

A DIGITALIZAÇÃO DOS PROCESSOS DE MODELAÇÃO GEOLÓGICA NUM CONTEXTO DE GESTÃO DA INFORMAÇÃO EM AMBIENTES BIM

Diogo Batista⁽¹⁾, Magda Roque⁽¹⁾, Miguel Alcantara⁽¹⁾, Alice Modesto⁽¹⁾, Ricardo Sardinha⁽¹⁾, Pedro Serra⁽¹⁾, David Carreira⁽¹⁾

(1) COBA – Consultores de Engenharia e Ambiente, Lisboa

Resumo

O presente *paper* pretende mostrar como a digitalização dos processos de modelação geológica e geotécnica está a transformar a gestão da informação e a integração de dados em ambiente empresarial. A implementação de ferramentas digitais, como plataformas especializadas para modelação geológica, associadas a soluções de desenho assistido (AutoCAD) e Building Information Modelling (BIM), permite uniformizar procedimentos, otimizar fluxos de trabalho e potenciar a colaboração entre equipas multidisciplinares.

A abordagem apresentada assenta na definição de padrões para a entrada e representação de dados, na criação de bibliotecas de templates e na automatização de rotinas para exportação e melhoria gráfica de perfis e logs. Estes processos digitais possibilitam a incorporação da interpretação técnica dos utilizadores nos modelos, através de métodos como a criação de sondagens fictícias, manipulação matemática de grids e integração de perfis editados em plataformas CAD, assegurando maior precisão e adaptabilidade dos modelos produzidos.

A integração com sistemas BIM decorre através de aplicações que transferem dados geológicos e geotécnicos para modelos tridimensionais, enriquecidos com atributos detalhados, facilitando a validação, rastreabilidade e reutilização da informação ao longo do ciclo de vida dos projetos. Esta estratégia conduz a ganhos significativos em produtividade, qualidade e fiabilidade dos modelos, respondendo às exigências crescentes do mercado em termos de interoperabilidade e gestão integrada da informação.

A digitalização contínua dos processos abre caminho à expansão de funcionalidades, à integração com novas plataformas e à criação de sistemas de informação geográfica, consolidando uma cultura de inovação e excelência operacional na empresa.

1. Introdução e enquadramento

A digitalização dos processos de trabalho nas áreas de geologia e geotecnia tornou-se determinante para garantir rastreabilidade, consistência e integração da informação ao longo do ciclo de vida dos projetos. Na COBA, a adoção de metodologias e ferramentas orientadas a dados – com particular destaque para a utilização do *software* RockWorks, em articulação com

plataformas CAD e BIM – permitiu transformar dados heterogêneos de prospeção em modelos geológico-geotécnicos coerentes, auditáveis e interoperáveis. O presente artigo descreve a abordagem integrada desenvolvida pela COBA, evidenciando as opções tecnológicas adotadas, as decisões metodológicas subjacentes e os resultados alcançados na produção de modelos e documentação técnica compatíveis com ambientes BIM.

Os estudos geológicos e geotécnicos alimentam decisões estruturais numa vasta gama de empreendimentos (infraestruturas lineares, fundações, túneis, barragens), mas os seus dados de origem são intrinsecamente heterogêneos: relatórios de campo, registos laboratoriais, logs de sondagens, ensaios in situ, cartografia e modelos digitais de terreno, frequentemente em formatos díspares. Sem uma estratégia digital consolidada, emergem assimetrias de representação, redundâncias e dificuldades de atualização, que dificultam a integração com modelos de outras disciplinas e com sistemas BIM exigidos por donos de obra. Acresce a esta dificuldade, a ausência de ferramentas de digitalização da construção, que permitam de uma forma simples, integrar e representar a informação geológico-geotécnica no ambiente comum de dados que compõe o Modelo BIM. Este grau de complexidade, aliado à fraca resposta tecnológica tem-se traduzido numa maturidade reduzida do mercado na disponibilização e implementação deste tipo de soluções.

A COBA respondeu a estes desafios através da combinação de diferentes ferramentas digitais, da normalização de processos, da promoção da interoperabilidade e do desenvolvimento interno de soluções específicas. A articulação entre o RockWorks, o AutoCAD e o Revit permitiram assegurar a interoperabilidade necessária à coordenação multidisciplinar, bem como a reutilização consistente da informação ao longo das diferentes fases do ciclo de vida do projeto.

2. Ferramenta de Modelação Geológica (RockWorks)

Na ausência de uma ferramenta BIM especificamente vocacionada para o processamento e gestão da informação geológica, a COBA optou por recorrer a soluções digitais especializadas, ainda que não integralmente compatíveis com os padrões BIM, mas tecnicamente adequadas às exigências dos estudos geológico-geotécnicos. Neste contexto, foi selecionado o software RockWorks, amplamente utilizado na organização e análise de dados de sondagens e de natureza tabular.

O RockWorks permite a estruturação sistemática da informação geológica através da criação de mapas base, secções, modelos de superfícies (*grids*) e modelos sólidos (*voxels*), bem como a geração de perfis e logs em ambientes 2D e 3D. A aplicação opera com tabelas tipificadas - nomeadamente de localização, estratigrafia, litologia e dados do tipo *I Data*, *P Data* e *T Data* - e disponibiliza diversos algoritmos de interpolação, incluindo *Inverse Distance Weighting* (IDW), *kriging* e triangulação, complementados por funcionalidades como *densify* e *polyenhance*. Os modelos são armazenados em formatos proprietários específicos para grelhas e sólidos (RwGrd e RwMod), sendo posteriormente exportáveis para ambientes CAD através do formato DXF e visualizáveis nas plataformas RockPlot2D e RockPlot3D. Esta base tecnológica constitui o suporte fundamental da cadeia de valor desenvolvida, a qual é detalhada nas secções seguintes do presente artigo.

2.1 Inputs

A introdução de dados no RockWorks é realizada através de um ficheiro Excel multifolhas, estruturado de forma a reproduzir a organização da base de dados da aplicação. Este ficheiro integra informação de identificação e localização das sondagens - incluindo cotas e coordenadas - bem como dados de litologia e/ou estratigrafia, complementados por tabelas destinadas à introdução de parâmetros numéricos, textuais, discretos ou contínuos. A flexibilidade deste modelo de entrada de dados permite representar, de forma consistente e estruturada, um vasto conjunto de ensaios *in situ*, tais como SPT/NSPT, ensaios pressiométricos, ensaios de permeabilidade (Lefranc e Lugeon), CPT/CPTu e PDL/DPSH. Adicionalmente, possibilita a integração de parâmetros geotécnicos relevantes - incluindo grau de alteração (W), afastamento de fraturas (F), recuperação (REC) e RQD - bem como a definição de zonamentos geotécnicos e hidráulicos e a incorporação de metadados de enquadramento.

A informação de prospeção, frequentemente disponibilizada em formato PDF, é assim convertida para um formato estruturado através deste ficheiro Excel, permitindo a sua posterior importação e representação digital no ambiente do RockWorks. Este processo constitui um passo fundamental na transição de dados analógicos ou semiestruturados para um modelo digital coerente e passível de integração em fluxos de trabalho subsequentes.

2.2 Modelação geológica

A modelação geológica no RockWorks é realizada a partir da interpretação dos dados de entrada pelo software, sendo esta interpretação passível de controlo e ajustamento por parte do utilizador através de diferentes mecanismos. O primeiro, e aquele que exerce maior influência na elaboração inicial do modelo geológico-geotécnico 3D, consiste na definição do algoritmo de interpolação da prospeção. O software disponibiliza diversos algoritmos [1], cuja adequação depende das condições geológicas locais, tratando-se de uma temática específica que não constitui o foco do presente artigo. À medida que aumenta a complexidade das formações e das camadas geológico-geotécnicas, os resultados produzidos exclusivamente por processos automáticos de interpolação tendem a afastar-se da interpretação técnica do utilizador, baseada na análise crítica dos dados de prospeção. Nestas situações, torna-se necessário intervir diretamente no processo de modelação, recorrendo a mecanismos de manipulação da interpolação.

Uma primeira abordagem consiste na introdução de pontos de controlo intermédios, que funcionam como sondagens fictícias. Estes pontos permitem caracterizar localmente zonas bem definidas do ponto de vista geológico-geotécnico, forçando o algoritmo de interpolação a respeitar essa informação e influenciando, de forma controlada, as áreas adjacentes do modelo. Uma segunda estratégia baseia-se na aplicação de operações matemáticas sobre os contactos interpolados, substituindo os resultados automáticos por superfícies representadas por malhas de elementos finitos manipuladas pelo utilizador. Por exemplo, quando se pretende que determinada camada geológica acompanhe, de forma controlada, o perfil do terreno e, simultaneamente, respeite os dados de prospeção disponíveis, é possível combinar estas duas condições utilizando a malha de elementos finitos da superfície do terreno como referência inicial. Sobre essa base são aplicadas operações matemáticas que incorporam os efeitos

observados na prospeção, resultando numa grid final que pode ser utilizada em alternativa à superfície gerada automaticamente pelo software.

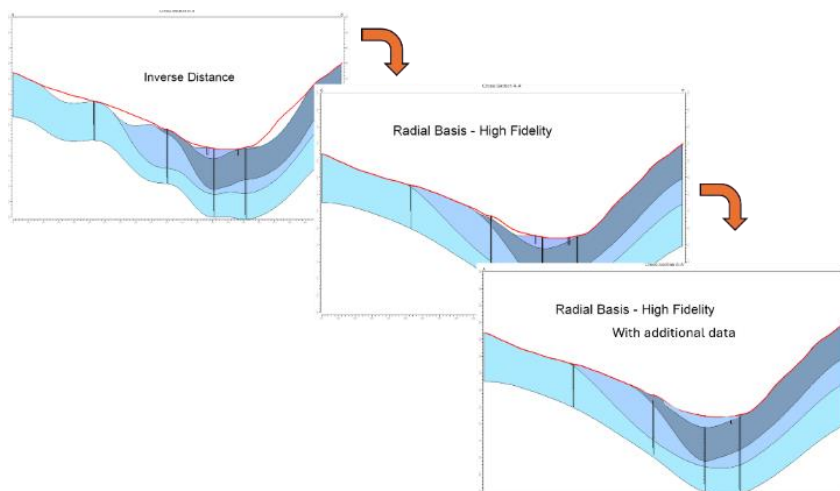


Figura 1: Métodos de interpolação e intervenção humana na produção do modelo

Por fim, quando persistem discrepâncias entre os resultados obtidos e a interpretação técnica do utilizador, é possível gerar perfis geológicos representativos do modelo, ajustá-los manualmente de acordo com essa interpretação e reintroduzir essa informação no processo de modelação. Através deste procedimento, o modelo passa a reproduzir, nas zonas abrangidas pelos perfis interpretados, resultados coincidentes com o input definido pelo utilizador.

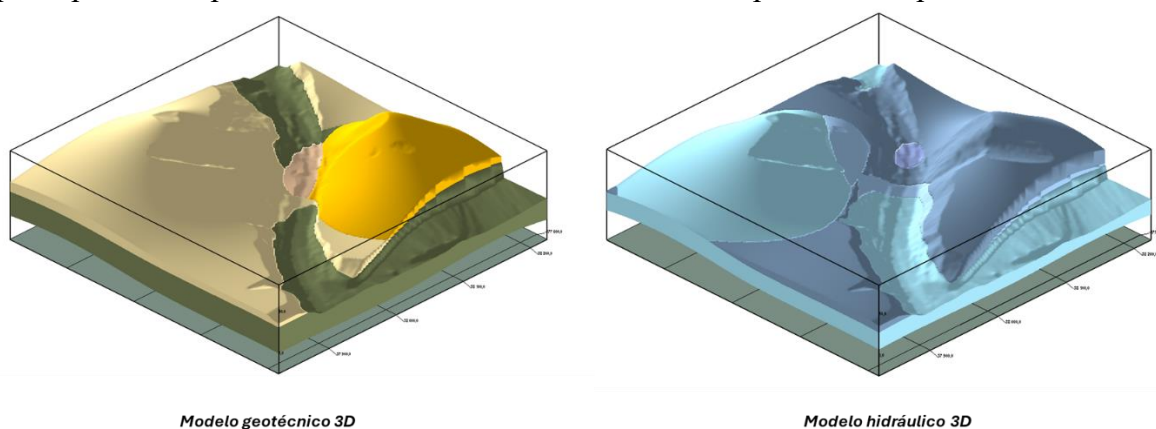


Figura 2: Exemplos de modelos geológico-geotécnicos no RockWorks

Esta versatilidade permite não apenas aumentar o rigor e a fiabilidade dos modelos produzidos, através da incorporação de um contributo essencial e dificilmente automatizável - a experiência e o conhecimento técnico dos profissionais responsáveis pelos estudos geológicos e geotécnicos - como também responder a diversos desafios inerentes ao processo de projeto e de modelação. Entre estes destacam-se a existência de sondagens incompletas ou assimetricamente distribuídas, a sua execução faseada e frequentemente espaçada no tempo, bem como a presença de condições geológicas complexas que nem sempre são adequadamente representadas apenas com base nos ensaios de campo.

2.3 Outputs (desenhos e documentação)

Um dos aspetos fundamentais em qualquer processo de digitalização ou de modelação tridimensional consiste na produção dos elementos que integram as peças desenhadas do projeto. A existência de modelos tridimensionais devidamente calibrados facilita significativamente este processo, permitindo a extração de perfis em qualquer zona do modelo para suporte à elaboração da documentação gráfica. Apesar da diversidade de ferramentas disponibilizadas pelo software e da precisão dos resultados obtidos ao nível analítico, a qualidade da sua representação gráfica revela-se insuficiente face aos padrões de desenho da empresa. Com efeito, embora o RockWorks seja uma ferramenta particularmente robusta para o estudo e interpretação das condições geológicas do local, não constitui um software de desenho assistido por computador, apresentando limitações evidentes ao nível da qualidade visual dos *outputs* produzidos.

Perante este enquadramento, a equipa de trabalho da COBA identificou a necessidade de desenvolver automatismos específicos para o processamento gráfico dos resultados gerados, com o objetivo de elevar a qualidade da sua apresentação final. A criação destes automatismos implicou, em paralelo, a padronização de um conjunto alargado de definições gráficas e de critérios de representação. A conjugação destes dois fatores - normalização de procedimentos e desenvolvimento interno de rotinas - conduziu à criação de um conjunto de ferramentas próprias da empresa, orientadas para a melhoria substancial da qualidade gráfica dos elementos produzidos, assegurando o cumprimento dos padrões de desenho da COBA. Estas ferramentas permitem, entre outras funcionalidades, a alteração sistemática de tipos e tamanhos de letra, a introdução de máscaras para melhoria da legibilidade da informação, o alinhamento consistente de títulos e simbologias, a inserção de blocos parametrizados e a montagem automática de desenhos prontos a *layout*, reduzindo o retrabalho e garantindo uniformidade visual. Em complemento, a definição de *templates* normalizados para logs e perfis, bem como de esquemas cromáticos para a representação de zonamentos geotécnicos e hidráulicos, assegura uma linguagem gráfica coerente e consistente entre os diferentes documentos e modelos produzidos ao longo do projeto.

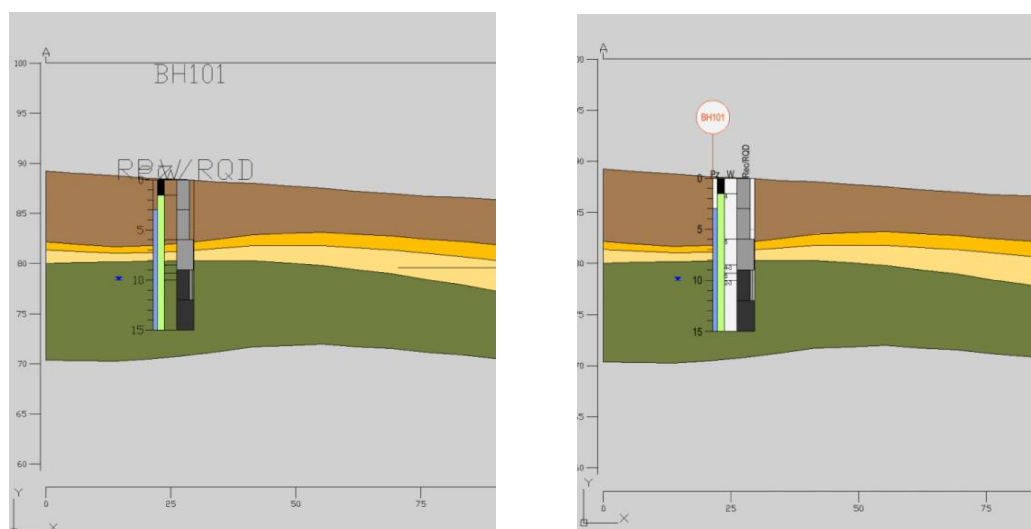


Figura 3: À esquerda, o output gráfico do RockWorks, à direita o resultado da aplicação das rotinas desenvolvidas internamente

3. Integração BIM (Revit e Civil 3D)

Num contexto atual de exigências crescentes associadas à adoção da metodologia BIM em todo o setor, tornou-se pertinente identificar soluções que permitissem integrar os modelos geológico-geotécnicos num ambiente comum de dados, assegurando a interoperabilidade com as principais ferramentas BIM. A abordagem inicial da COBA centrou-se na procura de mecanismos que permitissem materializar, em formato BIM, os dois principais elementos deste processo: as sondagens e os modelos geológico-geotécnicos tridimensionais. Para esse efeito, foi selecionada a ferramenta Revit, da Autodesk. Esta opção foi tomada com a plena consciência de que o Revit não constitui a solução mais adequada para a manipulação e representação deste tipo de informação específica; contudo, teve em consideração a realidade atual do mercado, na qual esta plataforma assume um papel dominante, oferecendo maiores garantias de interoperabilidade e de compatibilidade com clientes e parceiros. Importa ainda referir que o RockWorks não disponibiliza, até à data, mecanismos de exportação direta para formatos intermédios normalizados, como o IFC, o qual, por sua vez, ainda não se encontra plenamente preparado para acomodar este tipo de informação geológico-geotécnica.

A materialização das sondagens em ambiente BIM foi realizada através do desenvolvimento de rotinas em Dynamo, utilizando como *input* o mesmo ficheiro Excel que serve de base à produção dos modelos geológicos e geotécnicos no RockWorks. Esta abordagem permite, inclusivamente, a incorporação imediata dos resultados da prospeção no Revit, sem necessidade prévia de construção de modelos tridimensionais do terreno. As sondagens são representadas sob a forma de fustes estratificados, com materiais associados às respetivas zonas geotécnicas, complementadas por tabelas que expõem os principais atributos relevantes do modelo, tais como profundidades, descrições e classificações. Esta ligação direta contribui para uma integração célere e consistente das campanhas de prospeção no ecossistema BIM.

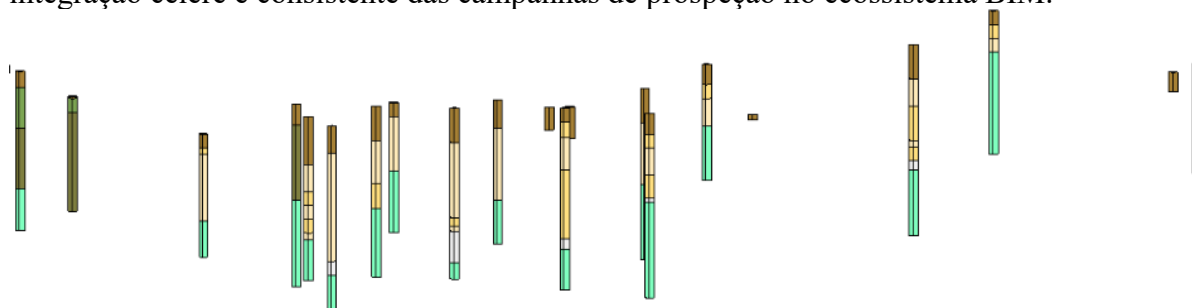


Figura 4: Materialização das sondagens no Revit

A segunda vertente do processo corresponde à construção do modelo geológico tridimensional em ambiente Revit. Para melhor enquadrar esta etapa, importa referir que o RockWorks funciona essencialmente como uma aplicação baseada em elementos finitos, permitindo a geração de dois tipos principais de modelos: modelos de superfícies (*grids*), nos quais cada zonamento geológico-geotécnico é delimitado por uma superfície de contacto superior e uma inferior, e modelos de *voxels*, constituídos por elementos cúbicos tridimensionais, em que cada *voxel* contém a informação relativa ao zonamento a que pertence. Na presente fase, a COBA optou pelo desenvolvimento de modelos de superfícies, uma vez que estes produzem resultados mais adequados às necessidades do projeto, apesar de implicarem um maior grau de complexidade na modelação. Com efeito, este tipo de modelos impõe regras de estratificação e

ordenação dos zonamentos que, em muitas situações, não se verificam de forma rigorosa no contexto geológico real. Apesar das limitações anteriormente referidas relativamente aos formatos de exportação, o RockWorks permite a geração de ficheiros de texto ASCII das superfícies interpoladas, no formato XYZ. Com base nesta funcionalidade, a COBA desenvolveu ferramentas específicas em C# para a reconstrução das superfícies de contacto em ambiente Revit, permitindo a criação de camadas estratigráficas enriquecidas com metadados. A fiabilidade deste processo de transferência revelou-se elevada, não se registando, de forma significativa, desvios entre os modelos produzidos no RockWorks e os respetivos modelos reconstruídos no Revit.

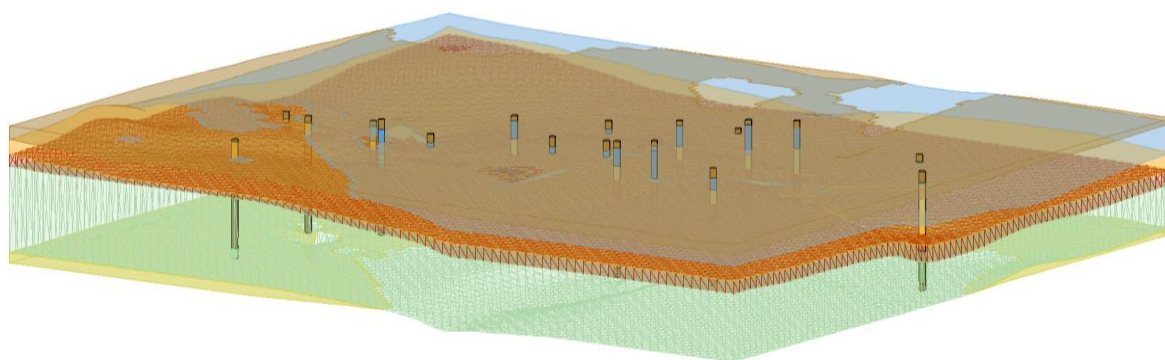


Figura 5: Materialização das sondagens e do modelo geológico-geotécnico no Revit

A possibilidade de integrar modelos geológico-geotécnicos no Revit, uma das plataformas BIM mais amplamente utilizadas, introduz benefícios relevantes tanto ao nível do desenvolvimento interno dos projetos como no domínio da interoperabilidade e da partilha de informação com outros intervenientes. Atualmente, a COBA dispõe da capacidade de cruzar, num único ambiente tridimensional, um modelo geotécnico composto por camadas, sondagens e respetivos atributos, com os restantes modelos de projeto, nomeadamente das especialidades de terraplanagens e movimentos de terras, escavações, estruturas de contenção e estabilização, bem como outras condições existentes, como edifícios e infraestruturas afetadas. A integração e análise conjunta desta informação permitem às equipas de engenharia desenvolver soluções mais informadas, rigorosas e fiáveis, contribuindo de forma decisiva para o aumento da qualidade global dos projetos. Do mesmo modo, ao nível da comunicação técnica - em particular na apresentação e fundamentação das soluções propostas - a visualização tridimensional das condições geológicas assume um papel de elevada relevância e eficácia. Por fim, a integração do estudo geológico e geotécnico no ambiente comum de dados BIM contribui para a simplificação da produção documental e para a redução de erros, reforçando a consistência e a rastreabilidade da informação ao longo do ciclo de vida do projeto.

4. Reflexões

Com o aumento das exigências associadas à produção de modelos BIM na fase de projeto - modelos que passaram a integrar, de forma crescente, os entregáveis contratuais e a constituir um elemento central de partilha de informação e desenvolvimento dos trabalhos - emergem questões relevantes relacionadas com a responsabilidade sobre a informação partilhada e, em

particular, com o seu grau de fiabilidade. Esta temática assume especial importância no domínio dos estudos geológicos e geotécnicos, onde a interpretação técnica desempenha um papel determinante.

Nos entregáveis tradicionais de projeto, a caracterização das condições do local é habitualmente apresentada sob a forma de perfis geológicos e geotécnicos. Estes elementos, pela própria natureza do processo de estudo, são produzidos em número limitado e circunscrevem-se às secções consideradas mais relevantes para o projeto. Resultam de um processo intensivo de observação, cruzamento de informação e interpretação humana, ficando assim claramente delimitada a responsabilidade do autor pelos conteúdos que produz. No novo paradigma da modelação BIM e tridimensional, o projetista vê-se, no entanto, confrontado com a necessidade - ou imposição - de disponibilizar um modelo contínuo, que deixa de ser discreto e localizado para passar a abranger a totalidade do volume modelado. Esta natureza contínua inviabiliza, em tempo útil, uma verificação exaustiva e uma validação detalhada de todo o modelo, introduzindo um risco acrescido na partilha de informação relativa a extensas zonas onde o grau de fiabilidade da interpolação não é homogéneo. Esta situação torna-se tanto mais evidente quanto maior for o afastamento relativamente às zonas diretamente suportadas por dados de prospeção ou por perfis interpretados.

No âmbito do trabalho de programação e desenvolvimento interno realizado pela COBA, foi criada uma ferramenta que permite posicionar qualquer perfil geológico-geotécnico existente em formato CAD na sua localização tridimensional correta. A partir desta funcionalidade, surgiu a proposta de enriquecer o modelo BIM geológico-geotécnico não apenas com as sondagens e o modelo tridimensional contínuo, mas também com os perfis interpretados que integram as peças desenhadas do projeto. A incorporação destes perfis em ambiente 3D permite que qualquer utilizador do modelo compreenda de forma clara o seu grau de validade e de fiabilidade, sendo essa perceção tanto mais próxima da interpretação do autor quanto maior for a proximidade às sondagens ou aos perfis explicitamente interpretados. Esta abordagem constitui uma possível estratégia para a gestão do grau de interpretação associado aos modelos geológico-geotécnicos - optando-se deliberadamente por não utilizar o termo “incerteza”, uma vez que esta é intrínseca a este tipo de estudos, independentemente da metodologia adotada.

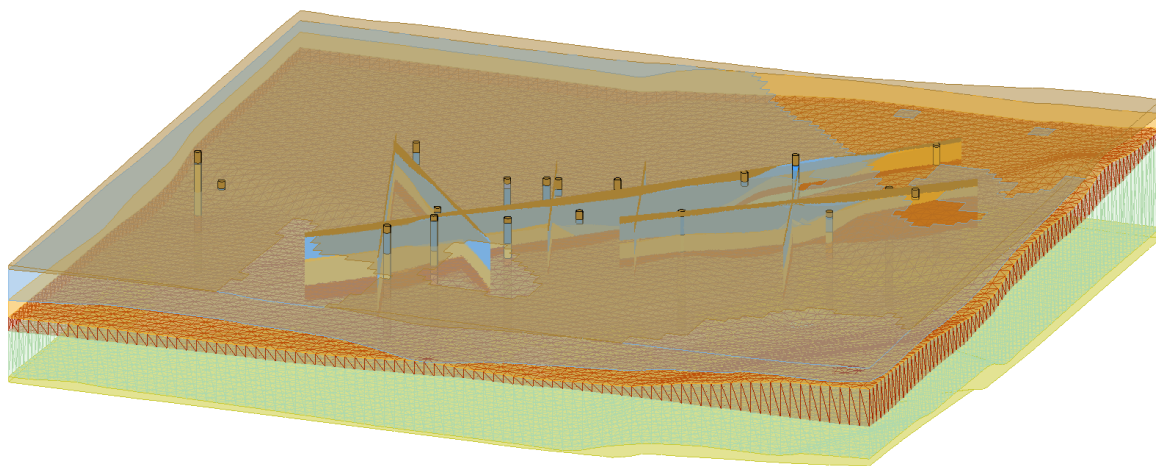


Figura 6: Proposta de Modelo BIM Geológico-geotécnico: Sondagens, Zonamento e Perfis Interpretados

Existem, naturalmente, outras abordagens possíveis. A capacidade de gerar perfis diretamente a partir do modelo tridimensional e de os editar de forma a refletir a interpretação humana, assegurando simultaneamente que essas alterações se repercutem novamente no modelo 3D, abre a possibilidade de definir mecanismos de interpretação mais ou menos padronizados, associados a diferentes níveis de interpretação técnica.

Esta reflexão encontra um paralelismo direto com o conceito original de Level of Development (LOD), conforme definido pela American Institute of Architects (AIA) [2]. Na sua génese, os LOD não foram concebidos apenas para balizar o nível de detalhe geométrico dos modelos - e, por consequência, o esforço de modelação associado - mas sobretudo para explicitar o grau de fiabilidade (*reliability*) da informação modelada. Este enquadramento conceptual revela-se particularmente pertinente no contexto da modelação das condições existentes, sugerindo a necessidade de uma reflexão mais aprofundada sobre a correta caracterização do LOD aplicado à representação geológico-geotécnica, a qual pode, na prática, ser desenvolvida com diferentes níveis de precisão e de interpretação.

5. Conclusões e desafios futuros

A digitalização implementada pela COBA produziu ganhos tangíveis na produtividade, qualidade gráfica e confiabilidade dos modelos, reforçando a interoperabilidade com ambientes BIM e a transparência das decisões técnicas. Em projetos recentes, como a Barragem de Alportel e a Linha Vermelha do Metropolitano de Lisboa, os processos descritos — normalização de dados, modelos híbridos (algoritmo + interpretação), automatização CAD e integração BIM — demonstraram escalabilidade e adaptabilidade a contextos distintos (bacias locais vs. empreitadas lineares com subsites), permitindo calibrar modelos a partir de perfis de interpretação e estabilizar a representação de contactos em zonas críticas. Estes casos evidenciam também a utilidade de estratégias de subsite e definição de malhas adequadas à geometria e à densidade dos dados, mitigando artefactos de interpolação e melhorando o desempenho computacional.

No plano organizacional, a utilização consistente de templates, bibliotecas e tabelas de cores, associada a rotinas de exportação/correção e a aplicações que transportam informação do RockWorks para o Revit, consolidou práticas internas, reduziu dependências de operações manuais repetitivas e elevou o nível de maturidade digital da empresa na área geotécnica. A rastreabilidade dos dados e a possibilidade de os reutilizar (por exemplo, em zonas geográficas com forte presença histórica da COBA) abrem caminho a um repositório georreferenciado de projetos, com evidentes benefícios na fase de proposta, no benchmarking interno e na aceleração de arranques de novos contratos.

Persistem, contudo, desafios e oportunidades de evolução. Do lado da modelação, interessa aprofundar a integração de falhas e descontinuidades, e a transferência direta para o Civil 3D de modelos/superfícies, bem como expandir a informação das sondagens em Revit (para além do zonamento geotécnico). Do lado dos dados, a automação baseada em IA para transformar registos de campo em Excel normalizados promete reduzir o tempo de preparação, diminuir erros de transcrição e acelerar iterações. Estas linhas de desenvolvimento, já identificadas pela COBA, constituem a próxima etapa de uma trajetória onde a digitalização se afirma como eixo de qualidade, eficiência e colaboração multidisciplinar.

Referências

- [1] RockWare Earth Science & GIS Software, *RockWorks 2021 Training Manual*, Colorado USA, 2013.
- [2] American Institute of Architects, *AIA Document G202 – Project Building Information Modeling Protocol Form*, , 2013.