

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**Modelagem Geológica 3D Aplicada à Soluções
Geotécnicas- Um Estudo de Caso- Estação Pinheiros
do Metrô**

ANGELICA PEDRO SANTANA

Orientador: Prof. Dr. Marcos Egydio da Silva

Co- orientador: Prof. Dr. Georg Robert Sadowski

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Programa de Pós-Graduação em Geoquímica e Geotectônica

SÃO PAULO, 2020

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Serviço de Biblioteca e Documentação do IGc/USP

Ficha catalográfica gerada automaticamente com dados fornecidos pelo(a) autor(a)
via programa desenvolvido pela Seção Técnica de Informática do ICMC/USP

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de catalogação da publicação:
Sonia Regina Yole Guerra - CRB-8/4208 | Anderson de Santana - CRB-8/6658

Santana, Angelica Pedro
Modelagem Geológica 3D Aplicada à Soluções
Geotécnicas- Um Estudo de Caso- Estação Pinheiros do
Metrô / Angelica Pedro Santana; orientador Marcos
Egydio da Silva; coorientador Georg Robert
Sadowski. -- São Paulo, 2020.
69 p.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação
em Geoquímica e Geotectônica) -- Instituto de
Geociências, Universidade de São Paulo, 2020.

1. geotecnia. 2. estação Pinheiros. 3. Bacia de
Sao Paulo. 4. modelagem 3D. I. da Silva, Marcos
Egydio, orient. II. Sadowski, Georg Robert,
coorient. III. Título.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**Modelagem geológica 3D aplicada à soluções geotécnicas - um
estudo de caso - estação Pinheiros do Metrô**

ANGÉLICA PEDRO SANTANA

Orientador: Prof. Dr. Marcos Egidio da Silva

Dissertação de Mestrado

Nº 853

COMISSÃO JULGADORA

Dr. Marcos Egidio da Silva

Dr. Wilson Shoji Iyomasa

Dr. Fernando Antonio Medeiros Marinho

SÃO PAULO
2020

À aqueles que amo infinitamente, que
mesmo longe sempre estiveram perto.
Para meu pai Beto, minha mãe Léa,
meus irmãos Angelo e Alexandre e,
aos pequenos Pepo e Maju.

AGRADECIMENTOS

Ao meu querido orientador, professor e sempre amigo Marcos Egydio da Silva, pelos ensinamentos, pelo riso fácil e os cafezinhos, mas acima de tudo pela leveza e paciência de cada dia.

Aos meus pais e irmãos pelo amor incondicional, compreensão e incentivo.

Meus sinceros agradecimentos à todos os amigos que, mesmo não participando diretamente deste trabalho, foram essenciais para sua existência, muitas vezes trazendo a calma em meio a tantas tempestades.

À todos que me são próximos e que por vezes me fiz distante.

Ao meu bem.

E por fim, porém não menos importante, a agência de fomento CAPES e ao Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo que contribuíram e foram essenciais para a realização desta pesquisa.

“As palavras só têm sentido se nos
ajudam a ver o mundo melhor.
Aprendemos palavras para melhorar os
olhos.”

(Rubem Alves)

Eles passarão eu passarinho

Poeminho do Contra

Todos esses que aí estão
Atravancando o meu caminho,
Eles passarão...
Eu passarinho!

(Mário Quintana)

RESUMO

Santana, A. P., 2020, Modelagem Geológica 3D Aplicada à Soluções Geotécnicas- Um Estudo de Caso- Estação Pinheiros do Metro [Dissertação de Mestrado], Sao Paulo, Instituto de Geociências, Universidade de Sao Paulo, 61p.

A ampla difusão de geotecnologias no meio da Geociências tem trazido diversas aplicações tecnológicas, permitindo assim obter informações relevantes perante o meio em que se trabalha, tanto dos processos geológicos quanto das feições estruturais a eles relacionados. A partir de um estudo de caso envolvendo o acidente na Estação Pinheiros do Metro, no ano de 2007, a qual foi construída sob área de influência da Zona de cisalhamento Caucaia (CSZ), foram gerados modelos 3D para que se fizesse possível uma melhor visualização e, entendimento do cenário em questão e, desta forma atentar como o método de modelagem, a partir de *software* de ampla difusão, contribui para a previsibilidade de tais acidentes e minimiza riscos. A clara observação foi permitida através dos resultados satisfatórios obtidos pelo método empregado, através das imagens geradas, agregando assim uma importante contribuição ao meio em que se aplica, uma vez que tais resultados, possibilitou o entendimento da área antes vista apenas em 2D, o modelo 3D agregou informações, trouxe riqueza de conhecimento e certa lucidez para tais acontecimentos, uma vez que mostrou que a área onde deu-se o acidente realmente apresentava características peculiares dignas de atenção. Sendo assim fez-se satisfatório o uso de tal ferramenta para projetos futuros.

Palavras- Chave: Modelagem 3D, geotecnia, geotecnologia, Bacia de Sao Paulo, Estação Pinheiros.

ABSTRACT

Santana, A. P., 2020, 3D Geological Modeling Applied to Geotechnical Solutions- A Case Study- Pinheiros Metro Station [Master's Dissertation], Sao Paulo, Institute of Geosciences, University of Sao Paulo, 61p.

The wide diffusion of the geotechnologies in the Geosciences has brought several technological applications, allowing relevant information, both the geological processes and structural features, in the specific worked area. From a case involving the accident in the Pinheiros subway station in 2007, which was built under influence area of the Caucaia shear zone (CSZ), 3 D models were generated to better visualize and understand the problem, and thus verify how the modeling method, using specific software, could contribute to the predictability of such accident, and minimize risks. Good observations were made with satisfactory results, allowing better understand the geological area, previously seen only in 2D. The 3D model brought information, knowledge and certain lucidity to these events, showing that the area, where the accident took place, presented peculiar characteristics worthy of attention. We conclude that the use of this tool for future projects is perfectly satisfactory.

Keywords: 3D Modeling, geotechnics, geotechnology, Sao Paulo Basin, Pinheiros Station.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	01
2. OBJETIVO.....	02
3. LOCALIZAÇÃO.....	03
4. MÉTODO.....	04
4.1 Geotechnical Module- GM.....	04
4.2 Dados.....	06
4.3 Rotina.....	07
5. CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL.....	08
5.1 A Bacia Sedimentar de São Paulo- BSP.....	08
5.1.1 Preenchimento sedimentar Neógeno e Paleógeno.....	10
5.1.2 Coberturas sedimentares quaternárias.....	13
6. GEOLOGIA ESTRUTURAL E TECTÔNICA.....	14
7. O MUNICÍPIO DE SÃO PAULO.....	17
7.1 Geologia Local.....	17
7.1.1 Unidades geológicas.....	18
7.2 Feições Estruturais do Embasamento.....	20
7.2.1 Modelo de compartimentação estrutural.....	22
7.3 Maciço Rochoso.....	26
8. SÍNTESE DO ACIDENTE.....	28
9. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	30
10. CONCLUSÃO.....	57
11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	59

1. INTRODUÇÃO

O uso de geotecnologias tem sido amplamente difundido e revolucionado a Geociências. Diversas aplicações tecnológicas têm permitido obter informações relevantes, tanto dos processos geológicos bem como da geometria das feições estruturais a eles relacionados. A modelagem geológica se aplica visando á construção de modelos 3D da Terra, em diferentes escalas. A visualização 3D auxilia na compreensão de sistemas complexos e suas relações espaciais, propiciando a interpretação em perspectiva e extração de dados e informações mais realísticas dos modelos geológicos.

O estudo tem como enfoque o caso prático da Estação Pinheiros da Companhia do Metropolitano de São Paulo - neste trabalho denominado Metrô, que colapsou durante a sua construção em 2007 (Figuras 1 e 2) . Conseqüentemente o local ficou sujeito a uma investigação criteriosa, superpondo aos estudos normais de projeto, análise detalhada do ponto de vista forense.



Figura 01. Abatimento da estação Pinheiros do Metrô, em janeiro de 2007 (Fonte: g1.globo.com).



Figura 02. Foto aérea da estação Pinheiros do Metrô antes do acidente em janeiro de 2007(Fonte: g1.globo.com).

2. OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo trazer informações adicionais sobre os possíveis fatores geológicos que poderiam ter contribuído para as causas do acidente referido acima. Para atingir a meta proposta, a utilização de um *software* de modelagem 3D será a ferramenta principal.

Discutir-se-á a visibilidade oferecida por esta ferramenta, a partir de um modelo confeccionado por determinado *software*, cujos resultados oferecidos serão analisados a partir de seu modelo e, conseqüente limitações intrínsecas ao método. Questões relevantes como a previsibilidade de acidentes e análise de riscos serão consideradas nesta dissertação e, assim, vislumbrar a inserção desta ferramenta de auxílio para obras que se façam necessárias.

Este modelo, elaborado a partir de uma metodologia pré-definida e utilizando informações igualmente pré-existent, busca inserir uma poderosa ferramenta de auxílio em atividades pertinentes. Acredita-se que tal ferramenta apresente uma relação custo/benefício vantajosa de maneira que consiga atender a maior gama de profissionais possíveis, visto o alto valor agregado aos softwares de modelagem. Sabe-se que o *software* escolhido é um programa muito comum nas obras de engenharia, seu uso demandaria menor custo nos projetos e não haveria a necessidade de profissionais especializados em *softwares* mais sofisticados.

3. LOCALIZAÇÃO

A área de estudo, Estação Pinheiros do Metrô da cidade de São Paulo, pertence a Linha 4 – Amarela - da Companhia do Metropolitano de Sao Paulo (CMSP) e está localizada na rua Capri, número 145, próximo à Avenida Dr^a. Ruth Cardoso e Marginal Pinheiros.(Figura 3). Cartograficamente a região se insere na Folha topográfica de São Paulo (SF-23-Y-C-VI-2), escala 1:50.000.(Figura 4).



Figura 03. Área da estação Pinheiros com as locações dos furos de sondagem (pontos coloridos aleatoriamente) referente ao presente trabalho. Fonte: *Google Maps*.

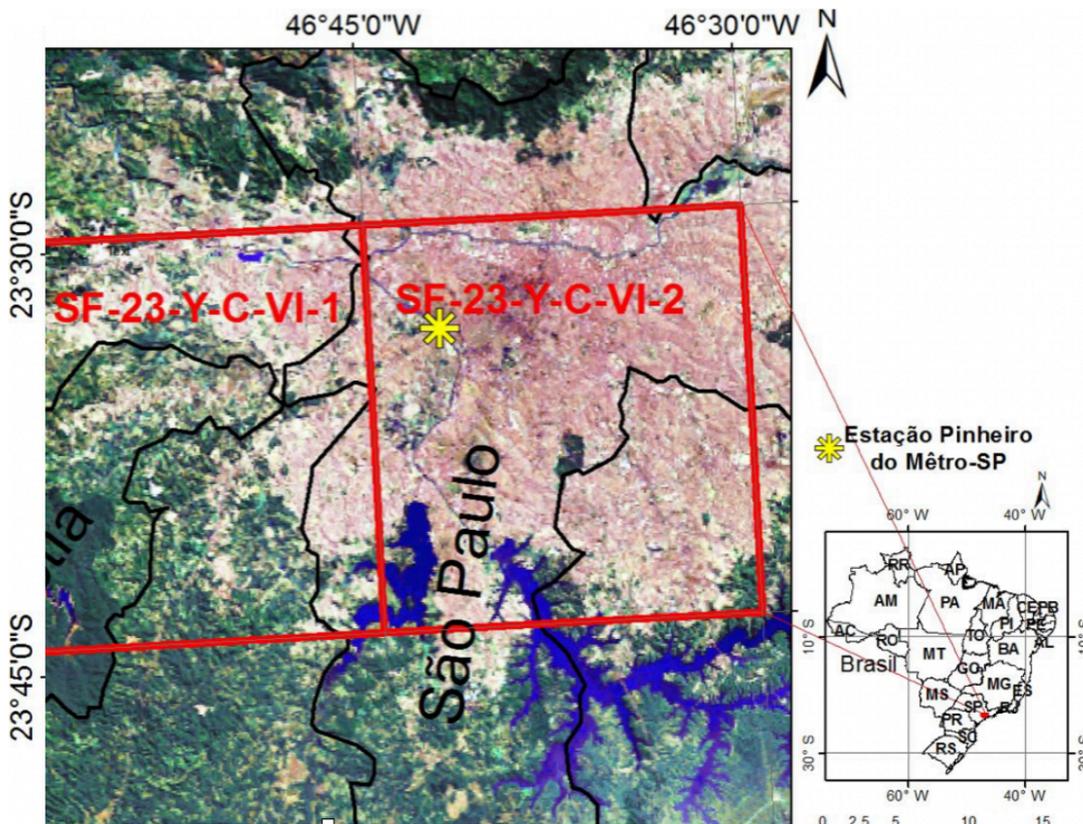


Figura 04. Mapa de localização da área de trabalho, folha cartográfica São Paulo (SF23YCVI2).

4. MÉTODO

O método empregado baseia-se na construção de modelos 3D a partir de dados tabelados e, por conseguinte, introdução em *software* específico. A utilização de dados pré-existentes e anteriores ao acidente possibilitará a utilização das informações necessárias para alimentar o *software*. Dentre várias ferramentas disponíveis no mercado optou-se por testar e utilizar o seguinte *software*: - Autocad Civil 3D - *Geotechnical Module* - da Autodesk, que permitirá definir procedimentos de rotina adequados às necessidades profissionais.

Para melhor desenvolvimento do trabalho foram realizados levantamentos e estudos do acervo bibliográfico e de relatórios técnicos, referentes ao acidente.

4.1. Geotechnical Module- GM

O *Geotechnical Module- GM* consiste em uma extensão do *software* AUTO-CAD CIVIL 3D. A inserção de dados e modelagem, por triangulação, é feita diretamente a partir deste módulo.

O módulo consiste na inserção de informações de furos de sondagem, utilizando-se de três tipos de tabelas, com formatos pré-estabelecidos. São elas: I) *Location Details* a qual apresenta os dados de localização do furo por coordenadas GPS e dados de topografia; II) *Field Geological Descriptions* contendo as descrições litológicas bem como espessura das camadas e III) *Orientation and Inclination* referente a orientação e inclinação dos furos.

O módulo apresenta algumas limitações como em qualquer outro método: as mais relevantes acontecem pelo fato de que camadas, que ocorrem em menos de três furos distintos, não são capazes de serem geradas. Outra limitação refere-se às intercalações, no mesmo furo, de camadas distintas, que possuem o mesmo nome (litologia). Neste caso o programa não é capaz de distingui-las, tomando-se como referência o topo da camada mais próxima à superfície e a base da última camada, suprimindo camadas intermediárias.

As informações primordiais não são perdidas. As tabelas geradas pelo *software* carregam todas as informações relevantes a tal camada, bem como do furo. Na tabela *strata* um recurso presente, chamado “*view*” permite que se possa verificar em quais furos determinada camada aparece, além de detalhes como a profundidade do topo e base de tal camada, o nível topográfico de ambos e, espessura. Na tabela *locations* é possível ativar um recurso chamado “*strip*”, que permite a visualização do desenho descritivo de cada furo.(Figura 5).

É de extrema importância que a formatação dos dados para inserção no *software* seja feita de maneira cuidadosa, trazendo as informações de forma mais clara possível.

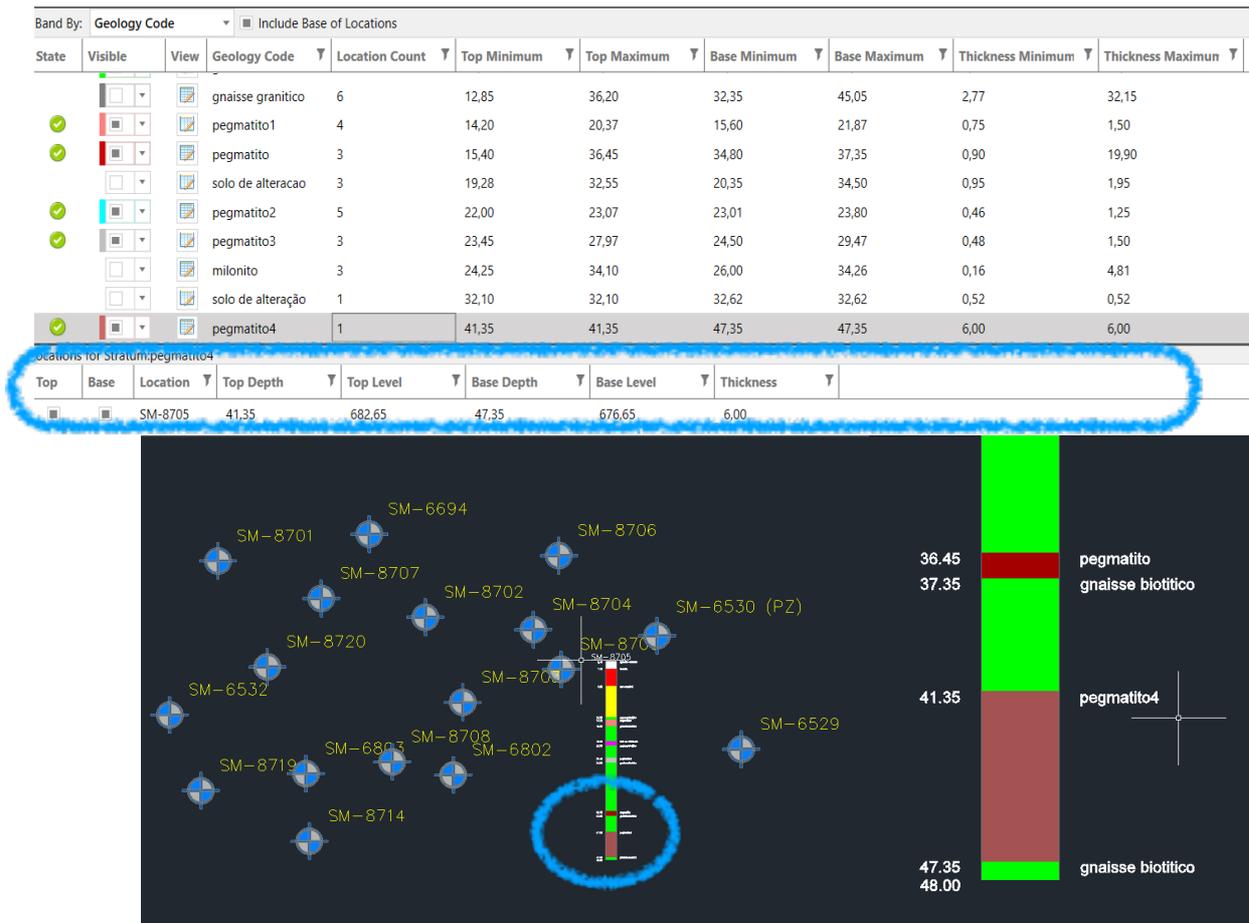


Figura 05. Exemplo de detalhes fornecidos pelo recurso *view*, para uma melhor visualização de informações (imagem superior). Na imagem inferior, utilização do recurso *“strip”*, em destaque trecho do desenho da sondagem, ampliado a direita da imagem.

4.2. Dados

Para o presente estudo foram selecionados 17 boletins de sondagem os quais continham dados e informações necessárias ao trabalho. A escolha teve como fundamento a sua localização próxima e na área do acidente. As informações foram adaptadas da melhor maneira possível, buscando sempre homogeneizar, quando possível e, assim, apresentar os dados de maneira clara.

As tabelas *Location Details*, *Field Geological Descriptions* e *Orientation and Inclination* apresentam as informações compiladas referentes a “alimentação” e por conseguinte, á confecção do modelo.

4.3. Rotina

O GM consiste em uma extensão do Autocad Civil 3D, como referido anteriormente. As tabelas apresentadas são adicionadas ao módulo pela elaboração de um projeto (Figura 6) e, posteriormente, feita a inserção dos parâmetros, os quais devem ser condizentes com os formatos estabelecidos nas tabelas. Para que tudo seja validado, as tabelas devem ser do tipo texto (CSV).(Figura 7 e 8).

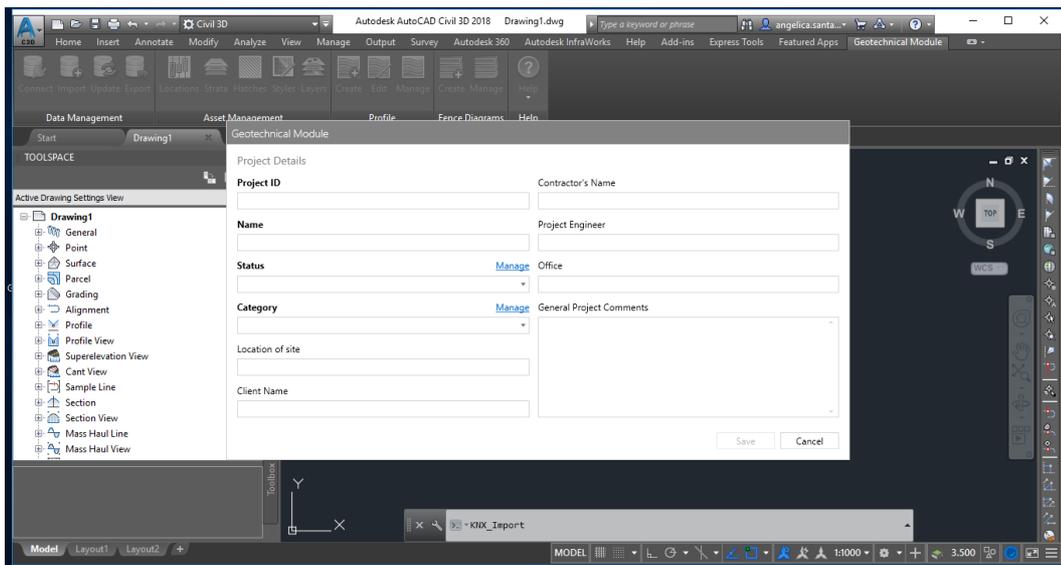


Figura 06. Interface de criação do projeto no *Geotechnical Module*; onde itens em negrito devem ser obrigatoriamente preenchidos.

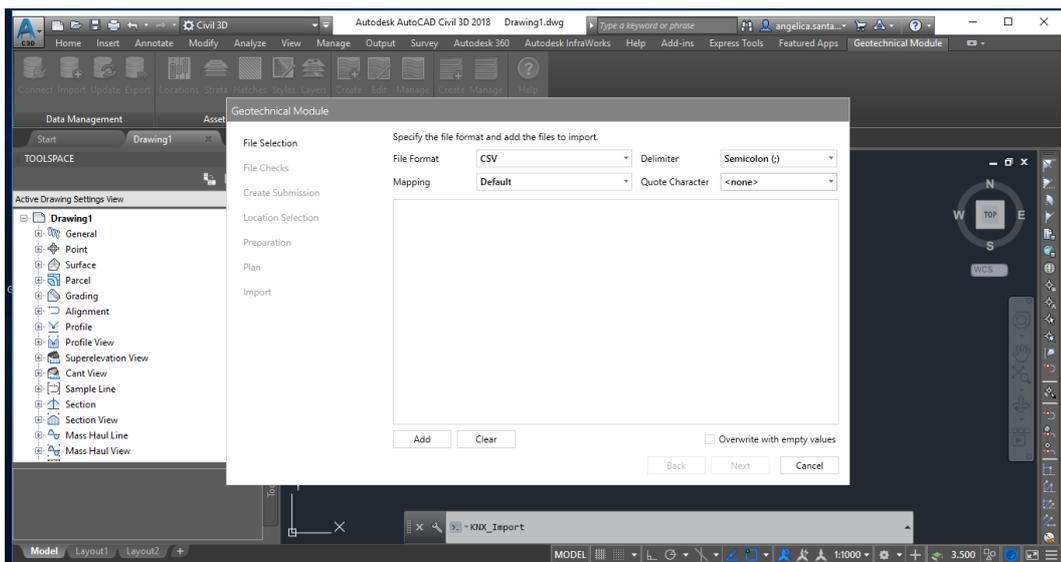


Figura 07. Ajuste de parâmetros para inserção de tabelas no *Geotechnical Module*.

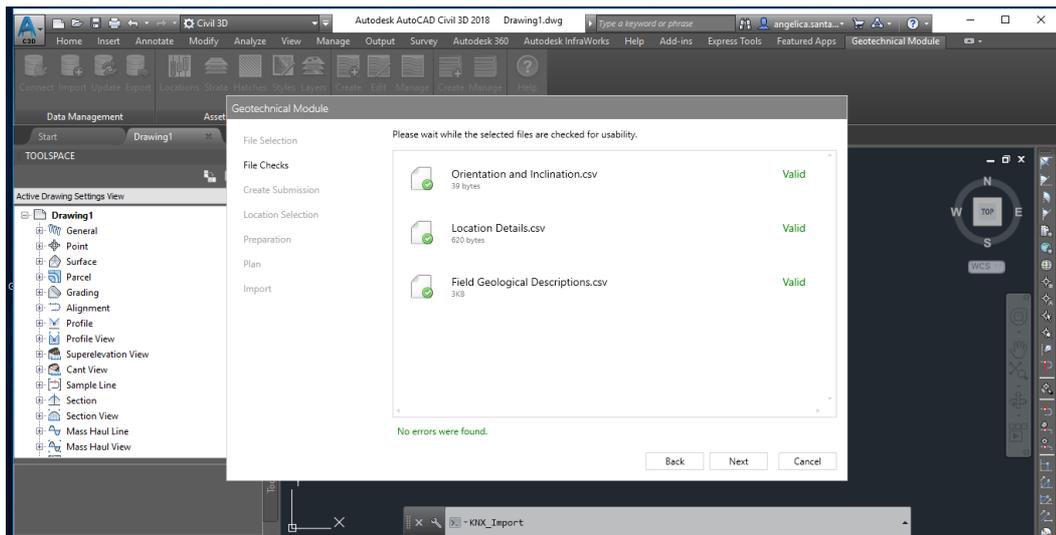


Figura 08. Validação das tabelas confeccionadas.

Após todo processo, os dados são computados pelo *software* e, assim dá-se o início da geração dos modelos.

5. CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

5.1 A Bacia Sedimentar de São Paulo- BSP

A área estudada localiza-se, geologicamente, na Bacia Sedimentar de São Paulo, a qual faz parte de um conjunto de bacias pertencentes ao *Rift Continental do Sudeste do Brasil (RCSB)* (Riccomini, 1989), formadas por tectônica distensiva no Paleógeno (66 a 23Ma.)/ Neógeno (23 a 2,5Ma). Está localizada no Planalto Atlântico (Azevedo, 1949), na porção leste do Estado de São Paulo, com área pouco superior a 1000km², tendo seu eixo maior 75km de extensão, entre Arujá, a leste, e Embu Guaçu a oeste, e seu eixo menor de 25km, entre Santana, a norte, e Santo André a sul (Riccomini & Coimbra, 1992; Riccomini *et al.*, 2004). Apresenta grande heterogeneidade litológica e espessura máxima de 290m, verificada em sondagens (Takiya, 1991).

Os trabalhos pioneiros sobre os sedimentos da Bacia de São Paulo deve-se a Mawe (1812) quem primeiro se referiu às rochas sedimentares da Bacia de São Paulo; posteriormente Moraes Rego (1933) introduziu a denominação “Camadas de

São Paulo”, as quais foram denominadas de Formação São Paulo por Mezzalira (1962).

Os sedimentos da Bacia de São Paulo assentam-se sobre rochas ígneas e metamórficas, de idade neoproterozóica, pertencentes à faixa de Dobramentos Ribeira (Hasui *et al.*, 1975), a qual é resultado dos processos colisionais da orogenia Brasileiro/Panafricano que culminou na formação do paleocontinente Gondwana Ocidental.

Apenas a partir da década de 1980 estudos mais detalhados passaram a ser realizados sobre a geologia da Bacia de São Paulo, por exemplo: Coutinho (1980a) publicou o mapa geológico da região metropolitana de São Paulo, descrevendo, pormenorizadamente, os sedimentos da Bacia de São Paulo.

Coimbra *et al.* (1983) definiu a Formação Itaquaquetuba, substituindo assim os “aluviões antigos dos rios Pinheiros e Tietê” definidos por Suguio & Takahashi (1970). Riccomini (1989) reformulou a litoestratigrafia da Bacia de São Paulo reestudando as Formações São Paulo e Itaquaquetuba (Bacia de São Paulo) e as Formações Resende e Tremembé (Bacia de Taubaté).

O embasamento da Bacia de São Paulo é constituído, predominantemente, por gnaisses migmatizados de composição granodiorítica, anfíbolitos e metassedimentos como xistos, filitos e corpos lenticulares de quartzito e calciossilicáticas, pertencentes ao Complexo Embu e aos Grupos São Roque e Serra de Itaberaba. O Complexo Embu é a unidade que predomina no embasamento da BSP, ocorre na porção centro-sul da região Metropolitana de São Paulo, com direção NE-SW. Os grupos São Roque e Serra do Itaberaba afloram na área norte da Região Metropolitana.

No embasamento, falhas transcorrentes de direção NE-SW, delimitam a Bacia de São Paulo. A norte, as falhas de Taxaquara e do Rio Jaguari (Juliani, 1992) e a sul, a falha de Caucaia, fazem parte do sistemas de falhas denominado Sistema Transcorrente Paraíba do Sul (Hasui *et al.*, 1975).

Na altura do Rio Tietê e, a norte da falha de Taxaquara, estão os metassedimentos dos grupos São Roque e Serra do Itaberaba, pertencentes aos Terrenos Apiaí-São Roque (Heilbron *et al.*, 2004). Ao sul da Falha de Caucaia afloram as rochas metamórficas dos Complexos Embu e Costeiro, intrudidos por vários corpos graníticos neoproterozoicos. Rochas de menor expressão são pertencentes ao Complexo Costeiro, Complexo Pico do Papagaio, da Nappe Socorro-Guaxupé e do Grupo Votuverava.(Figura 09).

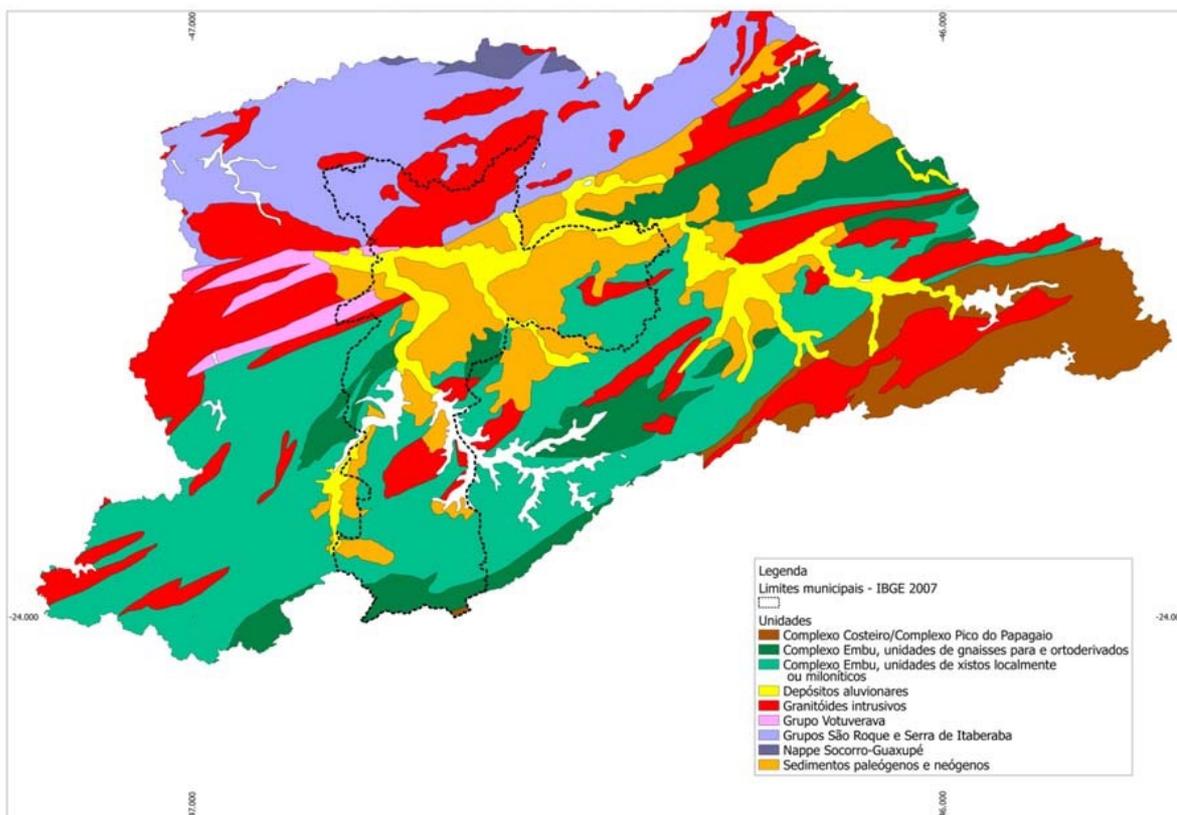


Figura 09 – Mapa geológico da Região Metropolitana de São Paulo com destaque para o embasamento. Fonte: Monteiro *et al.* (2012)

5.1.1 Preenchimento Sedimentar Paleógeno e Neógeno

O preenchimento da Bacia de São Paulo deu-se durante os períodos Paleógeno (66 a 23,03Ma.) e Neógeno (23.03 a 2,58Ma.), sendo sua principal fase de sedimentação no Oligoceno (33,9 a 23,03Ma.) (Melo *et al.*, 1985; Riccomini, 1989).

A deposição paleogênica é representada pelo Grupo Taubaté, composto pelas Formações Resende, Tremembé e São Paulo, a deposição Neógena é representada pela Formação Itaquaquetuba.(Figura 10).

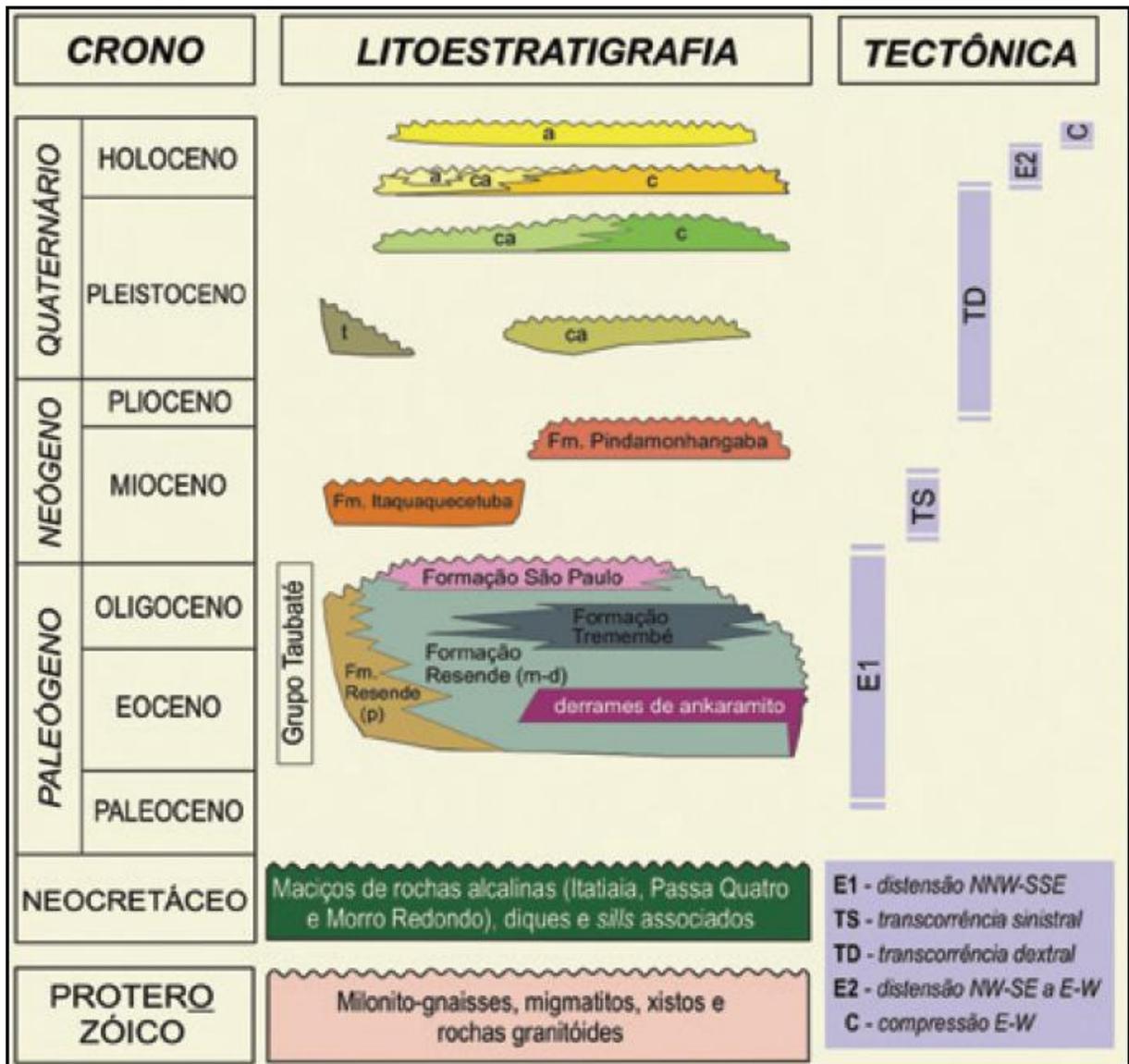


Figura 10 – Quadro litoestratigráfico e evolução tectono-sedimentar do segmento central do RCSB - Letras: p - leques aluviais proximais; m-d - leques aluviais medianos a distais associados a planície aluvial de rios entrelaçados; t - depósitos de tálus; c - depósitos colúviais; ca - depósitos colúvio-aluviais; a – depósitos aluviais. Fonte: Riccomini *et al.* (2004).

Formação Resende - Grupo Taubaté

A Formação Resende é a unidade basal e lateral do Grupo Taubaté. Com espessura estimada em 256m e distribuição generalizada, esta formação pode chegar a 80% do preenchimento sedimentar da BSP (Riccomini & Coimbra 1992). Litologicamente esta formação apresenta duas fácies principais; a primeira é composta por conglomerados polimiticos, interdigitados com arenitos e lamitos arenosos e, corresponde aos leques aluviais proximais, situados nas proximidades do contato com o

embasamento. A segunda apresenta arenitos intercalados com lamitos e, corresponde aos leques aluviais em posição distal associados a rios entrelaçados.

Formação Tremembé – Grupo Taubaté

Riccomini, (1989) define a Formação Tremembé como sendo depositada em ambiente lacustre do tipo *playa- lake*, interdigita-se lateral e verticalmente com os depósitos da Formação Resende. Na BSP esta formação apresenta camadas tabulares de argilito verdes maciços intercalados com argilitos cinza-escuro a preto, ricos em matéria orgânica. Sua espessura estimada é de 60m.

Formação São Paulo – Grupo Taubaté

A unidade do topo do Grupo Taubaté é a Formação São Paulo, composta por arenitos grossos, conglomeráticos e presença de clastos argilosos representantes de canais meandantes; siltitos e argilitos laminados, podendo conter registro fóssilífero (linhitos), depositados em meandros abandonados; arenitos médios e grossos, provenientes do rompimento de diques marginais, gradando para sedimentos mais finos rítmicos e laminados, típicos de planície de inundação. Esta formação compreende um sistema fluvial meandrante.(Riccomini, 1989).

Sobrepõe-se transicionalmente a Formação Resende. Nas interfaces entre fácies argilosas e arenosas a presença de couraças limoníticas de espessuras variáveis são frequentes (Riccomini & Coimbra, 1992). A Formação São Paulo apresenta frequentemente uma camada argilosa superficial de aproximadamente 10m de espessura, de coloração avermelhada, conhecida no meio geotécnico como “argilas porosas”.

Formação Itaquaquetuba

Assentada diretamente sobre rochas do embasamento pré-cambriano, a Formação Itaquaquetuba é representativa de um sistema fluvial entrelaçado restrito a área geográfica da BSP. Não é verificado sua relação com as unidades Paleógenas. A deposição desta unidade foi controlada por falhas de direção ENE e NNW, possibilitando a formação de cunhas clásticas ao seu redor, as quais contém bre-

chas polimíticas e megaclastos; lamitos arenosos, com intercalações de arenitos maciços, por vezes com estruturas resultantes de liquefação ocorrem nas partes distais das cunhas (Riccomini, 1989). Típicos desta unidade, ocorrem arenitos arcoseanos, contendo conglomerados basais com seixos de quartzo e quartzito arredondados, ou brechas com fragmentos de argilitos, na parte central da bacia.

5.1.2 Coberturas sedimentares quaternárias

Estes depósitos são representados por associações colúvio-aluviais com espessura e distribuição relativamente restritas, predominantemente próximas às drenagens atuais. São depósitos de idade pleistocênica a holocênica. Coluviões argiloarenosos, com lentes argilosas a conglomeráticas, ocasionalmente contendo madeira fóssil, e aluviões subordinados constituídos por conglomerados basais sobrepostos por areias grossas a conglomeráticas com estratificações cruzadas, gradando para areias médias a finas, com porções argilosas, caracterizam predominantemente os depósitos pleistocênicos (Melo *et al.*, 1987).

Coluviões e aluviões caracterizam os depósitos holocênicos. Os coluviões são descontínuos, embora com distribuição generalizada, podendo conter cascalheiras (*stone lines*) na base. Os depósitos aluviais estão depositados em várzeas e baixos terraços, constituídos por camadas arenosas e argilosas ricas em matéria orgânica, geralmente exibindo cascalheiras na base.

6. GEOLOGIA ESTRUTURAL E TECTÔNICA

A Bacia de São Paulo é uma bacia do tipo *rift*. Devido ao seu formato e distribuição de fácies sedimentares, admite-se que inicialmente a bacia seria um hemigráben controlado por falhas normais reativadas ao longo das zonas de cisalhamento de Taxaquara e Jaguari, dispostas ao longo de sua borda norte (Riccomini & Coimbra, 1992, Riccomini *et al.*, 2004). A BSP foi retrabalhada por falhas pós-sedimentares que causaram soerguimentos e abatimentos locais de seu substrato. (Figura 11 e 12).

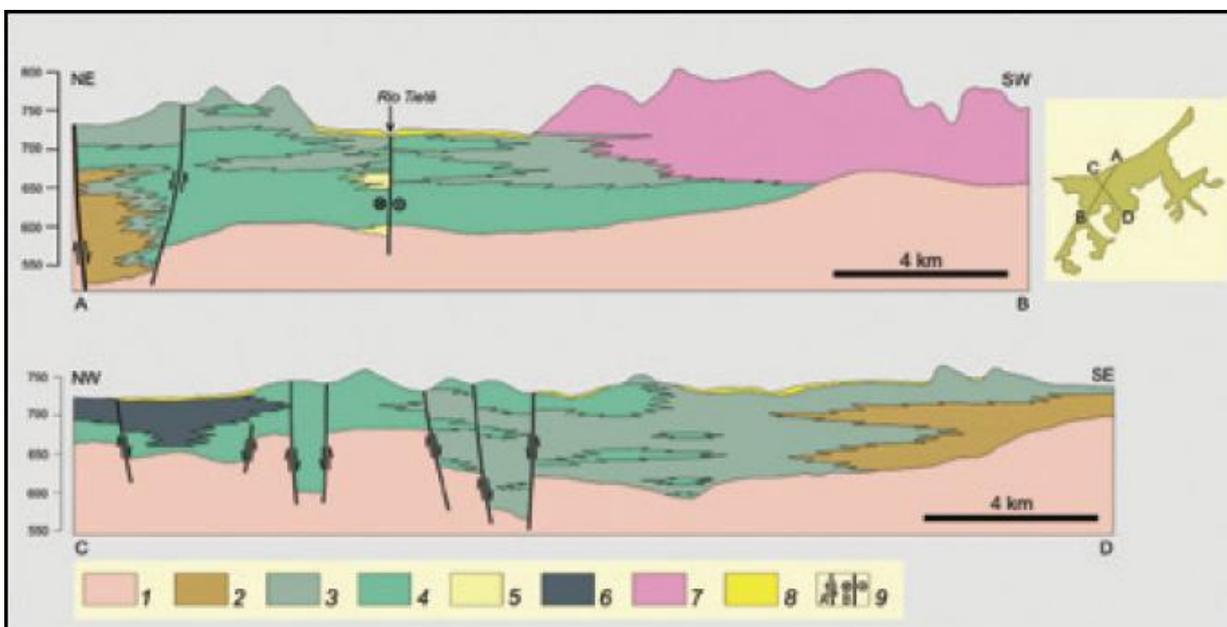


Figura 11 – Seções geológicas na Bacia de São Paulo construídas a partir de dados de sondagens para água subterrânea e observações de superfície - 1) embasamento pré-cambriano; 2) orto- e paraconglomerados de leques aluviais proximais da Formação Resende; 3) lamitos de leques aluviais medianos a distais da Formação Resende; 4) lamitos de leques aluviais distais e, principalmente, areias e conglomerados de sistema fluvial entrelaçado da Formação Resende; 5) predominância de areias grossas e conglomerados de sistema fluvial entrelaçado da Formação Resende; 6) sistema lacustre da Formação Tremembé; 7) sistema fluvial meandrante da Formação São Paulo; 8) aluviões quaternários; 9) falha normal (A) e falha transcorrente dextral (B). Para localização das seções na bacia ver esquema no canto superior direito da figura. Fonte: Riccomini *et al.*, (2004).

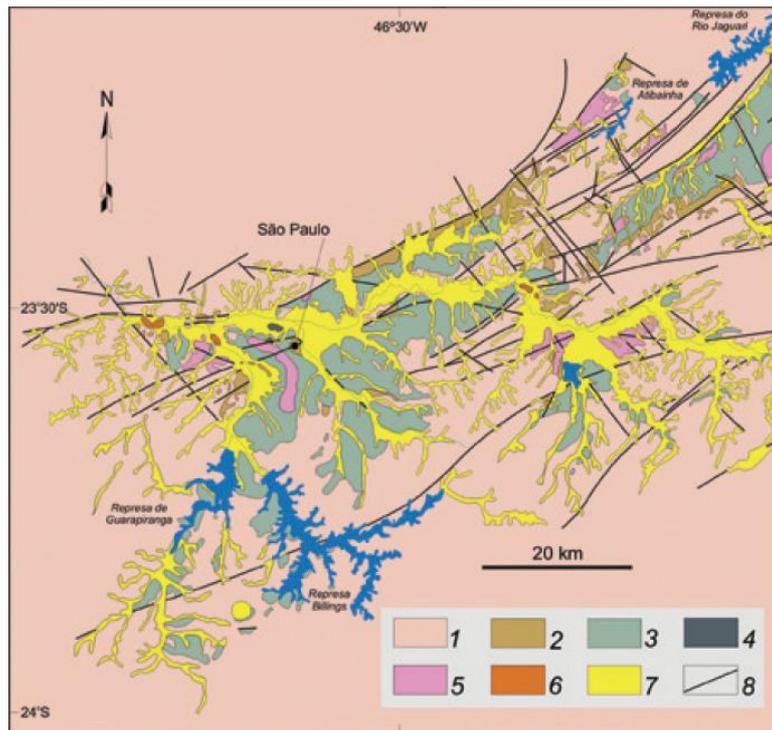


Figura 12 – Mapa geológico da Bacia de São Paulo e porção sudoeste da Bacia de Taubaté - 1) embasamento pré-cambriano; 2) Formação Resende (sistema de leques aluviais proximais); 3) Formação Resende (sistema de leques aluviais medianos a distais associados a planície aluvial de rios entrelaçados); 4) Formação Tremembé; 5) Formação São Paulo; 6) Formação Itaquaquetuba; 7) sedimentos quaternários; 8) falhas cenozoicas, em parte reativadas do embasamento pré-cambriano. Fonte: Ricomini *et al.*,(2004).

Um modelo tectônico inicial baseou-se em análises de estruturas tectônicas e suas relações estratigráficas para com o preenchimento sedimentar. O modelo contemplava tectonismos gerador e modificador para o seguimento central do RCSB (Riccomini, 1989), o qual incluiu a Bacia de São Paulo.

A formação da depressão original do *rift* e concomitante preenchimento sedimentar e vulcânico teriam ocorrido no Paleógeno (66 a 23,03Ma.), pela reativação de falhas normais de antigas zonas de cisalhamento proterozóicas de direção NE a ENE sob a ação de um campo de forças distensivas de direção NNW- SSE.

A instalação do segmento central do RCSB admite um modelo sustentado pelo caráter normal das falhas mestras ativas durante este processo. Segundo Riccomini (1995) a partir de estudos realizados em rochas do substrato do RCSB foi possível identificar a atuação de um regime transcorrente sinistral, com compressão de direção NE- SW e distensão NW- SE. As fases tectônicas deformadoras envolve-

riam novas reativações ao longo das falhas preexistentes e, em menor escala, geração de novas estruturas (Riccomini, 1989; Salvador & Riccomini, 1995). (Figura 13).

Os eventos deformadores sucessivamente, são os seguintes: 1) transcorrência sinistral de direção E-W, com distensão NW-SE e, localmente, compressão NE-SW, de idade neogênica; 2) transcorrência dextral, com compressão NW-SE, de idade quaternária; 3) distensão de direção WNW-ESE de idade pleistocênica a holocênica; e 4) compressão E-W, de idade holocênica.

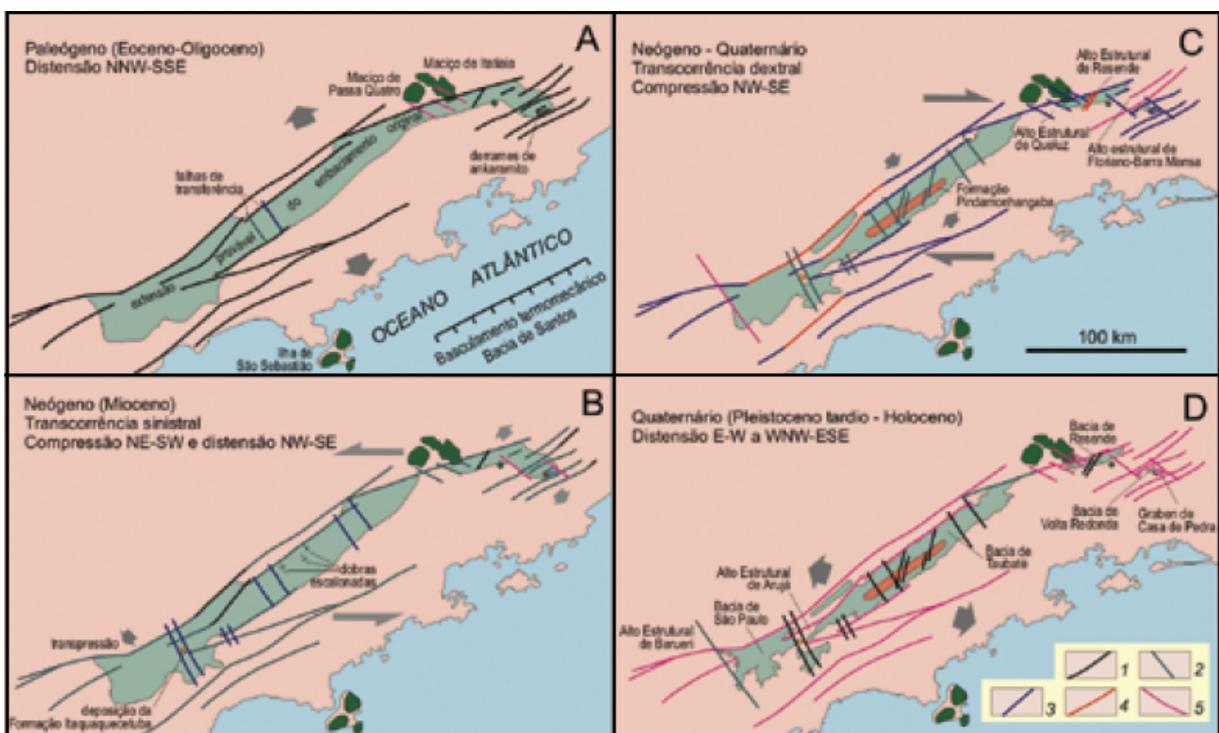


Figura 13 – Esboços paleotectônicos da evolução do segmento central do RCB - Legenda no quadro D: 1) falhas de componente predominante normal; 2) falha de componente transcorrente sinistral; 3) falha de componente transcorrente dextral; 4) falha de componente predominante reversa; 5) falha com movimentação não caracterizada. Fonte: Riccomini *et al.* (2004).

Falhas relacionadas ao primeiro evento deformador da bacia atuam colocando blocos de rochas do embasamento sobre os depósitos sedimentares, esse rearranjo estrutural esta relacionado à falhas de empurrão e falhas transcorrentes ocorrem controlando a instalação de bacias de afastamento de pequenas dimensões (Riccomini, 1989).

Em um segundo evento, foram acomodados os altos estruturais que atualmente separam o registro sedimentar paleogênico em bacias isoladas; neste segundo evento deformador, falhas das bordas das bacias ativas, durante a fase de instalação do *rift*, foram reativadas com caráter transcorrente, inverso e/ou de empurrão, localmente cavalgando depósitos sedimentares paleogênicos.

Aparentemente o terceiro evento deformador deu forma ao contorno atual da distribuição dos sedimentos, este apresentou caráter distensivo. Um quarto e último evento deformador desta sequência caracterizou-se por um regime compressivo, o qual causou a reativação inversa de falhas de direções próximas de N-S e a geração de famílias de juntas conjugadas de cisalhamento em depósitos colúvio-aluviais.

7. O MUNICÍPIO DE SÃO PAULO

7.1 Geologia Local

Todo o trecho da área relevante ao estudo encontra-se inserido em um maciço gnáissico que representa o embasamento Pré-Cambriano da BSP. Em alguns trechos restritos este é recoberto por sedimentos paleógenos/neógenos da Formação Resende. As áreas que apresentam tal cobertura restringem-se aos extremos do trecho, situados próximos às estações Pinheiros e Faria Lima. Recobrimo estes sedimentos e o embasamento, ocorrem aluviões e aterros.

O trecho da referente área insere-se na faixa de influência da Zona Transcorrente de Caucaia (Hasui, 1993), conforme indicado na Figura 14, a seguir.

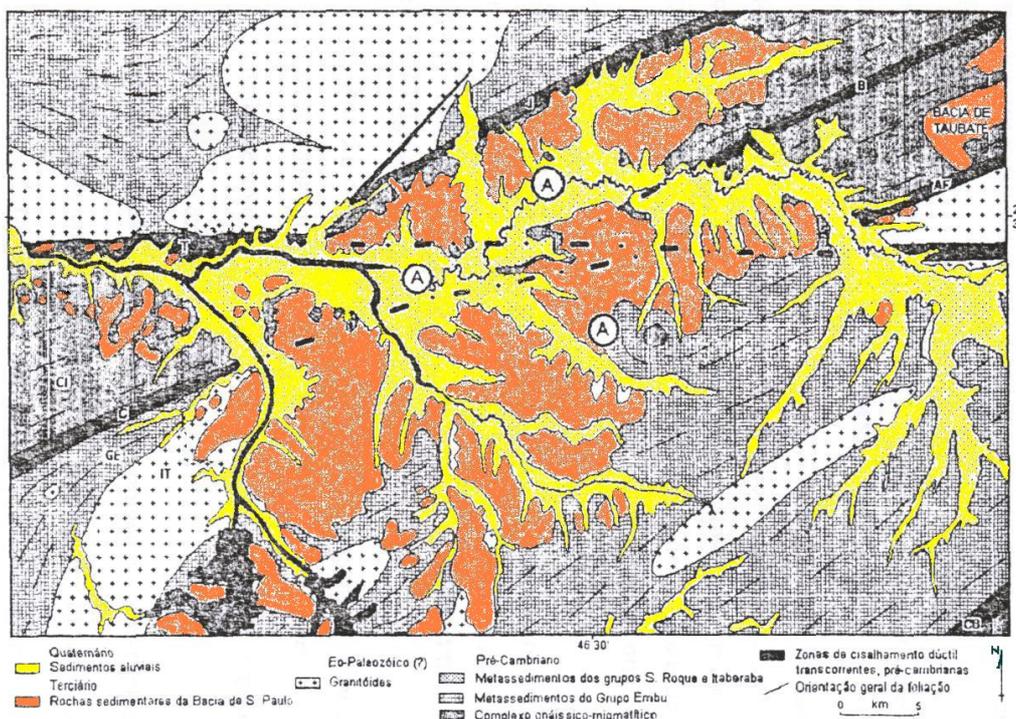


Figura 14 – Zonas de transcorrência dúctil: T-Taxaquara; C-Caucaia; J-Jaguari; B-Buquira; AF-Alto da Fartura; CB-Cubatão. As linhas grossas interrompidas indicam suas extensões aproximadas. Círculos com A indicam as porções dos blocos que mais afundaram durante o desenvolvimento da Bacia de São Paulo. Unidades do embasamento adjacente à área de interesse: CI-Complexo Ibiúna; GE-Grupo Embú; IT-Granitóide de Itapeirica. Fonte: Hasui (1993).

7.1.2 Unidades geológicas

A descrição das principais unidades geológicas presentes na área de estudo foi baseada no relatório geológico-geotécnico elaborado pela Figueiredo Ferraz, Consultoria e Engenharia de Projeto Ltda (2001) para a Companhia do Metropolitano de São Paulo (CMSP).

a) Embasamento

O embasamento é constituído por gnaisse migmatizado, podendo ocorrer intercalações graníticas e milonitos em zonas mais tectonizadas. Constituem corpos lenticulares justapostos, alinhados na direção ENE-WSW, com disposição vertical e subvertical. Embora certas litologias não tenham sido detectadas nas sondagens verticais, estas podem ocorrer na forma de associações no maciço gnáissico; xistos, quartzitos e anfibolitos.

O topo rochoso apresenta-se irregular, ondulando ao longo do traçado da via e das estações.

De modo geral descreve-se que no maciço rochoso, em decorrência da segmentação estrutural e da resposta diferenciada dos litotipos ao intemperismo, ocorrem rochas a alterada, pouco a muito fraturada.

A conformação regional do embasamento é descrita como sendo do tipo “caixa de ovos” e destaca-se que ao longo das discontinuidades geológicas e, principalmente nas interseções, as alterações tornam-se mais profundas, havendo, entretanto, preservação de porções do maciço mais resistentes entre elas.

b) Sedimentos Paleógenos/ Neógenos

Os sedimentos, pertencentes à Formação Resende, que ocorrem de forma restrita nas proximidades das estações Faria Lima e Pinheiros, estão associados às estruturas geológicas em regiões de depressão do maciço rochoso. Estes não interceptam diretamente o maciço de escavação do túnel nestas estações, entretanto ocorrem na área de influência do projeto e construção de suas estruturas.

c) Sedimentos Aluvionares

Os sedimentos aluvionares ocorrem, preferencialmente, ao longo da antiga faixa de inundação do vale do Rio Pinheiros e seus afluentes.

d) Depósitos Tecnogênicos

Constituem os aterros de materiais diversos, com predomínio de argila siltosa pouco arenosa, geralmente com pedregulhos e/ou matéria orgânica. Ocorrem principalmente sob as vias de acesso, bem como nas áreas antrópicas onde foram construídas obras civis.

7.2 Feições Estruturais do Embasamento

O modelo estrutural do embasamento cristalino Pré-Cambriano foi confeccionado com certas limitações, visto que, devido á urbanização no trecho do projeto, os estudos convencionais a um mapeamento geológico restringiram-se a praticamente um único afloramento de exposição de rocha. Este ocorreu na escavação para implantação do sistema viário Eusébio Matoso (Hasui, 1993). O modelo confeccionado restringe as feições estruturais às foliações e juntas, citando ainda a possibilidade de ocorrência de pequenas falhas superimpostas a estas estruturas.

A foliação constitui a feição de maior destaque na estruturação, sendo esta responsável por condicionar a distribuição dos litotipos e horizontes de alteração no maciço rochoso. Por constituir zonas de fraqueza, contribui para a ação dos processos intempéricos que, associados a outras feições estruturais, podem condicionar a configuração do topo rochoso. Em conformidade com o modelo tectônico evolutivo da Zona Transcorrente de Caucaia, a foliação apresenta predominantemente a direção N79E e mergulho subvertical.

Prováveis feixes de falhas associados à faixa de influência da Zona Transcorrente de Caucaia, com direção N79E/subvertical são inferidos a partir de dados de sondagem, nas proximidades das estações Faria Lima e Pinheiros e, devido às depressões acentuadas e conformação abrupta do topo rochoso, na zona de contato do embasamento com os sedimentos paleogênicos

De um modo geral tem-se gnaissificação N80(+ -)5E/ subvertical, fraturamento principal N15(+ -)5W/ 80(+ -)5SW, fraturamento secundário N80(+ -)5E/ subvertical e por fim, fraturamento terciário subhorizontal. Estas estruturas constituem o principal arranjo estrutural do trecho, aliadas as juntas existentes.(Figura 15).

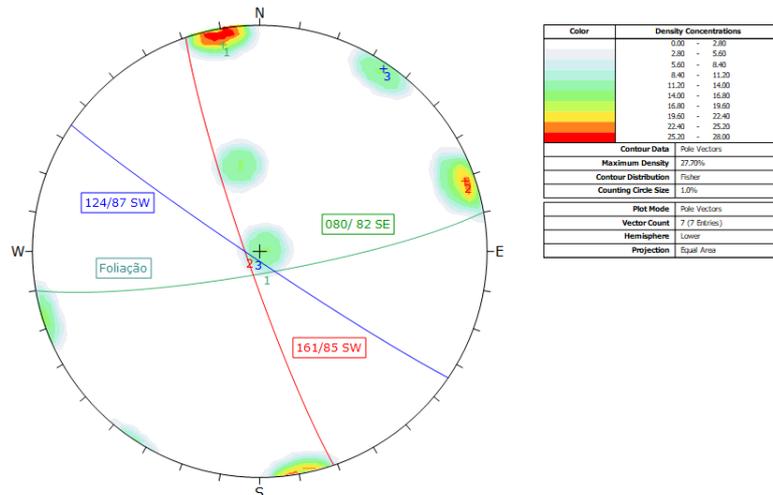


Figura 15 – Projeção estereográfica (hemisfério inferior) das principais estruturas (foliação e fraturas) na Estação Pinheiros.

7.2.1 Modelo de compartimentação estrutural

Ao longo do trecho realizou-se um mapeamento geológico de superfície visando identificar as litologias e estruturas presentes, a fim de elaborar um mapa geológico/estrutural da área; as informações descritas a seguir são baseadas no relatório da Figueiredo Ferraz, Consultoria e Engenharia de Projeto Ltda, 2001. A escassez de dados, que pudessem compor o mapa geológico, deveu-se a urbanização do trecho. Observações das escavações da obra do Sistema Viário Eusébio Matoso e, em alguns poucos afloramentos ocorrentes na entrada da Cidade Universitária, e no bairro City Butantã, permitiram enriquecer a qualidade do mapa, fornecendo medidas das atitudes das discontinuidades, as quais foram utilizadas para elaboração do modelo geológico-estrutural. (Fotos 1 e 2).



Foto 1 – Vista geral do corte do biotita gnaiss fraturado localizado na passagem inferior da Av. Eusébio Matoso. Fonte: Figueiredo Ferraz (2001).

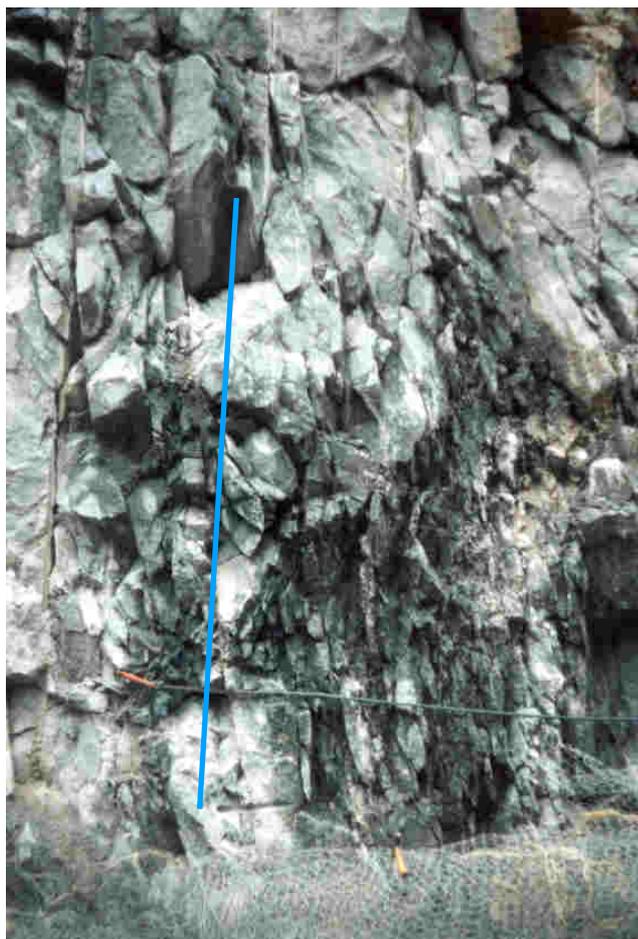


Foto 2 – Detalhe da foto anterior, com faixa de fraturamento concentrado com direção ENE/subvertical (linha azul). A faixa de cor escura e a direita da imagem o “migmatito biotítico” apresenta espessura de ordem de algumas dezenas de centímetros até quase um metro na parte mais espessa. Fonte: Figueiredo Ferraz (2001).

A rocha corresponde a um gnaíse de cor cinza, granulação médio-grosseira e foliação protomilonítica. A foliação da rocha, apesar de constituir uma estrutura bem destacada e persistente, não foi sistematicamente levantada. Os valores observados, indicam forte concentração na faixa compreendida entre N75-85E, com mergulhos subverticais a verticais. Localmente existe um aprofundamento da alteração paralelo ao bandamento gnaíssico.(Foto 3).

Há a presença de sedimentos paleogênicos em contato com o solo de alteração de gnaíse nas estações Pinheiros e Faria Lima, identificada pelas sondagens executadas nesses locais.(Foto 4).

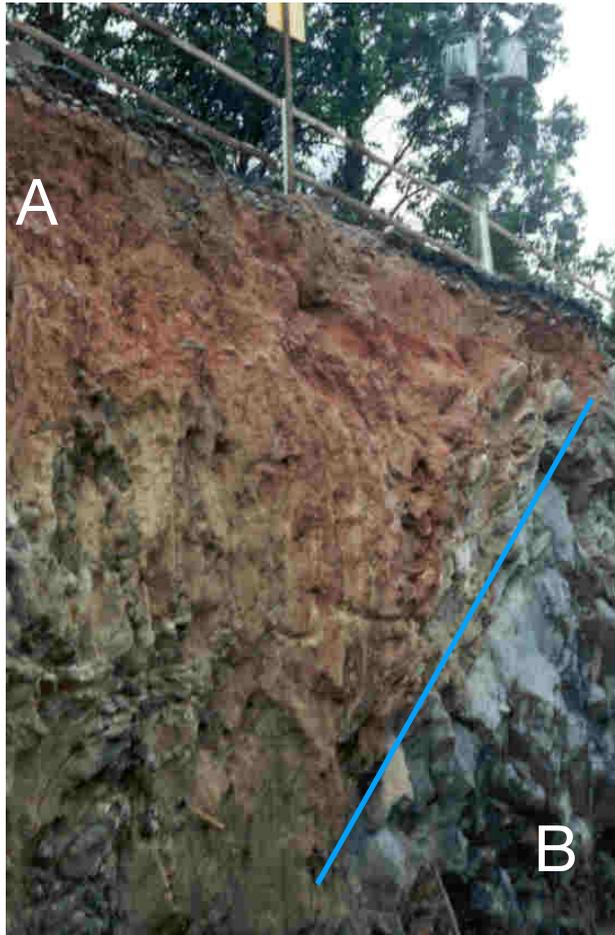


Foto 3 – Detalhe de alteração de rocha(A) avançando paralelamente ao bandamento do gnaiss(B). Notar alternância de camadas verticais de gnaiss/saprolito de gnaiss. Fonte: Figueiredo Ferraz (2001).



Foto 4 – Contatos das unidades Aterro(A) /Sedimentos paleógenos/neógenos (B) /Solo residual de gnaiss(C) na escavação da passagem inferior na Av. Waldemar Ferreira. Fonte: Figueiredo Ferraz

Perante resultados obtidos nos levantamentos executados, relacionando-os com as famílias admitidas no modelo estrutural de Hasui (1993) verifica-se que o maciço é fortemente compartimentado, pelas famílias subverticais que, compõem as juntas longitudinais, transversais e oblíquas à foliação.

Apesar de esparsas, as famílias inclinadas foram detectadas nas sondagens. Essas descontinuidades são importantes à medida que condicionam o isolamento de blocos de rocha no teto e paredes da escavação.

A família das juntas subhorizontais a horizontais, decorrentes do alívio de carga por processos erosivos, foram identificadas até as profundidades de investigação das sondagens. Apesar do espaçamento métrico, admite-se sua ocorrência ao longo de todo o trecho. A estabilidade de blocos é considerada a partir do traçado dos túneis e estações, quase paralelo à foliação.

A percolação é influenciada pela orientação das juntas em relação ao regime de tensões neotectônico vigente, que se caracteriza por um eixo distensivo de direção NE-SW, tendendo a abrir as juntas N17W/subv, N56W/85SW e N17W/38NE e um eixo compressivo de direção NW-SE, tendendo a fechar as juntas N79E/subv e N77E/32SE.

A localização do túnel a pequena profundidade no maciço rochoso implica em região de alívio de tensões com presença de juntas subverticais e subhorizontais abertas, podendo ocasionar a ocorrência de litotipos mais alterados, aumentar o aporte de água na escavação e instabilizar blocos de rocha.

A direção do túnel, subparalela à foliação pode implicar em faixas de percolação e alteração contínuas ao longo da seção, devido ao condicionamento de distribuição dos corpos rochosos nessa direção. Por outro lado, zonas de alteração e percolação associadas às juntas transversais são praticamente ortogonais ao túnel e pouco extensas. Como o traçado está sub-paralelo à direção das juntas longitudinais, que são muito persistentes e da foliação, que condiciona a distribuição dos litotipos e de níveis mais alterados no maciço rochoso, foram admitidas condições desfavoráveis e muito desfavoráveis para a orientação das fraturas e escavação da estação Pinheiros, considerando a atitude da foliação e Zona de Cisalhamento de

Caucaia (Figueiredo Ferraz Consultoria e Engenharia de Projeto Ltda, 2001).

A análise cinemática destes sistemas de fraturas revelam probabilidade de 19,05% para deslizamento em cunha e 0% para deslizamento planar.(Figuras 16 e 16A), respectivamente.

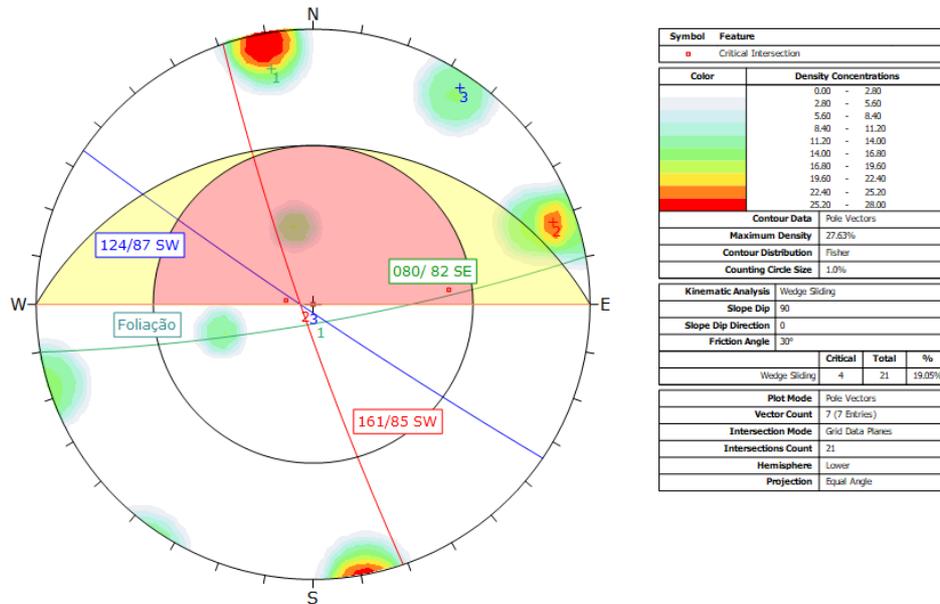


Figura 16 Análise cinemática das fraturas – talude vertical. Probabilidade de deslizamento em cunha 19,05%.

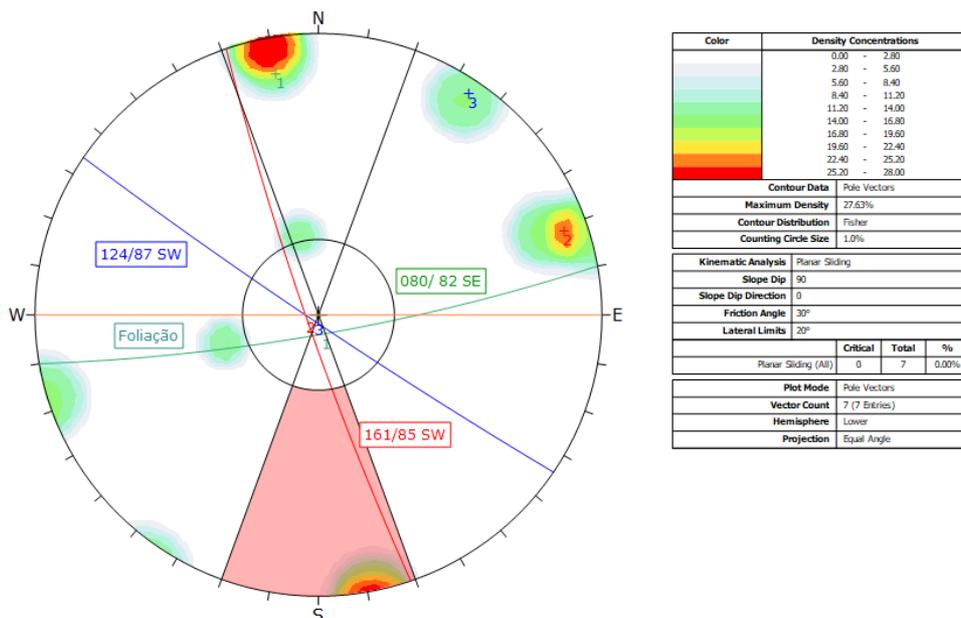


Figura 16A. Análise cinemática para deslizamento planar- talude vertical. Probabilidade 0%.

7.3 Maciço Rochoso

O maciço gnáissico situa-se abaixo da linha indicativa do topo rochoso. Segundo informações do IPT- Instituto de Pesquisas Tecnológicas, o qual realizou as análises das características litológicas da região, este maciço caracteriza-se por porções relativamente homogêneas sob aspectos geológicos, considerando-se relações mineralógicas, texturais e estruturais intrínsecas a cada litotipo.

O maciço foi compartimentado em três faixas com litotipos geomecânicos diferenciados predominantes; “maciço gnáissico milonítico granítico”, “maciço gnáissico milonítico biotítico” e “maciço gnáissico milonítico bandado” que, para efeitos práticos foram respectivamente denominados de gnaiss granítico, gnaiss biotítico e gnaiss bandado. Estão presentes ainda outros litotipos como corpos pegmatíticos de dimensões significativas.(Fotos 5 e 6).



Foto 5- A) gnaiss granítico com bandamento quartzo-feldspático. B) gnaiss de composição granítica rico em biotita. Vistas em planta. Fonte: Sadowski (2008).

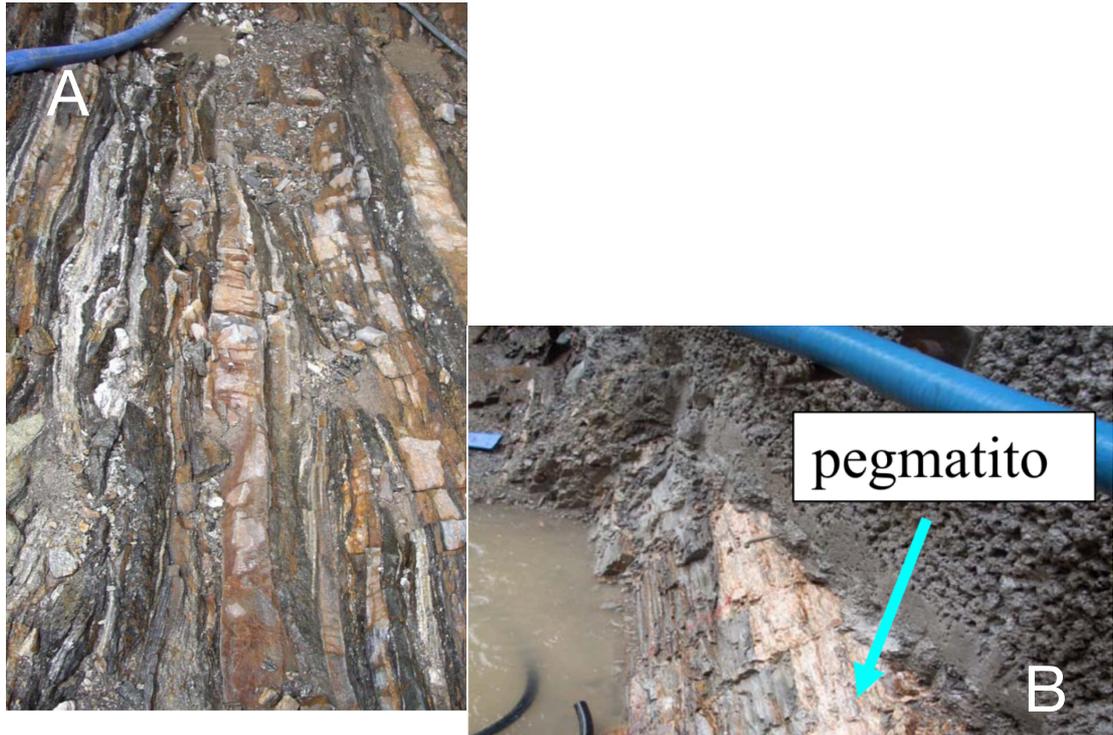


Foto 6- A) gnaiss granítico bandado – foliação subvertical. B) veio pegmatítico subparalela à foliação Fonte: Sadowski (2008).

Esta compartimentação em trechos individualizados representa a predominância de cada litotipo em relação aos demais. Entretanto não torna excludente a possibilidade de intercalação entre eles, os quais apresentam características geotécnicas diferentes

O maciço gnaiss granítico é descrito como um maciço homogêneo de coloração cinza escuro. Possui características geológicas e geotécnicas distintas ao longo de todo trecho em questão e caracteriza-se por apresentar uma foliação milonítica com mergulhos verticais a subverticais. Destacam-se porções mais intensamente deformadas, onde ocorre a recristalização do quartzo o que confere ao maciço maior resistência mecânica.

O maciço gnaiss biotítico, em alguns trechos, apresenta maior concentração de biotita, conferindo-lhe uma coloração de cinza escura a preta quando são ou pouco alterada, entretanto, dada a sua constituição mineralógica, esse maciço se encontra quase sempre alterado, independente de sua profundidade, o que lhe confere uma coloração marrom amarelada.

Entre as estações Pinheiros e Faria Lima os gnaisses apresentam uma foliação predominantemente N80E/subvertical e um faturamento mais acentuado(Foto 2).

8. SÍNTESE DO ACIDENTE

As estações estavam sendo escavadas pelos métodos de perfuração e detonação, sendo a frente composta por dois túneis: túnel leste - Lado Faria Lima e túnel oeste - Lado Butantã, (Figuras 17 e 18), separados pelo poço de acesso Capri, com 40m de diâmetro, que colapsou.

O túnel colapsado (20m x 40m x 10m), apresentava a coroa a 22m abaixo da superfície no interior da rocha intemperizada, a qual fora misturada e sobreposta por diversas litologias presentes no local. A caverna de 19m de extensão foi escavada a uma profundidade de cerca de 25 m sob a influência de uma importante estrutura geológica, a Zona de cisalhamento Caucaia (CSZ), onde predominam gnaisses miloníticos de composição granítica.(Sadowski, 2010).

O acidente ocorreu nos primeiros dias do ano de 2007, o início da instabilidade do túnel fora concretizado pela queda de pequenos pedaços de concreto de revestimento, seguidos de estalos e surgimento de trincas no teto do túnel no lado do edifício Abril, bem como trincas na superfície simultaneamente. Á priori acreditou-se tratar-se de uma instabilidade localizada, como um deslocamento. O local encontrava-se na fase de instalação dos chumbadores no rebaixo dos túneis. Detonações e escavações para o rebaixo haviam sido realizadas no lado Butantã e no sentido Faria Lima. Observou-se que no topo dianteiro do túnel havia surgido trincas e fissuras quando então, após a constatação de tal fato deu-se o acidente. O desmoronamento atingiu o poço de acesso à Estação Pinheiros (com colapso parcial do mesmo), o alinhamento da Rua Capri, e a lateral oposta à Rua Capri, onde se localizava um estacionamento. (Figura 19).

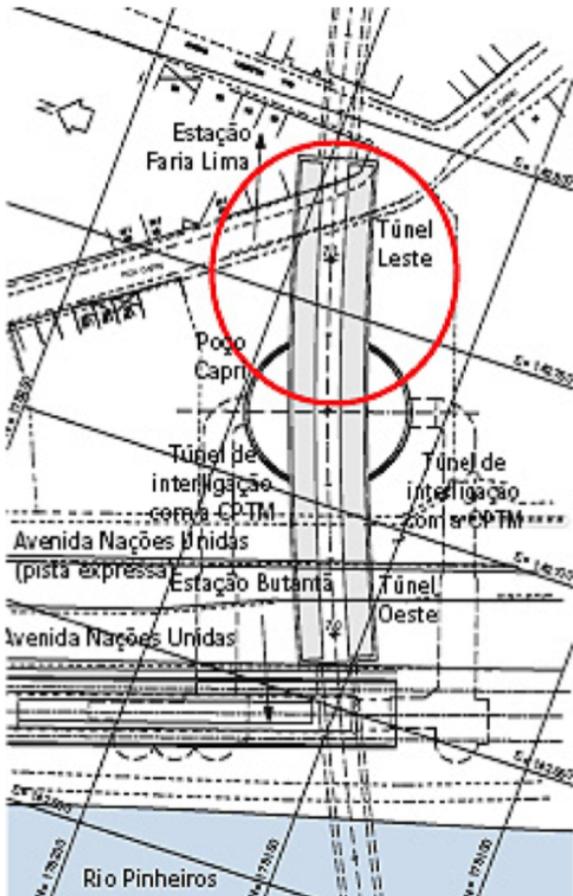


Figura 17 - Indicação da estação e do trecho afetado (interior do círculo). Fonte: Maffei *et al.*, (2011).

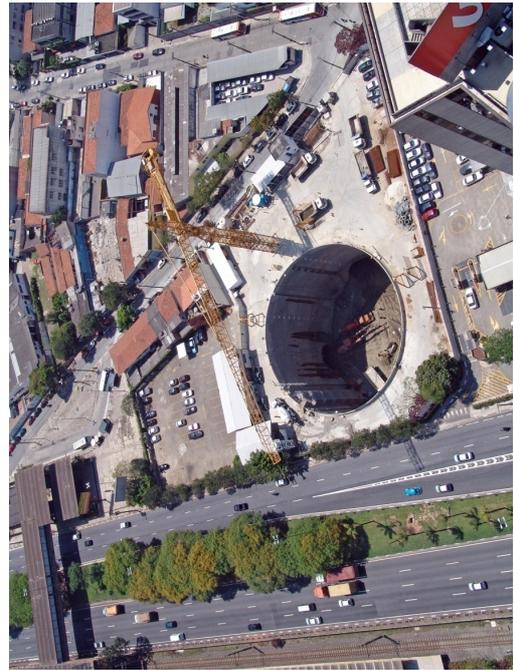


Figura 18 - Vista aérea antes do colapso. Fonte: Maffei *et al.*, (2011).



Figura 19 - Cicatriz de ruptura do lado da rua Capri. Maffei *et al.*, (2011).

O modelo geológico à época do projeto considerava a existência de lentes menos resistentes, as mesmas eram descritas como localizadas, relativamente delgadas e não contínuas, sendo de difícil localização espacial prévia através de sondagens. Um corpo de pegmatito fora claramente identificado ao lado do túnel, durante as escavações da perícia, o qual não pode ser claramente visível durante o mapeamento da frente de escavação.

De uma maneira geral o comportamento geomecânico do maciço, na região da Estação Pinheiros, é heterogêneo, anisotrópico, descontínuo, com resistência residual muito baixa.

9. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O presente trabalho baseou-se em dados obtidos a partir de furos de sondagem para criação de um modelo geológico em 3D da área onde, no ano de 2007, ocorreu o acidente durante a construção da Estação Pinheiros do Metrô da cidade de São Paulo, pertencente a Linha 4 – Amarela - da Companhia do Metropolitano de São Paulo (CMSP).

Foram selecionados 17 furos de sondagem os quais contemplavam os objetivos delimitados para tal modelagem. Estes furos concentraram-se na área do acidente e no entorno do mesmo, organizados de modo a atender os parâmetros do programa selecionado, bem como os objetivos finais do presente projeto. Os furos possuem informações litológicas as quais elucidam informações sobre o embasamento gnáissico e suas coberturas, como sedimentos paleógenos/neógenos, aluvião e intrusões pegmatíticas.

As informações foram coletadas e organizadas procurando-se homogeneizar informações distintas porém condizentes, provenientes de diferentes boletins de sondagem que foram realizadas por diversas empresas.

Os dados então inseridos e calculados pelo *software*, resultaram em uma gama de informações pertinentes ao estudo. Apresentaram informações claras e objetivas acerca de cada furo e, também das camadas geradas pelo programa. A partir deste instrumento tecnológico foi possível obter informações gráficas e tabelas que

Importante salientar que a cor apresentada pelo topo e base das camadas nos furos é algo previamente definido pelo *software*, podendo ser alterada no momento da confecção do sólido correspondente, ou seja, é possível definir a cor de cada camada criada. Na importação acima tem-se as seguintes correspondências, do topo para a base: cinza-claro = *aterro*; vermelho = *aluvião*; amarelo = *solo residual*; vinho = *sedimentos paleógenos/neógenos*; verde limão = *gnaisse biotítico*; cinza escuro = *gnaisse granítico*; rosê = *camada de pegmatito*; marrom = *camada de pegmatito (distinta)*; pink = *solo de alteração* e azul royal = *milonito*.(Figura 21).

As tabelas “*strata*” e “*location*” são tabelas geradas no processo de construção do modelo 3D, um recurso do próprio *software*, que trazem informações relativas às camadas e aos furos, respectivamente. Apresentaram todas as informações que puderam ser calculadas pelo programa, a partir dos dados iniciais fornecidos para a geração do modelo. (Figuras 22 e 23).

View	Geology Code	Location Count	Top Minimum	Top Maximum	Base Minimum	Base Maximum	Thickness Minimum	Thickness Maximum
	piso de concreto	8	0,00	0,00	0,05	0,70	0,05	0,70
	aterro	17	0,00	0,70	0,80	7,00	0,70	7,00
	aluvião	15	0,80	4,00	3,65	10,39	2,70	6,95
	solo residual	17	2,00	19,90	12,15	33,45	1,15	19,07
	sedimentos terciários da Bacia de Sao Paulo	7	6,90	10,39	11,00	19,90	4,00	13,00
	gnaisse biotítico	14	12,15	35,30	28,30	50,00	0,85	34,50
	gnaisse granítico	6	12,85	36,20	32,35	45,05	2,77	32,15
	pegmatito1	4	14,20	20,37	15,60	21,87	0,75	1,50
	pegmatito	3	15,40	36,45	34,80	37,35	0,90	19,90
	solo de alteracao	3	19,28	32,55	20,35	34,50	0,95	1,95
	pegmatito2	5	22,00	23,07	23,01	23,80	0,46	1,25
	pegmatito3	3	23,45	27,97	24,50	29,47	0,48	1,50
	milonito	3	24,25	34,10	26,00	34,26	0,16	4,81
	solo de alteração	1	32,10	32,10	32,62	32,62	0,52	0,52
	pegmatito4	1	41,35	41,35	47,35	47,35	6,00	6,00

Figura 22 -STRATA - tabela descritiva gerada pelo programa, apresentando informações pertinentes e relativas a cada camada existente. Apresenta informações tal qual a quantidade de vezes que cada camada ocorre, indicativos de topo e base e, espessuras.

Id	Type	Ground Level	Final Depth	Easting	Northing	Plan	Strip
SM-8704	SM	723,85	686,85	142764,00	178191,00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
SM-8719	SM	723,15	687,15	142684,00	178152,00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
SM-6529	SM	724,45	679,30	142814,02	178162,05	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
SM-8703	SM	724,00	679,00	142747,00	178173,40	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
SM-8705	SM	724,00	676,00	142770,69	178181,40	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
SM-8702	SM	723,50	687,35	142738,00	178194,00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
SM-6532	SM	721,59	678,41	142676,53	178170,36	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
SM-6530 (PZ)	SM	728,91	683,91	142793,71	178189,53	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
SM-8720	SM	723,40	686,40	142700,00	178182,00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
SM-8707	SM	723,63	683,13	142712,96	178198,58	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
SM-8706	SM	722,30	682,30	142770,09	178208,96	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
SM-6802	SM	723,81	678,60	142744,71	178155,82	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
SM-8708	SM	723,48	686,48	142730,00	178159,00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
SM-8701	SM	723,27	673,27	142688,11	178207,65	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
SM-6694	SM	723,30	678,26	142724,53	178214,15	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
SM-8714	SM	723,31	687,31	142710,09	178139,79	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
SM-6803	SM	723,48	680,48	142709,30	178156,14	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 23 - LOCATIONS - Tabela demonstrativa de informações referentes aos furos de sondagem. Id.- identificação de cada furo, Type- tipo de furo, Ground Level- nível topográfico, Final Depth- profundidade topográfica final, Easting- coordenada leste, Northing- coordenada norte.

Notar que a tabela *strata* possui informações como topo mínimo e topo máximo, base mínima e base máxima e, também espessura mínima e máxima de cada camada. Traz ainda informações referentes a quantas vezes determinado nome, relativo às camadas, aparece. Permite ainda controlar a visibilidade de cada camada, possibilitando a análise e observação individual de cada uma.

A tabela *locations* compila informações relativas à identificação de cada furo de sondagem, às respectivas superfícies topográficas bem como o valor desta em sua profundidade final e, também coordenadas . Apresenta a opção destes serem visualizados em planta e também do perfil de cada furo.

A seguir são apresentadas as imagens calculadas pelo *software*, pelo método de triangulação. Assim é gerado camada a camada, podendo desta forma visualizar e, analisar o comportamento individual e, também as relações existentes entre as mesmas. Vale ressaltar que o *software* comumente extrapola a abrangência de al-

guns domínios litológicos, entretanto quando todas as camadas integram o modelo final, este interpola as informações de maneira satisfatória.

Dentre algumas limitações apresentadas pelo *software*, destaca-se o fato de que este não permite a inserção de dados estruturais, para que desta forma o modelo pudesse contemplar não só uma análise litológica, mas também estrutural. Perante este detalhe é importante ressaltar que agregado ao modelo gerado não se ignore as informações estruturais descritas anteriormente na literatura.

Os modelos são construídos da base para o topo, ou seja, inicialmente será apresentada toda uma análise comportamental e visual do embasamento e, por conseguinte suas relações com outras camadas que constituirão o modelo final.

As Figuras de 24 a 27 representam dois domínios distintos do embasamento; um gnaisse predominantemente biotítico e outro granítico. Chama atenção o fato de que ambos apresentam superfície irregular e variação considerável de espessura.

A interpolação desses dois domínios resulta em um modelo do substrato da bacia da porção de interesse do presente estudo.(Figura 28).

O *software* possibilita diversas vistas das camadas geradas, dentre elas, até mesmo, uma visualização inferior.(Figura 29).

Para uma análise mais detalhada do comportamento do embasamento geraram-se vistas em diversas direções, para que assim este possa ser observado de diferentes formas e, por conseguinte, confrontar com informações pré existentes a respeito do mesmo. Inicialmente temos as vista norte e sul.(Figura 30).



Figura 24 - Em vista superior, representado pela cor pink, domínio do gnaisse biotítico

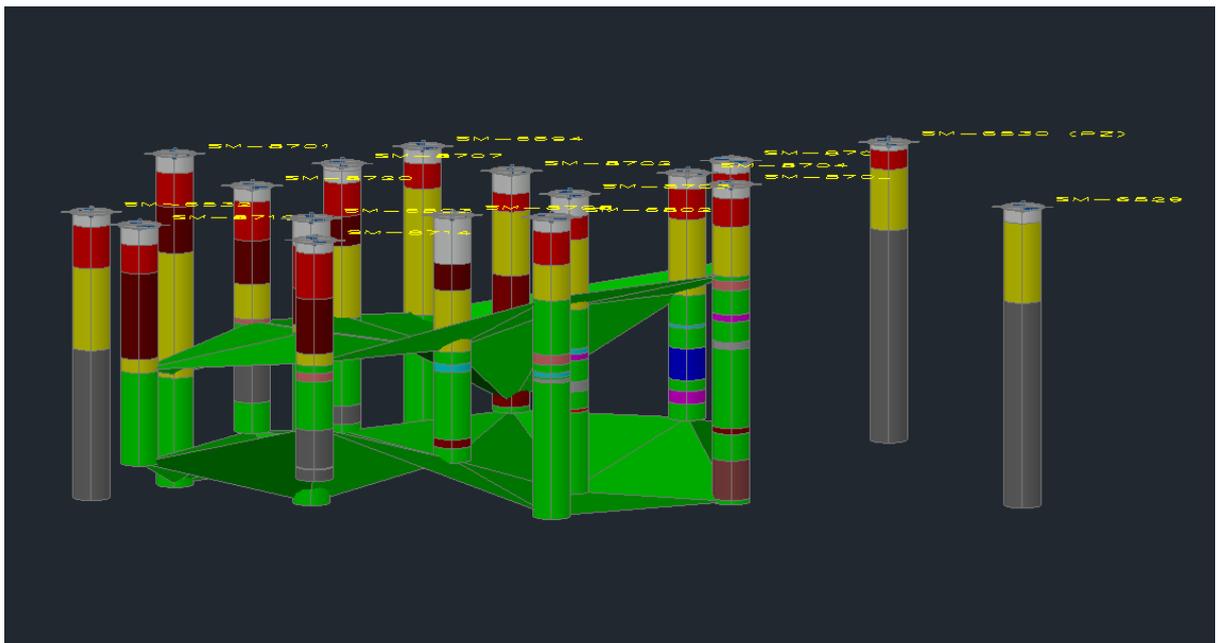


Figura 25 - Vista frontal, segundo orientação W- L , do topo e base da camada (cor verde) de gnaisse biotítico. Notar o contorno irregular e variação de espessura.

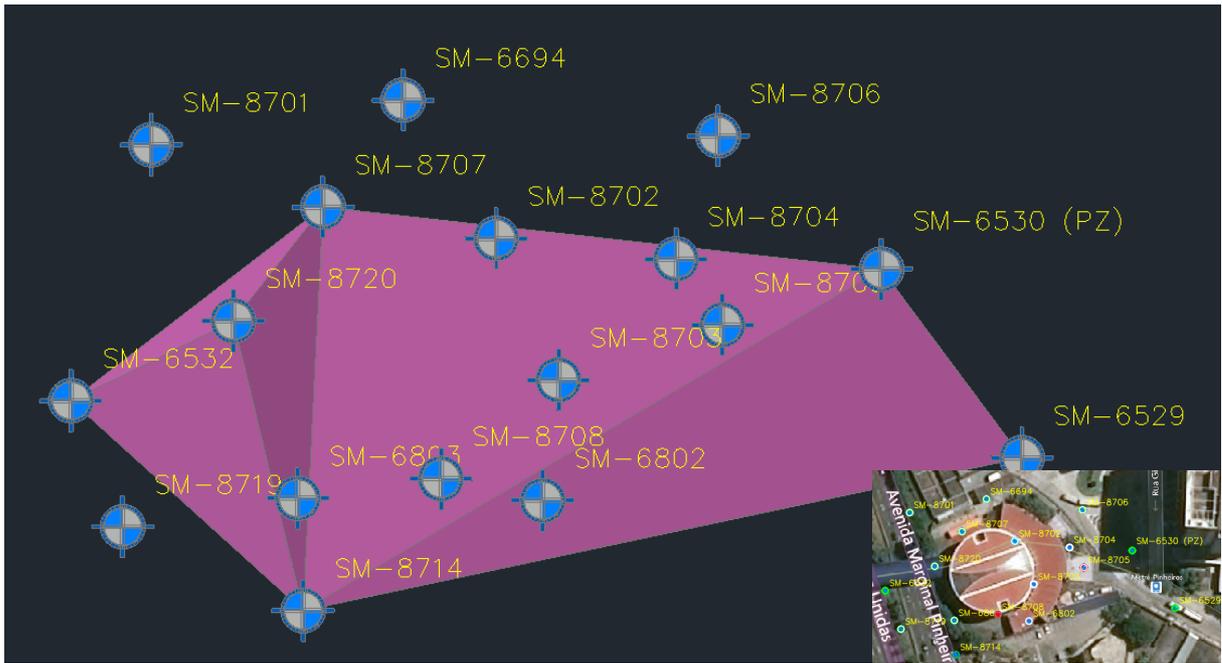


Figura 26 - Vista superior do domínio do gnaisse granítico, representado pela cor rósea.

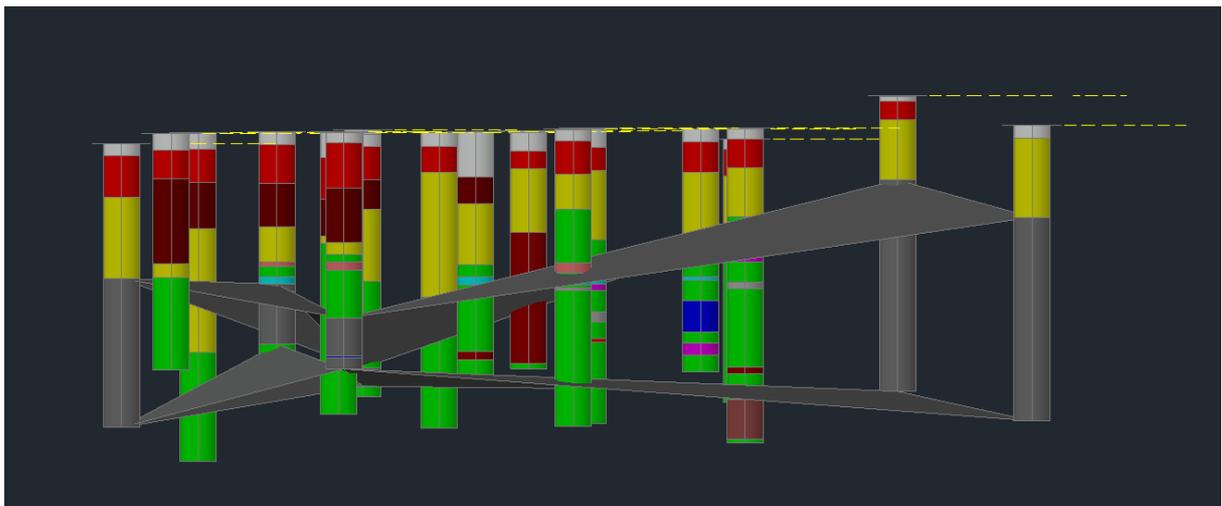


Figura 27 - Vista frontal, segundo orientação W- L, do topo e base da camada (cor cinza) de gnaisse granítico. Espessamento considerável na porção leste do domínio.

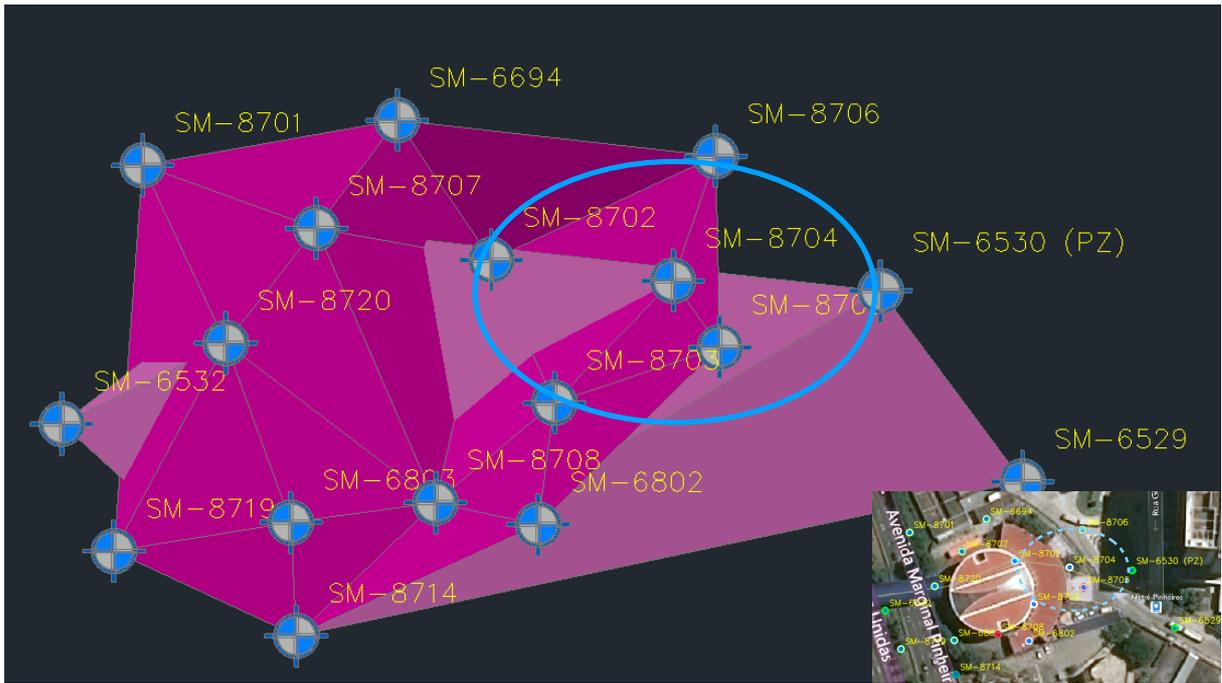


Figura 28 - Vista superior contemplando os domínios gnaiss biotítico (pink) e gnaiss granítico (roseo) interpolados, os quais constituem o substrato da área de estudo. Em destaque a área onde deu-se o colapso.

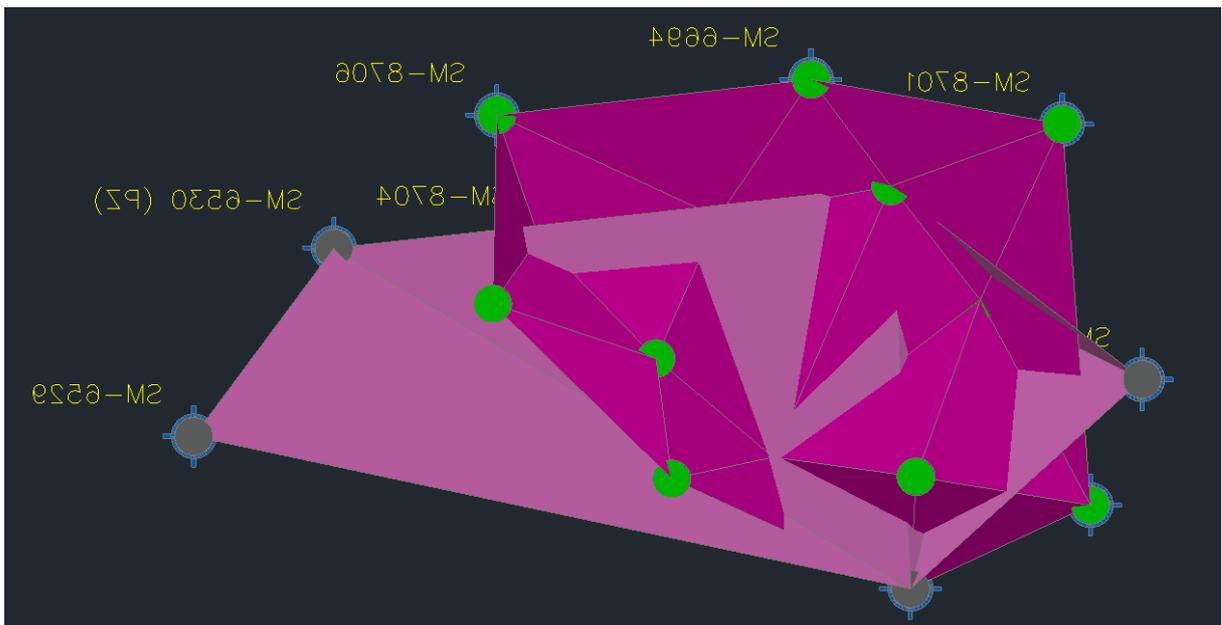


Figura 29 - Vista inferior do embasamento. Domínios do gnaiss biotítico (pink) e, gnaiss granítico (roseo).

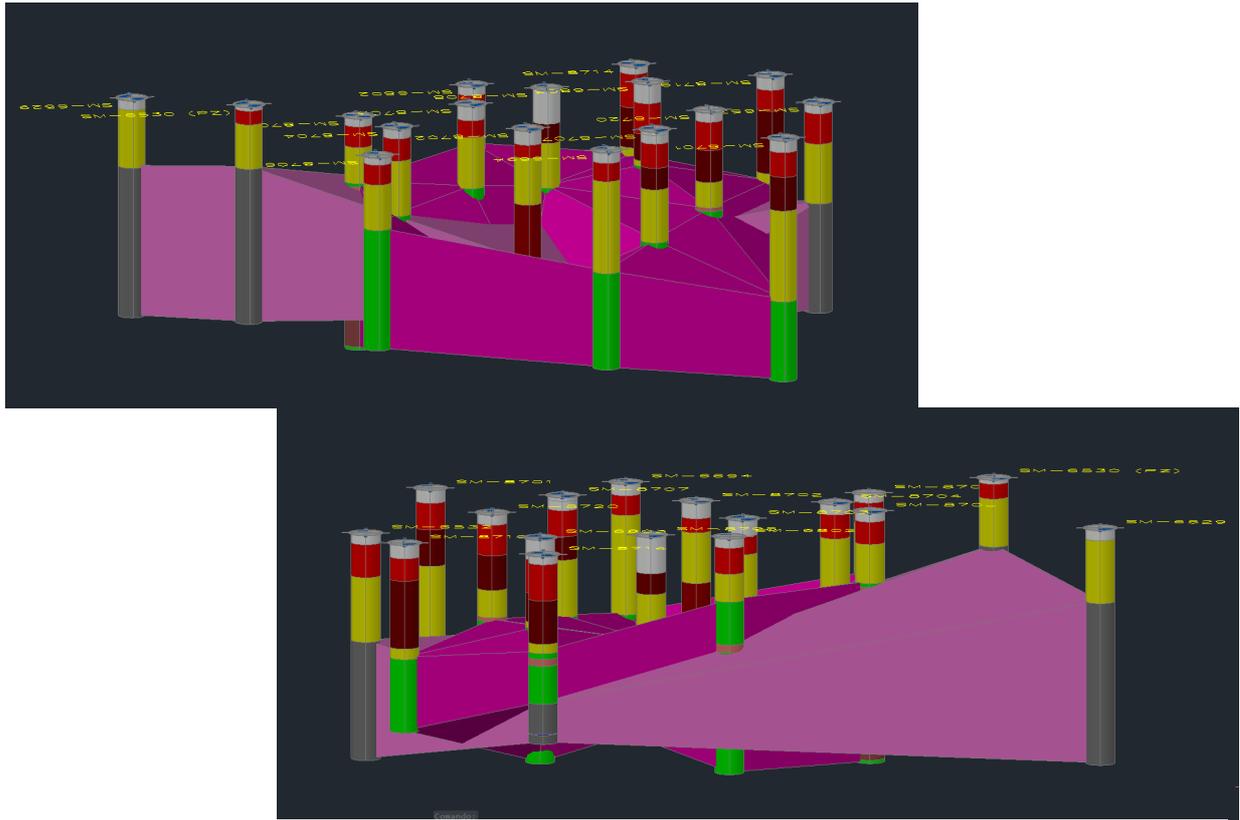


Figura 30 - Na imagem superior tem- se a vista N do embasamento e, na imagem inferior vista S com predomínio da unidade do gnaiss granítico (róseo).

A norte observa-se um comportamento relativamente equilibrado entre os domínios biotítico e granítico, tanto em espessura quanto em distribuição. Já na vista sul nota- se que o gnaiss granítico é predominante sobre o biotítico. No extremo leste da área de estudo constata-se o predomínio do gnaiss granítico, a oeste do biotítico.(Figura 31).

ta variações de espessura, tal qual no domínio gnaissé biotítico tem-se espessura mínima de 0,84m e máxima de 34,50m. No domínio gnaissé granítico tem-se espessura mínima de 2,77m e máxima de 32,15m. Estas informações são possibilitadas perante consulta da tabela *strata*.

Para uma visão mais completa são apresentadas visadas na direções NE, NW, SE, SW.(Figuras 32 e 33).

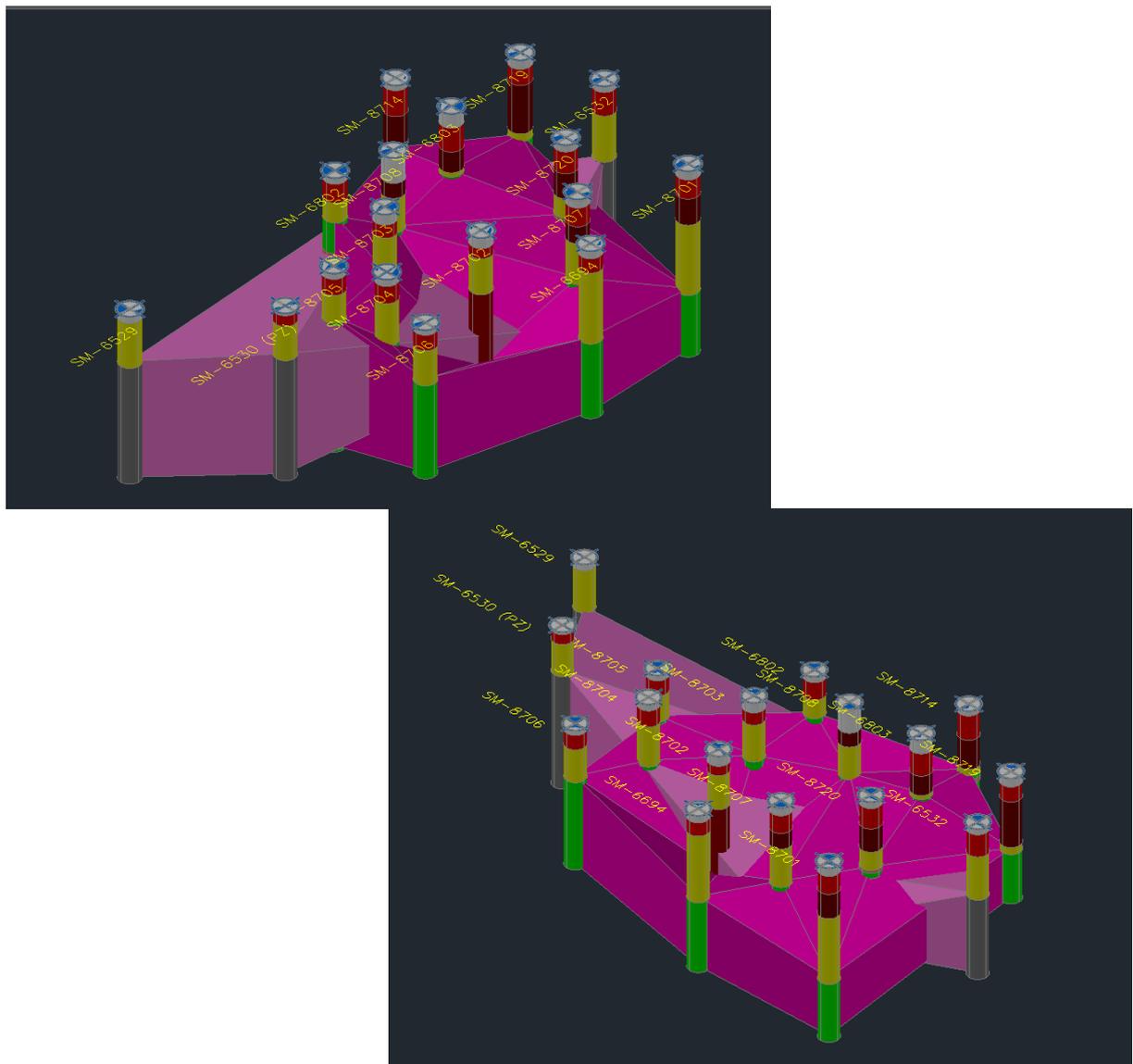


Figura 32 - Na imagem superior vista NE e, na imagem inferior vista NW do embasamento. Domínios do gnaissé biotítico (pink) e gnaissé granítico (rôseo).

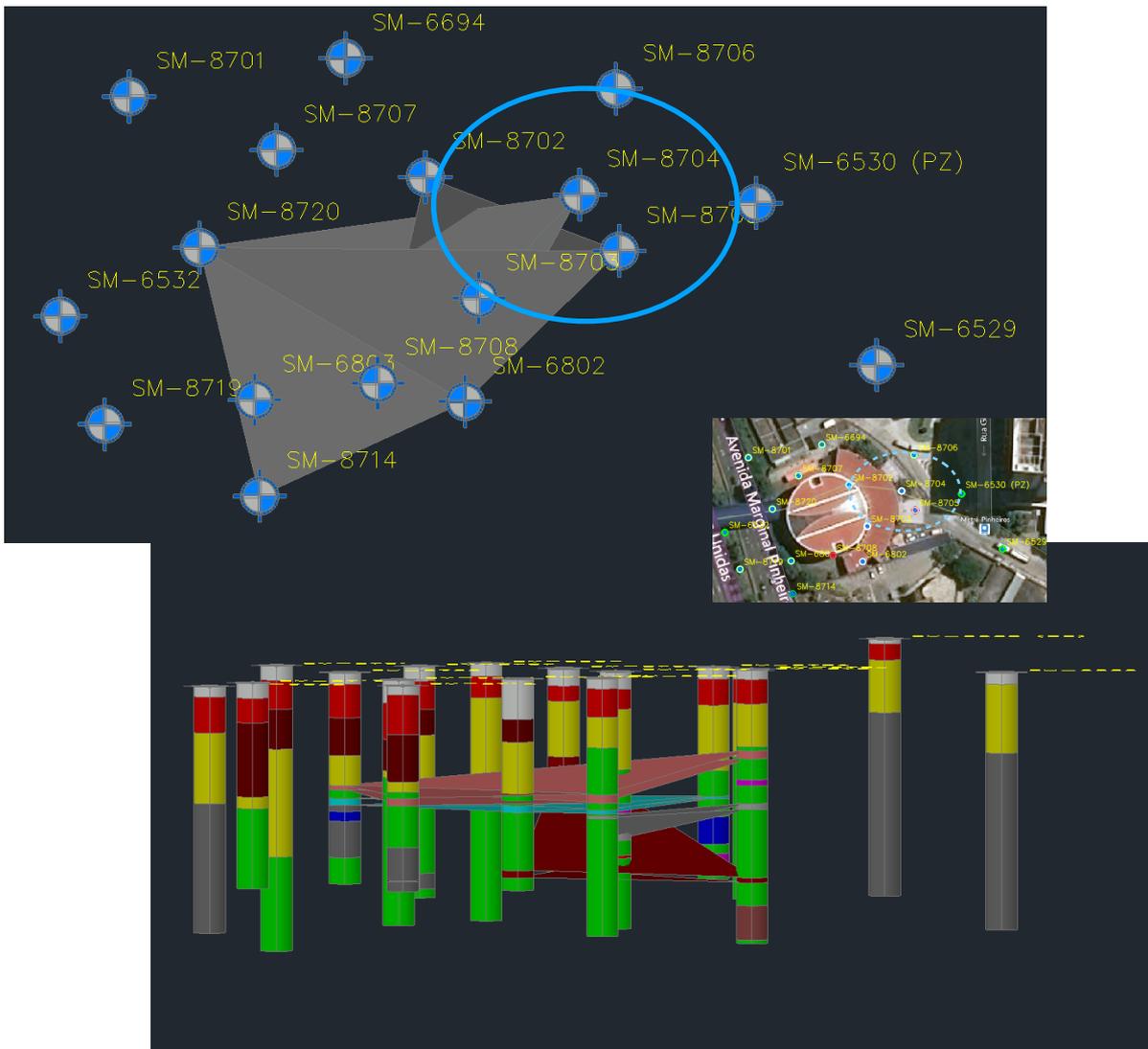


Figura 34 - Rochas pegmatíticas, vista superior (em cinza) contemplando todas as camadas presentes e, vista de E- W (imagem inferior). As cores laranja, ciano, cinza e marrom representam topo e base das distintas camadas de pegmatito presentes. Destaque para área do acidente.

Na imagem acima é possível verificar que o pegmatito apresenta predominância na região SW da área, com espessuras predominantemente homogêneas, entretanto vale a observação que em um determinado local ocorre um espessamento considerável desta rocha.(Figura 35)

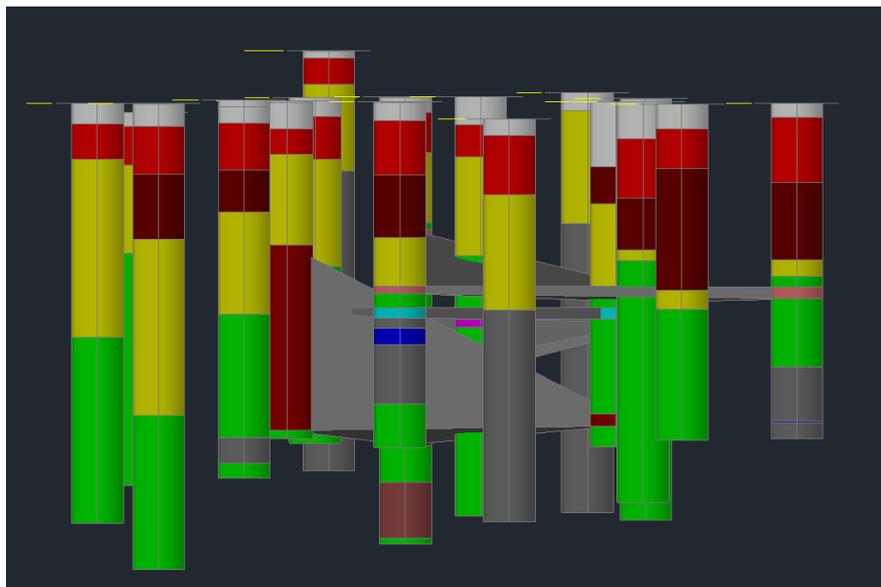


Figura 35 - Espessamento da rocha pegmatítica-camada de cor cinza, vista W.

A estrutura pegmatítica tem seu topo mínimo a 14.20m de profundidade a partir da cota topográfica e, base máxima a 47.35m. Estes valores são descritivos de lentes distintas, entretanto, mostram o quão presente esta estrutura se faz. Estão presente ao longo de profundidades variadas.

Os pegmatitos ocorrem como lentes entre o maciço rochoso (domínios graníticos) e o solo de alteração, podendo assim, de alguma forma, ter influenciado para a ocorrência do acidente, uma vez que parte desta localiza-se sob a área donde deu-se tal fato. O pegmatito é uma rocha que apresenta resistência diferente da rocha encaixante, são rochas intrusivas e, portanto sua presença pode ocorrer em locais sob influência de zonas de cisalhamento.

A seguir uma vista em planta da relação do pegmatito com o embasamento. (Figura 36). Para um melhor entendimento de sua relação com o embasamento temos a seguir outras vistas possibilitadas pelo *software*, tal ferramenta nos permite entender de várias perspectivas e, também visualizar o contexto de tal situação. (Figura 37).

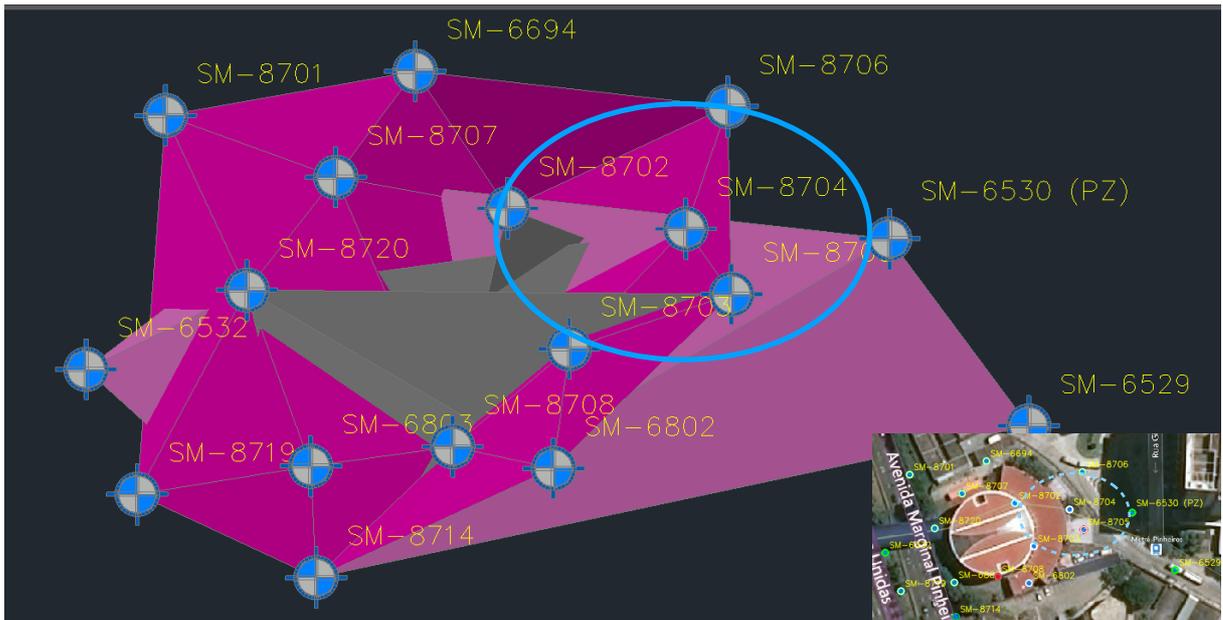


Figura 36 - Estruturas pegmatíticas em cinza X embasamento (domínios do gnaiss granítico-rosado e do gnaiss biotítico-pink). Destaque para área do acidente.

É possível observar porções aflorantes e não aflorantes perante tal contexto, donde o modelo ainda não completo analisa apenas a relação das estruturas pegmatíticas para com o maciço rochoso.

Outras rochas presentes neste contexto, as quais podem ter influência perante o cenário exposto, são um milonito, rocha característica de zona de cisalhamento e, uma camada relativamente profunda de um solo de alteração em meio a rocha sã, este segundo material citado nos sugere a existência de lentes de materiais relativamente mais moles e susceptíveis a alterações. (Figuras 38 e 39).

O milonito possui seu topo mínimo a uma profundidade de 24,25m a partir da cota topográfica do nível do solo, apresenta espessura máxima de 4,81m e mínima de 0,16m. O solo de alteração, o qual ocorre totalmente inserido na área do acidente, apresenta espessura mínima de 0,52m e máxima de 1,95m; seu topo mínimo dá-se a 19,98m.

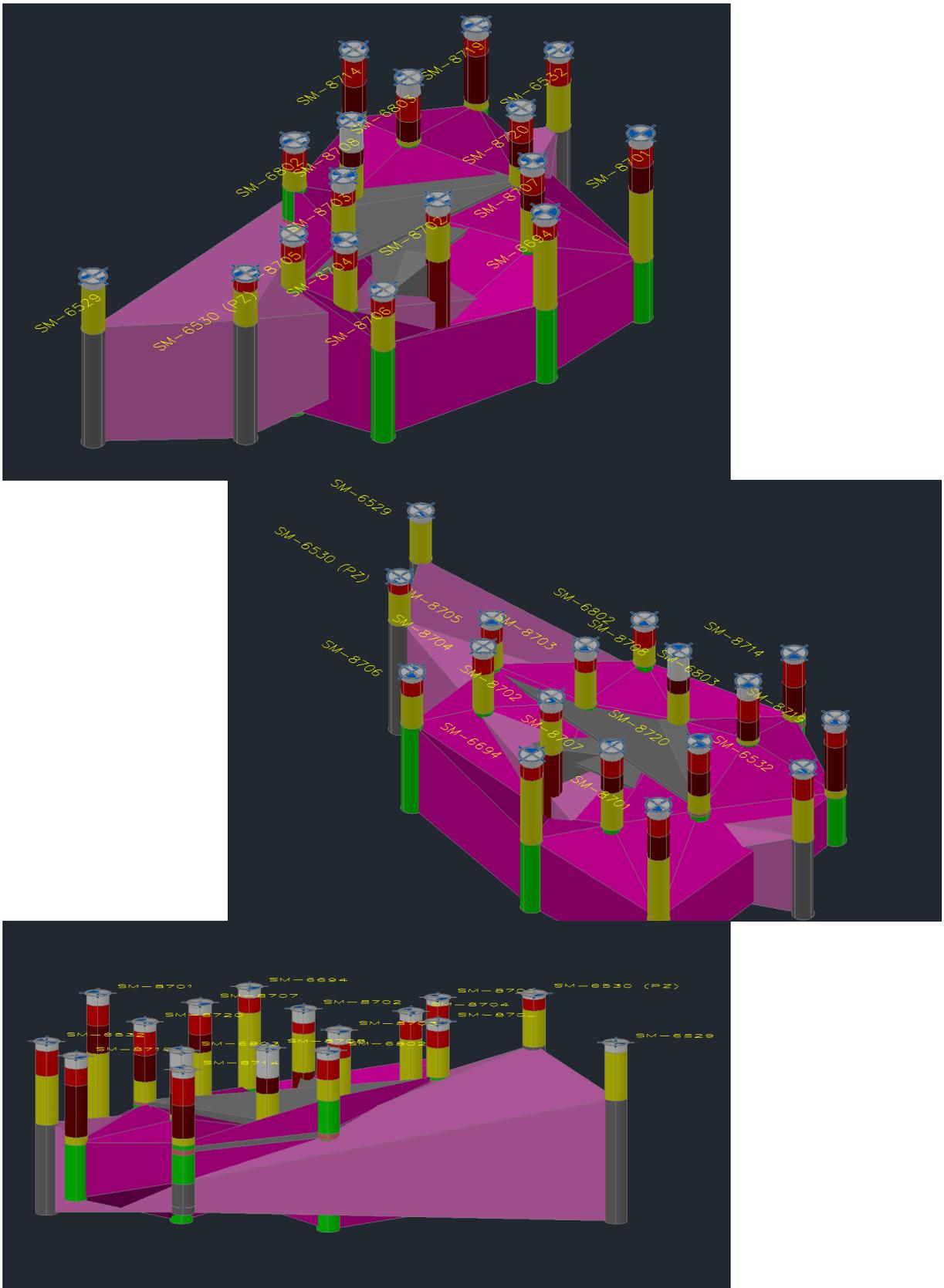


Figura 37 - Vistas NE (imagem superior), NW (imagem mediana) e, SUL (imagem inferior) respectivamente. Encaixante representado pelo gnaiss biotítico, na cor pink e, gnaiss granítico, cor rosa; ambos caracterizam o embasamento. O pegmatito esta representado pela cor cinza dos maciços.



Figura 38 - Vista em planta da rocha milonítica, destaque para área do acidente



Figura 39 - Vista em planta de solo de alteração, destaque para área do acidente.

Devido a sua localização no maciço rochoso não se faz possível uma observação mais detalhada do solo de alteração para com o embasamento; esta não apresenta área aflorante no mesmo. Entretanto a partir de sua visualização em planta podemos notar que esta estrutura, bem como todas as outras discutidas anteriormente, concentra-se relativamente em uma mesma zona de influência e todas se fazem presentes na área do acidente, em partes ou inteiramente. É possível observar a estrutura milonítica, com porção aflorante, para com o maciço rochoso.(Figura 40).

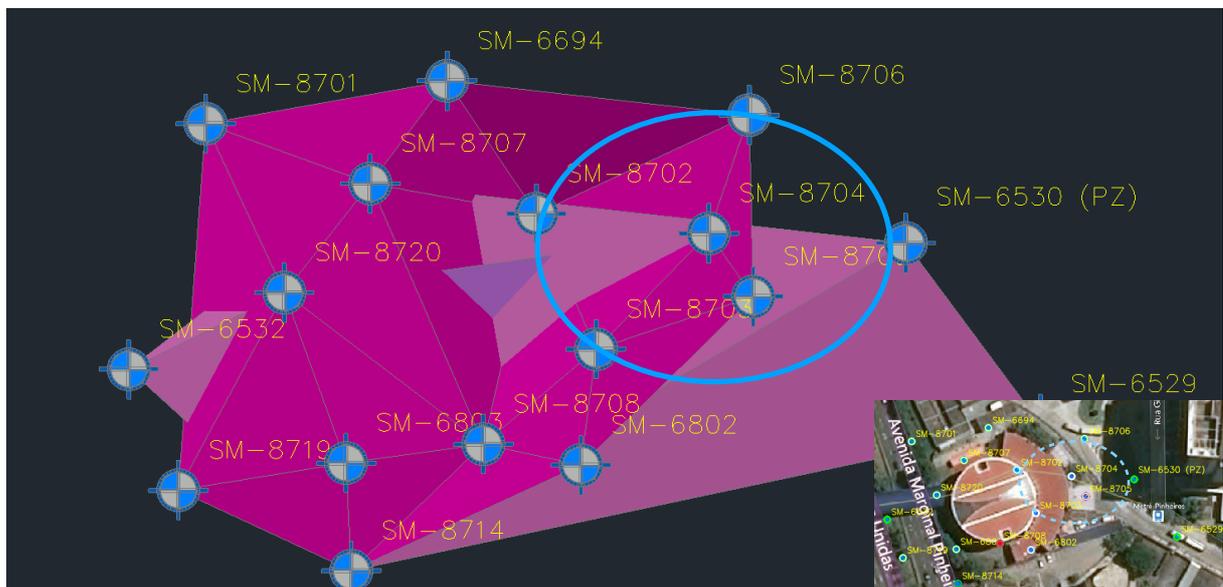


Figura 40- Vista em planta de estrutura milonítica x maciço rochoso, destaque para área do acidente. Porção aflorante do milonito, em lilás, não está inserida na área colapsada. Embasamento composto por gnaiss biotítico (pink) e gnaiss granítico (rôseo).

Em planta a porção milonítica a qual afeta a área do acidente não é aflorante, entretanto quando vista isoladamente é possível notar sua influência.

Tem-se a prerrogativa de que todas as estruturas descritas anteriormente estão em uma zona que se encontra sob a influência de uma entidade geológica de características que sugerem a presença de uma macro estrutura, como a Zona de cisalhamento Caucaia, que pode alterar a estabilidade do maciço.

Para um entendimento de todas as camadas que não compõem os sedimentos da BSP e, sim com um maior enfoque nas estruturas presentes no embasamento

da área, teremos uma análise sucinta do solo residual. A seguir a área de domínio de tal estrutura e, sua conformação de topo e base.(Figura 41).

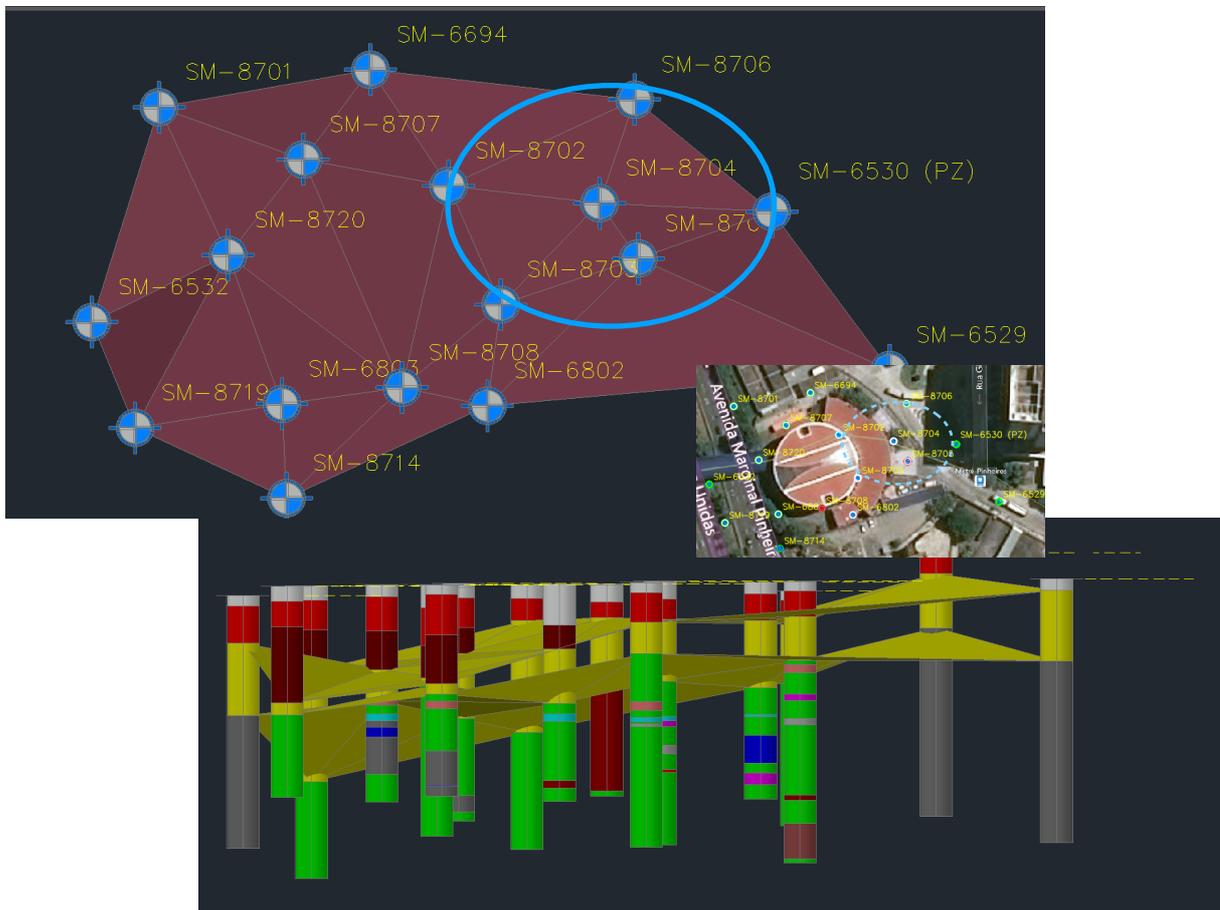


Figura 41- Imagem superior- vista em planta (cor marrom)do solo residual, em destaque área do acidente. Na imagem inferior topo e base da camada de solo residual na vista W- E

Nota-se que assim como os domínios gnaissé biotítico e gnaissé granítico o solo residual ocorre em toda área e, apresenta superfície irregular. Da- se diretamente sobre o maciço rochoso e por conseguinte sua base acompanha a estruturação irregular deste. Possui espessura irregular e, também é possível notar um afundamento do topo e da superfície da camada em geral a W. Sua relação para com o maciço da- se de forma homogênea e regular.(Figura 42).

A partir desta estruturação do embasamento como um todo, visualizando cada estrutura isoladamente e sua relação para com o maciço, temos a concretização de que este trata- se de um maciço de características heterogêneas, com detalhes pertinentes a uma atenção maior em certa área localizada.

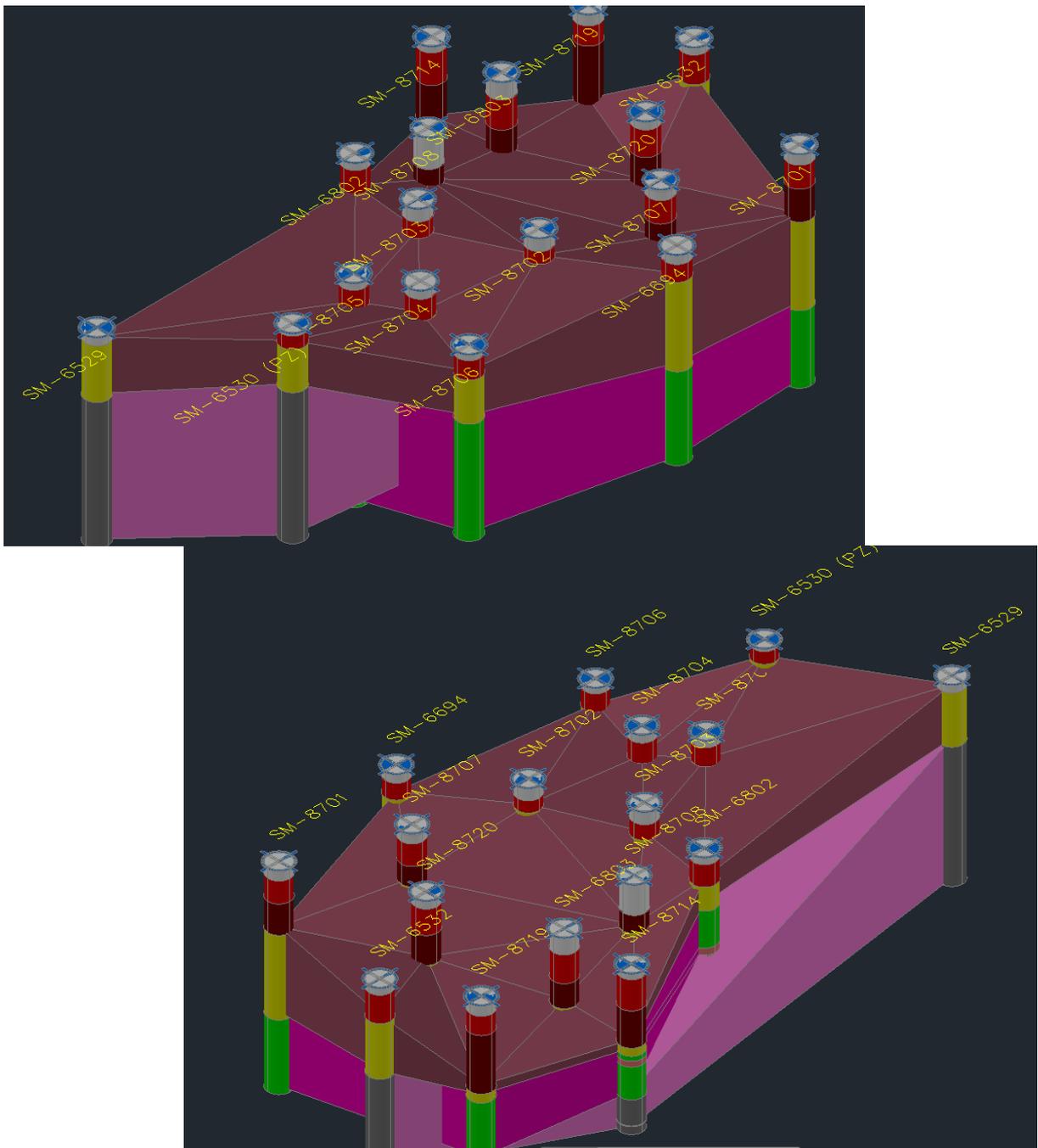


Figura 42 Vista NE (imagem superior) e vista SW (imagem inferior) para modelo 3D do embasamento. Solo residual em marrom e maciço rochoso em pink e róseo.

Um modelo completo contemplando as unidades da bacia sedimentar é sugerido, seguindo os mesmos pressupostos, constituindo as análises destas unidades e suas relações para com o embasamento.

Depositados diretamente acima da camada de solo residual tem-se sedimentos paleógenos/neógenos. A ocorrência destes, na área de estudos, dá-se de forma restrita e de localização bem definida. Eles não ocorrem na área exata do acidente

como as estruturas descritas anteriormente, concentram-se na porção W do trecho selecionado.(Figura 43).

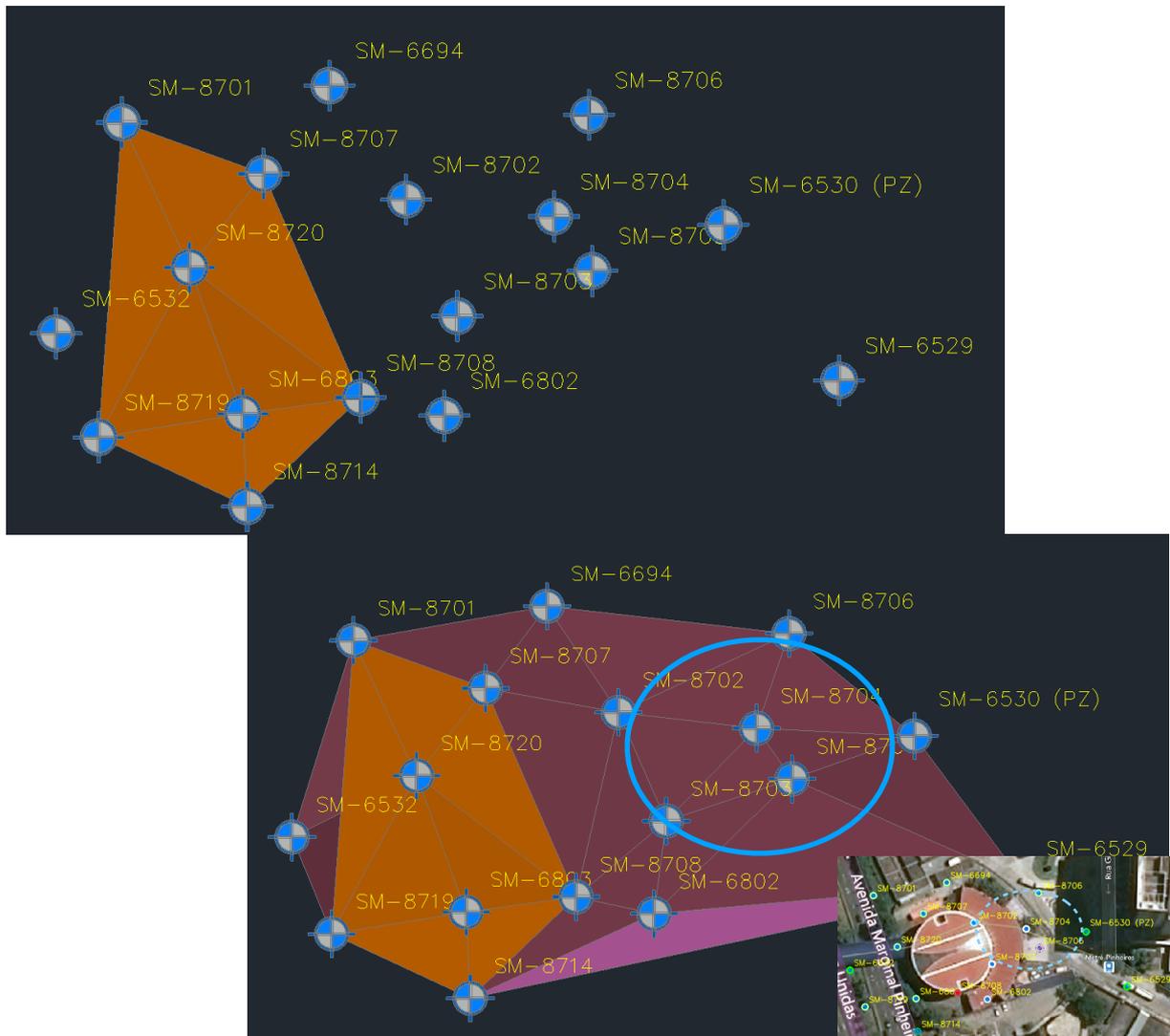


Figura 43 Na imagem superior vista em planta da ocorrência de sedimentos paleógenos/neógenos em laranja) . Destaque para área do acidente, em marrom camada de solo residual, em róseo embasamento.

Recobrimo todas as estruturas descritas anteriormente e, finalizando a estruturação do modelo geológico 3D da área, ocorrem sedimentos aluvionares. Estes apresentam distribuição regular em todo trecho selecionado, espessura relativamente homogênea e regular.(Figura 44).

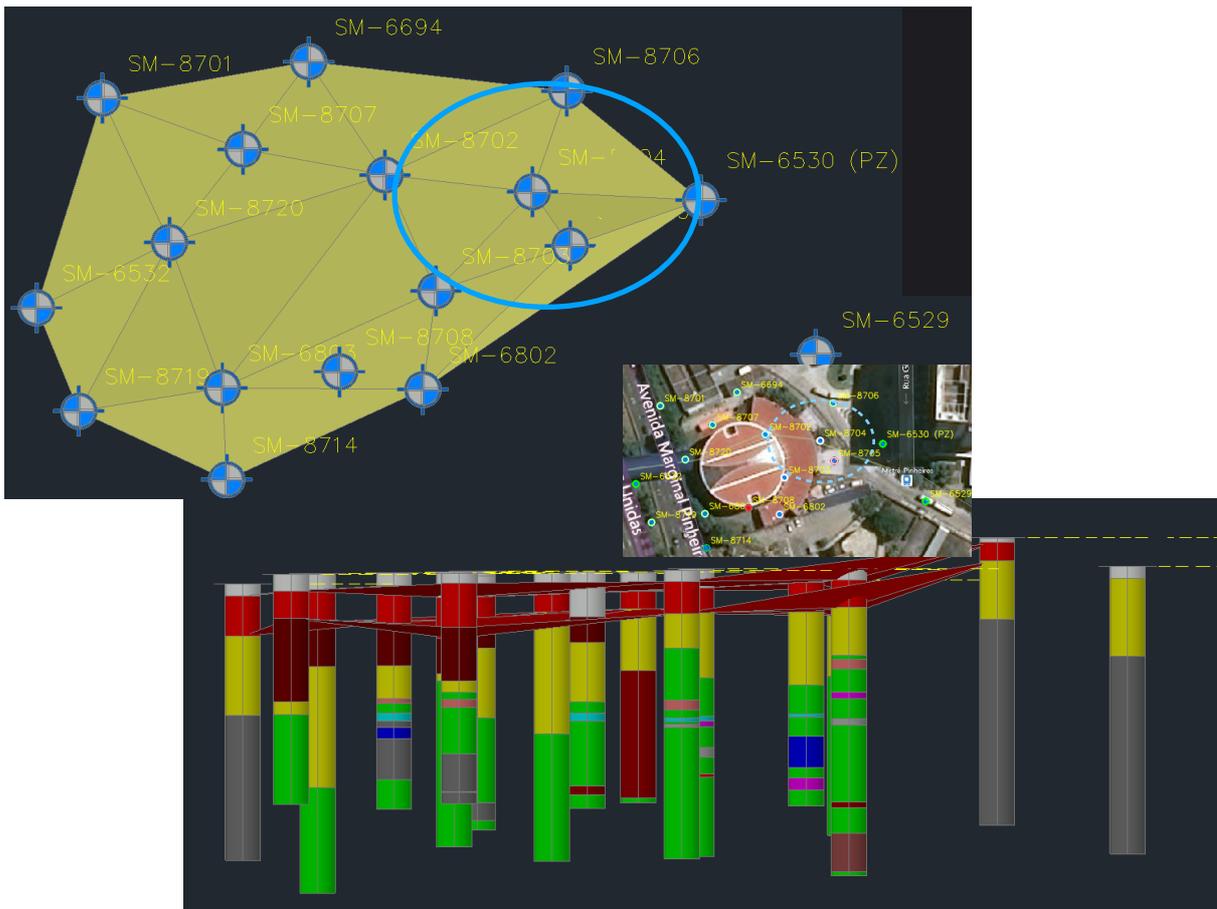


Figura 44 Na imagem superior vista em planta do aluvião (amarelo). Destaque para área do acidente. Em vermelho topo e base da camada de aluvião.

A construção do modelo completo dá-se perante a somatória de todas as estruturas descritas anteriormente. A maneira como ocorre a combinação das estruturas e sua influência, ou não, na área do acidente nos permite uma observação e consequente análise mais profunda de todo contexto abrangente da situação e, assim, entendimento dos arranjos presentes para ocorrência do acidente descrito neste estudo.

O modelo contempla toda estruturação das camadas da base para o topo, o embasamento gnáissico, com rochas intrusivas pegmatíticas, solo de alteração e milonito. Solo residual, resultante da alteração deste maciço, recoberto por sedimentos paleógenos/ neógenos e quaternários.(Figura 45).

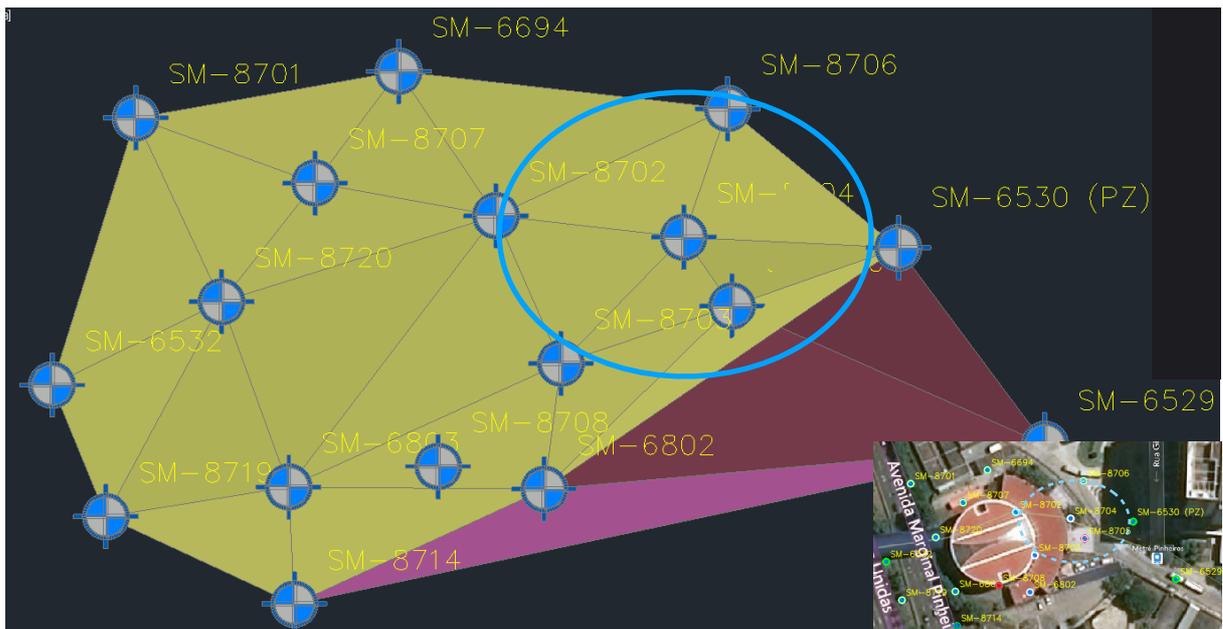


Figura 45 Vista em planta do modelo geológico completo. Da base para o topo tem-se o embasamento em róseo, solo residual em marrom e aluvião em amarelo. Destaque para área do acidente.

O colapso deu-se no sentido de W para E, na região delimitada nas figuras apresentadas. A visualização completa do modelo nos permite a concretização da ideia da heterogeneidade da área e, de suas camadas de distribuição irregular.

A visualização sob as perspectivas N e S nos remete às laterais, paredes, do túnel. As extremidades W e E, nos remete às visualizações posterior e frontal, respectivamente, da área de enfoque. (Figuras 46 e 47).

O modelo final pode contemplar quaisquer visadas requeridas pelo observador, fazendo-se assim totalmente possível a observação de diferentes perspectivas, trazendo desta forma um enriquecimento analítico a cerca da informação a qual se busca. (Figuras 48 e 49).

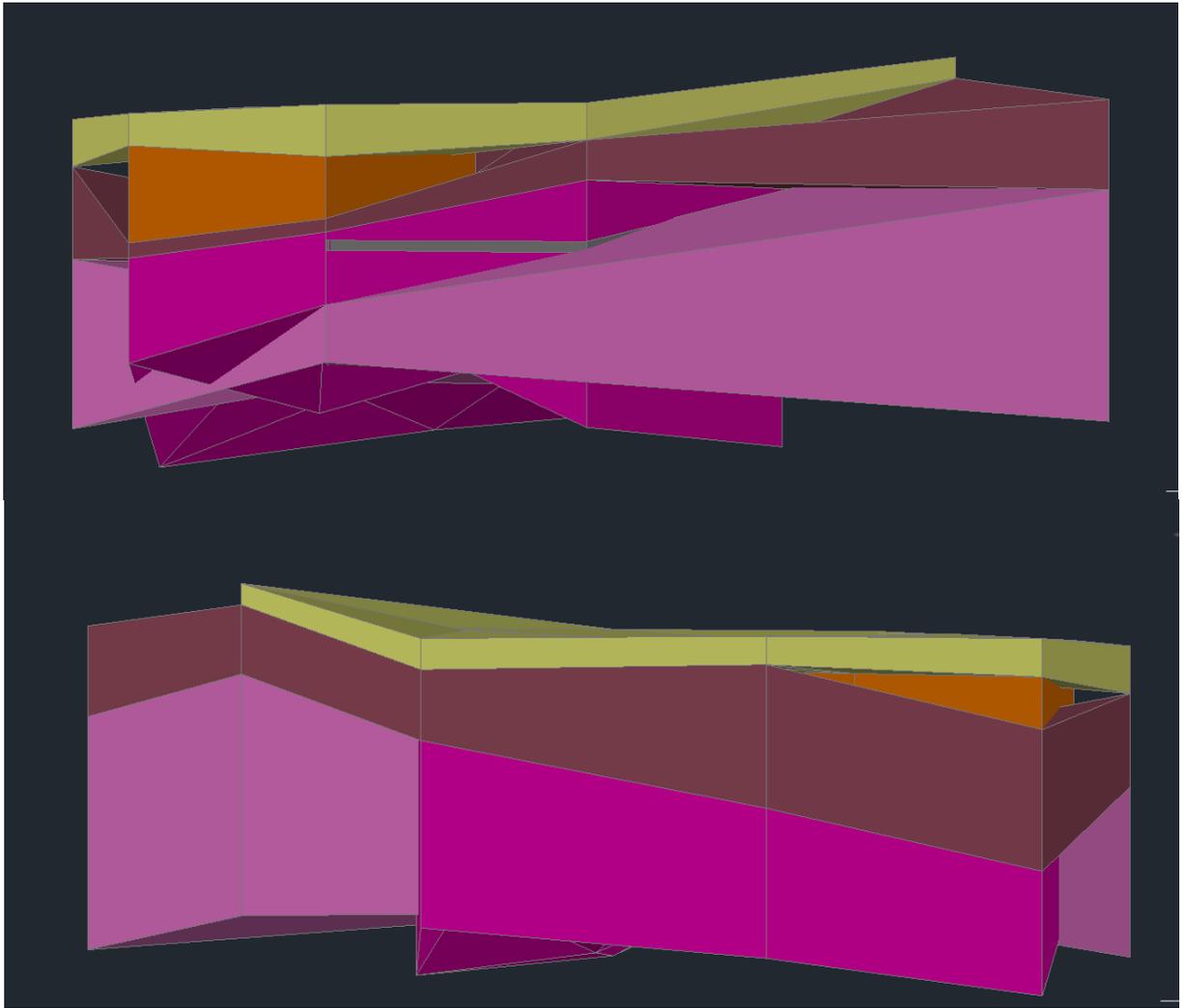


Figura 46 Vista N na imagem superior e, vista S na imagem inferior, visualização das laterais da área. Da base para o topo tem- se o embasamento gnáissico, gnaisse biotítico (pink) e gnaisse granítico (roseo), solo residual (marrom), sedimentos paleógenos/neógenos (laranja) e, aluvião (amarelo). a lente de coloração cinza presente na imagem inferior é representativa de rocha pegmatítica.

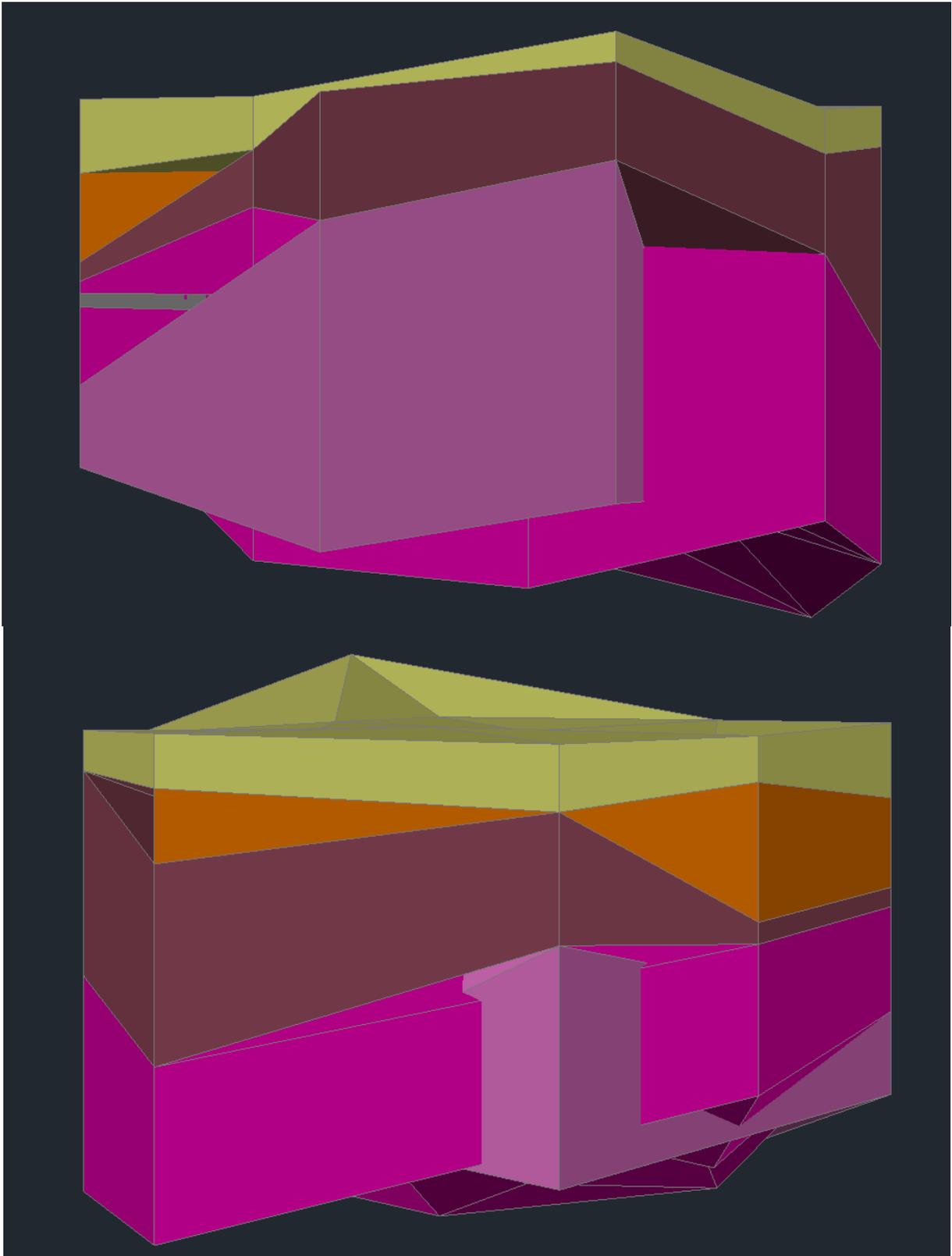


Figura 47 Vista W, na imagem superior, visualização posterior da área. Vista E, na imagem inferior, visualização frontal da área. Da base para o topo tem-se o embasamento gnáissico, gnaíse biotítico (pink) e gnaíse granítico (róseo), solo residual (marrom), sedimentos paleógenos/neógenos (laranja) e, aluvião (amarelo), a lente de coloração cinza presente na imagem superior é representativa de estrutura pegmatítica.

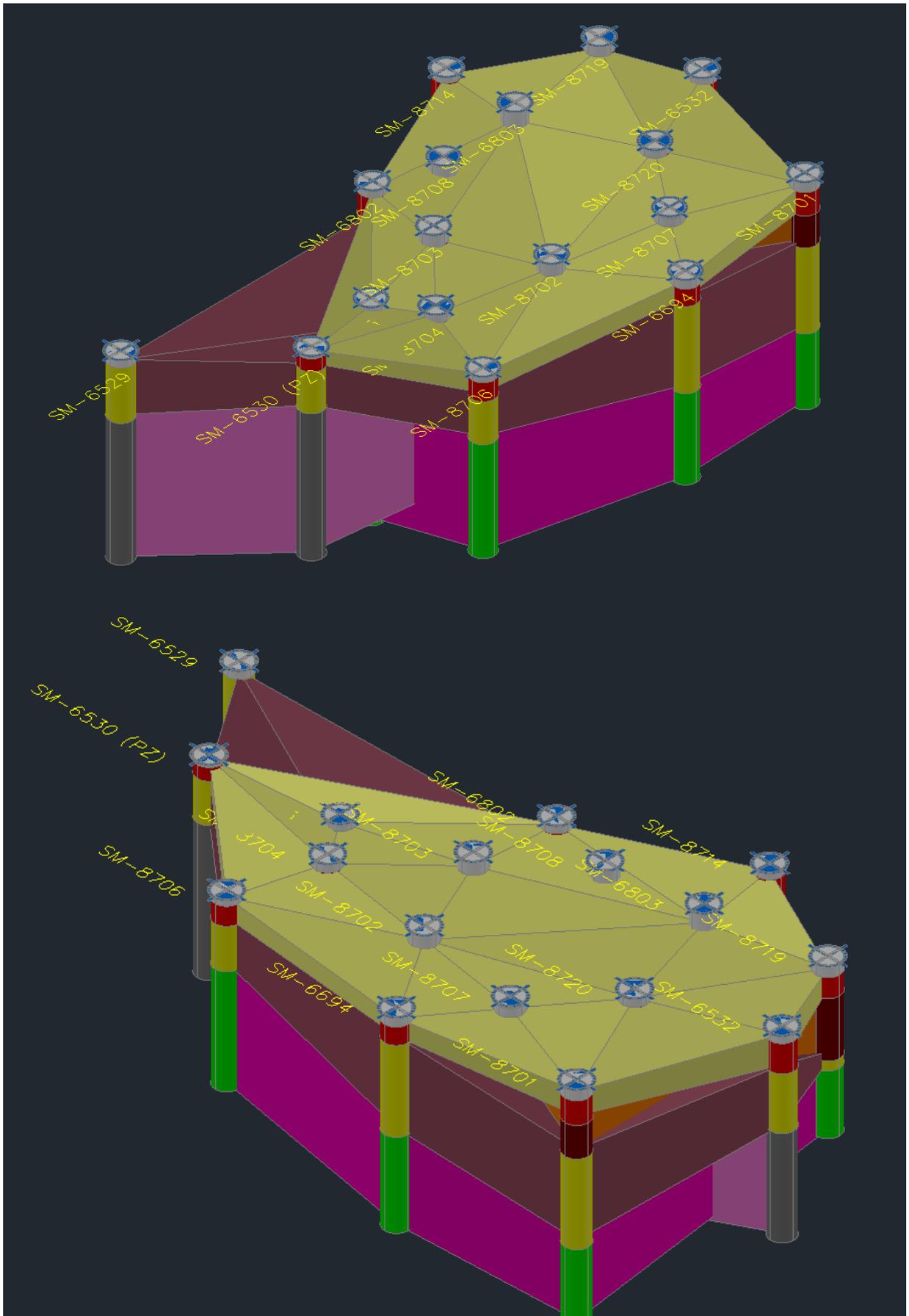


Figura 48 Vista NE na imagem superior e, vista NW na imagem inferior. Da base para o topo tem-se o embasamento gnáissico, gnaisse biotítico (pink) e gnaisse granítico (róseo), solo residual (marrom), sedimentos paleógenos/neógenos (laranja) e, aluvião (amarelo).

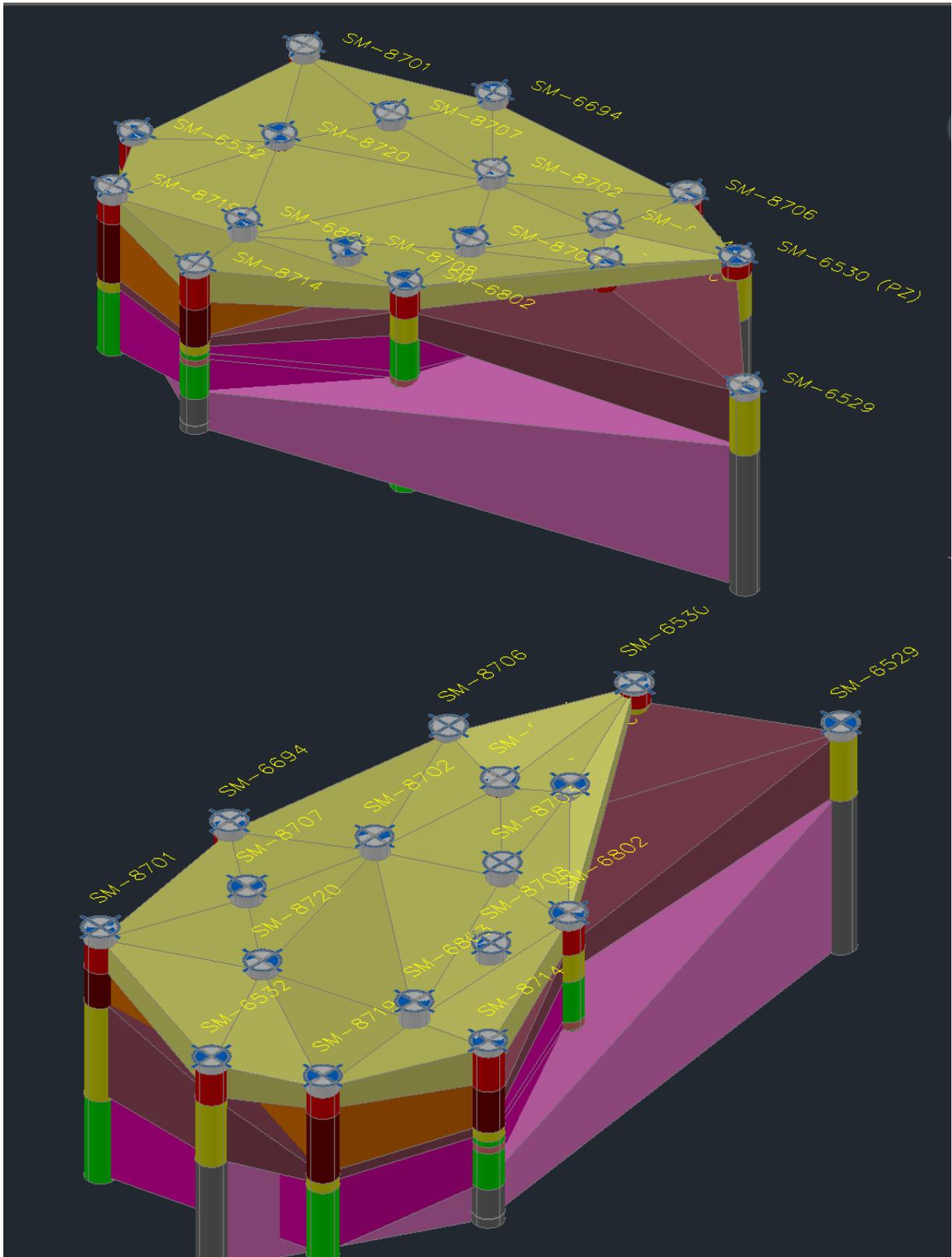


Figura 49 Vista SE na imagem superior e, vista SW na imagem inferior. Da base para o topo tem-se o embasamento gnáissico, gnaisse biotítico (pink) e gnaisse granítico (roseo), solo residual (marrom), sedimentos paleógenos/neógenos (laranja) e, aluvião (amarelo).

10. CONCLUSÃO

O presente trabalho propôs mostrar a relevância da utilização de *software* que possibilite a elaboração de modelos 3D visando auxiliar trabalhos na área de geotecnia. Tais modelos auxiliam na modelagem geológica para elaboração de projetos de engenharia para o correto entendimento da distribuição dos materiais geológicos, e a predisposição de riscos em grandes obras de engenharia. A visualização em imagens 3D concretiza informações, antes somente contempladas a partir de relatórios e imagens 2D, contribuindo para um melhor entendimento do cenário exposto em cada caso.

Particularmente em relação à área estudada, os modelos aplicados a diferentes cenários, corroboraram com informações relevantes e pertinentes sobre a área estudada, mostrando a distribuição e localização de camadas específicas bem como características peculiares a determinadas regiões dentro de uma área abrangente. Sendo assim, informações sobre o contorno da superfície das rochas que constituem o embasamento, evidenciando suas irregularidades e variação de espessura em locais distintos da área investigada, a localização das camadas de solo de alteração, rochas miloníticas, pegmatitos etc.. permitiram constatar que o acidente deu-se em local de influência de fatores relevantes, como zonas mais tectonizadas.

Rochas deformadas em zonas de cisalhamento podem apresentar diferentes resistências e comportamentos reológicos distintos em relação às rochas não milonitizadas ou com menores intensidades de deformação.

Para que o presente estudo fosse embasado de maneira apropriada, trabalhos anteriores e relatórios sobre a área de interesse, trouxeram informações geológicas, sem as quais não seria possível a modelagem 3D e uma análise mais adequada e detalhada sobre o tema investigado.

A disponibilidade escassa de dados estruturais, como juntas e foliações, não permitiu um estudo profundo sobre as descontinuidades rúpteis; entretanto as poucas informações obtidas possibilitaram uma análise cinemática muito preliminar e não conclusiva, que forneceu uma probabilidade de deslizamento em cunha de 19% e nula para o deslizamento planar.

A existência de camadas menos resistentes foram descritas no projeto inicial como descontínuas e localizadas, não sendo possível sua determinação espacial prévia apenas por meio de sondagens. A ferramenta escolhida e os modelos obtidos admitiram uma visão geral, não apenas do embasamento, mas também da rocha milonítica, do pegmatito, dos sedimentos paleogênicos, e do solo residual.

A modelagem 3D se mostrou de grande eficácia sugerindo a possível influência das rochas milonítica e pegmatítica, localizadas na porção oeste da área. Apesar do *software* utilizado não contemplar um estudo sobre as estruturas rúpteis, não se pode descartar a possibilidade de intersecções de fraturas ter isolado blocos (cunhas) tornando o fator de segurança crítico.

A utilização da modelagem 3D permitiu apresentar os resultados com clareza e de fácil interpretação, enriquecendo os trabalhos na área de Geologia de Engenharia. Da mesma forma revelou-se útil como ferramenta de análise para uma série de outros profissionais subsidiando, não necessariamente a previsão de acidentes, mas particularidades que merecem certa atenção, além de uma visão mais clara de onde se encontra o risco de uma ocorrência não desejada.

11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AZEVEDO, A. 1949. O Planalto Brasileiro e o Problema da Classificação de suas Formas de Relevo. Boletim Paulista de Geografia., (2): 43- 53
- COIMBRA, A.M.; RICCOMINI, C.; MELO, M.S. 1983. A Formação Itaquaquetuba: Evidências de tectonismo no quaternário paulista. In: Simpósio Regional de Geologia, 4, São Paulo, Anais, p. 253- 266.
- COUTINHO, J.M.V. 1980a. Carta geológica da região metropolitana de São Paulo. Escala 1:100.000. São Paulo, EMPLASA, 2 folhas.
- FIGUEIREDO FERRAZ CONSULTORIA E ENGENHARIA DE PROJETO Ltda.
2001. Relatório Geológico- Geotécnico - Trecho Faria Lima/ Butantã: RT-4.12.00.00/4C3-501, 81p.
- HASUI, Y.; CARNEIRO, C.D.R.; COIMBRA, A.M. 1975. The Ribeira Folded Belt. Revista Brasileira de Geociências, 5:257-266.
- HASUI, Y. 1993. Geologia estrutural das rochas na linha 4 do Metrô: Avaliação e síntese dos conhecimentos. São Paulo, 1993. 24 p. Parecer técnico apresentado à Companhia do Metropolitano de São Paulo, em outubro de 1993.
- HEILBRON, M.; PEDROSA-SOARES, A.C.; CAMPOS NETO, M.C.; SILVA, L.C.; TROUW, R.A.J.; JANASI, V.A. 2004. Província Mantiqueira. In: Mantesso-Neto, V.; Bartorelli, A.; Carneiro, C.D.R.; Brito Neves, B.B. (Eds.) Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. Beca. São Paulo, p. 203-234.
- JULIANI, C. 1992. O embasamento pré-cambriano da Bacia de São Paulo. In: ABAS/ABGE/SBG-SP, Problemas geológicos e geotécnicos na Região Metropolitana de São Paulo. São Paulo, p.3-20.

- MAFFEI, C. E. M.; MELLO, L. G.; NIEBLE, C. M.; SADOWSKI, G. R.; TAKAHASHI, J. 2011. As Causas do Acidente da Estação Pinheiros da Linha 4 do Metrô de São Paulo: Revista Técnica, p. 1-16.
- MELO, M.; RICCOMINI, C.; HASUI, Y.; ALMEIDA, F.F.M.; COIMBRA, A. M. 1985. Geologia e Evolução do Sistema de Bacias Tafrogênicas Continentais do Sudeste do Brasil. Revista Brasileira de Geociências, 15: 193- 201
- MELO, M.S.; PONÇANO, W.L.; MOOK, W.G.; AZEVEDO, A.E.G. 1987. Datações C14 em sedimentos da Grande São Paulo. In: Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário, 1, Porto Alegre, Anais, p.427-436.
- MEZZALIRA, S. 1962. Novas ocorrências de vegetais fósseis cenozoicos no Estado de São Paulo. Publicação do Instituto Geográfico e Geológico, São Paulo, 15: 73-94.
- MONTEIRO, M.D.; GURGUEIRA, M.D.; ROCHA, H.C. 2012. Geologia da Região Metropolitana de São Paulo. In: Twin Cities – Solos das cidades de São Paulo e Curitiba. ABMS, São Paulo, p. 15-44.
- MORAES REGO, L.F. 1933. As formações cenozóicas de São Paulo. Anuário da Escola Politécnica de São Paulo, São Paulo, 2: 231-267.
- RICCOMINI, C. 1989. O Rift Continental do Sudeste do Brasil. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 256p.
- RICCOMINI C. & COIMBRA A.M. 1992. Geologia da bacia sedimentar. In Solos da cidade de São Paulo. FERREIRA, A.A.; ALONSO, U.R.; LUZ, P.L (Ed). São Paulo, ABMS/ABEF, p.37-94.
- RICCOMINI, C; SANT'ANNA, L.C.; FERRARI, A.L. 2004. Evolução Continental do Rift Continental do Sudeste do Brasil. In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C. D. R.; NEVES, B.B.B. (orgs). Geologia do Conti-

nente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. Beca, São Paulo, p. 385-405.

SADOWSKI, G. R., 2008. Geologia Geotécnica do Setor Leste da Estação Pinheiros do Metro de Sao Paulo - Anexo 3- Litologias Definidas no Mapa Geológico do Assoalho do Rebaixo da Estação Pinheiros: Relatório, 10p.

SADOWSKI, G. R. 2010. Geological risk: Collapse of the Pinheiros Metro Station, São Paulo, Brazil. Geologically Active – Williams et al. (eds) © 2010 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-60034-7. p. 1399- 1404.

SALVADOR, E.D. & RICCOMINI, C. 1995. Neotectônica da região do alto estrutural de Queluz (SP-RJ, Brasil). In: Revista Brasileira de Geociências, 25:151-164.

SUGUIO, K. & TAKAHASHI, L.I. 1970. Estudo dos aluviões antigos dos rios Pinheiros e Tietê, São Paulo, SP. Anais da Academia Brasileira de Ciências, 42:555-570.

TAKIYA, H. 1991. Aplicação dos métodos quantitativos espaciais a dados geológicos da Bacia de São Paulo. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 109p.