

Modelagem geológico-geotécnica da Estação São Joaquim, Metro de São Paulo

R. C. Hammerle ¹; E. Pabst ²; J. Yasbek ³, M. D. Monteiro ⁴;

Resumo – Este trabalho aborda a modelagem geológico-geotécnica implícita elaborada no contexto do projeto de adaptação e ampliação da Estação São Joaquim, do Metro de São Paulo, para conexão da Linha 1 – Azul à Linha 6 – Laranja. O trabalho utilizou quatro campanhas de sondagens temporalmente espaçadas, dos anos de 1976, 2011, 2015 e 2023, perfazendo um conjunto de 21 sondagens com padrões de descrição tátil-visual da litologia distintos, incorrendo em um cenário desafiador para o método tradicional de interpretação manual das seções geológicas. A modelagem implícita tridimensional, por meio do software Leapfrog[®], se mostrou eficiente neste tipo de cenário complexo, possibilitando a otimização dos esforços da equipe na representação fidedigna dos conceitos da geologia local dentro do modelo tridimensional, a interlocução direta com o sistema BIM (*Building Information Modelling*) e a maior auditabilidade do processo.

Abstract – This work addresses the implicit geological-geotechnical modeling developed within the context of the adaptation and expansion project of the São Joaquim Station, of the São Paulo Metro, to connect Line 1 – Blue to Line 6 – Orange. The study utilized four geotechnical survey campaigns spaced temporally, from the years 1976, 2011, 2015, and 2023, resulting in a set of 21 boreholes with distinct tactile-visual lithology description patterns, creating a challenging scenario for the traditional method of manual interpretation of geological sections. The three-dimensional implicit modeling, using Leapfrog[®] software, proved efficient in this complex context, enabling the optimization of the team's efforts in accurately representing local geological concepts within the three-dimensional model, directly interacting with the BIM (*Building Information Modeling*) system, and enhancing the auditability of the process.

Palavras-Chave – Modelagem geológica implícita; túneis; bacia sedimentar São Paulo.

¹ Geólogo., ADDA Consultoria: São Paulo – SP, (11) 93472-8279, roberto.hammerle@addaconsultoria.com.br

² Eng., Interact Engenharia: São Paulo - SP, (11) 98399-5551, eugenio@interact.eng.br

³ Geólogo., ADDA Consultoria: São Paulo – SP, (11) 99750-0083, julio.yasbek@addaconsultoria.com.br

⁴ Geólogo., Metrô de São Paulo: São Paulo - SP, (11) 96456-6053, mdmonteiro@metrosp.com.br

1. INTRODUÇÃO

A rede metroviária da cidade de São Paulo é responsável pelo transporte de milhões de paulistas diariamente. Em constante ampliação, o Metro conta atualmente com 104,4 km de extensão, em 6 linhas conectando 91 estações, reduzindo as distâncias na maior cidade da América do Sul por meio de túneis e trechos em superfície. Representando o início desta história, a Linha 1 – Azul foi inaugurada no dia 14 de setembro de 1974 e a Estação São Joaquim no dia 17 de fevereiro de 1975, com a capacidade para 20 000 passageiros por hora.

Visando a adaptação e ampliação da Estação São Joaquim para sua conexão com a Linha 6 – Laranja, em construção, surge a demanda para o estudo de modelagem geológico-geotécnica implícita de todo o conjunto histórico de informações geológicas e geotécnicas da Estação São Joaquim. A modelagem apresentada é fundamentada em quatro campanhas de sondagem correspondentes ao (i) projeto original da estação, de 1976, (ii) ao projeto básico de ampliação, de 2011, (iii) a outro projeto básico de ampliação, de 2015, e (iv) ao projeto executivo de ampliação, de 2023.

O espaçamento temporal das campanhas de sondagem, datadas da inauguração do metrô aos dias atuais, implica em incertezas associadas ao emprego de distintos procedimentos de recuperação dos testemunhos e divergências nos padrões de descrição e interpretação das litologias. O cenário apresentado torna-se excessivamente complexo para a modelagem tradicional, que conta exclusivamente com o traçado manual, em softwares tradicionais para desenho técnico, para a interpretação de visual de dezenas de camadas sub-métricas representadas em diferentes escalas de detalhe em cada sondagem.

Como abordagem para superar este desafio, entregar produtos no formato do sistema BIM (Building Information Modelling) e fomentar a auditabilidade do processo, utilizou-se a modelagem implícita tridimensional por meio do software Leapfrog®.

2. METODOLOGIA

A modelagem implícita tridimensional, metodologia utilizada neste estudo, é uma ferramenta particularmente útil quando se trabalha com um conjunto de dados complexos e incertezas agregadas, comumente encontrados na exploração mineral e na engenharia geotécnica. Como alternativa ao método tradicional de interpolações manuais, a modelagem geológica implícita se baseia no auxílio de algoritmos matemáticos para inferir a geometria e a distribuição dos corpos geológicos a partir dos dados disponíveis.

Esta metodologia permite que os profissionais envolvidos despendam mais esforços na concepção de detalhes mais complexos da geologia local, como lentes sub-métricas de unidades sedimentares, e a elaboração de diversos modelos-testes partindo da interpretação dos mesmos dados. Além destas vantagens, a modelagem implícita possibilita a atualização automática do modelo com a entrada de novas sondagens e outros dados a qualquer momento.

O software Leapfrog®, desenvolvido pela Seequent, é uma ferramenta consolidada no campo da modelagem implícita tridimensional. O Leapfrog® utiliza o algoritmo FastRBFTM (Funções de Base Radial) para o ajuste de modelos matemáticos de um grande conjunto de dados tridimensionais representando padrões complexos e não lineares.

O processo que culmina na modelagem implícita é de suma importância para a qualidade do resultado e consiste nas quatro etapas elencadas a seguir de detalhes nos subcapítulos seguintes: 1) contextualização da geologia local a partir de dados secundários; 2) análise macroscópica (tátil e visual) dos testemunhos armazenados e o reconhecimento de campo da área de estudo; 3) compilação, avaliação técnica e seleção dos dados e 4) formatação dos dados para o padrão de entrada da modelagem. A Figura 1 apresenta o fluxo de trabalho utilizado para a modelagem geológica implícita utilizada neste trabalho.

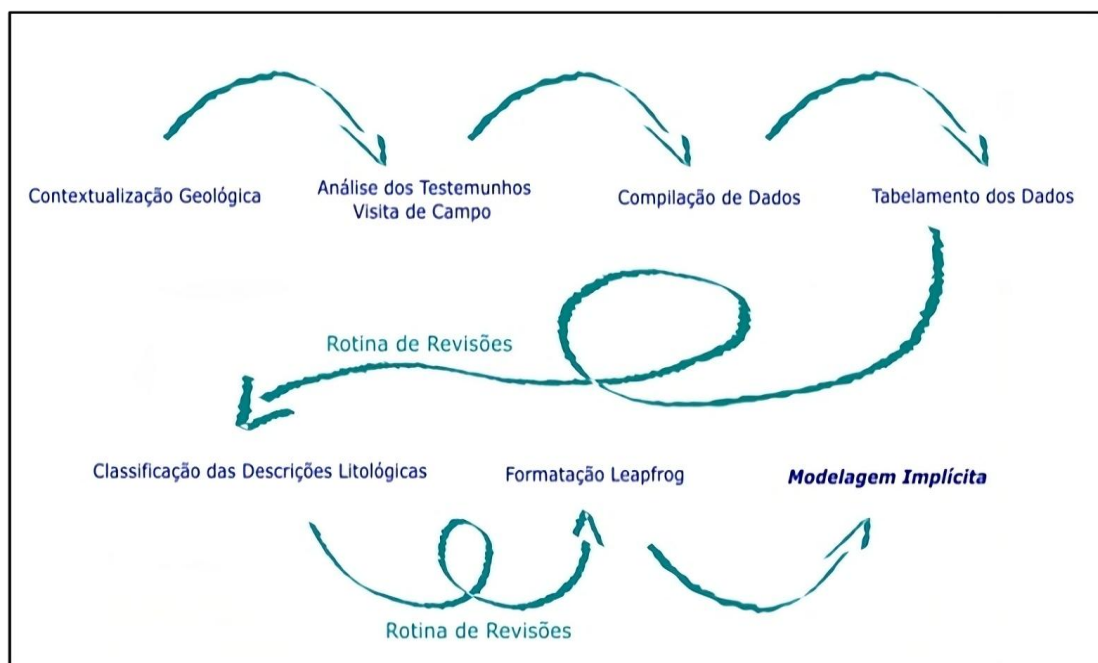


Figura 1. Fluxograma da modelagem implícita.

3. CONTEXTUALIZAÇÃO GEOLÓGICA

A área de interesse está inserida no contexto da borda da Bacia Sedimentar de São Paulo, de acordo com o mapa geológico do Estado de São Paulo (CPRM - RIGEO, 2006). A Bacia Sedimentar de São Paulo insere-se no Rift Continental do Sudeste do Brasil (Riccomini C., 1989), um sistema com cerca de 900 km, paralelo à linha da costa, composto por semi-grábens basculados para NNW (norte-noroeste).

O embasamento pré-cambriano da Bacia Sedimentar de São Paulo inclui-se no Cinturão de Dobramentos Ribeira (Hasui Y. e., 1981), formado por rochas metamórficas, migmatitos e rochas granitoides. Os depósitos sedimentares da bacia correspondem às seguintes unidades litoestratigráficas: Formação Resende, Formação Tremembé, Formação São Paulo e Formação Itaquaquecetuba, além da cobertura neogênica-quadernária (Riccomini C., 1989).

A Formação Resende é caracterizada pela presença de depósitos de sistema de leques aluviais predominando conglomerados polimíticos, brechas e diamictitos, lamitos por vezes associados a arenitos e conglomerados do sistema fluvial entrelaçado. A fácies proximal é comumente verificada na borda norte da bacia, tectonicamente ativa à época de deposição destes sedimentos, onde podem alcançar mais de 200 m de espessura. Os lamitos têm expressiva ocorrência dentro da unidade, principalmente em superfície. Os contatos superiores se dão com as formações São Paulo e Tremembé, os quais são interdigitados. Os depósitos fanglomeráticos da Formação Resende são relacionados com a abertura do Rift Continental do Sudeste Brasileiro e com o desenvolvimento de leques aluviais (Riccomini & Coimbra, 1992).

A Formação São Paulo corresponde a depósitos de sistema fluvial meandrante, sendo constituída por duas litofácies principais. A primeira litofácies é composta por arenitos grossos, conglomeráticos, com granodecrescência ascendente para siltitos e argilitos. Os depósitos pelíticos de topo são estratificados e laminados, de coloração marrom-escuro a preto e ricos em matéria orgânica. São depósitos de canais meandantes, com os sedimentos finos representando prováveis lagoas oriundas da migração e abandono de canais. A segunda litofácies é constituída por arenitos de granulação média a grossa, com granodecrescência ascendente para sedimentos arenosos progressivamente mais finos, até siltitos e argilitos. Estes depósitos são correspondentes a eventos de rompimento de diques marginais (Riccomini & Coimbra, 1992).

Segundo Riccomini & Coimbra (1992), crostas e concreções limoníticas, com espessuras variáveis, são frequentes na interface entre sedimentos argilosos e arenoso da Formação São Paulo.

A cobertura quaternária é composta por depósitos coluviais, aluviais e tecnogênicos. São denominados depósitos coluviais o conjunto representado por stone line e o horizonte argiloso situado geralmente acima desta feição. Os depósitos tecnogênicos são formados pelo resultado de atividade humana, como aterros. Os depósitos aluviais constituem-se, da base para o topo da camada, por conglomerado formado por seixos e blocos de quartzo e quartzito, sobrepostos por areias médias com estratificações cruzadas acanaladas, seguidos por sedimentos areno-argilosos turfáceos (Takiya, 1997).

Por meio da análise dos perfis de sondagem, da correlação com ensaios SPT e da revisitação dos testemunhos armazenados por meio da análise macroscópica (tátil e visual), o perfil litológico da área de interesse foi interpretado como a sobreposição da Formação Resende, Formação São Paulo e coberturas quaternárias, as quais possuem características aluvionares de afluentes do Córrego Moringuinho, que desagua no Rio Tamanduateí.

4. ANÁLISE DOS TESTEMUNHOS DE SONDAGEM E CONSTRUÇÃO DO BANCO DE DADOS

O modelo conceitual da geologia local estabeleceu comunicação com a realidade do projeto atual durante a visita dos geólogos da equipe do projeto ao armazém de testemunhos de sondagem da Estação São Joaquim, no dia 19 de março de 2024. Tais testemunhos são oriundos das investigações realizadas para embasar o projeto de interligação da Estação São Joaquim com a Linha 6 – Laranja. Por meio da análise macroscópica (tátil e visual) dos testemunhos armazenados, pode-se entender e confirmar o empilhamento estratigráfico local e tecer hipóteses específicas sobre os respectivos ambientes deposicionais e padrões geométricos de seus depósitos sedimentares.

A análise dos testemunhos de sondagem em conjunto com os registros de ensaios de sondagem a percussão é ilustrada na Figura 2.



Figura 2. Detalhe de fragmento de um testemunho de sondagem e seu respectivo boletim de sondagem

A transformação dos perfis individuais de sondagem no banco de dados adequado para a modelagem consiste em um processo de três etapas: 1) o tabelamento das descrições litológicas e seus respectivos limites superiores e inferiores; 2) a classificação das litologias descritas conforme o padrão de fácies utilizado pela Companhia do Metropolitano de São Paulo; e 3) a formatação dos dados na estruturação de entrada para o Leapfrog®.

O tabelamento das informações contidas nos arquivos dos perfis individuais de sondagem, em formato .pdf ou .dwg, é uma atividade manual e, portanto, susceptível à erros. Eventuais erros de digitação são encontrados e corrigidos por meio de uma rotina de duas revisões, por profissionais distintos, para o controle de qualidade das tabelas.

5. MODELAGEM IMPLÍCITA TRIDIMENSIONAL

A modelagem implícita de sistemas sedimentares complexos é iniciada pela separação dos principais pacotes com predominância de uma granulometria específica. No caso deste estudo, utilizou-se as denominações “ fácies arenosa” e “ fácies argilosa”, comumente empregadas na literatura técnico-científica sobre a Bacia São Paulo, para distinguir os pacotes francamente arenosos e francamente argilosos, respectivamente.

As litologias identificadas na área de estudo foram subdivididas em 1) Formação Resende, 2) Fácies Argilosa Inferior da Formação São Paulo, 3) Fácies Arenosa Central da Formação São Paulo, 4) Fácies Argilosa Central da Formação São Paulo, 5) Fácies Argilosa Superior da Formação São Paulo.

Assumindo a premissa de que estas fácies representam ambientes deposicionais distintos, as camadas, lentes e feições de menor escala foram modeladas no interior de suas respectivas fácies, sem interceptar as fácies do entorno. A conexão entre os intervalos interpretados como pertencentes à mesma camada ou lente foi realizada por meio da atribuição de sufixos no ID de litologia do intervalo, permitindo classificar os diferentes estratos de uma mesma litologia.

Ao fim do processo, levando em conta repetidos ajustes e melhorias, o modelo geológico tridimensional apresentou a conformação que é descrita a seguir. A porção inferior do modelo corresponde à Formação Resende, que é composta predominantemente por argilas siltosas pouco arenosas (4Ag1) com uma lente extensa de argila arenosa pouco siltosa com pedregulhos (4Ag2) e pequenas lentes de areias argilosas e siltosas (4Ar1 e 4Ar2), como apresentado na Figura 3.

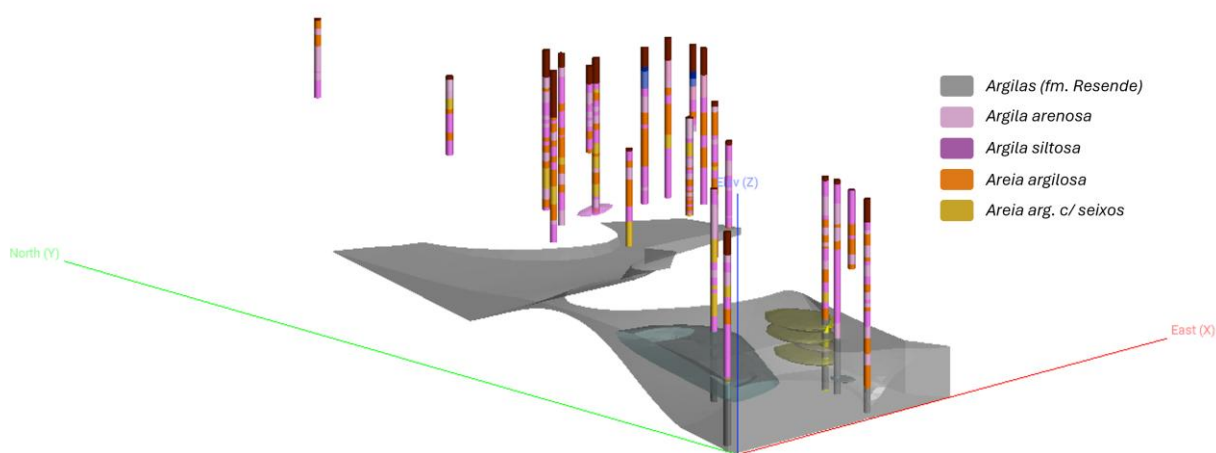


Figura 3. Modelagem da Formação Resende.

Na sequência, encontra-se o pacote francamente argiloso basal, denominado Fácies Distal Inferior da Formação São Paulo, composto predominantemente por 3Ag1, argila siltosa pouco arenosa, e populado por diversas lentes de fácies argilas arenosas (3Ag2) e areias (3Ar1 e 3Ar2), como se observa na Figura 4.

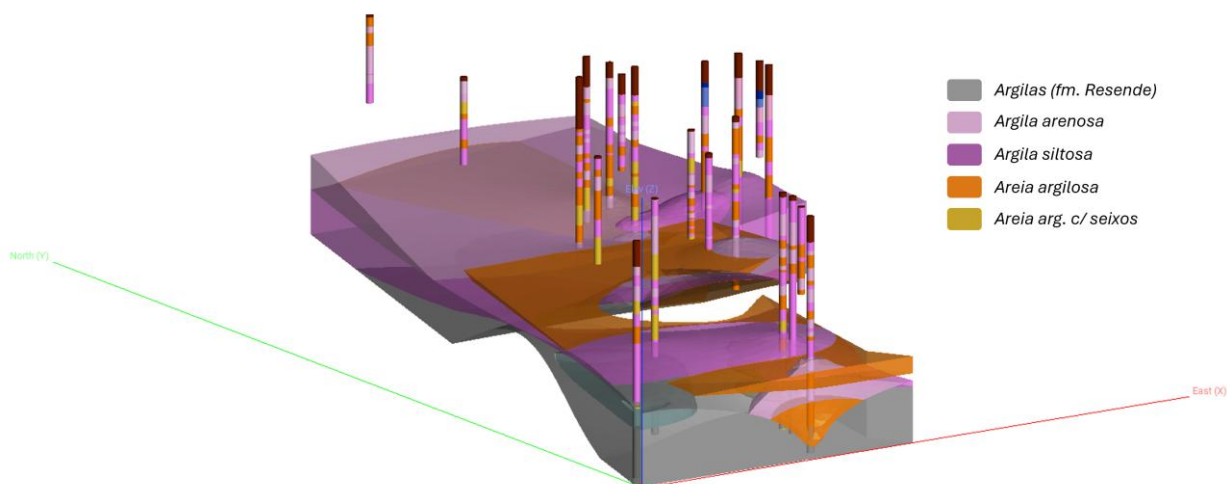


Figura 4. Modelagem da Fácies Distal Inferior da Formação São Paulo.

Sobreposto a este conjunto, encontra-se o conjunto de fácies arenosa denominado conjunto de fácies arenosa central da Formação São Paulo, composto predominantemente por 3Ar1, areia fina a média argilosa, com uma espessa camada de 3Ar2 no limite oeste do modelo e populado por diversas lentes de fácies argilosas (3Ag2 e 3Ag1), como se observa na Figura 5.

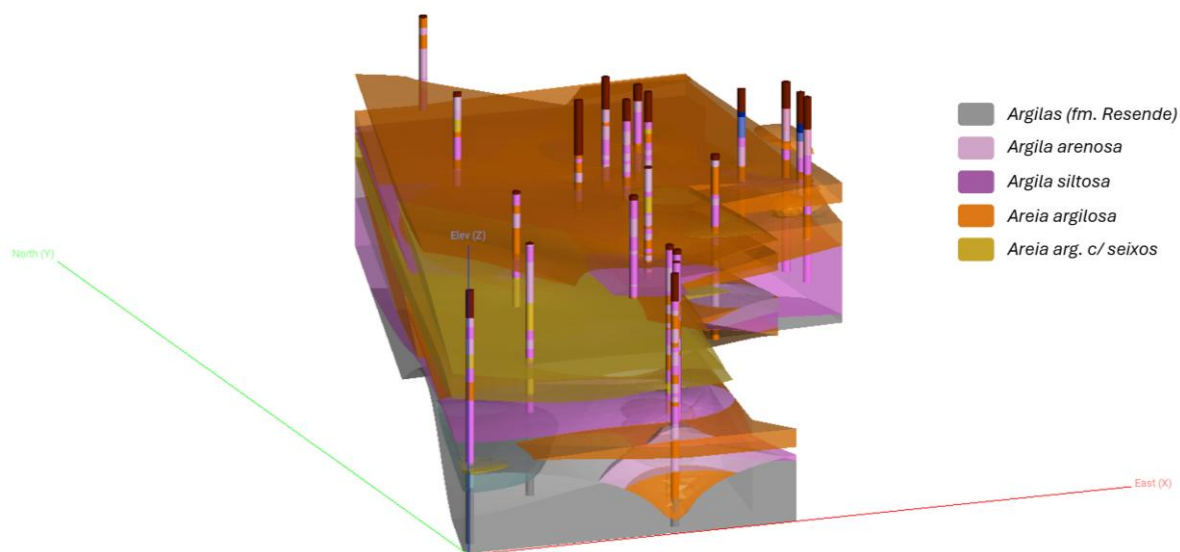


Figura 5. Modelagem da Fácies Proximal Central da Formação São Paulo.

Sobreposto ao conjunto de fácies arenosa, encontra-se o conjunto de fácies argilosa denominado conjunto de fácies argilosa central da Formação São Paulo, composto predominantemente por 3Ag1, argila siltosa pouco arenosa, e populado por diversas lentes de fácies argilas arenosas (3Ag2) e areias (3Ar1 e 3Ar2), como se observa na Figura 6.

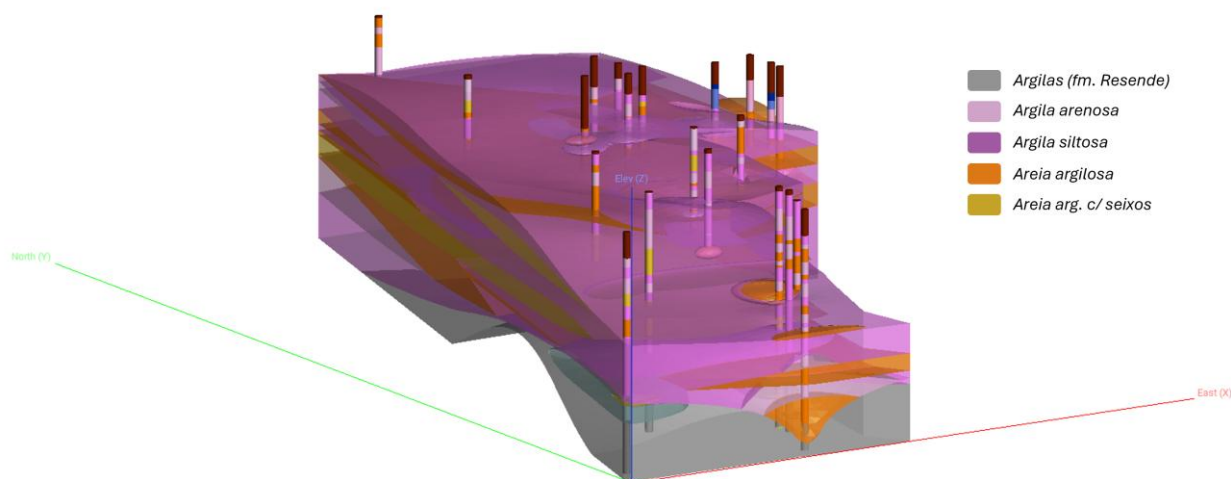


Figura 6. Modelagem da Fácies Distal Central da Formação São Paulo.

Na posição superior do perfil litológico da área, encontra-se um conjunto de fácies argilosas da Formação São Paulo, denominado conjunto de fácies argilosa superior, e depósitos aluvionares bastante restritos à área do Edifício Técnico Operacional (ETO). O conjunto de fácies argilosa superior da Formação São Paulo é composto predominantemente por 3Agp1, argila siltosa pouco arenosa e porosa, e populado por diversas lentes de fácies argilosas (3Ag1 e 3Ag2) e arenosas (3Ar1 e 3Ar2).

Os depósitos aluvionares são detectados somente nas sondagens SP-103 e SP-1601, não havendo continuidade detectada nas sondagens próximas como a SP-102 e SP-101A, como se observa na Figura 7. Acredita-se que este canal aluvionar siga a orientação NE-SW, corroborando com a direção inferida dos afluentes do córrego do Glicério.

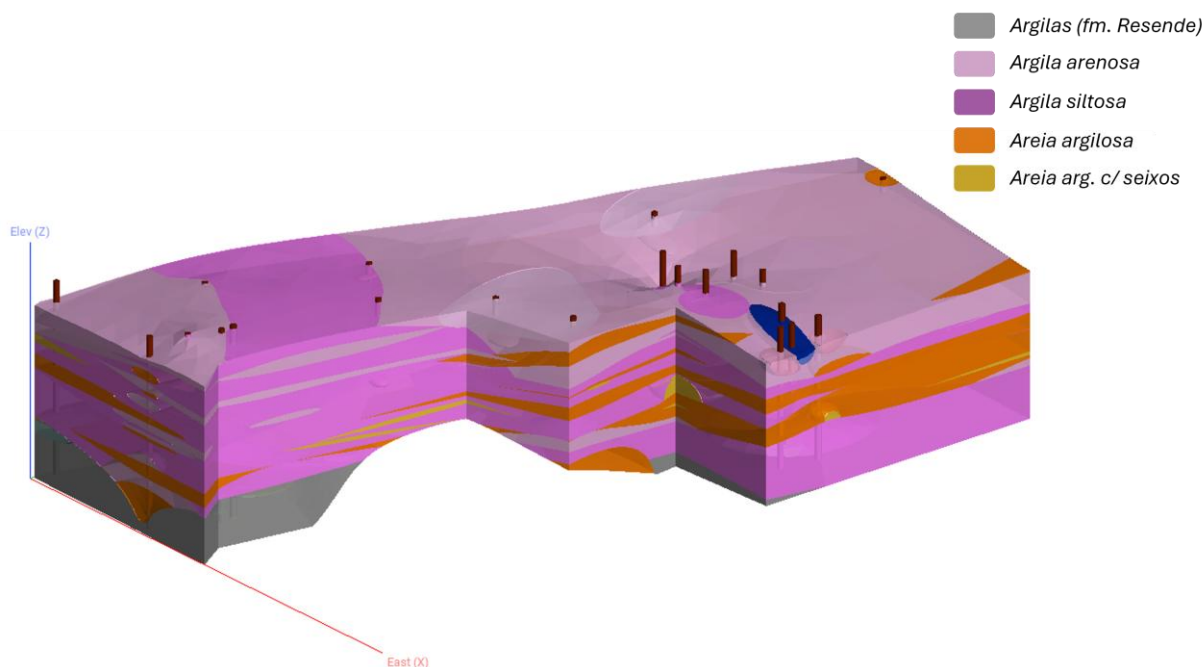


Figura 7. Modelagem da Fácies Distal Superior da Formação São Paulo.

6. CONCLUSÕES

A modelagem implícita mostrou-se mais eficaz que a modelagem tradicional para casos complexos, como o tratado neste estudo. O resultado alcançado neste estudo tem uma maior riqueza de detalhes e foi executado em um prazo inferior à maioria das modelagens tradicionais bidimensionais executadas para a mesma aplicação.

A comparação com as seções geológicas prévias é um importante critério para o controle de qualidade da modelagem, entretanto, deve-se considerar o caráter tridimensional do processo de modelagem implícita, que apresenta lentes formadas por informações de sondagens não necessariamente presentes na seção.

Nota-se, também, que em casos de geologia, com diversos estratos sedimentares sub métricos e continuidade lateral reduzida, as ferramentas de interpolação que melhor representam as lentes podem ser as desenvolvidas para as feições geológicas de intrusão e veio. Estas ferramentas podem resultar em padrões que não obedecem a lógica estratigráfica em algumas porções restritas do modelo e esta premissa deve ser considerada na utilização do modelo.

Observa-se a melhor correlação entre os perfis individuais de sondagem e os resultados da modelagem tridimensional implícita, em detrimento à elaboração de seções bidimensionais à maneira tradicional. Este resultado se deve ao tempo substancialmente menor em que o algoritmo FastRBF™, para o ajuste de modelos matemáticos de um grande conjunto de dados tridimensionais, é capaz de processar as interpretações geológicas ao se comparar com o tempo de desenhos manuais para interpretações nos softwares de desenho técnico convencionais.

A redução dos esforços empregados em desenhos manuais para os testes de interpretação e permite o foco da equipe na elocubração do modelo conceitual da geologia local e na representação fidedigna deste no modelo tridimensional.

A modelagem implícita possibilita a atualização automática do modelo com a entrada de novas sondagens. Na prática, esta característica significa que o modelo pode ser atualizado após cada nova sondagem e se tornar uma ferramenta do cotidiano da equipe. O processo de modelagem pelo software Leapfrog® é integralmente auditável e editável, corroborando com o registro das decisões técnicas e a possibilidade de alterações nas interpretações.

REFERÊNCIAS

- COMPANHIA DO METROPOLITANO DE SÃO PAULO (MOVESP). (2015). Relatório Geológico-Geotécnico - Linha 6 - Estação São Joaquim. São Paulo.
- CPRM - RIGEO. (2006). Mapa Geológico do Estado de São Paulo. São Paulo.
- Hasui, Y. e. (1975). The Ribeira folded belt. Revista Brasileira de Geociências, v. 5, n. 4, pp. p. 257-266.
- Hasui, Y., Dantas, A., Carneiro, C., & Bistrichi, C. (1981). O embasamento Pré-Cambriano e Eopaleozóico em São Paulo. Mapa Geológico do Estado de São Paulo. Pró-Minério, IPT. Vol. 1, pp. 12-41.
- Riccomini, C. (1989). O Rift Continental do Sudeste do Brasil. Tese de doutorado. Universidade de São Paulo.
- Riccomini, C., & Coimbra, A. M. (1992). Geologia da Bacia Sedimentar. Em A. Negro Jr., Solos da Cidade de São Paulo (pp. 37-94). São Paulo: ABMS/ABEF.
- TAKIYA, H. (1997). Estudo da sedimentação Neogênico-Quaternário no município de São Paulo: caracterização dos depósitos e suas implicações na geologia urbana. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.