem dos projetos geotécnicos e na eficiência da execução dos mesmos.

Agradecimentos

Os autores agradecem a autorização da SUDECAP e consórcio CME para a publicação do presente artigo e a colaboração e disponibilidade no envio dos dados necessários para a elaboração do documento.

Referências

- [1] Flávia Cristini, <https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2018/09/27/bh-tem-quase-90-areas-sujeitas-a-enchentes-saiba-onde-ficam.ghtml>, G1 MG Belo Horizonte, 2018
- [2] I Vaniček, D Jirásko and M Vaniček, “*Role of Geotechnical Engineering in BIM process modelling*” in *14th Baltic Sea Region Geotechnical Conference (2021)*, Helsínquia, Finlândia, 2021. Doi: 10.1088/1755-1315/727/1/012007

- [3] Brandalise, Luíz Alberto. Folha SE.23-Z-C-VI. Estado de Minas Gerais. Escala 1:100 000. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Belo Horizonte. Brasília : s.n., 1999
- [4] L. Tawelian and S. Mickovski, "*The implementation of Geotechnical Data Into the BIM Process*", 2016