

MODELAGEM GEOLÓGICA-GEOTÉCNICA IMPLÍCITA EM OBRAS DE INFRAESTRUTURA

Ana Paula CEZARIO DA SILVA ¹; Jéssica Luise Santos LOPES ²; Maiara Fabri MANEIA ³; Sebastião de Oliveira JUNIOR ⁴

Resumo – A modelagem implícita 3D utilizando o software *Leapfrog Works* em projetos de infraestruturas, tais como rodovias e ferrovias, tem se destacado como uma ferramenta eficiente no desenvolvimento de projetos. Os modelos gerados auxiliam na avaliação de estudo geológico-geotécnico, desde o entendimento do substrato local, até aplicação em diversas vertentes, tais como investigações geotécnicas mais aprofundadas. Por meio do uso do software *Leapfrog Works*, é possível construir modelos tridimensionais que representem, de forma dinâmica, a estratigrafia regional, os índices físicos obtidos em ensaios geotécnicos e as informações provenientes de sondagens. A modelagem implícita serve como ferramenta na análise qualitativa e quantitativa de dados, para uso em estudos de projetos de engenharia, priorizando a interpretação dos dados e dos modelos criados, com atualização dinâmica e com tempo otimizado de processamento. O objetivo do projeto é apresentar modelos tridimensionais a partir de dados litológicos (modelo estratigráfico), hidrológicos (modelo de nível d'água) e de compactação do material (modelo de índice de resistência à penetração do solo - nSPT) visando auxiliar a análise geotécnica ao longo do traçado do projeto. O estudo destaca a aplicação dessa metodologia de modelagem em um trecho da Estrada de Ferro Carajás, na região norte do Brasil, demonstrando seu potencial no suporte, planejamento e execução de obras de engenharia.

Palavras-Chave – Modelagem geológica-geotécnica, modelagem implícita, Leapfrog Works, Estrada de Ferro Carajás

Abstract – Implicit three-dimensional modeling using Leapfrog Works software in infrastructure projects, such as highways and railways, has emerged as an effective tool in project engineering. The 3D models generated support geological-geotechnical assessments, from understanding the local subsurface to applications in various domains, including more detailed geotechnical investigations. Using Leapfrog Works, it is possible to construct dynamic three-dimensional models that accurately represent regional stratigraphy, physical indices obtained from geotechnical tests, and data derived from boreholes. Implicit modeling is a powerful tool for both qualitative and quantitative analysis, improving studies by prioritizing data interpretation and model accuracy, while enabling real time updates and optimized processing time. Therefore, three-dimensional models were developed integrating lithological data (stratigraphic model), hydrological data (groundwater table model), and relative compaction (standard penetration test – SPT) to support geotechnical analysis along the railway alignment. The study highlights the application of this methodology in one segment of the Carajás Railway, in northern Brazil. The results demonstrated its potential to support planning and execution of engineering projects.

Keywords – geological-geotechnical assessments, implicit modeling, Leapfrog, Carajás Railway.

¹ Geól., MSc., ENGEFOTO S.A., Curitiba – PR, (21) 98135-4853, anapauladasilva@engefoto.com.br

² Eng. Geól., ENGEFOTO S.A., Curitiba – PR, (31) 9642-6005, jessicalopes@engefoto.com.br

³ Geól., ENGEFOTO S.A., Curitiba – PR, (41) 9622-5575, maiaramaneia@engefoto.com.br

⁴ Geól., ENGEFOTO S.A., Curitiba – PR, (41) 995314876, sebastiaojunior@engefoto.com.br

1. INTRODUÇÃO

A criação de modelos tridimensionais serve como ferramenta de avaliação quantitativa e qualitativa das informações relacionadas a geologia e geotecnia de projetos de engenharia. Dessa maneira, foram criados modelos matemáticos tridimensionais a partir das informações de sondagens, tais como descrição tátil-visual e nível de água, assim como valores de golpes NSPT, ao longo de um trecho, de aproximadamente 16 quilômetros, da Estrada de Ferro Carajás, localizada entre os estados do Maranhão e do Pará.

Ao total, foram criados modelos categóricos do tipo estratigráfico, de nível de água e modelos numéricos de NSPT, com base nas informações de sondagens realizadas ao longo da área de abrangência do estudo. A partir disso, perfis geológico-geotécnicos são extraídos ao longo dos trechos objetos de avaliação, servindo como ferramenta para visualização, caracterização e interpretação das principais feições geológicas e geotécnicas do substrato. Ao longo do desenvolvimento do projeto novos dados podem ser inseridos em modelos já construídos, havendo então atualização dinâmica do produto, otimizando o tempo de geração de resultados.

2. MODELAGEM IMPLÍCITA

A modelagem geológico-geotécnica apresentada nesse estudo foi realizada no *software Leapfrog Works 2024.1.2*, distribuído pela *Seequent*.

O fluxo de trabalho é realizado a partir da criação de uma superfície topográfica, a qual é a base para a modelagem. A partir disso, são inseridos os dados diversos obtidos a partir de furos de sondagens para criação e interpretação dos modelos. São criados modelos dinâmicos implícitos, de rápido processamento para maior tempo de interpretação dos resultados.

A ferramenta interpoladora utilizada para criação das superfícies é a *FastRBF*. O RBF é um algoritmo similar a krigagem, de base radial, criando modelos suaves e contínuos a partir de dados esparsos, enquanto o *FastRBF*, desenvolvido pela *Seequent*, apresenta a facilidade de trabalhar com bases de dados muito grandes. Conta com um recurso robusto de extrapolação de dados, mesmo com lacunas grandes de informação. As superfícies são geradas de maneira automatizada a partir da função matemática, na qual o algoritmo faz uma análise de dados e constrói a superfície que mais se adequa aos dados fornecidos. A função matemática intera dados regulares e amostras com dados irregulares e constrói as superfícies tridimensionais.

O interpolador preenche os campos onde não existem dados, combinando valores conhecidos de dados próximos. São criados valores estimados, fortemente influenciados por valores de amostras próximas do que aquelas localizadas mais distantes. O interpolador define quanto é a importância a se atribuir em cada amostra, com base na distância do ponto de interesse. Essa característica se aplica aos dados que são utilizados nas análises dentro da geociência.

A modelagem implícita é uma modelagem baseada em função 3D, utilizando um *software* intuitivo, com integração de múltiplos dados, atualização dinâmica e com interpretações explícitas. Os modelos são replicáveis e é possível testar hipóteses a partir de dados disponíveis.

3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A Estrada de Ferro Carajás (EFC), uma das maiores ferrovias do Brasil, apresenta extensão total de aproximadamente 893 quilômetros, que atravessa os estados do Maranhão e do Pará. A área de estudo está localizada no município de Parauapebas (PA) e corresponde ao eixo principal dessa ferrovia, compreendendo o trecho entre o km 863+080 e o km 879+568, totalizando 16,488 quilômetros de extensão. A Figura 1 apresenta o mapa de localização da área de estudo.

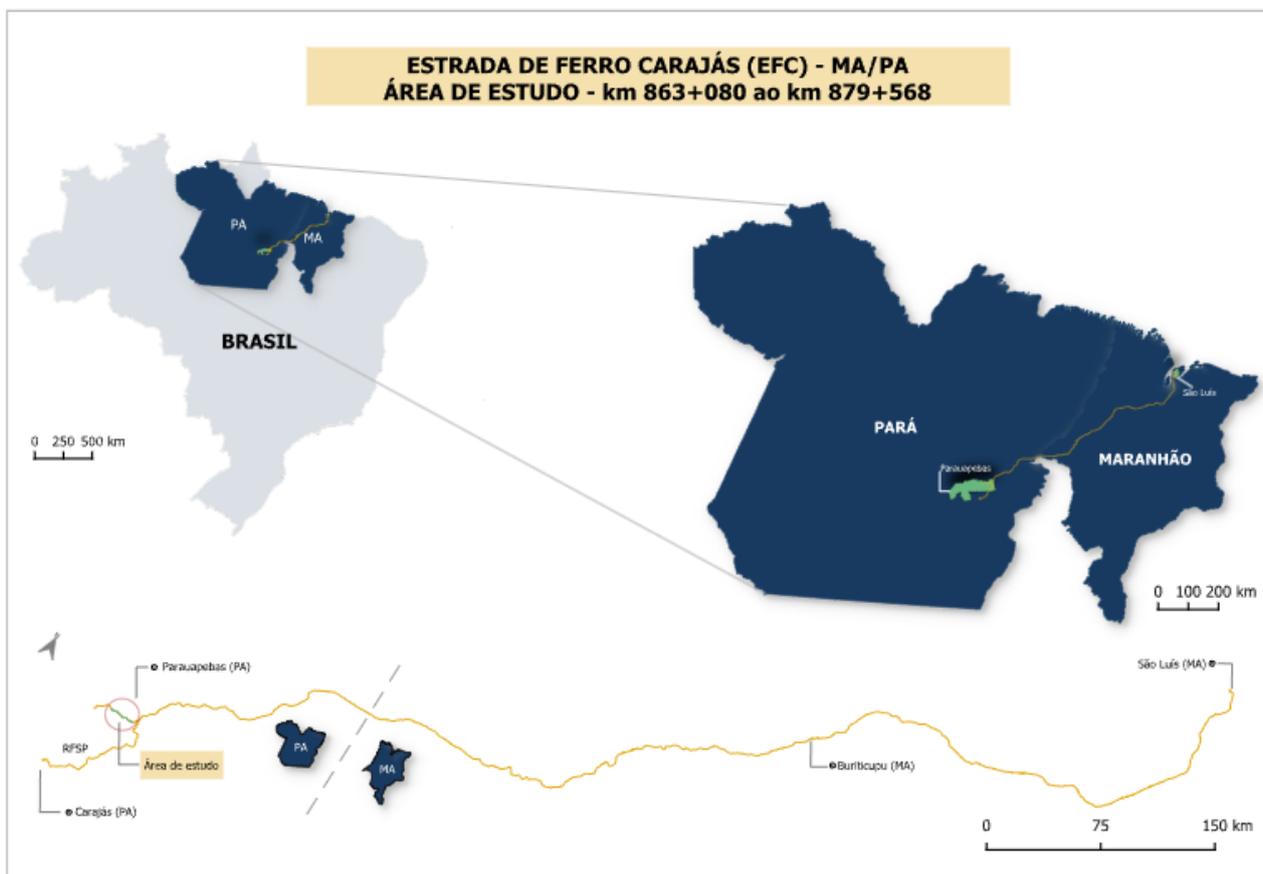


Figura 1: Mapa de localização da área de estudo

3.1. Caracterização geológica local

A área de estudo está localizada na Faixa Araguaia, uma faixa móvel neoproterozoica com cerca de 1.200 km de extensão e 100 km de largura, situada na borda leste do Cráton Amazônico, entre o norte do Tocantins e o noroeste de Goiás. Esta faixa representa uma das principais suturas tectônicas relacionadas ao Ciclo Brasileiro, tendo se formado sob predominância de esforços transcorrentes durante o estágio pré-orogênico, conforme descrito por Almeida et al. (1976) e Vasques et al. (2008).

O embasamento geológico da região é composto por unidades arqueanas e paleoproterozoicas, altamente deformadas e modificadas por múltiplos eventos magmáticos, metamórficos e tectônicos. De acordo com o Mapa Geológico-Geofísico da ARIM Carajás (CPRM, 2016), esses processos atuaram intensamente entre 3,0 e 2,7 Ga, conferindo complexidade estrutural e litológica ao conjunto.

As principais unidades litoestratigráficas da área incluem:

- **Q2a** – Depósitos Aluvionares: Sedimentos areno-argilosos e cascalhos de origem fluvial, representando depósitos quaternários recentes.
- **Elm** – Cobertura Laterítica Madura: Coberturas residuais ferruginosas e concrecionárias, desenvolvidas por intemperismo tropical intenso.
- **PP3yci** – Granito Cigano: Sienogranitos e monzogranitos tipo A com feições rapakivi; magmatismo anorogênico, idade de 1883 ± 2 Ma.
- **A4y2gl** – Metagranito Igarapé Gelado: Metagranodioritos e metatonalitos miloníticos com alterações hidrotermais; idade estimada de 2731 ± 26 Ma.

- **A4pj** – Formação Salobo-Pojuca: Quartzitos, metassedimentos e metavulcânicas básicas a intermediárias com formações ferríferas bandadas (FFB); cristalização estimada em 2732 ± 2 Ma.
- **A4ci** – Formação Igarapé Cigarra: Metassedimentos clásticos, FFB e manganésíferas, além de metavulcânicas ácidas; metamorfismo de subxisto verde a anfibolito.
- **A4cj** – Formação Carajás: FFB com jaspilitos interdigitadas a metabasaltos e metavulcânicas ácidas; idade de cristalização de 2740 ± 8 Ma.
- **A4ppf** – Formação Parauapebas Félsica: Metavulcânicas félsicas com intercalados de cherts e piroclásticas; idade de 2760 ± 11 Ma.
- **A4ppm** – Formação Parauapebas Máfica: Basaltos, andesitos, dacitos e gabros intercalados com FFB; metamorfismo de baixo grau.

As unidades geológicas da região estão distribuídas em compartimentos tectônicos delimitados por estruturas crustais, tais como zonas de cisalhamento, falhas, dobras e diques. Essas estruturas exercem controle direto sobre a geometria, disposição espacial e empilhamento das unidades litológicas, além de representarem importantes controles estruturais na concentração de mineralizações, com ênfase para os depósitos de ferro, ouro e cobre.

A compartimentação estrutural é complementada e reforçada pela rede hidrográfica regional, particularmente pelos cursos do Rio Igarapé Gelado e do Rio Parauapebas, que atuam na dissecação topográfica e na exposição diferencial das formações geológicas. A Figura 2 mostra o mapa geológico para a área de estudo.

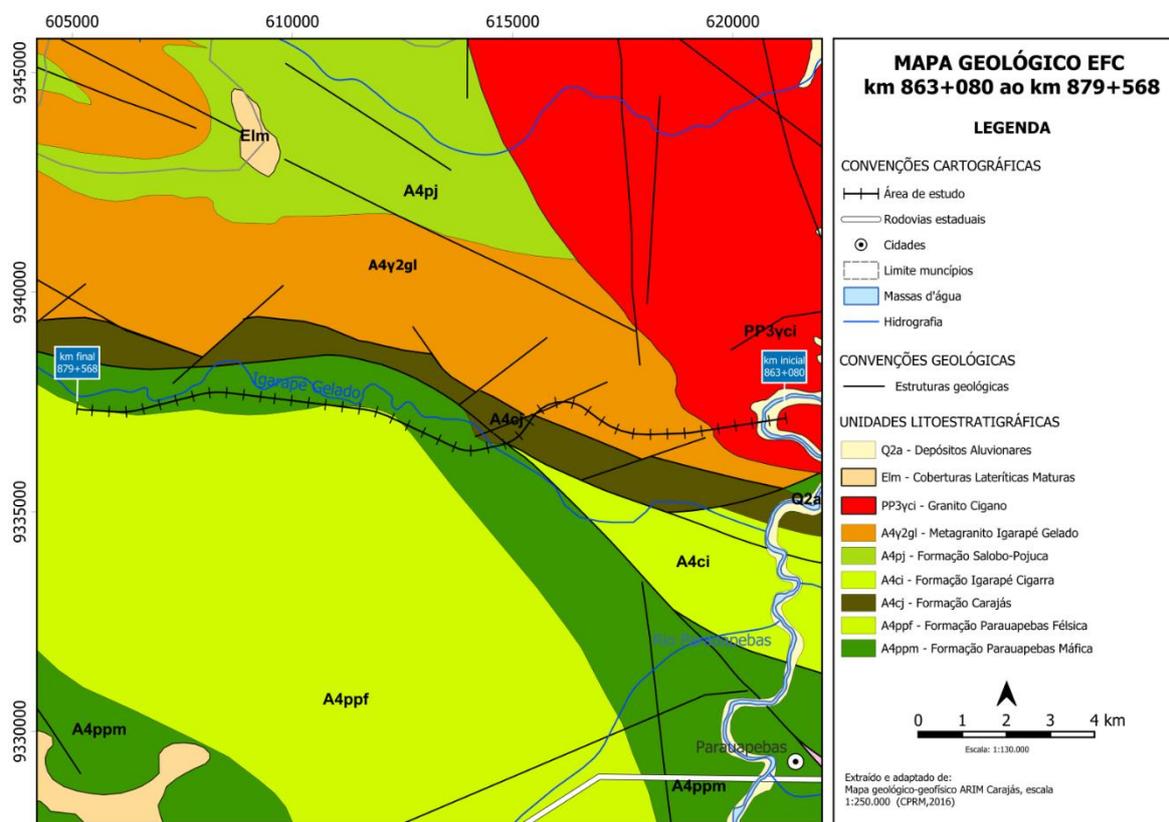


Figura 2: Mapa geológico da área de estudo. Extraído e adaptado de CPRM, 2016. Escala 1:250.000.

4. RESULTADOS

O estudo realizado entre os km 863 e 879 da EFC compreende a elaboração de três modelos geológicos-geotécnicos, utilizando exclusivamente os dados disponíveis de 24 sondagens do tipo percussão, 3 sondagens do tipo mista, 22 sondagens a trado e 63 pontos de investigação do tipo pá e picareta. A Figura 3 apresenta a distribuição em planta das sondagens no trecho de estudo. Foram extraídas as informações de descrição tátil-visual dos boletins de sondagens, assim como a profundidade do nível de água ou a ausência do mesmo e informações de golpes NSPT, relacionado a compacidade do material. Os modelos apresentam uma abrangência local, com extensão lateral de 100 metros a partir do eixo ferroviário da EFC.



Figura 3: Distribuição em planta das sondagens na extensão da linha férrea da EFC, entre os km 863 e 879.

A análise estatística do modelo gerado foi conduzida com base na porcentagem de correspondência entre os horizontes litológicos descritos e interpretados a partir dos dados dos boletins de sondagem e o volume total modelado. Os valores foram calculados por meio da ferramenta estatística de modelo do software *Leapfrog Works*. Esse cálculo estatístico é importante para a assertividade do modelo, assegurando a coerência entre as superfícies interpretadas e o volume gerado com a descrição inicial de campo. Em geral, os litotipos modelados apresentaram uma compatibilidade de 95% a 100% em relação às litologias descritas nas sondagens, o que demonstra uma excelente confiabilidade entre os dados interpretados e as condições geológicas descritas em campo.

Para a construção do modelo estratigráfico foram realizadas interpretações litológicas a partir da descrição tátil-visual presente nos boletins de sondagem. Com base nessa descrição os dados foram interpretados e categorizados de acordo com a granulometria do material e as características geológicas locais, sendo então classificados para a criação das superfícies no modelo.

A seção estratigráfica da Figura 4A ilustra a distribuição das litologias ao longo de um trecho da linha férrea, evidenciando, no geral, um caráter siltoarenoso para área de abrangência deste estudo. Na base da seção, identificam-se ocorrências de granito e *hornfels*, este último resultante do metamorfismo de contato provocado pela intrusão do corpo granítico nas litologias adjacentes. As litologias do trecho mostram variação granulométrica, abrangendo siltes arenosos e argilosos, areias siltsas e argilas arenosas. Esses materiais refletem condições deposicionais ou processos de alteração, possivelmente influenciados pelos rios Igarapé Gelado e Parauapebas, assim como solos resultantes da alteração das rochas do embasamento referentes ao Grupo Rio Novo, Complexo Xingu e Formação Parauapebas.

A extração de seções diversas, longitudinais e transversais, a partir de modelos estratigráficos que caracterizam o solo e a geologia local, podem servir de subsídio para estudos de estabilidade de taludes e cortes ao longo da área de abrangência do estudo, por exemplo.

O modelo do nível d'água foi construído a partir dos dados registrados nos boletins de sondagens, com base na profundidade em que se observou presença ou ausência de água. A Figura 4B apresenta uma seção longitudinal do modelo, em concordância com o sentido do eixo da ferrovia, representando as zonas saturadas a partir do nível de água observado na época da execução das sondagens. Tal modelo, é de grande importância para conhecimento das características hidrológicas locais, servindo de base para o estudo de implementação de drenos profundos em projetos de engenharia, por exemplo.

O modelo numérico representado na Figura 4C foi gerado a partir dos valores de nSPT (*Standard Penetration Test*), obtidos das sondagens, foi classificado conforme a ABNT NBR 6484/2020. É possível perceber uma variabilidade significativa nos valores de NSPT ao longo do segmento. De forma geral, o perfil demonstra uma correlação entre a profundidade e o aumento do índice de resistência. Os resultados indicam alta resistência à penetração (>40), especialmente associada aos litotipos do embasamento cristalino, e valores mais baixos para as regiões superficiais, onde há maior presença de solos moles/fofos. Os valores mais baixos foram identificados nas proximidades da estaca 863+100, sugerindo possível influência do Rio Parauapebas sobre os materiais de subsuperfície nessa região. Na região onde não foram disponibilizados dados geotécnicos, os valores de NSPT foram gerados por interpolação do software *Leapfrog Works* com base nos dados mais próximos.

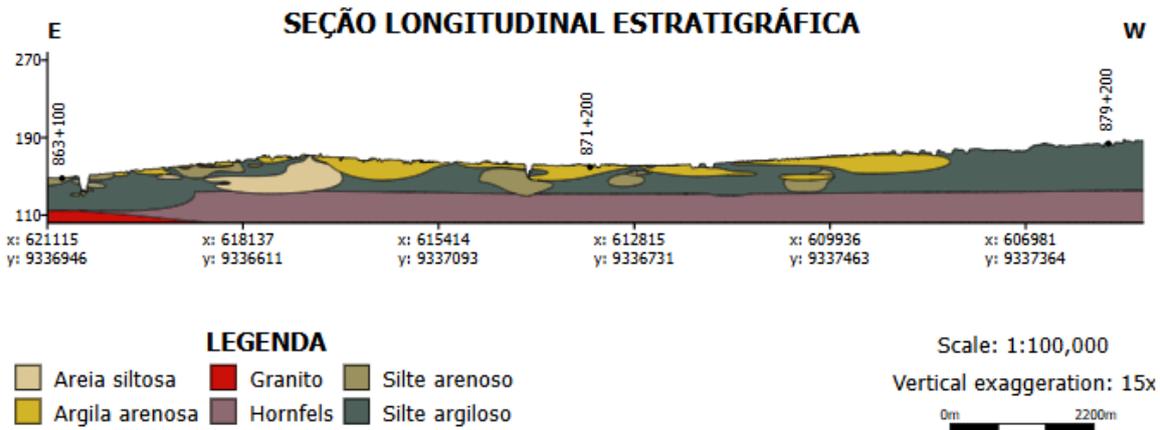
CONCLUSÕES E DISCUSSÕES

A possibilidade de desenvolvimento e criação de modelos geológicos-geotécnicos de todos os dados obtidos através de investigações geotécnicas, tais como descrição tátil-visual, números de golpes, recuperação, RQD, alteração, consistência, fraturamento, permeabilidade, nível de água, entre outros, é uma das principais vantagens da modelagem implícita aqui apresentada. Além disso, é possível também utilizar os dados de ensaios de laboratórios, como CBR, expansão, limites físicos, umidade, densidade, classificação granulométrica, ensaios triaxiais, por exemplo. De posse de todos esses dados, podem ser construídos modelos variados utilizando um ou mais dados que sejam interessantes para o desenvolvimento dos projetos. Exemplo disso, são modelos aplicados a estudos de terraplanagem, os quais utilizam caracterizam as categorias de escavação, dados de CBR e expansão dos cortes obrigatórios ou MCT de solos lateríticos. Os modelos aqui apresentados nesse estudo podem ser utilizados para análise de estabilidade, no caso do modelo estratigráfico, estudo de definição de drenos profundos, no caso do modelo de nível de água, por exemplo.

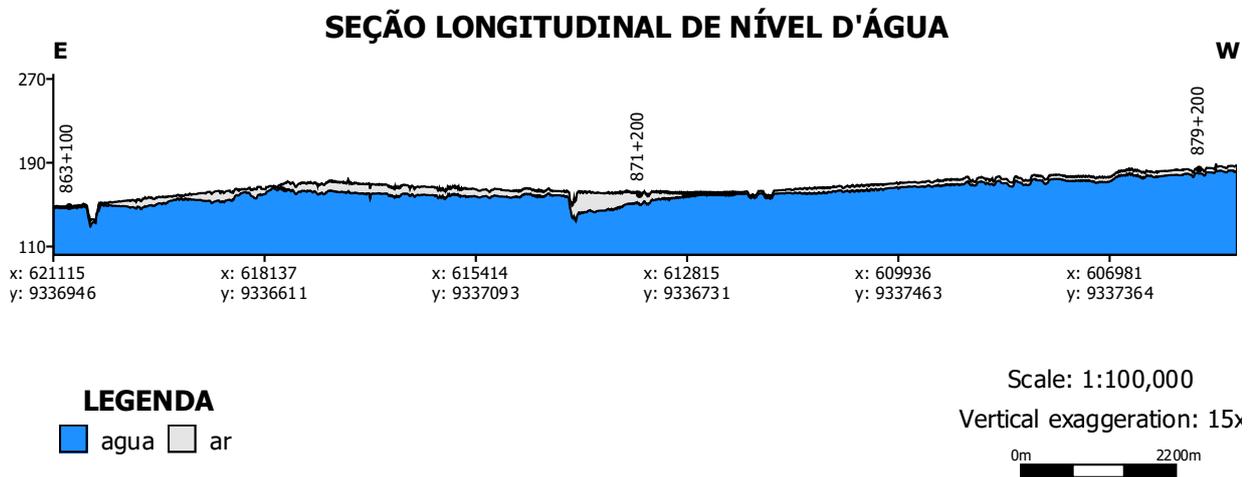
A partir de modelos finalizados, existe a possibilidade de elaborar novos planos de investigação geotécnica, tais como planejamento de nova campanhas de sondagens. Nesse caso, é possível estimar o material a ser perfurado em novas áreas de investigação, auxiliando no planejamento operacionais e de custos do serviço. Esse resultado é uma maneira de validação do modelo criado, utilizando as informações disponíveis em futuras campanhas, com o resultado real obtido em campo.

Por fim, a modelagem também permite a integração de um banco de dados geológicos e geotécnicos, os quais consolidam o estudo da área de abrangência do estudo, facilitando a visualização dos dados através de um produto, que possibilita uma interpretação com base em modelo implícito, dinâmico e de fácil interpretação.

A



B



C

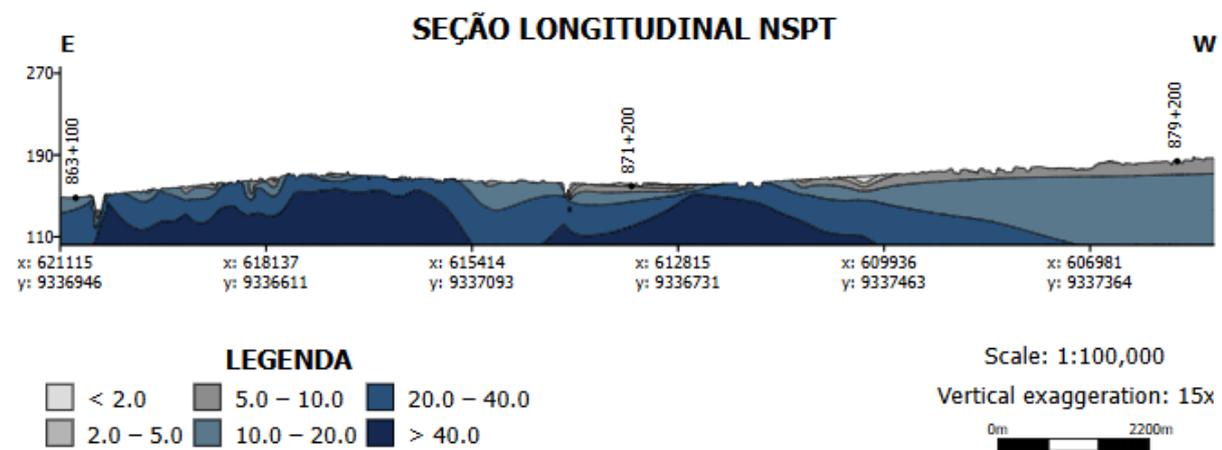


Figura 4: Seções longitudinais a extensão da linha férrea da EFC, extraídas a partir dos modelos gerados. A - Estratigráfico; B - Nível de água ; C - NSPT

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a ENGEFOTO S.A. pelo apoio fornecido e pela disponibilização dos dados deste estudo.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, F.F.M.; HASUI, Y.; BRITO NEVES, B.B. The Upper Precambrian of South America. *Boletim Instituto de Geociências USP*, v. 7, p. 45-80, 1976. (Série Científica, 7). Disponível em <<https://doi.org/10.11606/issn.2316-8978.v7i0p45-80>> Acesso em 16 de abril. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6484:2020 - Determinação do índice de consistência e do limite de Atterberg de solos. Rio de Janeiro, 2020.

BRASIL. Ministério dos Transportes. Plano Nacional de Logística 2023. Brasília: Ministério dos Transportes, 2023. Disponível em: < Mapas — Ministério dos Transportes >. Acesso em: 26 set. 2024.

COSTA, U.A.P.; PAULA, R.R.; SILVA, D.P.B.; BARBOSA, J.P.O.; SILVA, C.M.G.; TAVARES, F.M.; OLIVEIRA, J.K.M.; JUSTO, A.P. Mapa geológico-geofísico ARIM Carajás: versão preliminar. Belém: CPRM, 2016. 1 mapa, color. Escala 1:250.000. Disponível em: <<https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/19048?mode=full>>. Acesso em: 17 de abril de 2025.

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo: Araguaia: folha SB.22. Brasília: CPRM, 2004. Escala 1:1.000.000. Programa Geologia do Brasil. Disponível em < Repositório Institucional de Geociências: Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo: Araguaia >. Acesso em 23 de out. 2024.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Malha Municipal Digital da Divisão Político-Administrativa Brasileira. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <Malha Municipal | IBGE>. Acesso em: 26 set. 2024.

VASQUEZ M.L., ROSA-COSTA L.T, SILVA C.M.G., KLEIN E.L. 2008. Compartimentação tectônica. *In: VASQUEZ M.L. & ROSA-COSTA L.T. (orgs.) Geologia e Recursos Minerais do Estado do Pará: Sistema de Informações Geográficas —SIG: texto explicativo dos mapas Geológico e Tectônico e de Recursos Minerais do Estado do Pará 1:1.000.000*. Belém, Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais, p. 39–112. Disponível em <<https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/10443>> Aceso em 16 de abril. 2025