

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/38

Caracterização geomecânica de barragem de rejeito – Estudo de caso

Marina Fernanda Rocha de Avelar
Engenheira Civil, UFMG, Belo Horizonte, Brasil, avelarmarina@ufmg.br

Talita Caroline Miranda
Professora Adjunta, Departamento de Engenharia de Transporte e Geotecnia, UFMG, Belo Horizonte, Brasil
talita@etg.ufmg.br

Sérgio Gonçalves Pena
Engenheira Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, penasrgio@gmail.com

Isabele Altoé Bissoli
Graduanda em Engenharia Civil, UFMG, Belo Horizonte, Brasil, isabelealtoe@ufmg.br

RESUMO: A premissa básica de um projeto geotécnico é o conhecimento em detalhe das características do maciço, em especial os parâmetros de resistência ao cisalhamento do material. Uma boa campanha de investigação geotécnica é composta por diversos tipos de ensaios campo e de laboratório, permitindo ao projetista que o traçado de uma seção de análise de estabilidade que seja representativa da estratigrafia do solo com a aferição dos parâmetros de resistência para cada camada. Com o avanço da tecnologia computacional é possível estimar a distribuição espacial das propriedades geomecânicas através da geração de um modelo tridimensional. Este trabalho apresenta a compilação dos resultados de duas campanhas de investigação geológico/geotécnica realizadas em uma barragem de rejeitos. Foi dada uma ênfase especial aos dados de CPTu, os quais foram utilizados para obter um modelo tridimensional e uma seção transversal da estratigrafia de deposição do rejeito, conforme a classificação do solo STBn.

PALAVRAS-CHAVE: Modelagem tridimensional, Estabilidade de barragem, CPTu, Propriedades geomecânicas.

ABSTRACT: The basic premise of a geotechnical project is detailed knowledge of the characteristics of the mass, especially the material's shear resistance parameters. A good geotechnical investigation campaign is made up of different types of field and laboratory tests, allowing the designer to outline a stability analysis section that is representative of the soil stratigraphy with the measurement of resistance parameters for each layer. With the advancement of computational technology, it is possible to estimate the spatial distribution of geomechanical properties through the generation of a three-dimensional model. This work presents the compilation of the results of two geological/geotechnical investigation campaigns carried out in a tailings dam. Special emphasis was placed on CPTu data, which were used to obtain a three-dimensional model and a cross section of the tailings deposition stratigraphy, according to the STBn soil classification.

KEYWORDS: Three-dimensional modeling, Dam stability, CPTu, Geomechanical properties.

1 INTRODUÇÃO

Os rompimentos de barragens de rejeitos de mineradoras resultaram em muitos danos humanos e imensuráveis danos ambientais no estado de Minas Gerais. Os principais ocorridos foram: Grupo Itaminas (Itabirito, 1986), Mineração Rio Verde (Nova Lima, 2001), Mineradora Rio Pomba Cataguases (Miraí, 2007), Companhia Siderúrgica Nacional (Congonhas, 2008), Herculano Mineração (Itabirito, 2014), Samarco/Vale/BHP Billiton (Mariana, 2015) e, por fim Córrego do Feijão (Brumadinho, 2019).

Todas as barragens citadas possuem em comum atestados de funcionamento que garantiam a segurança de que não haveria ruptura. Para garantir a estabilidade dos taludes é indispensável o conhecimento detalhado dos parâmetros geomecânicos do maciço, em especial os parâmetros de resistência ao cisalhamento do material, seja por ensaios de campo ou de laboratório. Esses ensaios fornecem dados pontuais para um local específico ou ao longo de uma profundidade. A localização destas informações depende da campanha da investigação e do monitoramento da execução da barragem, em geral, para um determinado plano preferencial, traçando assim as seções geológico-geotécnicas, cruciais para o estudo da estabilidade da barragem.

Tais seções transversais ao corpo de uma barragem, utilizadas nas análises de estabilidade, em geral, são obtidas com base na experiência do profissional com base nas informações de investigação geotécnica disponível pontualmente ou ao longo de uma profundidade. No entanto, técnicas mais atuais, utilizando plataformas com softwares modeladores, permitem a integração de diversos tipos de informações e análises da variação pontual e/ou sua distribuição espacial de um determinado dado. Gerando assim modelos implícitos tridimensionais que apresentam a estimativa e/ou extrapolação dos parâmetros pontuais ou longo de uma superfície e/ou camada de solo para áreas que não possuem informações.

Barragens de terra utilizadas para conter o rejeito de mineração, possuem um número expressivo de resultados de diferentes ensaios que permitem uma melhor caracterização do maciço. Este trabalho pretende reunir e interpretar os resultados de diferentes ensaios de laboratório e de campo, com o intuito de estimar os parâmetros geomecânicos do maciço, de duas formas: por comparação e por modelagem implícita tridimensional. Estimando assim os parâmetros de resistência do solo para uma seção crítica para um futuro trabalho de análise de estabilidade.

O maciço de uma barragem de rejeitos, objeto de estudo deste trabalho, está localizado em uma província mineral da Região Central de Minas Gerais. Construída principalmente pelo método de alteamento a montante, contando também com um alteamento a jusante, a barragem possui cerca de 80 metros de altura e 1,5 milhão de metros cúbicos de rejeitos gerados no processo de tratamento de minério de ferro.

2 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DE CAMPO

As campanhas de investigação geotécnica realizadas na barragem contaram com ensaios de campo como sondagem mista, *Vane Test* e ensaios de *Cone Penetration Test* (CPTu). Devido ao volume de ensaios e a possibilidade de estimar inúmeros parâmetros geomecânicos através dos resultados do CPTu foi dada maior ênfase a esse ensaio.

Os ensaios de cone com medida de poropressão (CPTu) são utilizados para determinar a estratigrafia de perfis de solo, avaliar as propriedades dos materiais a serem investigados e prever a capacidade de carga de fundações. O procedimento consiste na cravação de uma ponteira cônica (com 60° de ápice) no terreno a uma velocidade constante de 20 mm/s, obtida através de um equipamento com uma estrutura de reação e um sistema de aplicação de carga. A seção transversal do cone possui 10 cm² e a área da luva de atrito lateral é de 150 cm². A penetração é realizada através do acionamento contínuo de hastes com cerca de 1 m de comprimento, operadas por um pistão hidráulico, e é interrompida apenas para conexão de novas hastes e para realização do ensaio de dissipação (Filho, 2004).

À medida que as hastes são introduzidas no solo, a cada 2 cm de profundidade, alguns parâmetros são obtidos de forma automática e através de instrumentação de precisão devidamente calibrada e instalada na extremidade inferior do conjunto. São eles: a resistência à penetração de ponta (q_c), a resistência por atrito lateral (f_s), a poropressão (u) e o ângulo de inclinação da ponteira cônica em relação à vertical. Esses dados são transmitidos à superfície por um sistema de ondas acústicas ou cabo, eliminando-se qualquer influência do operador no ensaio, e podem ser visualizados em tempo real através de um computador.

Segundo Bedin (2006), os ensaios de piezocone são bastante úteis na identificação das propriedades físicas e mecânicas de depósitos de resíduos para o estudo de sua estabilidade estrutural. Em geral, os perfis característicos gerados como resultado dos ensaios de CPTu executados em resíduos de minérios se assemelham, uma vez que apresentam grande variabilidade de resistência em função da profundidade, além de considerável heterogeneidade espacial de propriedades.

É importante ressaltar a importância da influência da drenagem na estimativa de parâmetros constitutivos em materiais com fração siltosa predominante. Na interpretação de ensaios de campo nesse tipo de solo com permeabilidade intermediária, é necessário especificar as condições de drenagem impostas ao solo

durante a cravação do cone. Como é apresentado por Schnaid & Odebrecht (2012), devem ser asseguradas condições não drenadas ou perfeitamente drenadas para que ensaios de piezocone e palheta seja interpretados corretamente, pois a drenagem parcial modifica o estado de tensões ao redor da sonda e, caso isso aconteça, os resultados dos ensaios não podem ser utilizados para estimar parâmetros constitutivos do solo.

2.1 Parâmetros Geotécnicos

Para solos argilosos, a partir do ensaio CPTu é possível obter alguns parâmetros de resistência, deformabilidade e condutividade hidráulica do solo, como a história de tensões, resistência ao cisalhamento não drenada (S_u), fator de capacidade de carga (N_k), razão de pré-adensamento (OCR), coeficiente de empuxo no repouso (k_0), módulo de deformabilidade não drenada (E_u), módulo cisalhante médio (G_0), coeficiente de adensamento horizontal (Ch) (Schnaid & Odebrecht, 2012).

No caso de solos não coesivos, são obtidos parâmetros de resistência e deformabilidade a partir de correlações com os resultados fornecidos pelo ensaio. Alguns desses parâmetros são: densidade relativa (D_r), ângulo de atrito interno (ϕ'), módulo de deformabilidade (E) e módulo cisalhante médio (G_0).

Como resultado da cravação do cone, são obtidas: a resistência de ponta (q_c), o atrito lateral (f_s) e a poropressão gerada durante a cravação (u). Outros dois parâmetros considerados fundamentais na identificação do tipo de solo e caracterização estratigráfica do perfil podem ser inferidos, a razão de atrito (F_r) e o coeficiente de poropressão (B_q).

A razão de atrito (FR) relaciona a resistência de ponta (q_c) e o atrito lateral (f_s) ao longo da profundidade do perfil.

As medidas de resistência à penetração podem ser influenciadas pelo efeito da atuação de poropressões em áreas desiguais da geometria do cone, portanto é necessário conhecer as pressões neutras medidas na base do cone (u) para calcular a resistência real mobilizada no ensaio (Schnaid & Odebrecht, 20). A desigualdade se dá no encontro entre a luva e a ponta do cone, conforme é apresentado na Figura 3. A resistência corrigida é chamada (q_t) e é obtida conforme Robertson & Cabal (2015). Para solos argilosos e siltosos, em condições não drenadas, a medida da resistência de ponta deve ser corrigida e em solos arenosos não é necessário fazer correção (Robertson & Cabal, 2015).

2.2 Classificação dos Solos

Uma das principais aplicações do ensaio de piezocone é a determinação da estratigrafia e da classificação dos solos. Em geral, a resistência de ponta (q_c) é alta em solos arenosos e baixa em solos argilosos. Já a razão de atrito (R_f) costuma ser baixa em areias e alta em argilas. De acordo com Robertson & Cabal (2015), os ensaios CPT e CPTu não fornecem uma classificação dos solos baseada em características físicas, como tamanho dos grãos, mas orientam a sua classificação a partir de características mecânicas, como compressibilidade e resistência, e do tipo de comportamento do solo (SBT).

O gráfico do tipo de comportamento do solo mais utilizado atualmente foi introduzido em 1986 por Robertson e atualizado pelo mesmo autor em 2010. No gráfico são utilizados os parâmetros obtidos do ensaio: resistência de ponta (q_c) e razão de atrito (R_f). A resistência de ponta é normalizada pela pressão atmosférica, tornando-a adimensional.

Como a resistência à penetração do cone aumenta com a profundidade devido ao aumento da tensão vertical é necessário normalizar os resultados para solos muito rasos e/ou muito profundos. Para Nejaïm (2015), qualquer normalização que represente o acréscimo de tensões deveria considerar mudanças em termos de tensões horizontais, uma vez que a resistência à penetração é influenciada significativamente pela tensão efetiva horizontal.

O tipo de comportamento do solo pode ser aperfeiçoado pela coleta dos dados de medida de poropressão. Em argilas moles e siltes, o excesso de poropressão gerado pela penetração é maior, enquanto em argilas sobreadensadas ou sites e areias siltsosas a poropressão pode ser baixa ou até negativa em relação a poropressão de equilíbrio (u_0). A taxa de dissipação da poropressão durante a pausa no ensaio (ensaio de dissipação) também pode ajudar na classificação do tipo de solo. Em solos arenosos, qualquer excesso de poropressão irá se dissipar rapidamente, enquanto em solos argilosos a taxa de dissipação pode ser bastante lenta (Robertson & Cabal, 2015).

3 LOCAL DE ESTUDO

A barragem abordada nesse trabalho está localizada em uma importante região produtora de minério integrante do Quadrilátero Ferrífero. A mineração nessa região teve sua operação iniciada ainda no século XIX, quando a lavra ainda era realizada em pequena escala, e com o interesse crescente de novas empresas mineradoras, passou-se a exigir licenciamento ambiental corretivo e assinatura de Termos de Ajustamento de Conduta para proteção do meio ambiente.

Essa barragem, renomeada de Barragem B1 nesse estudo, teve seu dique de partida construído com material argiloso compactado. O primeiro alteamento foi realizado pelo método à jusante, utilizando-se solo residual de filito no corpo e material argiloso na face de montante. Em seguida, foi executado um alteamento à montante em aterro compactado também com solo residual de filito reaproveitado de escavações realizadas para a implantação de uma estrutura próxima a barragem.

Foram realizados mais quatro alteamentos a montante e o último alteamento, a jusante. Atualmente, a barragem se encontra desativada e a estrutura não está mais em operação, apenas são realizadas auditorias e monitoramento periódico da estabilidade.

4 METODOLOGIA

Foram analisados resultados de ensaio de duas campanhas de investigações geotécnicas diferentes, uma realizada em 2013 e outra em 2019. A campanha de 2013 contou com apenas 4 ensaios de piezocone realizados no corpo da barragem, através dos diques dos alteamentos. Já na campanha de 2019 foram executados 17 ensaios, sendo 10 no reservatório e 7 no corpo da barragem. A partir dos dados gerados pelos ensaios de CPTu foram estimados os parâmetros geomecânicos da barragem e do rejeito.

Foi realizada uma avaliação preliminar dos resultados, onde através dos dados fornecidos pelos ensaios foram calculadas a razão de atrito (F_r), o coeficiente de poropressão (B_q), a resistência de ponta corrigida (q_t) e a correção do atrito lateral medido (f_s).

Em seguida, foi feita a classificação dos solos SBTn para a determinação da estratigrafia. Para isso, foram utilizados os gráficos do tipo de comportamento do solo. Para normalizar os parâmetros utilizados para a classificação foram usadas as equações apresentadas por Robertson & Cabal (2015). Para as camadas de solos não coesivos, foram estimados a partir do ensaio CPTu: densidade relativa (D_r), ângulo de atrito interno (ϕ'), módulo de deformabilidade (E_s), módulo cisalhante médio (G_o) e parâmetro de estado (Ψ). Já para as camadas de solo coesivos foram observados: razão de pré-adensamento (OCR) e o coeficiente de empuxo no repouso (k_o).

Neste trabalho, optou-se por utilizar a modelagem implícita tridimensional com informações de ensaios de investigação geotécnica do tipo CPTu, mais especificamente do parâmetro de classificação do solo SBTn. Para tal, foi utilizado o modelador Leapfrog Works, desenvolvido pela Seequent, utilizando a ferramenta de interpolação chamada FastRBF™ (Fast Radial Basis Function), que acelera os processos e permite a atualização dinâmica dos modelos. Após a obtenção do modelo tridimensional, foi obtida uma seção transversal no eixo da barragem, para fins de comparação.

5 RESULTADOS

A fim de se analisar o comportamento do rejeito depositado na barragem ao longo dos anos, foram comparados os resultados dos ensaios de piezocone da campanha de 2013 e da campanha de 2019. Devido à concentração dos furos em duas áreas diferentes (topo e pé da barragem). Foram gerados gráficos em função da profundidade dos furos, adotando para tal análise a cota mais alta do ensaio da campanha de 2019, cota 1011,23 m do furo CPTU-05-2019 A, como referência para as análises. Para as camadas de areias e siltes foram analisados: densidade relativa (D_r), ângulo de atrito interno (ϕ'), módulo de deformabilidade (E_s), módulo cisalhante médio (G_o) e parâmetro de estado (Ψ). Já para as camadas de argila foram observados: razão de pré-adensamento (OCR) e o coeficiente de empuxo no repouso (k_o).

A Figura 1 apresenta a variação da densidade relativa do material dos solos não coesivos (areias e siltes) ao longo da profundidade. Na Figura 1- a) é observada uma variação da densidade relativa entre 20 e 100% até a profundidade de 33 m, entre 33 e 47 m esta variação cai para 29 e 45%, que também é observada na

campanha de 2013 c), o que pode ser considerado coerente visto os furos de CPTu são paralelos e distanciados de poucos metros. Já a campanha de 2019 na parte inferior do talude (pé da barragem) os valores de densidade relativa observados em b) variam entre 18 e 100%.

Em relação ao ângulo de atrito interno do material (Figura 1) observa-se que a campanha de 2019 registra valores mais altos para o ângulo de atrito interno do material, variando entre 32 e 43°, como observado em a) e b). Já na campanha de 2013, observado em c), esse parâmetro variava entre 32° e 43°. No entanto, assim como observado no gráfico de densidade relativa, os valores de ângulo de atrito entre 37 e 47 m de profundidade se mantém na mesma faixa de variação entre 32° e 38°, indicando que não houve um aumento deste parâmetro com o passar do tempo, nesta região. Dando continuidade à análise dos parâmetros estimados a partir dos dados de CPTu somente para solos não coesivos, observa-se na Figura 2 a variação do módulo de deformabilidade (E_s) em relação à profundidade. Estas comparações foram realizadas para os demais parâmetros estimados através das correlações de CPTu.

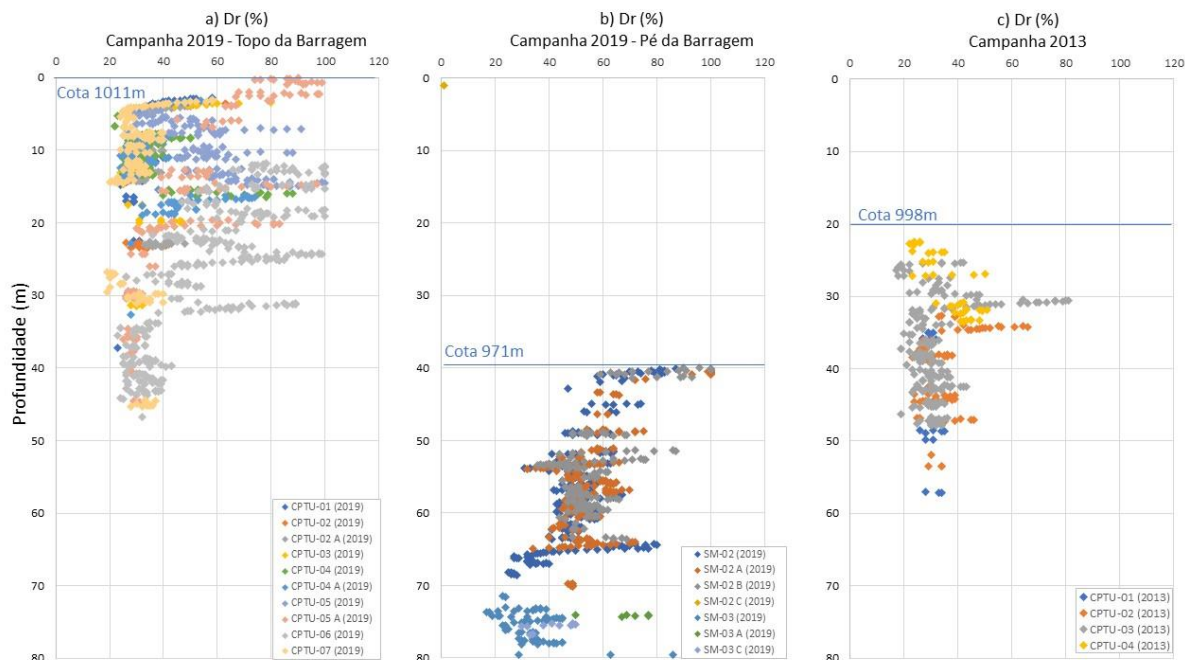


Figura 1 - Variação dos valores de densidade relativa com a profundidade.

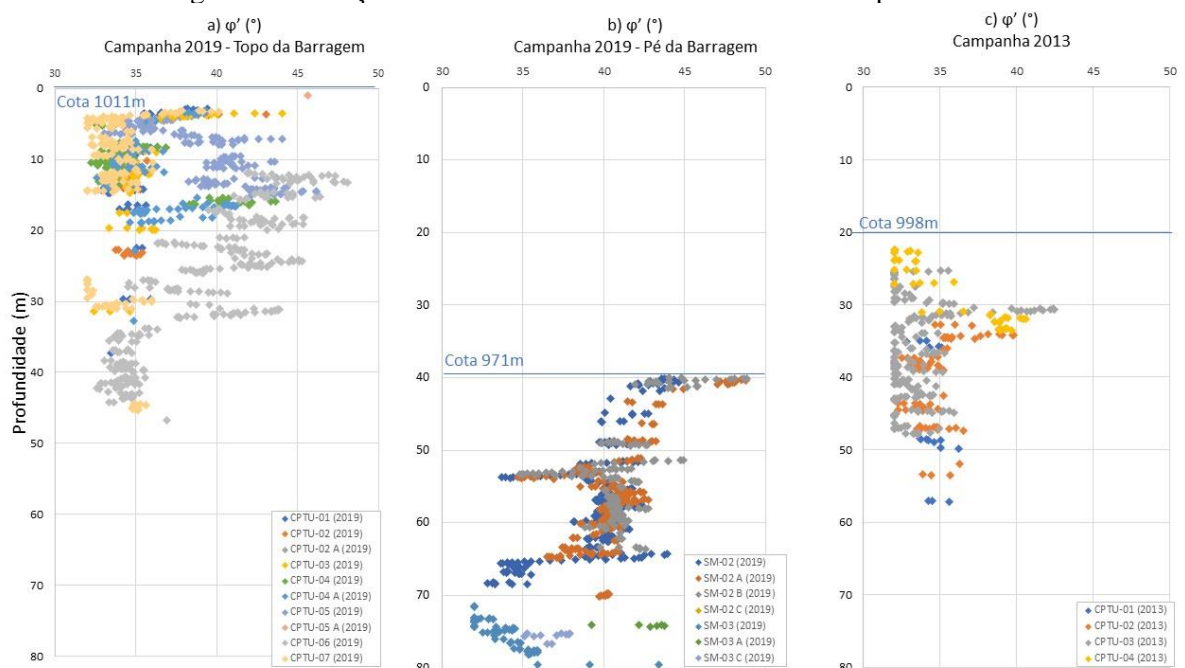


Figura 2 - Variação dos valores de ângulo de atrito efetivo com a profundidade

Seguindo a mesma metodologia foram analisados os parâmetros de módulo de deformabilidade (E_s) e módulo cisalhante médio (G_o), resistência ao cisalhamento não drenada (S_u) e coeficiente de empuxo (k_0) praticamente não sofreu alteração, se mantendo no valor esperado para materiais argilosos.

Com o intuito de se analisar a distribuição espacial dos dados estimados, primeiramente optou-se por gerar um modelo tridimensional da estratigrafia, conforme apresentada na Figura 3, com a classificação e a estratigrafia de deposição dos rejeitos na barragem em função da classificação dos solos SBTn onde se observa os seguintes solos:

- Zona 6: Areias (Areias a areias siltsosas) no topo do talude, indicando a utilização de material arenoso utilizado na última elevação da barragem como solo compactado no alteamento.
- Zona 7: Areias com cascalhos a areias em uma zona central indicando que houve uma deposição de material de classificação mais grosseira no último alteamento da barragem.
- Zona 3: Argila (argilas siltsosas e argilas) indicando que houve deposição de material de classificação mais fina com comportamento coesivo ao longo do corpo da barragem;
- Zona 5: Misturas de areia (areias siltsosas e siltes arenosos) indicando que houve deposição de material de classificação mais fina com comportamento não coesivo;
- Zona 6: Misturas de silte (siltes argilosos e argilas siltsosas) indicando que a utilização deste material para os alteamentos da barragem a partir da cota 975m.
- Zona 2 (Solo orgânico – Argila) e Zona 1 (Solo fino sensível) indicando limite entre o material depositado e o solo existente na base da barragem.

Como o conjunto de dados de campo estão alinhados, foi gerada a seção apresentada na Figura 4, com a seção estratigráfica obtida para fins de comparação com a seção de projeto. Nota-se que somente pelo SBTn não é possível indicar geometricamente o dique de partida e os alteamentos realizados.

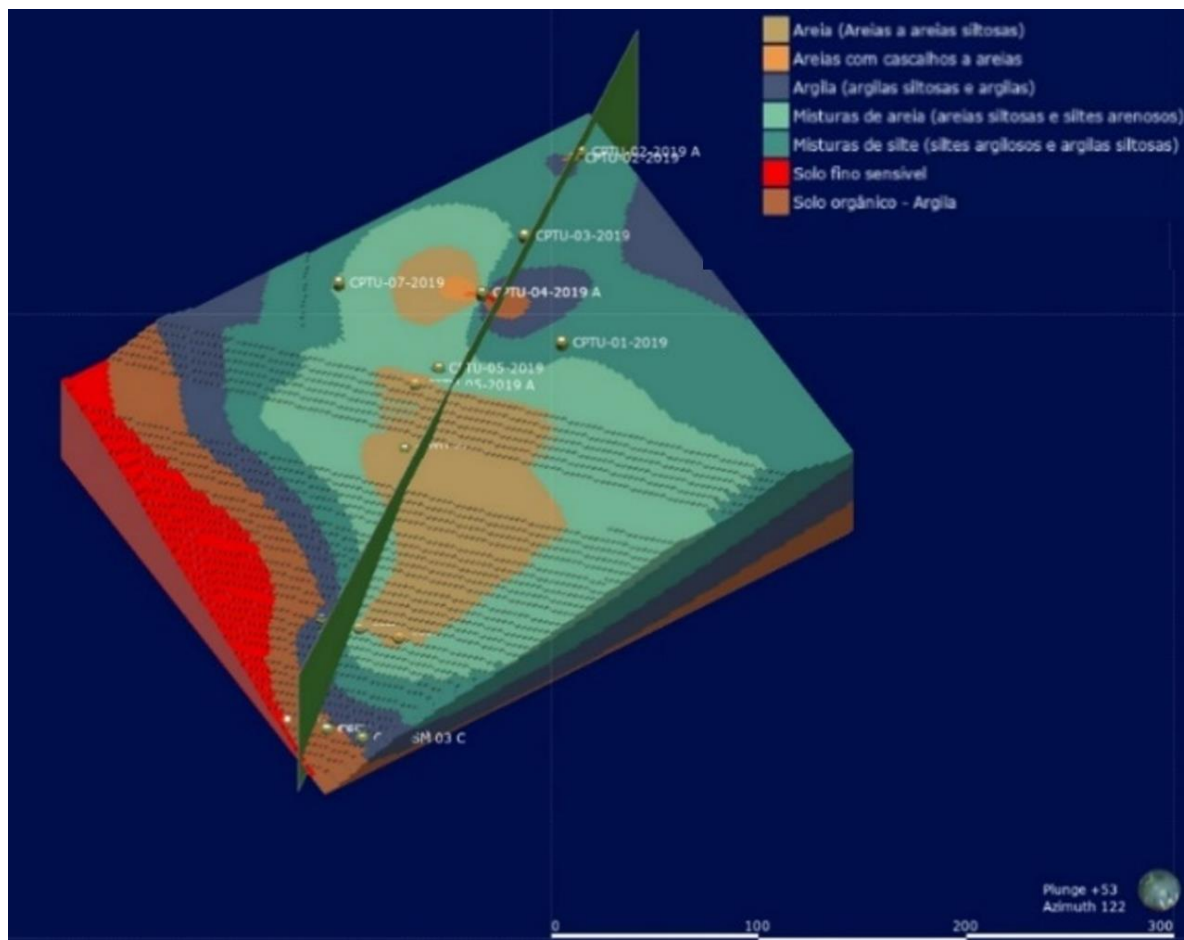


Figura 3 – Modelo tridimensional com a classificação dos solos em função do SBTn, furos de CPTu e localização da seção analisada.

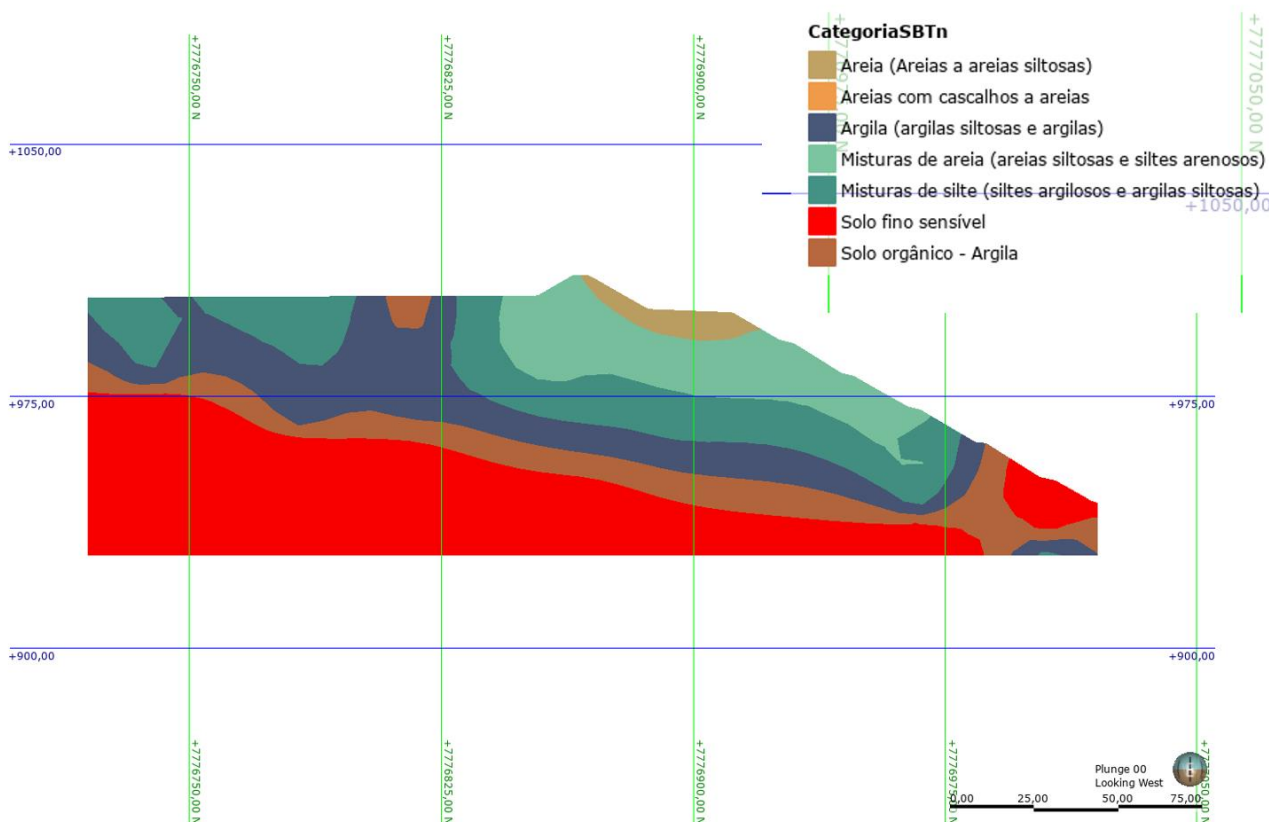


Figura 4 – Seção estratigráfica em função da classificação dos solos SBTn.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Coletar, avaliar e determinar os parâmetros geomecânicos de uma barragem de rejeitos a partir de dados de investigação geotécnica é de suma importância como etapa anterior ao da análise de estabilidade de ruptura. O principal objetivo deste trabalho em coletar, catalogar as informações de caracterização básica e estimar os parâmetros de cisalhamento do solo, foi atingido parcialmente.

No entanto estas informações foram fundamentais para a determinação da estratigrafia da barragem. As análises foram divididas por campanha (2013 e 2019) para verificar o comportamento do material com o passar do tempo. Para a campanha mais atual, também foi feita a divisão entre topo e pé da barragem para agrupar melhor os resultados dos ensaios de piezocone. Foram verificados parâmetros para solos arenosos, argilosos e siltsos, uma vez que foram encontrados esses três tipos de material nos perfis.

Para as camadas de solo não coesivos (areias e siltes) notou-se o aumento de parâmetros como densidade relativa (D_r), ângulo de atrito interno (ϕ), módulo de deformabilidade (E_s) e módulo cisalhante médio (G_o). Já as camadas de solo coesivo (argilas) apresentaram uma redução da resistência ao cisalhamento não drenada (S_u) para novos alteamentos da barragem, e um aumento para camadas existentes (Figura 1 e Figura 2). Os gráficos de ambas as campanhas mostram a tendência de as camadas mais profundas possuírem razão de pré-adensamento mais baixas, indicando materiais normalmente adensados, enquanto o coeficiente de empuxo (k_0) praticamente não sofreu alteração, se mantendo no valor esperado para materiais argilosos.

Para as camadas de solos siltsos buscou-se observar o comportamento do parâmetro de estado com o intuito de se analisar o comportamento do material próximo a condição de estado crítico (Figura 2). Ao longo dos alteamentos da barragem notou-se uma diminuição no valor desse parâmetro, aproximando o material de um comportamento dilatante com o passar do tempo.

O uso de ferramentas de modelagem permite que se tenha um modelo mais próximo da realidade do campo, o que ficou evidenciado na seção em que é possível observar a deposição e estratigrafia da deposição do rejeito. No entanto, o modelo gerado precisa passar por uma análise refinada, incluindo a topografia da base da barragem e informações do “*as built*” dos alteamentos da barragem. Com isto a seção de análise estará o mais fiel possível ao

projeto executado em campo, em especial para o corpo da barragem que não ficou bem representado na seção de análise.

Para trabalhos futuros recomenda-se:

- Integração de todas as informações em uma plataforma do tipo SIG (Sistema de Informações Geográficas) associado a um banco de dados georreferenciado contendo as informações da investigação e detalhes topográficos dos alteamentos;
- Análise e validação de todos os parâmetros de resistência do solo e de comportamento tensão *versus* deformação obtidos, através da análise individual de cada furo e do conjunto de informações.
- Comparação dos valores de resistência ao cisalhamento não drenado para os solos coesivos obtidos CPTu e Vane e a validação dos mesmos com dados da literatura. Separando a análise por região (rejeito ou corpo da barragem) e por data, com o intuito de avaliar se houve mudança nestes parâmetros ao longo do tempo.
- Refino do modelo tridimensional e da seção de análise, incluindo as delimitações de corpo de barragem e rejeito. Assim como a inserção das demais informações além da classificação do solo e análise da variação das informações ao longo da profundidade e espacialmente.

7 REFERÊNCIAS

- Bedin, J. (2006). *Interpretação de ensaios de piezocone em resíduos de bauxita*. Dissertação (mestrado). Porto Alegre, RS, Brasil: Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.
- Filho, L. H. (2004). *Avaliação do comportamento geotécnico de barragens de rejeitos de minério de ferro através de ensaios de piezocone*. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.
- Nejaim, P. (2015). *Análise do tipo de comportamento do solo do depósito de Sarapuí II através de ensaios de Piezocone com ênfase na camada do Pleistoceno*. Projeto de Graduação (UFRJ/Escola Politécnica). Rio de Janeiro.
- Robertson, P. K., & Cabal, K. L. (2015). *Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering* (6^a ed.). USA: Gregg Drilling & Testing, Inc.
- Schnaid, F., & Odebrecht, E. (2012). *Ensaio de campo e suas aplicações à engenharia de fundações* (2. ed.). São Paulo: Oficina de Textos.