

18º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental

ENSAIO CPTU APLICADO A UMA BARRAGEM DE REJEITO DE MINERAÇÃO EM MG: A IMPORTÂNCIA DA ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS COMO SUPORTE DE TOMADA DE DECISÃO

Bruno Landi¹; Luiz Carlos da Cruz²; Felipe Augusto³

Resumo: Este estudo investiga o comportamento de uma barragem de rejeitos construída pelo método de alteamento a montante em Minas Gerais e escolhida devido à sua condição de armazenamento de rejeitos e aos potenciais indicadores de poropressão associados a essas estruturas. Em março de 2024, foram realizados ensaios CPTu com o penetrômetro automotriz modelo Crawler IV, que permitiu medições contínuas da resistência de ponta, atrito lateral e poropressão. Os dados coletados foram analisados por meio do software CPeT-IT e interpretados segundo a metodologia de Peter Robertson. Os resultados destacam a importância do monitoramento contínuo da área de estudo, evidenciando a complexidade do perfil do solo, com camadas superiores, entre 0 e 8 m de profundidade, compostas por material arenoso, alta resistência de ponta e comportamento dilatante, favorável à estabilidade estrutural. No entanto, camadas mais profundas apresentaram menor resistência e alta suscetibilidade ao aumento de poropressão, indicando comportamento contrátil que pode comprometer a segurança sob carregamento. O estudo reafirma a necessidade de métodos precisos e de investigações regulares para garantir a confiabilidade das barragens de rejeitos, contribuindo para a segurança de estruturas críticas.

Palavras-chave: Geotecnia; Poropressão; CPTu; CpeT-IT.

Abstract: This study investigates the behavior of a tailings dam built using the upstream raising method in Minas Gerais, chosen due to its tailings storage condition and the potential pore pressure indicators associated with these structures. In March 2024, CPTu tests were carried out with the Crawler IV self-propelled penetrometer, which allowed continuous measurements of tip resistance, lateral friction, and pore pressure. The collected data were analyzed using the CPeT-IT software and interpreted according to the methodology of Peter Robertson (2010 and 2016). The results highlight the importance of continuous monitoring of the study area, evidencing the complexity of the soil profile, with upper layers, from 0 m to 8 m deep, composed of cohesive sandy material, high tip resistance, and dilatant behavior, favorable to structural stability. However, deeper layers presented lower resistance and high susceptibility to pore pressure, indicating contractile behavior that can compromise safety under loading. The study reaffirms the need for accurate methods and regular investigations to ensure the reliability of tailings dams, contributing to the safety of critical structures.

1. INTRODUÇÃO

Obras de Engenharia Civil requerem que um estudo detalhado sobre o comportamento do solo seja devidamente considerado. A Mecânica dos Solos estuda diferentes tipos de comportamento quando tensões são aplicadas (fundações) ou aliviadas (escavações), ou quando há escoamento de água em seus vazios que podem ser classificados em microporos e macroporos. Dentre os diversos fatores que influenciam no comportamento dos solos, a poropressão tem um

¹ Geól. UniBH. Tel: 31 98414-7039. Email: brunolandi1997@gmail.com

² Geóg. Dr. UniBH. Tel: 31992524581. Email: luiz.c.cruz@ulife.com.br

³ Geól. Dr. UniBH. Tel: +55 11 94984-9647. Email: Felipe.nascimento@ulife.com.br

papel predominante, principalmente em solos saturados por umidade, o que influencia diretamente nas tensões efetivas e, conseqüentemente, afetando na compressão, distorção e resistência ao cisalhamento.

Tal fenômeno pode ocasionar riscos e problemas para estruturas e projetos de engenharia, principalmente quando de grande porte, como aquelas próximas a barragens de rejeitos de mineração. A diversidade e a diferença de comportamento dos diversos rejeitos perante as solicitações de interesses das engenharias trazem a importância da classificação dos rejeitos e seu agrupamento em conjuntos distintos. São tantas as peculiaridades dos diversos rejeitos que um sistema de classificação que permitisse um nível de conhecimento adequado para qualquer projeto teria de levar em conta uma grande quantidade de índices, deixando totalmente de ser viável para uma aplicação prática. Entretanto, eles ajudam a organizar as ideias e a orientar os estudos e o planejamento das investigações para a obtenção dos parâmetros mais importantes de cada projeto (Pinto, 2006, p.64).

Neste sentido, os estudos geotécnicos é que fazem por balizar o comportamento de materiais, como rochas e solos que possuem uma grande diversidade de características. É importante destacar que rochas não são todas iguais, assim como os solos e os rejeitos, já que ambos podem apresentar propriedades distintas em termos de composição, estrutura e comportamento mecânico. Entender os princípios de mecânica dos solos é fundamental para o tratamento correto na análise de classificação dos rejeitos e os ensaios geotécnicos *in situ* são uma das principais formas de obtenção de informações para determinar o comportamento do rejeito e direcionar as tomadas de decisões.

Dentre os ensaios geotécnicos, destacam-se os ensaios de piezocone (*piezocone penetration test*), conhecidos pelas siglas CPTu. Este ensaio é reconhecido internacionalmente como uma das mais importantes ferramentas de prospecção geotécnica, por fornecer dados sobre a resistência do solo e a variação da poropressão ao longo da profundidade. Resultados de ensaios podem ser utilizados para determinação estratigráfica de perfis de solo ou rejeitos, para determinação de propriedades dos materiais prospectados (particularmente em depósitos de materiais argilosos moles) e a previsão de capacidade de carga das fundações (Schnaid, 2012, p.63).

Os ensaios de piezocone passaram a fazer parte da engenharia brasileira, complementando as informações obtidas em programas preliminares de investigação desenvolvidos com base em sondagens (Schnaid, 2012, p.114). As medidas de ensaios de resistência de ponta, atrito lateral e poropressão (Q_c , F_s , U e Fr) obtidas por meio de procedimentos analisados são utilizadas na determinação e classificação do comportamento e propriedades do solo, assim como no dimensionamento de projetos geotécnicos, pois os resultados obtidos possibilitam uma análise do comportamento do solo em seus mais diversos usos, até em barragens de rejeito, como é o foco deste estudo, e isto torna-se fundamental para garantir a estabilidade dessas estruturas e evitar colapsos.

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é analisar, a partir dos dados de investigações geotécnicas o comportamento de uma barragem de rejeito que foi construída utilizando o método de alteamento a montante situada em Minas Gerais, e como as variações de poropressão influenciam no comportamento do material. Os ensaios CPTu permitem avaliar os parâmetros críticos como resistência ao cisalhamento e variações na poropressão, fornecendo dados essenciais para prever possíveis deformações ou instabilidades. Em barragens a montante, esses dados tornam-se ainda mais relevantes, uma vez que os resultados podem direcionar medidas preventivas de monitoramento estabelecidos pela legislação estadual de Minas Gerais, de acordo com a Lei Estadual nº 23.291 também conhecida como a Política Estadual de Segurança de Barragens (PESB-MG) que busca mitigar riscos associados a esse tipo de estrutura.

É importante ressaltar que, embora os rejeitos de mineração apresentem particularidades que os distinguem dos solos naturais, os princípios da mecânica dos solos e ferramentas de investigação como o CPTu são fundamentais para sua caracterização. A classificação baseada no tipo de comportamento do solo (SBTn), proposta por Robertson (2009, 2016), é amplamente aplicada a rejeitos por se basear na resposta mecânica *in situ* do material à penetração, fornecendo uma estrutura robusta para a interpretação de sua estratigrafia e comportamento potencial (e.g., Robertson, 2016).

2. DESENVOLVIMENTO

O ensaio de CPTu é uma técnica amplamente utilizada na geotecnia para determinar as propriedades do solo e este é realizado por meio de penetrômetros hidráulicos com capacidade de cargas verticais de até 200 KN, que realizam a cravação de instrumentos e ensaios estáticos, que vem se mostrando de grande confiabilidade.

Os principais atrativos do ensaio são o registro contínuo da resistência à penetração, fornecendo uma descrição detalhada da estratigrafia que refere-se ao estudo das camadas ou estratos de solo e rochas, analisando sua composição, organização e histórico geológico.

Dentre vários métodos de ensaios de campo existentes, o CPTu destaca-se por registrar de maneira contínua as leituras de cravação, sendo elas (i) resistência de ponta (Q_c), (ii) atrito lateral (F_s) e a (iii) poropressão (u), que fornece uma descrição detalhada da estratigrafia do subsolo sem a necessidade de coleta prévia de amostras. Além disso, serve de base no auxílio para uma interpretação satisfatória e confiável desses ensaios, pois proporciona diversas informações para uma análise dos tipos de comportamentos e consequentemente, a resistência ao cisalhamento (Schnaid, 2012, p.63).

A cravação de piezocone, utilizada para reconhecimento de propriedades geotécnicas do subsolo, é um método de sondagem utilizado em todo o mundo por permitir a determinação dos parâmetros citados acima. A escolha da cravação de piezocone como método de investigação se justifica pela sua capacidade de fornecer um perfil detalhado das condições de pressão de poro ao longo da profundidade. A presença de excesso de poropressão pode ser um indicativo de risco de instabilidade, uma vez que elas influenciam diretamente na resistência efetiva do solo, um dos fatores críticos para a manutenção da segurança da barragem. Além disso, o piezocone pode detectar variações de compacidade e densidade dos materiais de rejeito, que afetam diretamente seu comportamento mecânico. Robertson e Cabal (2022), na publicação *Guide to cone penetration testing*, abordam como os ensaios de CPTu ajudam a identificar variações na compacidade e densidade dos materiais, especialmente em rejeitos, ampliando as discussões sobre a utilização do piezocone para identificar variações no comportamento mecânicos de solos. Essa publicação e contribuição científica corroboram a importância desse método de sondagem como ferramenta essencial na análise geotécnica de barragens.

As medidas contínuas de resistência de ponta e atrito lateral ao longo da profundidade, associadas ao monitoramento da poropressão, permitem a identificação das camadas de solo, mesmo com baixa espessura. Conforme Robertson (2009), sabe-se que os solos arenosos tendem a ter alta resistência de ponta e baixa taxa de atrito lateral e os solos argilosos tendem a ter baixa resistência de ponta, alta taxa de atrito lateral e poropressão significativamente alta em camadas argilasas.

Isso acontece devido às características específicas dos materiais e a forma como eles respondem à penetração do cone e ao atrito gerado ao longo do equipamento. As areias resistem mais à penetração do cone devido a sua compacidade e a fricção interna entre as partículas, o que resulta em uma alta resistência de ponta. Devido à ausência de coesão, o atrito lateral é menor em comparação a solos argilosos, que, por apresentarem características como coesão e plasticidade geram maior atrito lateral, já que as partículas de argila tendem a grudar e deformar ao longo da superfície do cone. O excesso de poropressão em camadas argilasas faz com que o solo perca tensão efetiva, resultando em valores menores de resistência de ponta (Lambe, Whitman, 1979; Lunne, Robertson, Powell, 1997).

Na identificação da estratigrafia do solo, o cone elétrico amplia a sensibilidade do equipamento, permitindo a detecção de camadas de pequena espessura não registradas anteriormente com técnicas tradicionais de sondagem, como a sondagem a percussão ou métodos mecânicos convencionais. De maneira geral, esta técnica de investigação aumenta a confiabilidade nos parâmetros de resistência dos rejeitos de mineração. Os registros dos resultados dos ensaios, obtidos em tempo real, são monitorados continuamente e digitalizados, transmitidos a um computador em campo. Conforme Smits (1982 p. 871-876) o piezocone passou a ser considerado por muitos especialistas como “o mais poderoso instrumento para determinação detalhada da estratificação dos solos”.

2.1 Sistema de aquisição e tratamento dos dados

O sistema automático de aquisição de dados, em geral, é composto por programas computacionais simples e que permitem o gerenciamento do processo de aquisição, além do armazenamento das medidas *in situ*, por meio da interação entre um conversor analógico e um computador. A partir do adentramento da sonda no solo, o instrumento envia dados diretamente para um computador portátil que para a transmissão dos dados utiliza-se um sistema de cabos, eliminando qualquer influência do operador no ensaio. Para tanto, utiliza-se um programa específico, como o Coneplot que efetua o registro de profundidades em medidas (cm) e gera de forma automática um gráfico de resistência à pressão que, a posteriori, permite uma análise, interpretação e por sua vez, subsidia tomada de decisões mais assertivas com relação ao solo em análise.

Os dados coletados em campo são salvos em arquivos digitais no computador. Para serem tratados, deve-se utilizar o CPeT-IT, software (fig. 1) detalhado que traduz e representa os dados para posterior interpretação dos dados do CPTu. Esse software coleta os dados brutos do ensaio gerando gráficos, e subsidiando os profissionais a interpretarem os gráficos em termos de tipo de comportamento.

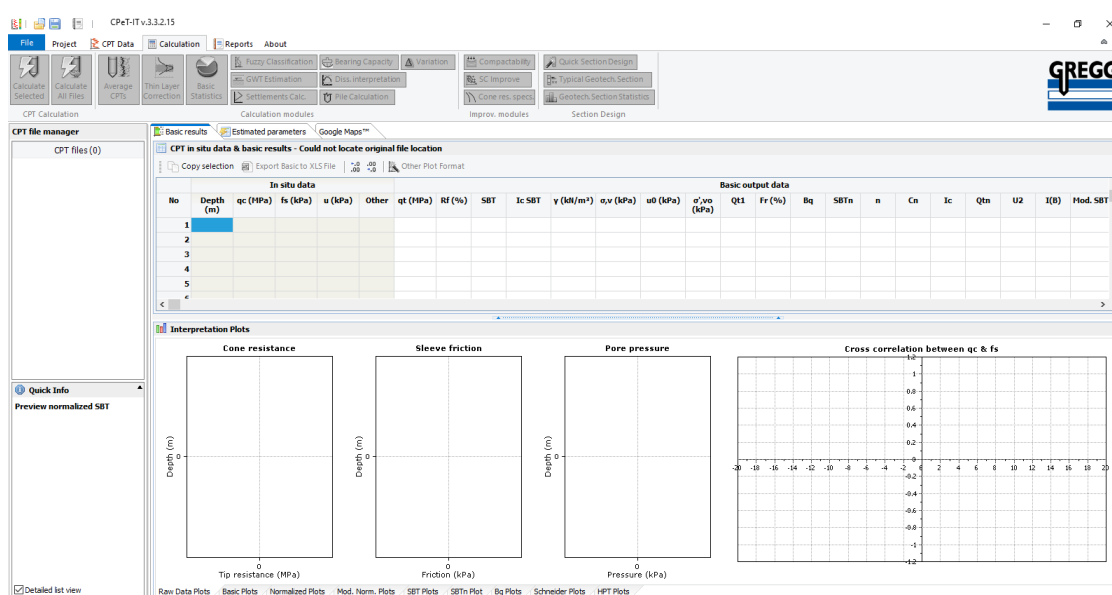


Figura 1 – Layout do software CpeT-IT utilizado para o devido tratamento dos dados.

2.2 Poropressão

Um dos elementos considerados na aplicação do experimento prático é o levantamento da poropressão, compreendida como a pressão exercida pela água presente nos poros de um solo. A compreensão desta é fundamental para entender como o solo se comporta sob diferentes condições de carga e saturação. Sua variação determina a diferenciação dos materiais de uma determinada camada de solo, que pode ser feita com base em suas propriedades físicas e mecânicas (solos granulares e coesivos).

Solos com estrutura física granulares apresentam alta permeabilidade e baixa retenção de água, resultando em menores variações de poropressão sob carga, diferente dos solos coesivos, que tem alta retenção de água e, portanto, podem apresentar variações significativas de poropressão estando diretamente relacionada com a resistência ao cisalhamento, alterando a capacidade de carga que é efetivamente suportada pelas partículas do solo. Quando a poropressão aumenta significativamente, o solo pode perder resistência, o que é um fenômeno crítico em estruturas de engenharia, como barragens. Se a poropressão atinge um nível alto, a tensão efetiva no solo diminui, resultando na ruptura da estrutura. Lambe e Whitman (1979) explicam que a tensão efetiva é a diferença entre a tensão total e a poropressão, esse entendimento é fundamental para entender a resistência ao cisalhamento do solo.

Nas análises dos resultados de CPTu, as informações são complementadas por meio das medidas de poropressões geradas durante o processo de cravação. As medidas contínuas de resistência ao longo da profundidade, associadas à extrema sensibilidade observada no

monitoramento das poropressões, possibilitam a identificação precisa das camadas de solo (Schnaid, 2012, p.85). As medidas contínuas de resistência e poropressão não apenas permitem a identificação das camadas de solo, mas também são fundamentais para a tomada de decisão em projetos de engenharia, podendo sinalizar a necessidade de mudanças de projeto. Entretanto, no contexto de barragens de rejeitos, essas medidas não devem ser realizadas apenas uma vez. De acordo com a prática geotécnica recomendada, esses ensaios podem ser realizados de maneira inicial, como parte do estudo de viabilidade e projeto, mas devem ser complementados por campanhas periódicas de monitoramento. Portanto, ao tratar de barragens, é fundamental especificar que o monitoramento por CPTu deve ser integrado em um plano de gerenciamento contínuo da segurança da estrutura, especialmente aquelas construídas pelo método a montante. Assim, medições contínuas ou reavaliações em intervalos regulares tornam-se indispensáveis para garantir a segurança.

2.3 Classificação dos solos

Os solos podem ser classificados de diferentes maneiras, isto de acordo com cada ramo da ciência. Na Engenharia Civil, a exemplo, pode-se pautar a classificação do solo com base no comportamento mecânico (como o solo se comporta sob cargas e forças externas aplicadas no solo). Essa classificação envolve a análise da resistência ao cisalhamento, compressibilidade e deformabilidade dos solos, permitindo que engenheiros determinem como um solo suportará estruturas e fundações. Outra maneira de análise é descrever o comportamento do solo levando em consideração a classificação granulométrica pautada no campo da pedologia e a plasticidade (capacidade do solo de se deformar sem fraturar quando uma força é aplicada). No caso do CPT, as grandezas medidas são de resistência de ponta e o atrito lateral, sendo a razão de atrito (R_f) o primeiro parâmetro derivado do ensaio utilizado para a classificação dos solos (Schnaid, 2012, p.83).

Nesse sentido, Begemann (1965, p.8-15) propôs uma grandeza que relaciona a resistência de ponta e o atrito lateral ao longo da profundidade, denominada razão de atrito, por meio da expressão abaixo:

$$FR (\%) = 100 (FS/QC)$$

FR: Razão de atrito, expressa em porcentagem (%).

FS: Força de atrito lateral medida durante o ensaio.

QC: Resistência de ponta medida durante o ensaio.

O professor Robertson (2009), reconhecido por suas contribuições documentadas em artigos acadêmicos e apresentações em simpósios (*2nd International Symposium on Cone Penetration Testing*) aos estudos de ensaios CPTu passa a utilizar uma nova forma de determinar o comportamento do solo (*soil behaviour type* - SBTn) baseando-se em valores obtidos para a resistência de ponta e razão de atrito (fig. 2 abaixo).

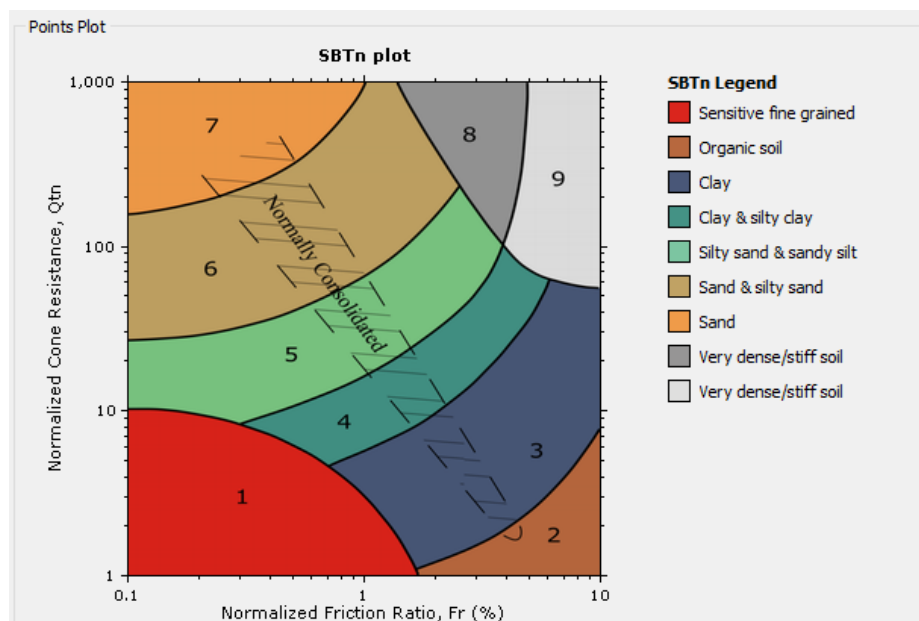


Figura 2 - Gráfico do tipo de comportamento do solo (SBTn) segundo Robertson (2009).

Com base no gráfico de classificação do comportamento do solo, usa-se os termos tradicionais areia, silte e argila. Vale lembrar, porém, que o solo não é homogêneo, e o comportamento será determinado pelo nível de plasticidade encontrado ali. Um solo pode apresentar uma porcentagem maior de areia do que de argila, por exemplo, mas se essa argila possui alta plasticidade, o comportamento *in situ* do solo será controlado pela argila e não pela areia. Por isso, é possível dizer que há uma diferença entre o comportamento do solo (SBTn) e os sistemas de classificação de solo com base em amostras (Robertson, 2009).

Tabela 1 - Tabela de Classificação de comportamento do solo do gráfico (SBTn)

Zona	Tipo de comportamento do Solo (SBT)
1	Sensível, graduação fina
2	Solos orgânicos - Argila
3	Argila - argila siltosa a argila
4	Misturas de silte - silte argiloso a argila siltosa
5	Misturas de areia - areia siltosa a silte arenoso
6	Areias - areia limpa a areia siltosa
7	Areia Grossa a areia densa
8	Areia muito rígida a areia argilosa
9	Muito rígido com graduação fina

Fonte: Classificação dos solos segundo Robertson (2009).

2.4 Comportamento contrátil e dilatante

Essa classificação é uma extensão das análises discutidas anteriormente sobre o comportamento do solo. O comportamento volumétrico sob carga se divide em dois principais tipos, sendo o contrátil e dilatante. Esses tipos estão relacionados com a resposta do solo ao cisalhamento, que tende a aumentar ou diminuir de volume durante a aplicação de uma tensão externa ou devido ao seu peso próprio. Robertson (2009) sugere um novo parâmetro de classificação comportamental do material, dividindo-os em regiões contráteis (refere-se à diminuição do volume do solo quando submetido a tensões externas) e dilatantes (refere-se ao aumento do volume do solo durante a aplicação de tensões). Para essa classificação, o autor criou uma atualização do diagrama (SBTn) onde o comportamento do material é dividido pela linha $CD=70$, e o comportamento arenoso e argiloso, da esquerda para direita, é determinado pelo IB (índice de comportamento modificado): acima de 32 significa que o solo tem comportamento arenoso e abaixo de 22, argiloso (ver figura 3).

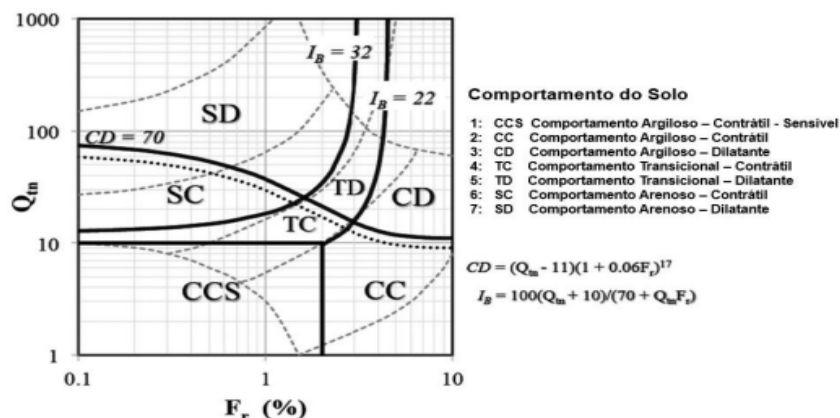


Figura 3: Proposta de atualização do diagrama (SBTn). Fonte: Adaptado de Robertson (2009).

A relação entre o comportamento volumétrico (contrátil e dilatante) e a classificação do solo é de suma importância para a compreensão das propriedades do solo. Essa análise oferece uma compreensão mais aprofundada das respostas do solo a tensões externas. Essa metodologia e suas atualizações foram apresentadas em eventos como o *2nd International Symposium on Cone Penetration Testing (2010)* e são amplamente utilizadas para análises geotécnicas e segurança em aplicações de engenharia, como na avaliação da estabilidade de barragens.

3. METODOLOGIA

Para aplicação do método proposto foi selecionada uma barragem de rejeitos localizada no complexo Paraopeba Sul, nas proximidades da cidade de Congonhas/MG (fig. 4). Os ensaios para a obtenção dos dados foram executados em março de 2024 e, para tanto, utilizou-se o penetrômetro automotriz Mod. Crawler IV, um equipamento que executa ensaios CPTU- piezocones dotados de sensores dos três parâmetros principais já citados. Os ensaios CPTu foram realizados de forma contínua, com o penetrômetro cravando o solo a uma taxa controlada. Durante a penetração, os sensores registraram a resistência ao cone, a fricção lateral e a poropressão em intervalos regulares, permitindo a coleta de dados em tempo real. Os dados coletados durante a cravação do cone foram tratados utilizando as ferramentas oferecidas pelo CPeT-IT.

Para interpretar e relacionar a variação da poropressão com o comportamento do material, pautou-se na metodologia criada pelo professor Peter Robertson (2010 e 2016) para uma análise detalhada dos ensaios realizados em campo.



Figura 4 – Imagem do local onde foi executado o ensaio CPTu para obtenção dos resultados sobre o assunto do trabalho presente. Fonte: Imagem adaptada de Google Earth, 2024.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados dos ensaios CPTu realizados na Barragem revelam informações relevantes sobre a estratigrafia do rejeito (fig. 5). Entre 0 m e 8 m de profundidade, os ensaios identificaram uma camada de material com elevada competência mecânica, caracterizada por altos valores de resistência de ponta (q_c de até 30 MPa) e baixa geração de poropressão. A análise da classificação SBTn (fig. 6) posiciona este material predominantemente em zonas de comportamento arenoso (Zonas 6 e 7 de Robertson, 2009) e com tendência dilatante (fig. 7). Este comportamento dilatante é favorável à estabilidade da estrutura, pois indica uma tendência do material de ganhar resistência ao ser cisalhado.

Por outro lado, a espessura da camada seguinte, de 8 a 48m, apresentou taxas mais baixas de resistência, alto atrito lateral e a geração de poropressão durante a cravação. Esse comportamento é típico de materiais finos (argilosos e siltosos), que são mais suscetíveis à geração de excesso de poropressão e consequente perda de resistência sob carregamentos rápidos ou em condições não drenadas. Essa análise dos dados evidencia a variação nas propriedades do solo e suas implicações para a estabilidade da barragem.

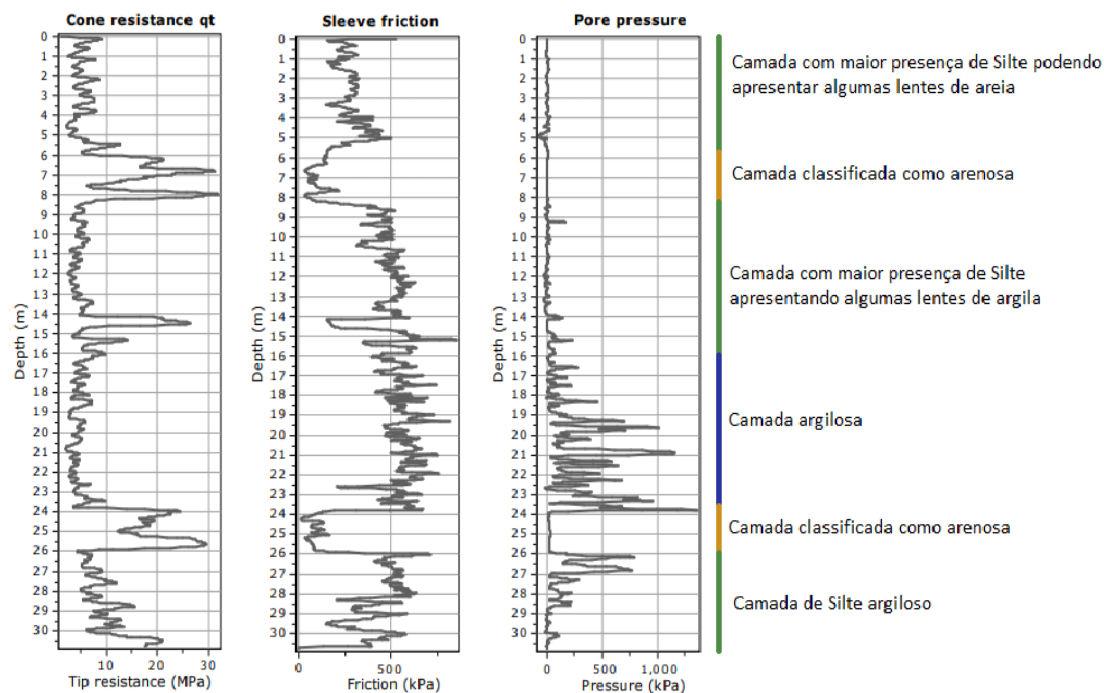


Figura 5 – Gráfico representativo dos parâmetros de resistência, atrito lateral e poropressão após um ensaio CPTu em uma barragem de rejeito. Fonte: Bruno Landi, 2024.

As adaptações de Robertson (2009 e 2016) fornecem uma representação dos comportamentos do material na área estudada (fig. 6), permitindo a classificação do comportamento do material e a avaliação do comportamento do rejeito o que, por sua vez, indica a suscetibilidade à perda ou ganho de resistência.

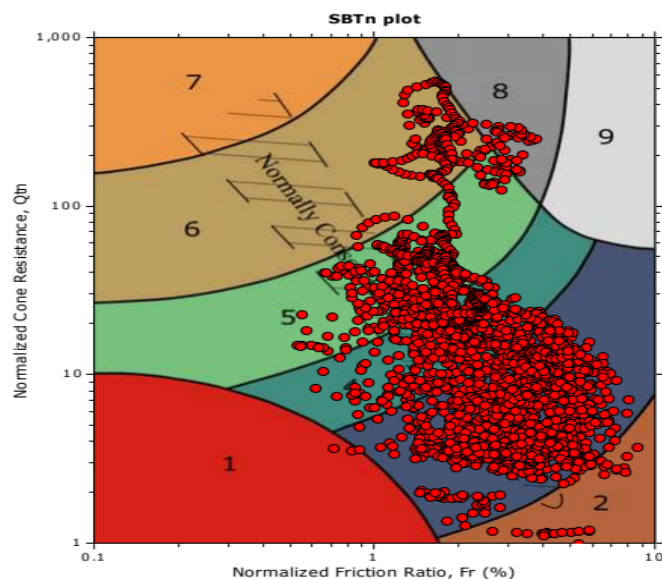


Figura 6: Diagrama SBT do local de estudo.

Os resultados dos ensaios CPTu (fig. 7) revelam que a camada superficial, com resistência elevada, apresenta um comportamento dilatante, sugerindo que este material pode resistir a tensões sem sofrer deformações volumétricas significativas. Em contraste, a camada mais profunda, com taxas mais baixas de resistência e a presença de poropressão, indica um comportamento contrátil. Isso sugere que esse material está mais suscetível a perda de resistência sob carga, o que pode comprometer a estabilidade da barragem.

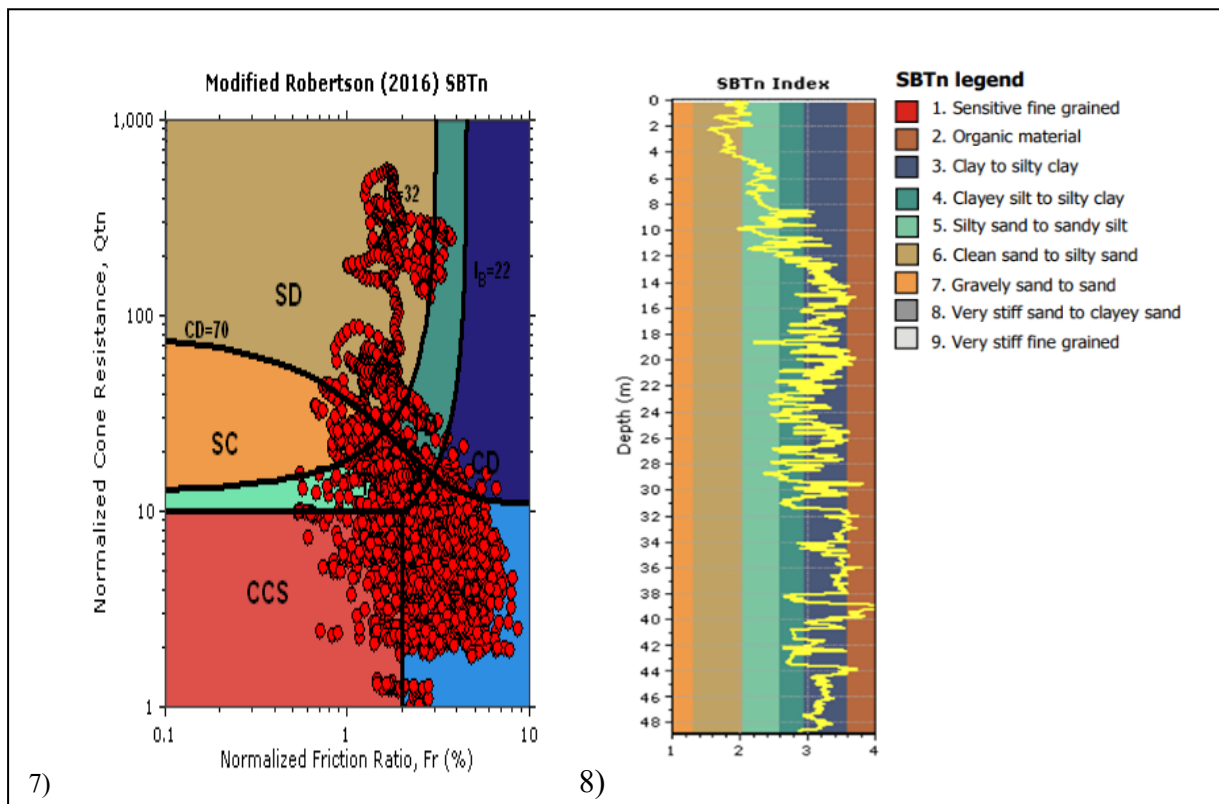


Figura 7 – Diagrama representativo do comportamento volumétrico (7) e estratigrafia do material com base em seu comportamento (8).

A análise e interpretação dos resultados dos ensaios de CPTu mostrou-se uma ferramenta particularmente interessante para a classificação do material de uma barragem quanto ao seu comportamento. Os resultados dos parâmetros medidos por meio do ensaio de piezocone permitiram a identificação de lentes de granulometria fina, fornecendo informações sobre a resistência ao cisalhamento e estabilidade do solo devido aos excessos de poropressão.

5 CONCLUSÕES

Com base nos estudos realizados, foi possível evidenciar como os dados obtidos a partir desses ensaios são cruciais para o entendimento de estabilidade de barragens, visto que permitem uma avaliação precisa das características do comportamento dos solos que compõem essas estruturas.

Os resultados obtidos indicam a presença de camadas com diferentes características de resistência e comportamento, evidenciando a complexidade do perfil dos rejeitos que compõem a estrutura. Em particular, observou-se que a camada superficial (0 a 8 m) é caracterizada por alta resistência de ponta, classificando-se, segundo os diagramas de Robertson (2009, 2016), predominantemente em zonas de comportamento dilatante (SD - *Sand-like, Dilative*). Essa condição é favorável à estabilidade, pois indica que o material tende a aumentar de volume e ganhar resistência quando submetido ao cisalhamento.

Essa condição é benéfica para a estabilidade da barragem, pois sugere que essa camada pode suportar a carga sem apresentar deformações volumétricas significativas. Em contraste, as camadas mais profundas (8 a 48 m) apresentam menor resistência de ponta e valores de Q_t e F_r que as posicionam, nos diagramas de classificação, em zonas de comportamento contrátil (CCS - Clay-like, Contractive, Sensitive e SC - Sand-like, Contractive). A alta geração de poropressão observada durante o ensaio nesses níveis corrobora a presença de materiais finos e de baixa permeabilidade. O potencial de comportamento contrátil indica que, sob carregamento não drenado, esses materiais são suscetíveis à liquefação ou à perda significativa de resistência, representando um ponto de atenção para a segurança da estrutura. Esse comportamento indica que, sob um carregamento não drenado (como um sismo ou uma elevação rápida do nível d'água), o material tende a contrair, gerando poropressão positiva que reduz a tensão efetiva e, consequentemente, sua resistência, o que poderia comprometer a estabilidade da estrutura.

A análise do comportamento volumétrico, conforme o Sistema de Classificação do Comportamento do Solo (SBTn) proposto por Peter Robertson (1990) mostrou-se importante nesse contexto, pois permitiu interpretar as interações entre os parâmetros medidos, como resistência à ponta, atrito lateral e poropressão. Os dados obtidos possibilitaram compreender que a área em questão se mantém estável, mas não eximem de outros testes a posteriori, a fim de monitorar e garantir maior confiabilidade nas estruturas. Este estudo reforça a necessidade de investigações contínuas e a utilização de métodos cada vez mais precisos para avaliar o comportamento dos solos em barragens de rejeitos, destacando o papel crucial do monitoramento da poropressão e da análise dos comportamentos contráteis e dilatantes para o sucesso de obras de engenharia.

4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BEGEMANN, H. K. S. The friction jacket cone as an aid in determining the soil profile. In: **Proceedings of the 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**, ICSMFE, Montreal, September (pp. 8-15), 1965.

LAMBE, W. WHITMAN, R. **Soil mechanics**. Massachussets Institute of Technology, 1969.

Lei nº 23.291, de 25/02/2019. Institui a política estadual de segurança de barragens. Disponível em: <https://www.almg.gov.br/legislacao-mineira/texto/LEI/23291/2019/>

LUNNE, T. ROBERTSON, P. POWELL, J. **Cone penetration testing in geotechnical practice**. 1st edition: CRC Press, London, 1997.

PINTO, C. **Curso básico de mecânica dos solos**. 3a edição: São Paulo, Oficina de textos, 2006.

ROBERTSON, P.K. Cone penetration test (CPT)-based soil behaviour type (SBT) classification system - an update. **NRC Research Press**, Can. Geotech. J, v.53, p.5-6, 2016.

ROBERTSON, P.K. CABAL, K. **Guide to penetration testing**. Signal Hill, CA: Gregg Drilling LLC, 7th edition, 2022.

ROBERTSON, P. K. Interpretation of cone penetration tests - a unified approach. **Canadian Geotechnical Journal**, 46: 1-19, 2009.

ROBERTSON, P.K. Soil Classification using the Cone Penetration Test. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 27, n.1, p. 151-158, 1990.

SCHNAID, F. **Ensaio de Campo e suas aplicações à engenharia de Fundações**. 2a edição: São Paulo, Oficina de textos, 2012.

SMITS, F.P. Penetration pore pressure measured with piezometer cones. **Proceedings of the Second European Symposium in Penetration Testing (ESOPTII)**, Amsterdam, v. 2, p. 871-876, 1982.