



Modelamento tridimensional de zona de tálus com uso integrado de metodologias geofísicas e investigações diretas

*Luís Gustavo F. D'Agostino-Fugro; Letícia Betezek Monteiro-Fugro

Copyright 2022, SBGF - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no IX Simpósio Brasileiro de Geofísica, Curitiba, 04 a 06 de outubro de 2022. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do IX SimBGf, mas não necessariamente representa a opinião da SBGF ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGF.

Resumo (Arial Bold, 9)

Este artigo tem como objetivo apresentar os benefícios da análise conjunta entre metodologias geofísicas e investigações diretas utilizando modelagem tridimensional. Os resultados da pesquisa combinando contrastes de condutividade entre as camadas superficial e profunda com as mudanças de velocidade sísmica permitiram uma separação entre as principais descontinuidades geológicas. A aplicação de investigações diretas com sondagem padrão e rotativa (SM), penetrômetro dinâmico leve (DPL) e o mapeamento geológico ao longo da rodovia foram utilizados para orientar e calibrar os ensaios geofísicos, resultando em um modelo de pelo menos seis subdivisões inferidas: zona de talus, solo, rocha intemperizada, embasamento rochoso, zonas de descontinuidade e aterro da rodovia.

Introdução

Com a crescente necessidade de estudos das zonas de fraqueza e suscetíveis a escorregamento em encostas e taludes ao longo das rodovias brasileiras, a utilização de ferramentas de baixo impacto e pouca ou nenhuma geração de resíduos mostram-se como alternativa viável e essencial à ampliação do conhecimento local. As investigações indiretas por meio das propriedades físicas da geologia trazem soluções complementares às técnicas convencionais de investigação que, além de sua limitação espacial de resposta geralmente restritas às proximidades de onde são executadas, costumam causar grandes transtornos, principalmente quando operadas em áreas de proteção ambiental, caso de sondagens para obtenção de testemunhos.

O estudo discutido neste artigo foi realizado no trecho de serra da rodovia BR-376 conhecido como Curva da Santa, no Paraná. Foram aplicadas no local as técnicas da tomografia elétrica e sísmica de refração, posteriormente comparadas com as sondagens mistas nas bermas do talude de contenção da encosta e os ensaios de cone dinâmico leve (DPL), além do caminhamento geológico nas proximidades da rodovia para coletar as atitudes das camadas e fraturas identificadas no local. Posteriormente, todos os dados foram compilados e comparados para geração de um modelo geotécnico tridimensional (3D) que representasse as características locais, apresentando uma visualização diferenciada e dinâmica do comportamento local e das feições identificadas.

Contextualização Geológica

Localizada no município de Guaratuba, PR, a Curva da Santa é um trecho da Serra do Mar no km 667+900 da BR-376 Régis Bitencourt. Conforme definido por Hartmann *et al.* (1979), a área de estudo está localizada no Complexo Granulítico Santa Catarina, descrito com frequência como ortognaisses, gnaisses e migmatitos de diferentes épocas e com metamorfismo intenso, compostos por quartzo, feldspato e minerais máficos, como anfibólio, piroxênio e biotita (Basei *et al.*, 1992). Scheibe (1986) descreve que o Complexo Granulítico Santa Catarina possui limites a Sul com o Lineamento de Blumenau, a Leste com o Granito Canavieiras-Estrela (pertencente ao Terreno Paranaguá) e a Oeste com o Granito Morro Redondo. A zona de cisalhamento Palmital é o limite entre o contato das rochas gnáissicas migmatíticas e o Terreno Paranaguá, em que predominam rochas miloníticas que indicam uma tectônica com importante componente lateral (Siga Jr., 1995).

Ainda conforme Hartmann, a região é composta por regime de falhas e de zonas de cisalhamento, sendo as rochas oriundas dessa localidade produto desta tectônica rúptil e dúctil.

O caminhamento geológico feito no trecho de cerca de 500 metros centralizado na área de estudo ao longo da rodovia apontou, macroscopicamente, para uma variação composicional/textural da rocha em diversos pontos relativamente próximos entre si. Descreveu-se, de maneira simplificada, rochas cinza claras/escuras a rosadas, bandadas e foliadas, compostas por minerais como quartzo, feldspato alcalino e máficos, em diversas proporções, com textura granoblástica. Nomeando os litotipos, em campo, de acordo com suas características macroscópicas, pode-se estabelecer um domínio de ortognaisses e outro domínio milonítico não delimitados devido à ausência de afloramentos contínuos.

Foram tomadas medidas nos afloramentos acessíveis, as quais registram direções NE-SW e NW-SE, sendo mais abundantes direções NE-SW, estas com mergulhos médios a altos para SE.

Hipótese Inicial

Devido às características geológicas locais, e considerando-se o mapeamento de uma possível zona de tálus/colúvio, foram indicadas as aplicações da eletrorresistividade com arranjo dipolo-dipolo e a sísmica de refração nas mesmas posições. A aplicação de diferentes técnicas teve por objetivo a análise de dois parâmetros principais: a compactação das camadas superficiais e a presença de descontinuidades a diferentes profundidades.

Amplamente discutido dentro da literatura como Telford (1990), Reynolds (2011) e Samouëlian (2005), entre outros, valores de resistividade de solos superficiais variam conforme composição mineralógica, teor de umidade, compactação e presença de matéria orgânica, além de demais outras variantes. Castro (2018) apresenta em sua tese resultados comparativos para a presença de pedregulhos em solos superficiais com ensaios de campo e laboratório, onde os valores encontrados mostram grande variedade (podendo chegar a uma variação de três ordens de grandeza). Desta maneira, a hipótese inicial considerava que a presença de blocos em tamanhos variados, mesmo que em uma matriz argilosa em solo tropical, traria grandes variações de valores superficiais ocasionadas pelas diferenças físico-químicas dos blocos com a matriz onde estariam inseridos.

Comparativamente, as propriedades elásticas dos solos possuem padrões mais bem definidos, conforme apresentado por Reynolds, onde valores de velocidade de onda para ondas compressão em solos deformados, pedregulhosos e refugo de aterro (o que, nas primeiras suposições, equiparou-se com as características de solos coluvionares recentes) podem variar de 180 a 750 m/s.

Assim, a hipótese inicial é descrita como “movimentos recentes superficiais ocasionados pela desagregação das porções superiores do embasamento, seja pelo manto de intemperismo ou pelas fraturas sub-horizontais, definidos como zonas de tálus/colúvio, apresentam padrões eletrorresistivos perturbados devido à presença de blocos de rocha em diferentes tamanhos associados a baixas velocidades de onda para ondas compressão causadas pela característica inconsolidada do material”.

Metodologias e Procedimentos

Tomografia Elétrica

Dada a hipótese inicial, o planejamento para a eletrorresistividade visou obter a maior densidade possível de pontos em subsuperfície para caracterização do modelo variável de resistividade. Aplicou-se arranjo dipolo-dipolo com espaçamento de dipolo de 5,0 m associado a um equipamento multicanal automatizado.

O refinamento e tratamento dos dados adquiridos foi realizado através da inserção dos dados de topografia, interpolação de valores intermediários, eliminação de valores inconsistentes e aplicação de filtros quando necessário. O processamento dos dados envolveu correção dos valores pela topografia, ajuste dos melhores parâmetros de inversão através da identificação das estruturas principais e determinação do melhor método de inversão pela razão de erro do modelo matemático invertido. Devido aos padrões do tipo de anomalia a ser encontrada, os dados brutos foram minimamente modificados por filtros de maneira a se tentar utilizar o máximo das informações originais.

Sísmica de Refração

Para otimizar o comparativo entre os dados obtidos, as linhas sísmicas foram posicionadas nas mesmas posi-

ções das linhas da tomografia elétrica. Optou-se por uma separação de geofones de 10,0 metros com uso de marreta sobre placa metálica.

Devido às características de baixa compactidade do solo e o movimento intenso de veículos pesados na rodovia, a análise profunda dos dados foi prejudicada nas proximidades da BR-376, porém, sem interferência nos resultados finais dado o interesse no comportamento das camadas superficiais.

Seu tratamento computacional envolveu a inserção da topografia, aplicação de filtros, análise das primeiras chegadas e inversão do modelo em profundidade.

Sondagem Mista

Foram posicionadas na área 3 sondagens mistas (percussão e rotativa) com recuperação de testemunho para análise geológica/geotécnica. Por se tratar de uma Área de Proteção Ambiental (APA), o posicionamento da sonda ficou restrito às áreas abertas na proximidade da rodovia, sendo duas localizadas na segunda berma e uma na sexta berma do talude superior.

Na sondagem mista foi utilizada uma perfuratriz leve para execução da sondagem a percussão (aterro e solo) e rotativa (rocha), fazendo o uso do trado concha de 4' de diâmetro, para os avanços e de um amostrador bipartido SPT para a cravação metro a metro. Dada a identificação do impenetrável ao SPT iniciou-se a perfuração rotativa, com o uso de água, fazendo a utilização de hastes com barrilete duplo, HW, e coroa diamantada.

Sondagem DPL

O DPL é um penetrômetro dinâmico leve portátil utilizado para determinar caracterização da estratigrafia, nível de água e resistência do solo até 12 m de profundidade.

O cone do DPL tem uma área próxima a um terço da área do amostrador padrão SPT. A energia transmitida à ponteira (cone) do DPL é também muito menor que ao SPT. Desta forma, o ensaio envolve energias e regiões muito menores. Esta diferença em escala, permite ao DPL informar pequenas variações que não seriam detectadas por um ensaio robusto. Por outro lado, o número de golpes necessários para promover o avanço da ponteira é muito maior que o do SPT. Assim, são geradas diferenças suficientes para permitir avaliar as variações do terreno (Souza, Conciani e Santos, 2008).

Foram realizados 9 testes no local distribuídos ao longo de toda a área do levantamento com o principal objetivo de determinar a profundidade da capa de solo. Seu tamanho pequeno e peso leve também foram cruciais para utilização dentro da APA sem que houvesse a necessidade de supressão vegetal.

Resultados

Os modelos invertidos da eletrorresistividade apresentaram de maneira satisfatória resultados que puderam ser divididos em: valores de baixa resistividade superficial tanto para o aterro dos taludes quanto nas proximidades da rodovia, padrão variável de resistividade nas camadas



Figura 1 – Local dos levantamentos geofísicos e investigações diretas através de sondagens mistas e teste DPL.

superficiais do solo nas áreas da encosta, diminuição significativa da resistividade da encosta em camadas subsuperficiais e camadas profundas de altos valores de resistividade com a presença de descontinuidades sub-verticalizadas, apresentando aumento da condutividade.

Os valores obtidos através da sísmica mostraram grande variação ao longo de todo o trecho quando comparado o seu comportamento em profundidade. Camadas superficiais com cobertura vegetal orgânica apresentaram os menores valores de velocidade indicando a baixa com-

pactação do material. As áreas do aterro tanto da rodovia quanto do talude mostraram um aumento progressivo de velocidade em profundidade sem grandes variações horizontais.

A análise comparativa fora das áreas de aterro, confirmando a hipótese inicial, mostrou que as áreas de maior variação de resistividade em superfície também apresentavam as menores velocidades de propagação de onda, indicativo da presença de blocos desagregados dentro de uma matriz de baixa compactação, confirmado pelos testes DPL quando deslocados da posição inicial que apresentavam o impenetrável próximo à superfície.

Para o modelamento geotécnico, baseado nas hipóteses iniciais, estabeleceram-se os critérios:

- 1) Considerado como depósito de tálus/colúvio valores de resistividade variáveis na camada superficial, com predominância de picos de alta resistividade e baixas velocidades de onda (fator da hipótese inicial). Além da resposta geofísica ao meio, foram utilizadas as informações das sondagens DPL como confirmatórias que, ao detectarem o impenetrável, eram deslocadas poucos metros: caso a profundidade de penetração se repetisse, esta era determinada como impenetrável real; caso verificada maior profundidade, a área seria identificada como com presença de blocos superficiais.
- 2) Considerado solo residual valores de resistividade e velocidade de onda intermediários. Solos residuais tendem a apresentar os valores de resistividade e de velocidade de onda mais altos que os solos transportados devido à maior rigidez, principalmente, por serem solos in situ.
- 3) Considerada rocha alterada a sã altos valores de resistividade e velocidade de onda. Para a determinação da

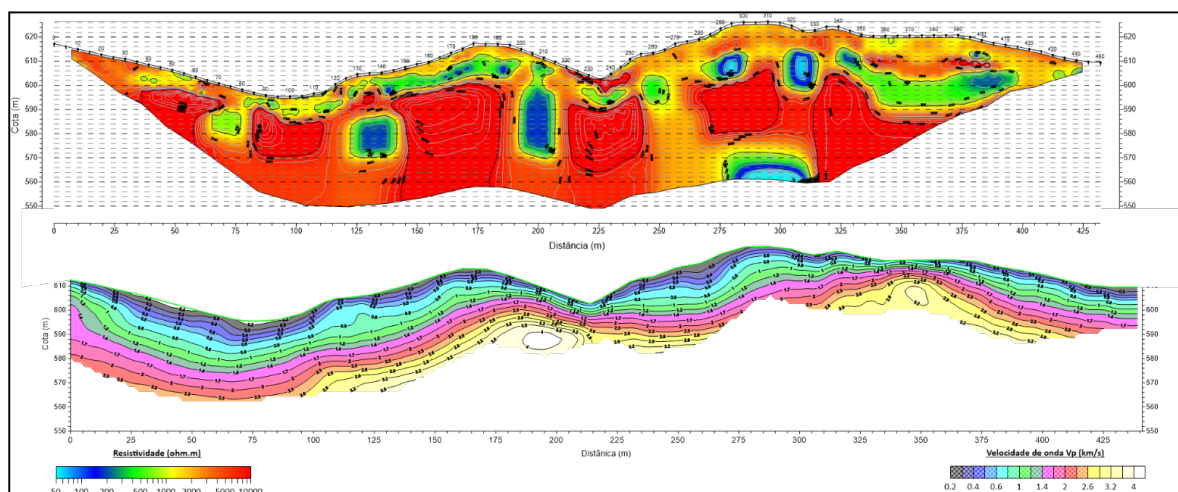


Figura 2 – Comparativo entre os valores de eletrorresistividade e as velocidades de ondas compressoriais. Perfil localizado acima do talude superior da rodovia (linha LV3) apresentando padrão variável de resistividade nas camadas superficiais, aumento da condutividade em sua porção subsuperficial e novo aumento da resistividade em profundidade com a presença de zonas verticalizadas de descontinuidade das camadas profundas. Seu padrão de velocidade apresenta os maiores valores para V_p em camadas mais profundas. Os ensaios DPL localizados na distância 225,0 m apresentaram diferentes profundidades de impenetrável: 30 cm, 240 cm e 620 cm, configurando desta forma que a camada superior é composta por blocos soltos.

passagem da zona alterada para a zona sã, estabeleceu-se a velocidade de onda de 2,3 km/s e resistividade de 5.000,00 Ohm.m. conforme literatura, podendo este limite variar de acordo com a especificidade da linha e do caminhamento geológico. Dado que a passagem destes dois domínios é gradual, visto que a alteração mineralógica não é algo uniforme, o modelo geotécnico inferido para a área não apresenta esse limite com exatidão, podendo ser deslocado para cima ou para baixo.

4) Nomeadas de zonas de provável maciço com alto grau de fraturamento/intrusão subvertical as partes das linhas que apresentaram descontinuidade lateral dos valores de resistividade (aumento de condutividade em maiores profundidades) sem uma diminuição significativa da velocidade de onda, quando presente, sendo interpretada como resultado da percolação de água, a qual foi facilitada, possivelmente, por um sistema estrutural da área.

5) O aterro foi interpretado através do mapeamento geológico em conjunto com o comportamento geofísico do material, apresentando baixos valores de resistividade e de velocidade de onda, visto que é domínio normalmente saturado e pouco compacto. Sua baixa compacidade também pode ser confirmada pelo ensaio DPL executado ao lado da rodovia.

6) As atitudes medidas em campo nos afloramentos próximos à rodovia foram assumidas como representativas para toda a área, sendo modeladas e transportadas para os modelos tridimensionais.

Modelamento 3D

Os modelamentos tridimensionais basearam-se em duas análises: comparativo entre os dados de eletrorresistividade com os planos das principais famílias de fraturas e foliações projetadas e; o modelamento geotécnico final com a integração de todas as informações obtidas.

A primeira análise trata da apresentação das três famílias de fraturas identificadas nos afloramentos acessíveis, duas sub-horizontais e uma subvertical, assim como para foliação através do Diagrama Schmidt.

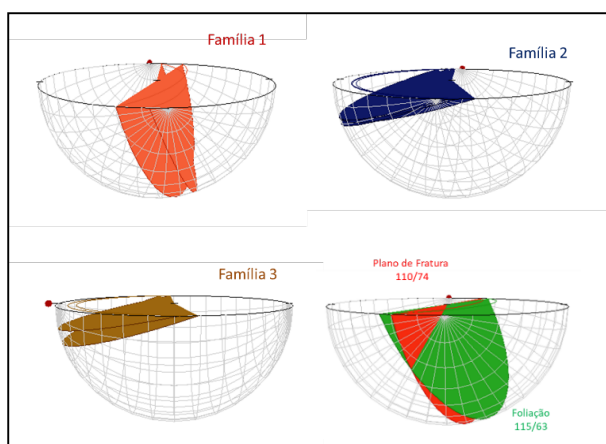


Figura 3 – Diagrama de Schmidt com a projeção dos planos de fratura e foliação aferidos na área – família 1 no plano 110/74, família 2. no plano 266/17, família 3 no plano 351/20 e foliação no plano 115/63.

Ao plotar as principais medidas das famílias de fraturas e da foliação no modelo de resistividade tridimensional, pode-se estabelecer relação íntima entre as fraturas com atitude 110/74 e a foliação que apresenta atitude 115/63, podendo ser considerados planos semiparalelas, possivelmente, sendo a foliação uma região de fraqueza para a geração das fraturas.

As outras duas famílias de fraturas também possuem correspondência com o modelo tridimensional, mostrando-se como feições subverticalizadas como redução dos valores de resistividade. Esse aumento na condutividade pode ser indicativo do faturamento ser uma região propícia à percolação de água.

A família de fratura 2, representada por atitudes como 266/17 merece destaque devido a se apresentar, espacialmente, concordante com a face livre do talude, responsável pelas grandes movimentações de massa recentes.

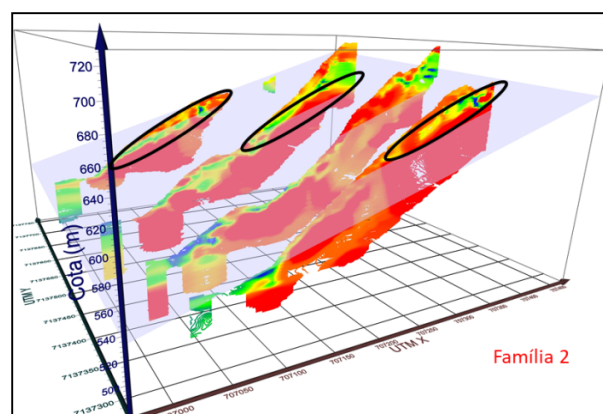


Figura 4 – Comparativo entre a projeção tridimensional dos perfis da geofísica com a família de fraturas 2.

O modelamento da eletrorresistividade apresenta, nesta mesma direção, uma tendência à diminuição dos valores de resistividade principalmente para camadas superficiais.

Este comparativo suporta a hipótese de que a diminuição dos valores de resistividade se dá pela presença de água que percola principalmente através do sistema de fraturas, facilitando o intemperismo nestas regiões.

Os demais grupos de fraturas também apresentam correspondência com as baixas resistividades, compondo um sistema complexo e inter cruzado de fraturas e percolação que, quando associado à declividade do terreno, cria um sistema propício a escorregamentos, podendo ser uma das causas da geração do solo coluvionar observado tanto durante os levantamentos dentro da área do morro (com a presença de blocos soltos) quanto ao longo da rodovia no formato de morrotes com material mal selecionado.

Quando projetados todos os perfis eletrorresistivos tridimensionalmente, sua visualização permite observar a atuação das diversas famílias de fratura no que podem ser os caminhos de percolação de água alterando as

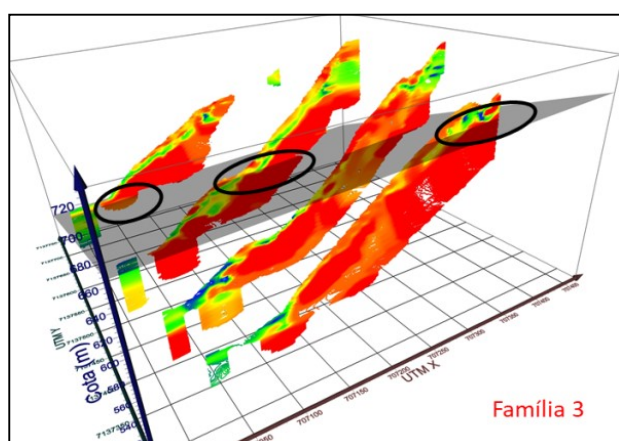


Figura 5 – Família de fraturas 3 em comparação com os resultados de eletrorresistividade.

propriedades elétricas da superfície e do embasamento rochoso.

O modelamento geotécnico final da área teve como base todas as informações obtidas em campo e discutidas anteriormente. Inicialmente, partiu-se da inferência dos modelos geotécnicos para os perfis bidimensionais dos resultados comparativos, que foram utilizados como base para a geração do modelo tridimensional final.

Os comparativos e confirmações por linha foram projetados tridimensionalmente para, além de possibilitar a visualização da área como um todo, permitir a análise de concordância dos perfis propostos. Uma vez definidos os principais horizontes a serem modelados, geraram-se as estruturas determinadas em diferentes camadas, porém enfatizando o que seria a possível camada de colúvio/tálus.

A vantagem destes modelos é a possibilidade de, além

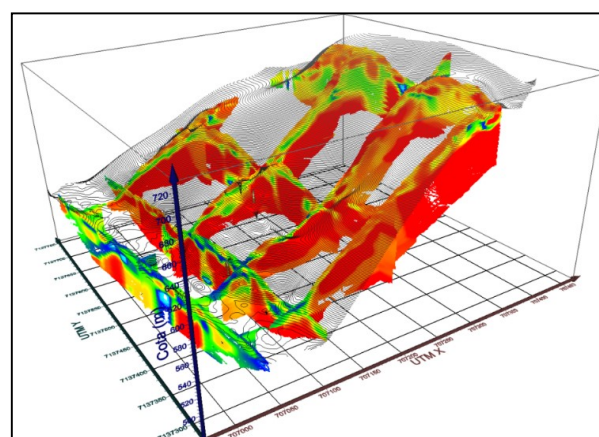


Figura 6 – Projeção 3D das linhas de geoeétrica.

da visualização em bloco, uma estimativa da cubagem do material. Outro ponto a ser observado pelos modelos é que possibilitam estudos mais aprofundados da situação atual das estruturas e suas proximidades. Modelos complementares podem ser gerados e aprimorados conforme novas informações vão sendo obtidas ao longo das áreas de estudo. Dentro das necessidades da geotecnia, principalmente quando discutido dentro de políticas públicas de infraestrutura, modelos geofísicos associados a informações de sondagens diretas possibilitam análises de comportamentos momentâneos, estimativas físicas de necessidade em obras e até previsões de comportamentos futuros. A obtenção de tais informações tem como principal objetivo auxiliar no monitoramento preventivo dos morros e taludes, principalmente quando apresentam risco conhecido ou estimado para rodovias, além de localizar áreas de risco crítico, identificando e direcionando a necessidade de instrumentações a serem aplicadas.

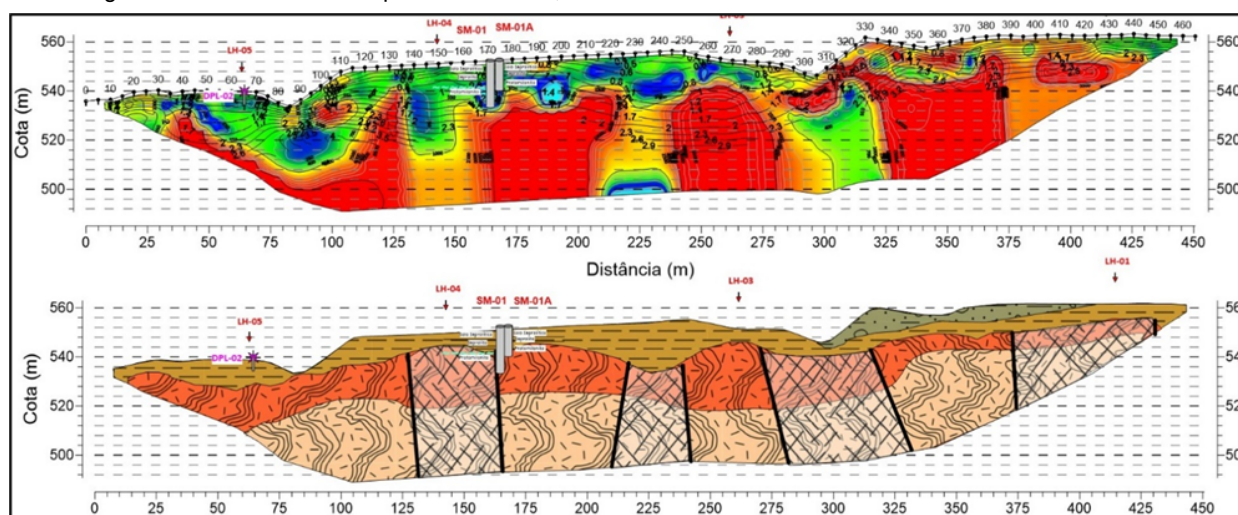


Figura 7 – Análise comparativa entre as informações obtidas a partir da eletrorresistividade, sísmica de refração, sondagens mistas e ensaios de DPL (superior). Imagem inferior da figura apresenta o modelo geotécnico final inferido para área apresentando as camadas de aterro do talude (marrom), rocha alterada (laranja), rocha sã (bege), colúvio/tálus (cinza) e áreas identificadas como zonas de descontinuidade subverticalizadas (chanfrado).

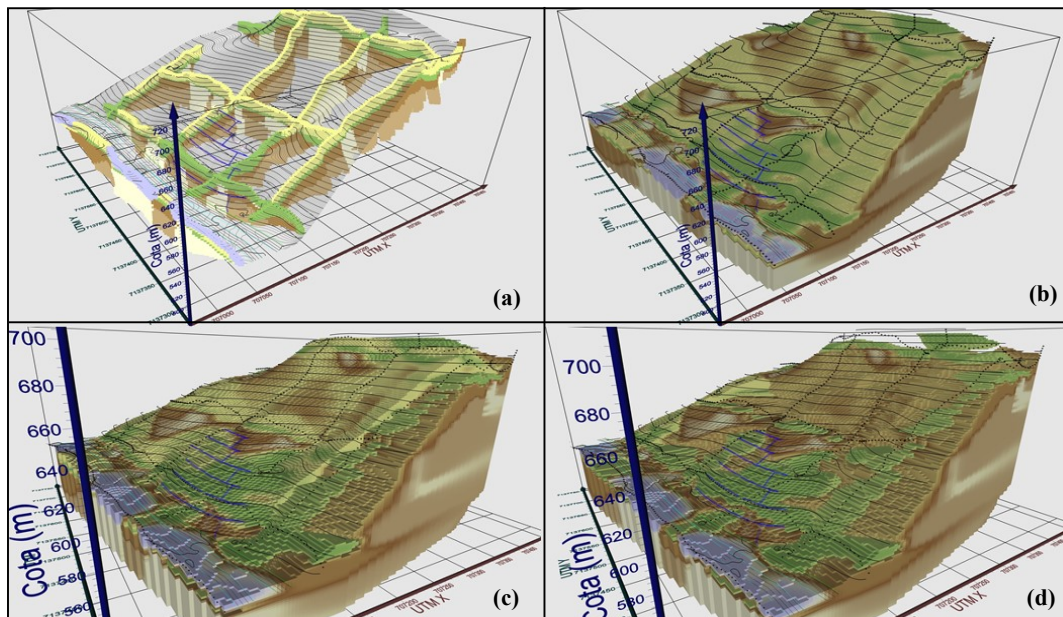


Figura 8 – Modelos tridimensionais da interpretação geotécnica de área. (a) Projeção 3D dos perfis geotécnicos inferidos a partir da análise comparativa dos resultados obtidos para análise de concordância; (b) Modelo geral 3D em bloco do talude superior; (c) Visualização do bloco com remoção parcial da camada interpretada como zona de tálus/colúvio – em amarelo e; (d) Visualização do bloco com remoção total da zona de tálus/colúvio.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao grupo Arteris / Autopista Litoral Sul e à ANTT – Agência Nacional de Transportes Terrestres pela autorização para a divulgação dos resultados do presente estudo. Registram também seu agradecimento à UFPR – Universidade Federal do Paraná, pelo apoio e interação durante a realização dos trabalhos.

Referências

Basei, M. A. S., Siga Jr, O., Machiavelli, A., e Mancini, F., 1992. Evolução tectônica dos terrenos entre os inturões Ribeira e Dom Feliciano. *Revista Brasileira de Geociências*, 22: 216-221.

Castro, B. C., 2018. Uso de resistividade elétrica em investigação geotécnica: o caso de Palmas-TO. Tese de doutorado em geotecnia (Departamento de Engenharia Civil e Ambiental), 270p. Brasília: Universidade de Brasília.

Cury, L.F., 2009. Geologia do terreno Paranaguá. Tese de doutorado (Departamento de Geologia), 188p. São Paulo: IGC/USP.

Gandolfo, O. C. B, 2007. Um estudo de imageamento geoeletrico na investigação rasa. Tese de doutorado (Departamento de Geociências), 215p. São Paulo: IGC/USP.

Hartmann, L. A., Silva, L. C., e Orlando Filho, V., 1979. O complexo granulítico de Santa Catarina. Descrição e implicações genéticas. *Acta Geologica Leopoldensia*, 6 ed.

Kearey, P., Brooks, M. e Hill, I., 2009. *Geofísica de exploração*. Tradução: M. C. M. Coelho. São Paulo: Oficina de Textos.

Reynolds, J. M, 2011. *An introduction to applied and environmental geophysics*. 2nd. West Sussex: Wiley-Blackwell.

Samouëlian, A., Cousin, I., Tabbagh, A., Bruand, A. e Richard, G., 2005. "Electrical resistivity survey in soil science: a review." *Soil & Tillage Research* 83: 173-193.

Scheibe, L. F, 1986. "A geologia de Santa Catarina: sinopse provisória." *Geosul*, 1 ed.: 7-38.

Siga Junior, O, 1995. "Domínios tectônicos do Sudeste do Paraná e Nordeste de Santa Catarina: geocronologia e evolução crustal." Tese de doutorado, 215p. São Paulo: IGC/USP.

Souza, D. N., Conciani, W., e Santos, A. C. C., 2008. "Uso de sondagens com DPL para avaliação da variabilidade do Solo." 2a. Jornada da Produção Científica da Educação Profissional e Tecnológica da Região Centro Oeste. Cuiabá: CEFETMT.

Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E. e Keys, D. A., 1990. *Applied geophysics*, 2 ed. Cambridge: Cambridge University Press.