REVISTA TÓPICOS
ISSN 2965-6672 | Qualis A2

CLASSIFICAÇÃO DO COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO E OBTENÇÃO DE PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE REJEITOS DO BENEFICIAMENTO DO MINÉRIO DE CARVÃO ATRAVÉS DE CORRELAÇÕES PROPOSTAS PARA ENSAIO COM PIEZOCONE

CLASSIFICATION OF GEOTECHNICAL BEHAVIOR AND DETERMINATION OF SHEAR STRENGTH PARAMETERS FOR COAL PROCESSING TAILINGS USING CORRELATIONS PROPOSED FOR PIEZOCONE TESTING

Engenharias • 10/11/2026

REGISTRO DOI: 10.70773/revistatopicos/794201426

Carlos Henrique Machado[1]

Rodrigo Moraes da Silveira[2]

RESUMO

A caracterização geotécnica de rejeitos do beneficiamento do minério de carvão constituiu uma etapa fundamental para a compreensão de seu comportamento geotécnico e para a estimativa de parâmetros de resistência ao cisalhamento. Este estudo avaliou o comportamento de rejeitos depositados em uma barragem localizada em Cachoeira do Sul, Rio Grande do Sul, Brasil, por meio de correlações estabelecidas na literatura técnica a partir de ensaios de campo com piezocone (CPTu). A metodologia empregou dados de dois ensaios CPTu para classificar o comportamento dos materiais quanto à textura fina, granular ou transicional, investigar a suscetibilidade à liquefação e estimar parâmetros de resistência ao cisalhamento drenada e não drenada. A análise incluiu diferentes correlações empíricas, procedimentos estatísticos descritivos e avaliação do ajuste das distribuições Normal, Lognormal e Weibull. Os resultados evidenciaram variabilidade geotécnica entre os pontos investigados: o perfil CPTu-01 apresentou predominância de comportamento argiloso, enquanto o CPTu-02 indicou comportamento predominantemente arenoso, com contribuição de materiais transicionais. A interpretação dos índices de comportamento e dos parâmetros de estado sugeriu suscetibilidade à liquefação no perfil CPTu-01. As estimativas de resistência também variaram conforme o comportamento do material e a correlação empregada, reforçando a importância da seleção criteriosa dos modelos interpretativos. De modo geral, as distribuições Lognormal e Weibull apresentaram ajustes mais adequados aos parâmetros estimados. Os resultados demonstraram o potencial do CPTu para a caracterização de rejeitos de carvão, consideradas as limitações decorrentes do número reduzido de ensaios e da natureza indireta das correlações utilizadas.

Palavras-chave: barragem; rejeito; carvão; piezocone; resistência ao cisalhamento não-drenada.

ABSTRACT

The geotechnical characterization of coal processing tailings is a fundamental step in understanding their geotechnical behavior and estimating shear strength parameters. This study evaluated the behavior of tailings deposited in a dam located in Cachoeira do Sul, Rio Grande do Sul, Brazil, using correlations established in technical literature based on piezocone (CPTu) field tests. The methodology utilized data from two CPTu tests to classify the material behavior—categorizing it as fine-grained, granular, or transitional—to investigate liquefaction susceptibility, and to estimate drained and undrained shear strength parameters. The analysis incorporated various empirical correlations, descriptive statistical procedures, and an assessment of how well the data fit Normal, Lognormal, and Weibull distributions. The results revealed geotechnical variability between the investigated locations: the CPTu-01 profile showed a predominantly clay-like behavior, whereas the CPTu-02 profile indicated a predominantly sandy behavior, with a contribution from transitional materials. The interpretation of behavior indices and state parameters suggested a susceptibility to liquefaction in the CPTu-01 profile. Strength estimates also varied depending on the material behavior and the specific correlation applied, underscoring the importance of carefully selecting interpretive models. Overall, the Lognormal and Weibull distributions provided the best fit for the estimated parameters. The findings demonstrate the potential of the CPTu for characterizing coal tailings, while acknowledging the limitations imposed by the small number of tests and the indirect nature of the correlations employed.

Keywords: dam; tailings; coal; piezocone; undrained shear strength.

1. INTRODUÇÃO

As barragens são estruturas utilizadas desde as primeiras civilizações para o armazenamento de água e o atendimento às necessidades humanas, inicialmente construídas com base em técnicas empíricas. A partir do século XX, os avanços tecnológicos passaram a incorporar de forma mais sistemática os aspectos relacionados à segurança estrutural desses empreendimentos (Silva, 2020; Rossi, 2020). Além do abastecimento de água, da irrigação, do controle de cheias e sedimentos, da navegação e da geração de energia elétrica, essas estruturas também são empregadas no armazenamento de rejeitos de mineração e resíduos industriais (Comissão Internacional de Grandes Barragens, 2008).

Apesar de sua relevância econômica e social, a ruptura de barragens pode provocar consequências ambientais e humanas significativas, em razão do volume e das características dos materiais armazenados (Rocha, 2015). Entre os eventos de maior repercussão no Brasil, destacam-se as rupturas das barragens de Fundão, em Mariana, em 2015, que ocasionou 19 mortes e afetou aproximadamente 650 km de rios utilizados para abastecimento e subsistência humana (Hatje et al., 2017), e da Barragem I da Mina do Córrego do Feijão, em Brumadinho, em 2019 (Balbino, 2022).

Esses eventos ampliaram a atenção dedicada à prevenção de riscos, à gestão de emergências e à segurança de barragens, estimulando a adoção de tecnologias e procedimentos voltados à redução de acidentes (Andrade, 2021). No Brasil, esse contexto contribuiu para o fortalecimento do marco regulatório, incluindo a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), instituída pela Lei Federal nº 12.334/2010 e alterada pela Lei Federal nº 14.066/2020. Para o setor de

mineração, destacam-se também as Resoluções nº 95/2022, nº 130/2023 e nº 175/2024 da Agência Nacional de Mineração (ANM), que estabelecem requisitos relacionados à gestão da segurança, à documentação técnica e aos planos de emergência das estruturas abrangidas pela regulamentação (ANM, 2022; ANM, 2023; ANM, 2024; BRASIL, 2010; BRASIL, 2020).

A caracterização geotécnica de barragens de rejeitos apresenta desafios associados à variabilidade espacial dos materiais e às incertezas na determinação de suas propriedades. As características do solo empregado nos aterros e dos rejeitos depositados no reservatório variam em função dos processos de construção, compactação, beneficiamento e disposição. Essas variações influenciam parâmetros como peso específico, ângulo de atrito interno e resistência ao cisalhamento na condição não drenada, tornando relevante a aplicação de métodos capazes de caracterizar o comportamento dos materiais ao longo da profundidade (Sausen Netto, 2019).

Nesse contexto, o ensaio de campo com piezocone (CPTu) constitui uma ferramenta para a investigação geotécnica de rejeitos de mineração, pois fornece informações contínuas sobre a resistência de ponta, o atrito lateral e a poropressão durante a penetração. O ensaio permite interpretar o comportamento dos materiais e estimar parâmetros geotécnicos por meio de correlações empíricas, além de contribuir para a avaliação da suscetibilidade à liquefação. Sua aplicação apresenta vantagens relacionadas à continuidade do perfil investigado, à repetibilidade das medições e ao custo-benefício da investigação, embora a interpretação dos resultados exija conhecimento técnico e controle adequado da qualidade dos dados (Saar et al., 2024).

A literatura sobre a caracterização de rejeitos por meio de correlações derivadas do CPTu concentra-se, em grande parte, em materiais provenientes do beneficiamento de minérios de ferro (Aguiar, 2022; Balbino, 2022; Silva, 2023) e fosfato (Santos Junior et al., 2019). Para rejeitos de carvão, Hummes (2007) investigou as propriedades geotécnicas de materiais provenientes de uma carbonífera catarinense por meio de ensaios laboratoriais de compressão unidimensional em grandes dimensões, enquanto Heitor et al. (2016) estimaram a resistência ao cisalhamento não drenada de rejeitos de carvão australianos com base em ensaios triaxiais. Esse panorama evidencia a necessidade de ampliar os estudos sobre a caracterização geotécnica de rejeitos do beneficiamento do minério de carvão mediante correlações aplicadas a dados de ensaios CPTu.

Diante desse contexto, este estudo teve como objetivo caracterizar o comportamento geotécnico de rejeitos do beneficiamento do minério de carvão depositados em uma barragem localizada em Cachoeira do Sul, Rio Grande do Sul, Brasil, utilizando correlações propostas na literatura especializada para dados de dois ensaios CPTu realizados na região do reservatório. A investigação classificou os materiais quanto ao comportamento fino, granular ou transicional, avaliou sua suscetibilidade à liquefação e estimou parâmetros de resistência ao cisalhamento drenada e não drenada por meio de diferentes correlações empíricas. Adicionalmente, avaliou a variabilidade dos parâmetros estimados por meio de estatísticas descritivas e do ajuste das distribuições de probabilidade Normal, Lognormal e Weibull.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Investigação Geotécnica – Ensaio de Campo com Piezocone

O ensaio de penetração de cone (CPT) consiste na cravação contínua de um cone no solo, a velocidade constante, permitindo investigar suas características geotécnicas. Nos piezocones convencionais, a poropressão é geralmente medida por um sensor localizado na base do cone. Essas variações permitem adaptar o ensaio às condições do terreno e aos objetivos da investigação geotécnica (Schnaid, 2009; Robertson; Cabal, 2014; Schnaid; Odebrecht, 2012).

No Brasil, o ensaio CPTu era regulamentado pela ABNT NBR 12069/1991, atualmente cancelada, sendo adotada a norma americana ASTM D5778/2020 para sua execução. O ensaio fornece registros contínuos da resistência de ponta do cone (q_c), do atrito lateral (f_s) e da poropressão gerada durante a cravação (u_2), permitindo avaliar a resistência à penetração e as condições de pressão da água nos vazios do solo (Pinto, 2006).

Os valores de q_c e f_s são calculados conforme as equações (1) e (2) (Robertson; Cabal, 2014), a partir dos dados obtidos diretamente do equipamento, uma vez que dependem da área do cone utilizado.

$q_c = \frac{Q_c}{A_c}$	(1)

Onde:

q_c = resistência a penetração na ponta do cone

Q_c = força total agindo no cone

A_c = área projetada do cone

$f_s = \frac{F_s}{A_s}$	(2)

Onde:

f_s = atrito lateral superficial

F_S = força total atuando no atrito

A_s = área superficial do trecho que mede o atrito

Os valores de q_c e f_s determinados segundo as equações (1) e (2) devem ser corrigidos conforme os efeitos oriundos da geometria do cone utilizado e pela poropressão que age sobre ele, conforme disposto nas equações (3) e (4) (Robertson; Cabal, 2014).

$q_t = q_c + u_2(1 - a)$	(3)

Onde:

q_t = resistência de ponta real mobilizada ou corrigida

a = razão entre as áreas interna e externa do cone, calibrada em laboratório com valor típico entre 0,70 e 0,85

$f_t = f_s - (u_2 A_{sb} - u_3 A_{st}) / A_s$	(4)

Onde:

f_t = atrito lateral corrigido

A_{sb} = área da seção transversal do cone na base da luva

A_{st} = área da seção transversal do cone no topo da luva

u_2 = poropressão gerada medida na base da luva

u_3 = poropressão gerada medida no topo da luva, desconsiderada no presente trabalho

2.2. Classificação Comportamental do Material – Proposta de Robertson (2016)

Uma das principais aplicações do ensaio CPTu consiste na classificação do comportamento geotécnico de solos e rejeitos. Em geral, materiais de comportamento arenoso apresentam maior resistência de ponta (q_c), enquanto materiais de comportamento argiloso tendem a apresentar valores menores. Robertson (2016) propôs o sistema de classificação normalizada do comportamento do solo (*Normalized Soil Behaviour Type* – SBTn), atualizando a metodologia apresentada anteriormente (Robertson, 2010). O sistema estabelece seis tipos de comportamento, com base em parâmetros normalizados obtidos no ensaio, independentemente da composição do material. As formulações específicas da metodologia foram descritas nas Equações (5) a (10).

$Q_t = \frac{q_t - \sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}}$	(5)

Onde:

Q_t = resistência de ponta normalizada

σ_{vo} = tensão total

σ'_{vo} = tensão efetiva vertical

$F_r = 100\left(\frac{f_s}{q_t - \sigma_{vo}}\right)\%$	(6)

Onde:

F_r = razão de atrito normalizada, em %

$B_q = \frac{u_2 - u_0}{q_t - \sigma_{vo}}$; $B_q > -1,0$	(7)

Onde:

B_q = razão de poropressão

u_0 = poropressão inicial

$I_c = [(3,47 + log Q_{tn})^2 + (log F_r + 1,22)^2]^{0,5}$	(8)

Onde:

I_c = índice de classificação

Q_{tn} = resistência de ponta normalizada pelo expoente de tensão

$Q_{tn} = \left(\frac{q_t - \sigma_{vo}}{p_a}\right)\left(\frac{p_a}{\sigma'_{vo}}\right)^n$	(9)

Onde:

p_a = pressão atmosférica = 100 kPa

n = expoente linear de tensão

$n = 0{,}381(I_c) + 0{,}05(\frac{\sigma_{vo}}{p_a}) - 0{,}15; n \leq 1{,}0$	(10)

O cálculo do índice de classificação (I_c) é realizado de forma iterativa, assumindo-se inicialmente o expoente linear de tensão (n) igual a 1 para cálculo da resistência de ponta normalizada pelo expoente de tensão (Q_{tn}) até que a variação do expoente obtido entre cada iteração seja igual ou inferior a 0,01.

Robertson (2016) também classifica os solos como contráteis ou dilatantes, por meio do parâmetro CD, o qual pode ser calculado conforme a equação (11). Para valores de CD superiores a 70, o material é classificado como predominantemente dilatante, para valores de CD inferiores a 70, o material é considerado predominantemente contrátil e para valores iguais a 70, tem-se uma linha que separa os dois diferentes tipos de comportamento.

$CD = (Q_{tn} - 11)(1 + 0{,}06F_r)$	(11)

Onde:

CD = parâmetro CD, adimensional

Robertson (2016) também sugeriu um Índice de Comportamento do Solo (*Soil Behaviour Type Index* – I_B), calculado por meio da

equação (12). Para valores de I_B superiores a 32, indica-se solos arenosos (*sand-like*); para valores de I_B inferiores a 22, tem-se solos argilosos (*clay-like*) e para valores de I_B entre 22 e 32, identifica-se solos com comportamento transicional.

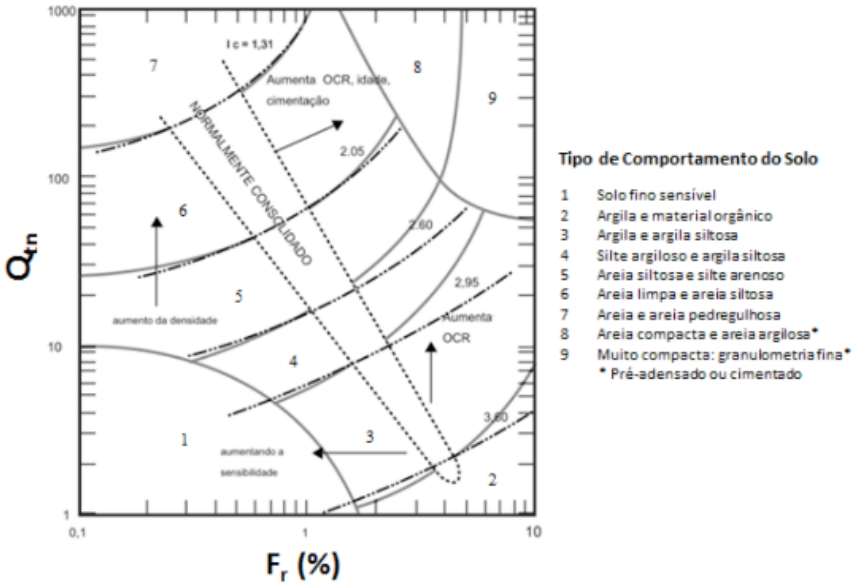
$I_B = 100(Q_{tn} + 10) / (70 + Q_{tn} F_r)$	(12)

Onde:

I_B = Índice de Comportamento do Solo

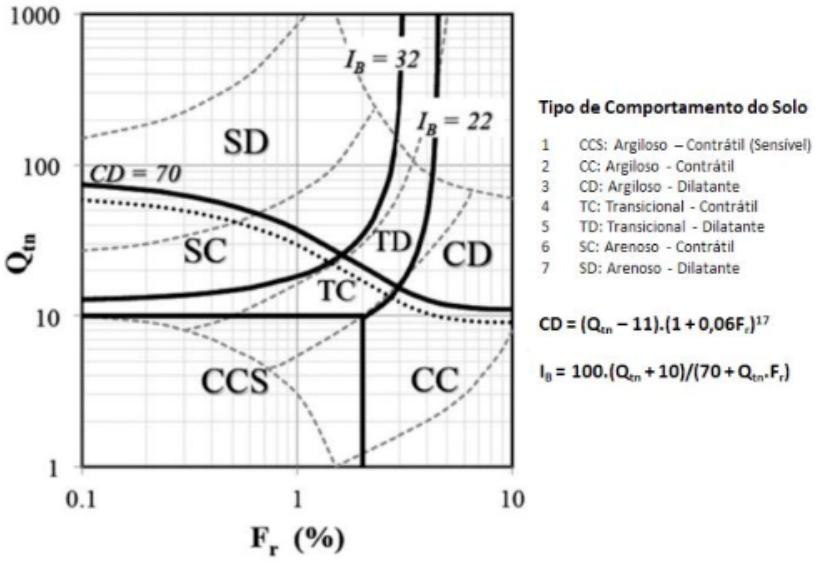
A metodologia de Robertson (2016) utiliza dois ábacos SBTn (Figura 1 e Figura 2), baseados na razão de atrito normalizada e na resistência de ponta normalizada, para classificar os materiais quanto ao comportamento argiloso (*clay-like*), arenoso (*sand-like*) ou transicional. O segundo ábaco amplia essa interpretação ao avaliar o comportamento contrátil ou dilatante, considerando os parâmetros CD e demais critérios de classificação apresentados na Tabela 1 e Tabela 2.

Figura 1. Ábaco de Classificação SBTn baseada em parâmetros de CPT normalizados de Robertson (2010)



Fonte: ROBERSTON (2010).

Figura 2. Ábaco de Classificação SBTn baseada em parâmetros de CPT normalizados de Robertson (2016)



Fonte: ROBERSTON (2016).

Tabela 1. Classificação de comportamento do solo conforme proposta de Robertson (2010)

Zona	**SBTn – Tipo de Comportamento do Solo**	I_C
1	Sensível, grão fino	N/A
2	Solos orgânicos – argila	$I_C > 3,6$

3	Argilas – argilas siltosas a argilas	$2,95 < I_C < 3,60$
4	Misturas de silte – siltes argilosos a argilas siltosas	$2,60 < I_C < 2,95$
5	Misturas de areia – areias siltosas a siltes arenosos	$2,05 < I_C < 2,60$
6	Areias – areias limpas a areias siltosas	$1,31 < I_C < 2,05$
7	Areias densas a areias com cascalho	$I_C < 1,31$
8	*Solo rígido/muito denso	N/A
9	*Solo muito rígido com grãos finos	N/A

N/A – Não se aplica

*Sobreadensado e/ou cimentado

Fonte: Modificado de ROBERTSON e CABAL (2022).

Tabela 2. Classificação de comportamento do solo conforme proposta de Robertson (2016)

Sigla	SBTn – Tipo de Comportamento do Solo
CCS	Argiloso (*clay-like*) – Contrátil e Sensível
CC	Argiloso (*clay-like*) – Contrátil
CD	Argiloso (*clay-like*) – Dilatante
TC	Transicional – Contrátil
TD	Transicional – Dilatante
SC	Arenoso (*sand-like*) – Contrátil
SD	Arenoso (sand-like) – Dilatante

Fonte: Modificado de ROBERTSON e CABAL (2022).

2.3. Estimativa do Peso Específico a Partir de Ensaios de Campo CPTu

O peso específico total (γ) de um solo é obtido de forma mais apurada por meio da extração de amostras relativamente não perturbadas por técnica como tubos Shelby. Porém, nos casos em que não se foram amostrados materiais, é possível estimar este parâmetro geotécnico por meio de resultados de CPTu, conforme proposto por Robertson e Cabal (2010) na equação (13).

$\frac{\gamma}{\gamma_w} = [0{,}27(\log R_f) + 0{,}36(\log(\frac{q_t}{p_a})) + 1{,}236] G_s/2{,}65$	(13)

Onde:

γ = peso específico total, em kN/m3

γ_w = peso específico da água = 10 kN/m3

G_s = gravidade específica do solo, tipicamente igual a 2,65

2.4. Avaliação de Susceptibilidade à Liquefação a Partir de Ensaios de Campo CPTu

A liquefação constitui uma das principais causas de ruptura de barragens de rejeitos, especialmente daquelas construídas pelo método de montante, devido à deposição de materiais soltos e saturados, suscetíveis à perda de resistência sob carregamentos não drenados (Oliveira, 2020). Esse fenômeno ocorre quando o aumento da poropressão reduz as tensões efetivas e a resistência ao

cisalhamento a níveis inferiores às tensões atuantes, podendo provocar o comportamento fluido do material e o colapso da estrutura (Morris, 1983; Miranda, 2018). Embora barragens suscetíveis possam permanecer estáveis por longos períodos, fatores construtivos, operacionais e externos podem desencadear rupturas inesperadas, reforçando a importância da avaliação da suscetibilidade à liquefação e do monitoramento contínuo dessas estruturas (Freire Neto, 2009; Oliveira, 2020).

A metodologia de Robertson (2016) classifica os materiais em três grupos: *sand-like*, associado a comportamento arenoso, não plástico e drenado; *clay-like*, relacionado a comportamento argiloso, plástico e não drenado; e transicional, que apresenta características intermediárias. A suscetibilidade à liquefação pode ser avaliada com base na linha CD = 70, que separa comportamentos dilatantes e contráteis, sendo estes últimos potencialmente suscetíveis ao fenômeno (Figura 2).

Jefferies e Been (2006) propõem avaliar a suscetibilidade à liquefação com base na teoria do estado crítico, utilizando o parâmetro de estado (ψ) e sua correlação com dados de CPT. Esse parâmetro representa a diferença entre a condição inicial do material e seu estado crítico, considerando fatores como densidade relativa, índice de vazios e tensão confinante. Estudos de Jefferies e Been (1985), realizados com areias contendo diferentes teores de silte e submetidas a distintas condições iniciais, identificaram comportamentos associados à Linha de Estado Crítico (LEC).

Com isso, eles propuseram o uso do Parâmetro de Estado (ψ) para correlacionar o índice de vazios inicial (e_0) em campo com o índice de vazios no estado crítico ou permanente (e_{ep}), para uma mesma

tensão de confinamento. Essa correlação é expressa pela equação (14) a seguir:

$\psi = e_0 - e_{ep}$	(14)

Onde:

ψ = parâmetro de estado, adimensional

e_0 = índice de vazios do material in situ antes do cisalhamento e para uma dada tensão confinante, adimensional

e_{ep} = índice de vazios do material para a condição de estado permanente, sob a mesma tensão confinante, adimensional

Para Robertson (2010), é possível estimar o valor do parâmetro de estado com base na equação simplificada (15), a qual possui relação com a resistência de ponta normalizada e corrigida para areia pura ($Q_{tn,cs}$), cujo cálculo está demonstrado na equação (23).

$\psi = 0,56 - 0,33 log Q_{tn,cs}$	(15)

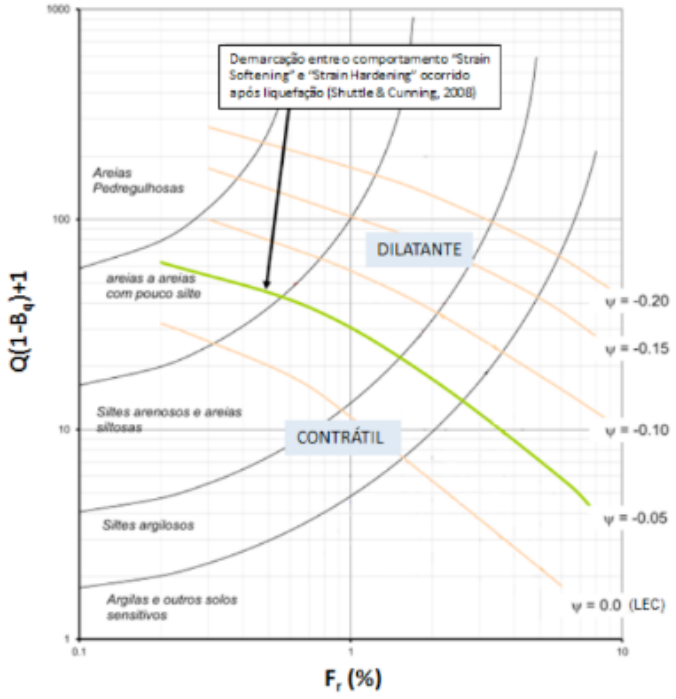
Onde:

$Q_{tn,cs}$ = resistência de ponta normalizada e corrigida para areia pura, usualmente em kPa.

Shuttle e Cunning (2008), por meio de modelagens numéricas de ensaios CPTu realizados em câmaras de calibração, mostraram que rejeitos com ψ > -0,05 exibem comportamento contrátil e,

portanto, são suscetíveis à liquefação. Por outro lado, materiais com ψ < -0,05 demonstram comportamento dilatante, o que os torna não suscetíveis à liquefação. Jefferies e Been (2006) confirmaram esses limites com uma série de resultados experimentais e propuseram a seguinte relação (Figura 3).

Figura 3. Avaliação da Suscetibilidade à Liquefação proposta por Jefferies e Been (2006)



Fonte: modificado de Jefferies e Been (2006).

2.5. Estimativa da Resistência Ao Cisalhamento Não Drenada

A resistência ao cisalhamento não drenada de pico varia conforme a direção do carregamento, a anisotropia, a taxa de deformação e o histórico de tensões, exigindo que sua estimativa por ensaios in situ considere fatores empíricos e possíveis efeitos de perturbação das amostras. Para materiais suscetíveis ao amolecimento e à liquefação, também é necessário estimar a resistência não drenada residual ou liquefeita, correspondente a grandes deformações (Robertson, 2022).

Nesse contexto, diferentes autores propuseram correlações para estimar essas resistências a partir de ensaios geotécnicos.

Olson (2001) analisou 33 casos históricos de ruptura por liquefação para estabelecer correlações entre resultados de CPTu e resistências ao cisalhamento não drenadas de pico e residual. As correlações propostas aplicam-se a materiais arenosos e transicionais, incluindo siltes arenosos (I_c < 2, 95), sem recomendar correções da resistência de ponta em função do teor de finos.

$\frac{S_{u,pico}}{\sigma'_{v0}} = 0,205 + 0,0143 q_{c1} \pm 0,04;\ q_{c1} \leq 6,5\ MPa$	(16)
$\frac{S_{u,liq}}{\sigma'_{v0}} = 0,030 + 0,0143 q_{c1} \pm 0,03;\ q_{c1} \leq 6,5\ MPa$	(17)
$q_{c1} = q_c C_q$	(18)
$C_q = \frac{1,8}{0,8 + \left(\frac{\sigma'_{v0}}{p_a}\right)}$	(19)

Onde:

$\frac{S_{u,pico}}{\sigma'_{v0}}$ = razão de resistência ao cisalhamento não drenada de pico, adimensional

$\frac{S_{u,liq}}{\sigma'_{v0}}$ = razão de resistência ao cisalhamento não drenada residual ou liquefeita, adimensional

q_{c1} = resistência de ponta corrigida para o nível de tensões efetivas, em MPa

C_q = fator de correção proposto por Kayen et al. (1992)

Sadrekarimi (2014) avaliou a resistência ao cisalhamento não drenada de pico e residual com base em casos históricos de ruptura por liquefação e em uma base de 600 ensaios laboratoriais realizados sob diferentes condições de cisalhamento. O autor propôs correlações para as condições de pico e residual em ensaios de compressão triaxial, aplicáveis à avaliação da liquefação estática, sem abranger rupturas associadas a carregamentos dinâmicos ou deformações excessivas.

$\frac{S_{u,pico}}{\sigma'_{v0}} = 0{,}219 + 0{,}008 q_{c1} \pm 0{,}049;\ q_{c1} \leq 8\ MPa$	(20)
$\frac{S_{u,liq}}{\sigma'_{v0}} = 0{,}019 + 0{,}016 q_{c1} \pm 0{,}012;\ q_{c1} \leq 8\ MPa$	(21)

Robertson (2022) atualizou o método originalmente proposto por Robertson (2010), apresentando novas correlações para a determinação da resistência ao cisalhamento não drenada liquefeita. Para materiais de comportamento sand-like e transicional, o autor sugere a correção da resistência de ponta normalizada (Q_{tn}) por meio do fator de correção K_c , conforme indicado na equação (24), resultando na resistência de ponta normalizada equivalente para areias puras ($Q_{tn,cs}$), apresentada na equação (23) para determinação da razão de resistência ao cisalhamento apresentada em (22).

$\frac{S_{u,liq}}{\sigma'_{v0}} = 0{,}0007\, e^{Q_{tn,cs}} + \frac{0{,}03}{Q_{tn,cs}}$	(22)
$Q_{tn,cs} = K_c Q_{tn}$	(23)

$K_c = \frac{14}{1 + \left(\frac{I_c}{2{,}95}\right)^{11}}$	(24)

Quando $I_c \leq$ 1,7, o material é considerado areia pura, fato que condiciona um processo de penetração drenado, e, portanto, adota-se K_c = 1,0.

Para materiais clay-like, Lunne et al. (1997) demonstraram uma correlação empírica entre a resistência ao cisalhamento não drenada (S_u) com a resistência de ponta do cone corrigida q_t, apresentada na equação (25) a seguir:

$S_{u,pico} = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{N_{kt}}$	(25)

Onde:

N_{kt} = fator de correção do cone, o qual pode ser estimado com base em correlação com o próprio ensaio CPTu, de acordo com a proposta de Mayne e Peuchen (2022), apresentada na equação (26).

$N_{kt} = 10{,}5 - 4{,}6 \ln\left(B_q + 0{,}1\right)$	(26)

Robertson (2012) afirmou que os valores de N_{kt} variam de 10 a 18, com tendência de aumentar quanto maior for a plasticidade e a reduzir com o incremento da sensibilidade do solo. Alternativamente, o autor propôs uma forma de estimativa do N_{kt} por meio da equação a seguir:

$N_{kt} = 10{,}5 - 7 \log (F_r)$	(27)

Para argilas muito moles, Robertson e Cabal (2022) sugeriram que a resistência ao cisalhamento não drenada de pico pode ser estimada conforme equação (28).

$S_u = \frac{\Delta u}{N_{\Delta u}}$	(28)
$\Delta u = u_2 - u_0$	(29)
$N_{\Delta u} = B_q N_{kt}$	(30)

Onde:

Δu = excesso de poropressão

$N_{\Delta u}$ = fator de correção do cone devido ao excesso de poropressão

Ainda para materiais clay-like, Robertson (2022) demonstrou que a resistência ao cisalhamento não drenada liquefeita é aproximadamente igual ao atrito lateral mobilizado (f_s), com embasamento nas observações realizadas por Robertson e Campanella (1983) e Lunne et al. (1997), evidenciado na equação (31).

$\frac{S_{u,liq}}{\sigma'_{v0}} = \frac{f_s}{\sigma'_{v0}} = \frac{F_r Q_{tn}}{100}$	(31)

2.6. Estimativa da Resistência Ao Cisalhamento Drenada

Conforme Robertson e Cabal (2022), de forma simplificada, pode-se considerar a coesão efetiva (c') nula para materiais argilosos e siltosos, assim como ocorre nos materiais arenosos. Para o caso de rejeitos de mineração, boas práticas de engenharia empregam o uso de coesão nula.

Para materiais classificados com comportamento *clay-like*, Robertson e Cabal (2022) indicaram a metodologia desenvolvida pelo Instituto de Tecnologia Norueguês – *Norweigan Institute of Technology* (NTH: Senneset et al., 1989) para estimativa do ângulo de atrito interno, vide equação (32) apresentada a seguir:

$\phi = 29,5 B_q^{0,121} (0,256 + 0,336 B_q + log Q_t)$	(32)

Onde:

ϕ' = ângulo de atrito interno de pico, em graus

Já para materiais classificados como *sand-like*, Robertson e Campanella (1983) propuseram a correlação apresentada em (33) para estimar o ângulo de atrito de pico para areias não cimentadas, não envelhecidas, moderadamente compressíveis e predominantemente compostas por quartzo, com base em resultados de testes em câmeras de calibração. Para areias com maior compressibilidade (ou seja, areias carbonáticas ou areias com alto teor de mica), o método tende a prever valores de ângulo de atrito excessivamente baixos.

$tan\ \phi' = \frac{1}{2,68} [\log (\frac{q_c}{\sigma'_{v0}}) + 0,29]$	(33)

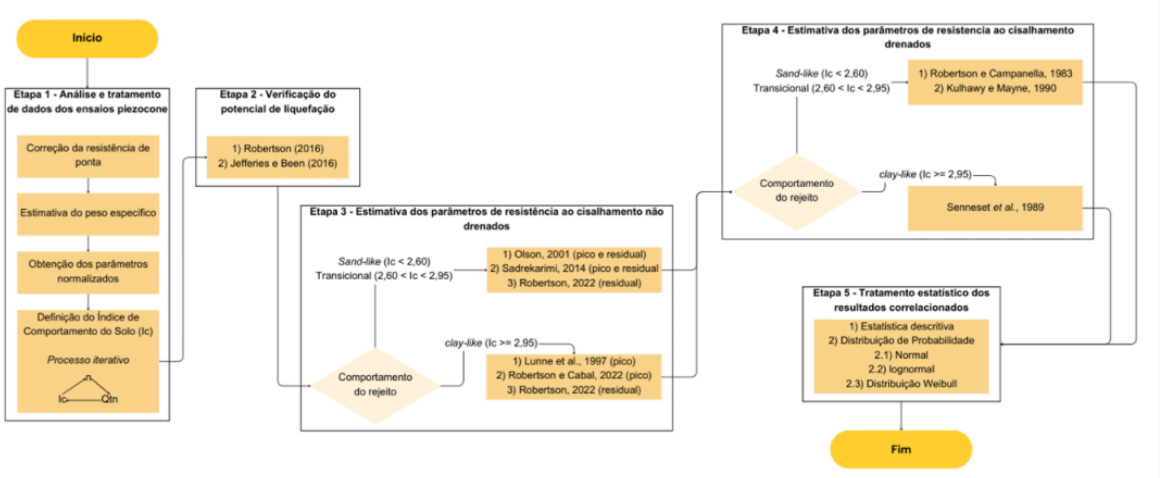
Kulhawy e Mayne (1990) desenvolveram uma correlação alternativa, disposta em (34) para areias puras, arredondadas e não cimentadas, compostas predominantemente por quartzo utilizando dados de campo de alta qualidade.

$\phi = 17{,}6 + 11\log(Q_{tn})$	(34)

3. METODOLOGIA

A metodologia compreendeu a apresentação da área de estudo e cinco etapas de análise: tratamento dos dados dos ensaios CPTu; avaliação da suscetibilidade à liquefação; estimativa da resistência ao cisalhamento não drenada; estimativa dos parâmetros de resistência drenada; e tratamento estatístico dos resultados. As correlações utilizadas estão apresentadas na Fundamentação Teórica, e a sequência dos procedimentos está sintetizada na Figura 4 e detalhada a seguir.

Figura 4. Fluxograma dos Procedimentos Metodológicos

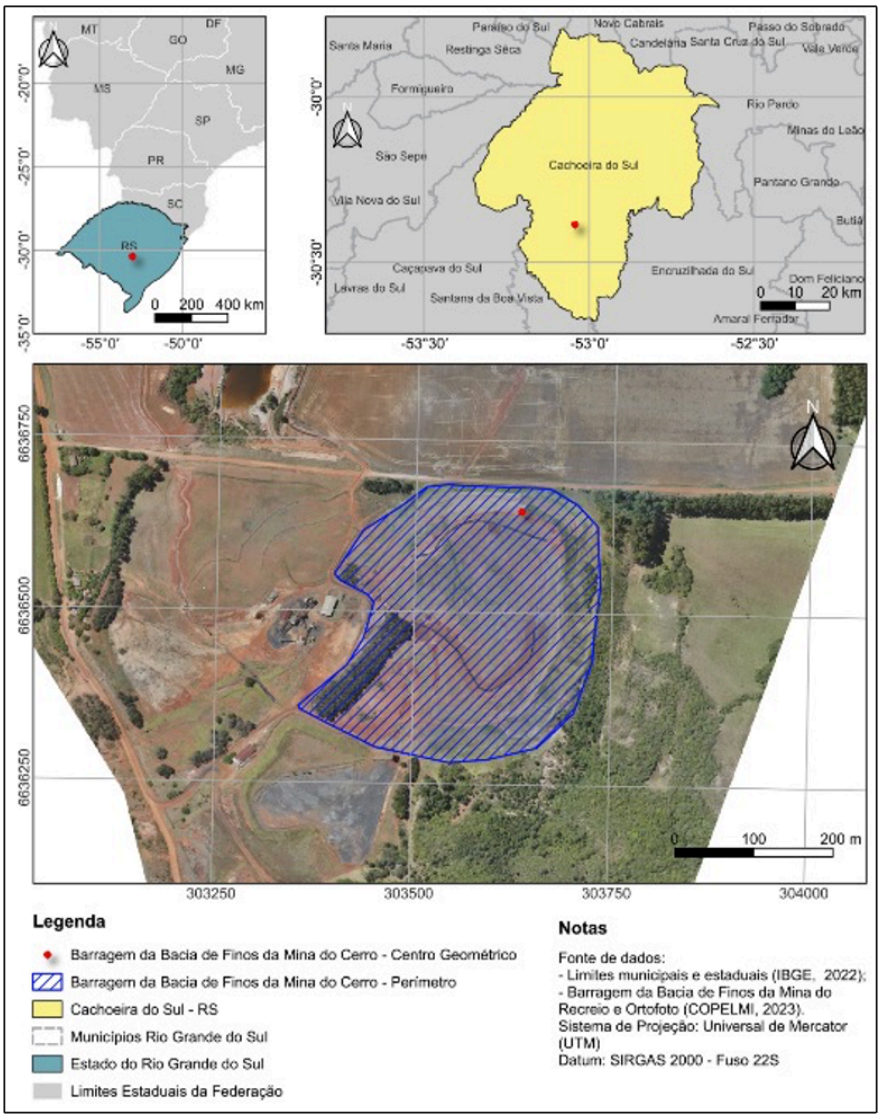


Fonte: Elaborado pelos autores, 2026.

3.1. Apresentação da Área de Estudo

A Barragem da Bacia de Finos da Mina do Cerro, pertencente à Copelmi Mineração, localizada em Cachoeira do Sul, Rio Grande do Sul (Figura 5), foi concebida como uma estrutura mista, com barramento inicial de terra e alteamentos realizados predominantemente com rejeitos do beneficiamento de carvão. Sua fundação é composta por materiais de bota-fora da mineração e rochas sedimentares, como siltitos, argilitos e arenitos finos, sem dados granulométricos que permitam distinguir as proporções de solo e rejeito. Por volta de 2010, a barragem foi alongada ao norte para ampliar sua capacidade de armazenamento, apresentando altura entre 3 e 10 m, crista de aproximadamente 700 m de extensão, largura média de 6 m e taludes com inclinação de 1V:2,5H. A disposição de rejeitos foi encerrada no início de 2014 e, posteriormente, foram executadas obras de reforço do talude de jusante, cobertura do reservatório com material argiloso e implantação de sistemas de drenagem interna e superficial, concluídas em abril de 2020 (GEOMZ, 2023).

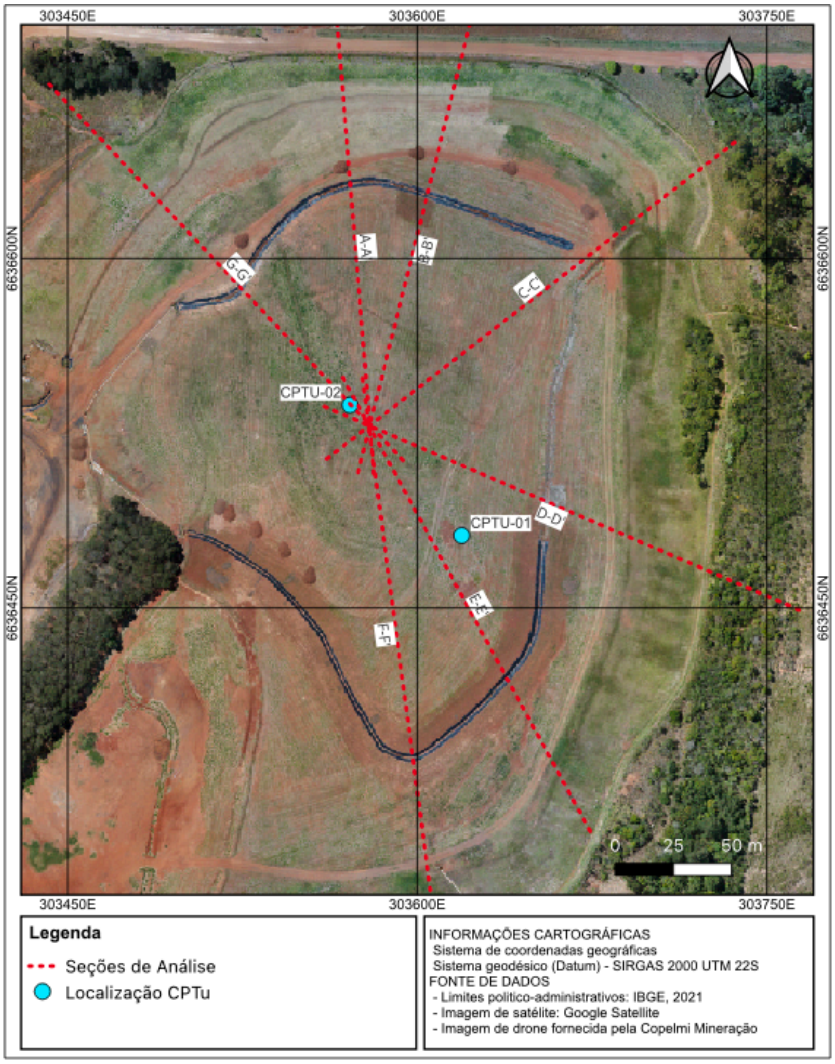
Figura 5. Mapa de Localização da Barragem da Bacia de Finos da Mina do Cerro



Fonte: Elaborado pelos autores, 2026.

Em 2019, foram realizados dois ensaios CPTu na região do antigo reservatório da Barragem da Bacia de Finos da Mina do Cerro (Figura 6). A documentação disponível não informa os critérios para definição da quantidade e localização dos ensaios, e não foram disponibilizados ensaios laboratoriais para caracterização dos rejeitos ou determinação de seus parâmetros de resistência ao cisalhamento. Dessa forma, o presente trabalho utilizou correlações com dados de CPTu para classificar o comportamento dos rejeitos, avaliar sua suscetibilidade à liquefação e estimar os parâmetros de resistência ao cisalhamento não drenados de pico e residuais para rejeitos saturados, além dos parâmetros drenados para materiais não saturados.

Figura 6. Mapa de Localização dos Ensaios Piezocone executados na Barragem da Bacia de Finos da Mina do Cerro



Fonte: Elaborado pelos autores, 2026.

3.2. Etapa 1 – Análise e Tratamento de Dados dos Ensaios Piezocone

O tratamento dos dados dos ensaios CPTu-01 e CPTu-02 compreendeu a correção da resistência de ponta, a estimativa do peso específico dos rejeitos, o cálculo das razões de atrito e de poropressão e a determinação iterativa do índice de comportamento do solo (I_c), calculados conforme disposto nas equações (3) a (10). Foram desconsideradas as leituras dos trechos de pré-furo, destinados à calibração dos equipamentos. Com os parâmetros calculados, os dados foram representados nos ábacos

SBTn, permitindo classificar o comportamento dos rejeitos e avaliar suas propriedades geotécnicas ao longo da profundidade.

3.3. Etapa 2 – Verificação do Potencial de Liquefação

A segunda etapa do presente artigo foi composta pela verificação do potencial de ocorrência do fenômeno de liquefação dos rejeitos presentes nas amostras CPTu-01 e CPTu-02 de acordo com as metodologias de Robertson (2016) e Jefferies e Been (2006). Para tal finalidade, a sequência metodológica apresentada a seguir foi adotada:

- cálculo do parâmetro CD conforme equação (11) e verificação do comportamento do material se dilatante (CD>70) ou se contrátil (CD<70);

- cálculo do índice de comportamento do solo pela Equação (12), distinguindo-o do parâmetro CD calculado pela Equação (11), e classificação do material como *sand-like* para valores do índice superiores a 32, transicional para valores entre 22 e 32 e *clay-like* para valores inferiores a 22;

- determinação do parâmetro de estado (ψ) de acordo com a equação (15) e análise do comportamento se contrátil (-0,05 < ψ < 0) ou dilatante (ψ < -0,05).

3.4. Etapa 3 – Estimativa dos Parâmetros de Resistência Ao Cisalhamento Não Drenada

Na terceira etapa, estimaram-se as resistências ao cisalhamento não drenadas de pico e residual dos rejeitos investigados nos furos CPTu-01 e CPTu-02. Para materiais com comportamento *sand-like* e

transicional, aplicaram-se as metodologias de Olson (2001), Sadrekarimi (2014) e Robertson (2022). Para materiais *clay-like*, utilizaram-se as propostas de Lunne et al. (1997), Robertson e Cabal (2022) e Robertson (2022), conforme as Equações (16) a (31). Nas estimativas dependentes do fator de cone Nkt, compararam-se dois cenários de cálculo desse fator: Robertson (2012) e Mayne e Peuchen (2022). Os resultados foram representados graficamente em função da profundidade.

3.5. Etapa 4 – Estimativa dos Parâmetros de Resistência Ao Cisalhamento Drenados

Para obtenção dos parâmetros de resistência ao cisalhamento drenados, relativos à porção de rejeitos que não se encontram saturados (acima da linha do nível d'água), foi considerada coesão nula (c') e ângulo de atrito (ϕ') estimado com base no método de Senneset et al. (1989) para materiais *clay-like* e Robertson e Campanella (1983) e Kulhawy e Mayne (1990) para rejeitos classificados como transicionais e *sand-like*. Também foram gerados gráficos dos valores calculados para avaliar a variação dos parâmetros calculados ao longo da profundidade dos ensaios executados.

3.6. Etapa 5 – Tratamento Estatístico dos Resultados Correlacionados

A quinta etapa compreendeu a análise estatística das razões de resistência ao cisalhamento não drenada de pico e liquefeita e dos ângulos de atrito interno efetivo estimados nas etapas anteriores. Excluíram-se razões de resistência superiores a 0,80, sob a hipótese de que esses valores poderiam não representar adequadamente o

comportamento não drenado das camadas de rejeitos. As estatísticas e os ajustes apresentados referem-se, portanto, aos conjuntos remanescentes após esse filtro. Calcularam-se número de observações, mínimo, máximo, média, mediana, desvio padrão e primeiro e terceiro quartis. Com a linguagem R, elaboraram-se histogramas com ajustes das distribuições Normal, Lognormal e Weibull, gráficos de probabilidade e gráficos quantil-quantil (Q-Q), além dos percentis de 30% a 70%. A interpretação desses resultados é condicionada ao critério de exclusão e não constitui validação independente das correlações geotécnicas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

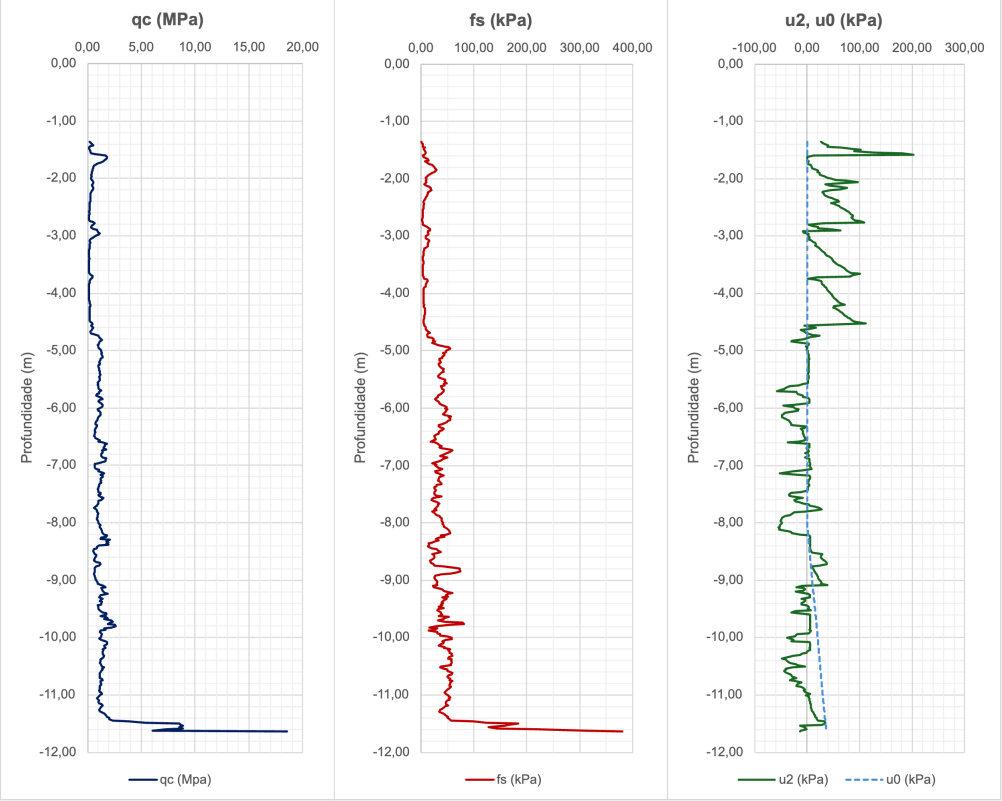
4.1. Interpretação dos Ensaios Piezocone

Neste item encontra-se apresentada a avaliação e o tratamento dos dados brutos registrados, disponibilizados pela Copelmi Mineração Ltda. O banco de dados consistiu em 515 medições de resistência de ponta, atrito lateral e poropressão medida na base da luva (q_c , f_s e u_2 , respectivamente) para o furo CPTu-01 e 393 para o furo CPTu-02, já desconsiderando os valores medidos em “pré-furo”.

No CPTu-01 (Figura 7), a resistência de ponta foi baixa, sobretudo nos primeiros 5 m, e aumentou nas camadas inferiores, atingindo aproximadamente 2,60 MPa. Os picos próximos ao final do ensaio sugerem uma camada mais resistente, possivelmente abaixo dos rejeitos. O atrito lateral apresentou tendência semelhante, com valores menores até 5 m e aumento em profundidade. A poropressão registrada tornou-se negativa a partir dessa profundidade; a atribuição desse registro à sucção permanece uma hipótese interpretativa, condicionada à qualidade da medição. Em

conjunto, os perfis sugerem comportamento predominantemente argiloso.

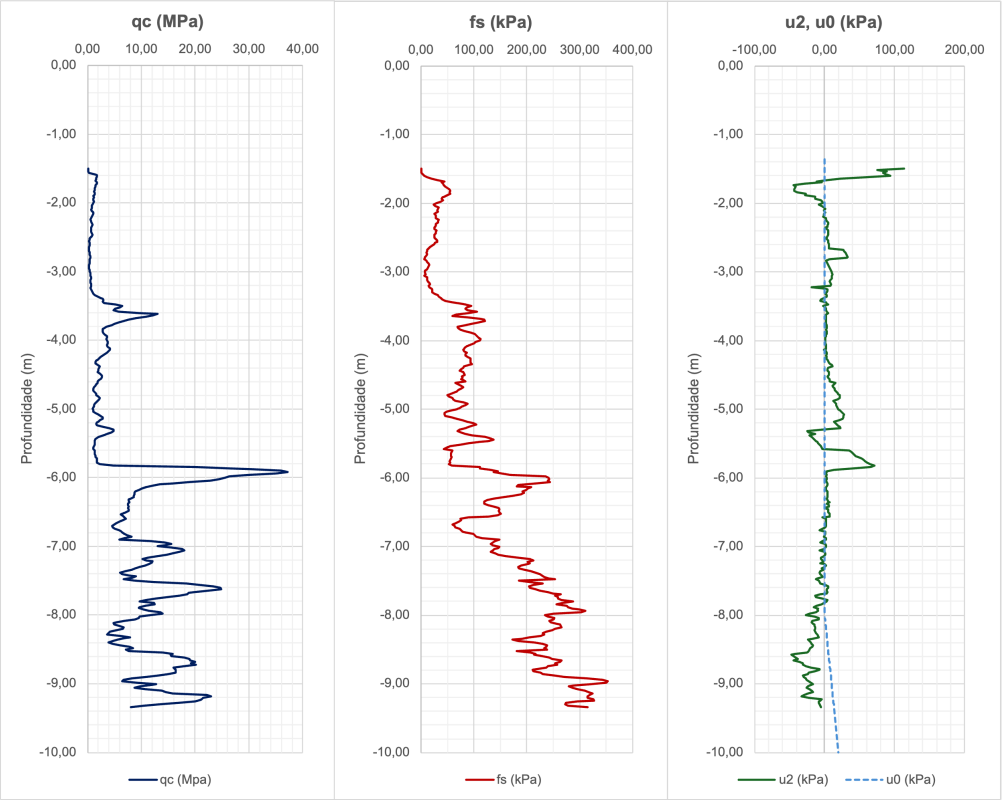
Figura 7. Gráfico da Resistência de Ponta, do Atrito Lateral e da Poropressão para o Ensaio CPTu-01



Fonte: Elaborado pelos autores, 2026.

Por outro lado, para o ensaio CPTu-02 (Figura 8), o gráfico de q_c indicou valores de resistência de ponta superiores, com destaque a um valor de pico (37,13 MPa) ao se atingir 6 m de profundidade. Os valores de f_s e u_2 também foram superiores aos indicados no furo CPTu-01. De forma geral, os perfis apresentados sugerem um material com comportamento predominantemente granular/arenoso.

Figura 8. Gráfico da Resistência de Ponta, do Atrito Lateral e da Poropressão para o Ensaio CPTu-02



Fonte: Elaborado pelos autores, 2026.

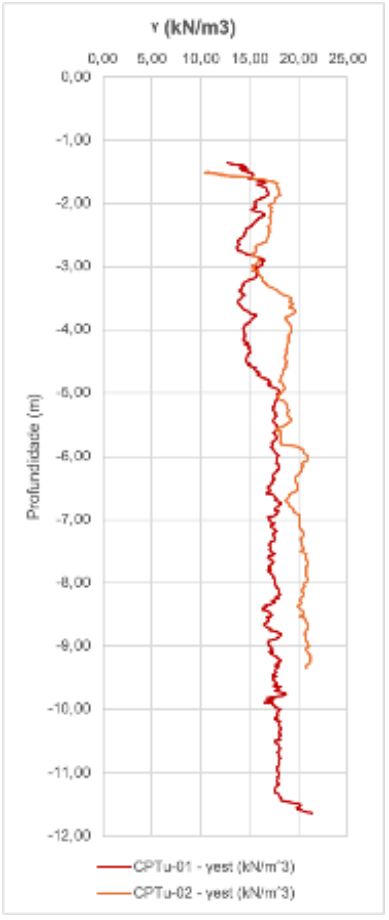
4.2. Estimativa do Peso Específico

O gráfico apresentado na Figura 9 mostra as estimativas do peso específico para os ensaios CPTu-01 e CPTu-02, ao longo da profundidade, obtidas por meio da correlação proposta por Robertson e Cabal (2010), conforme a Equação (13). No caso do ensaio CPTu-01, os valores estimados foram inferiores, predominando na faixa de 15 a 20 kN/m³. Em contrapartida, para CPTu-02, foram observados valores superiores a 20 kN/m³.

As Figuras 10 e 11 apresentam os histogramas e as estatísticas descritivas dos pesos específicos estimados. No CPTu-01, a diferença entre média e mediana sugere assimetria. No CPTu-02, a proximidade entre essas medidas indica maior simetria, mas não confirma, isoladamente, uma distribuição Normal. Na ausência de ensaios laboratoriais para determinação do peso específico, adotaram-se os valores medianos das estimativas obtidas por correlações com os ensaios de piezocone. Esses valores

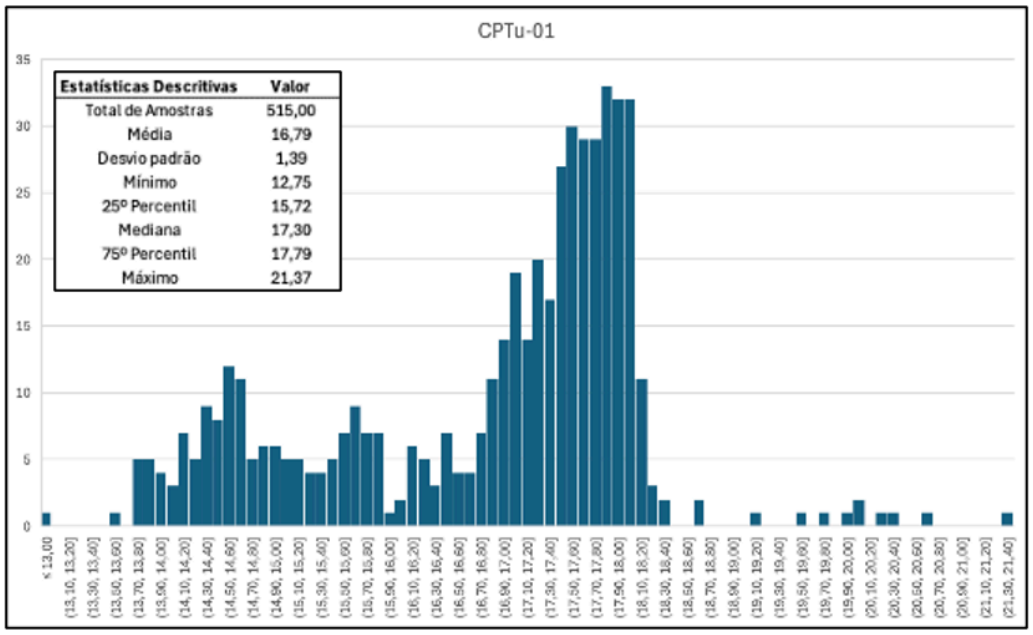
permanecem estimativas indiretas, condicionadas à correlação utilizada.

Figura 9. Gráfico estimativa do peso específico ao longo da profundidade para os ensaios CPTu-01 e CPTu-02



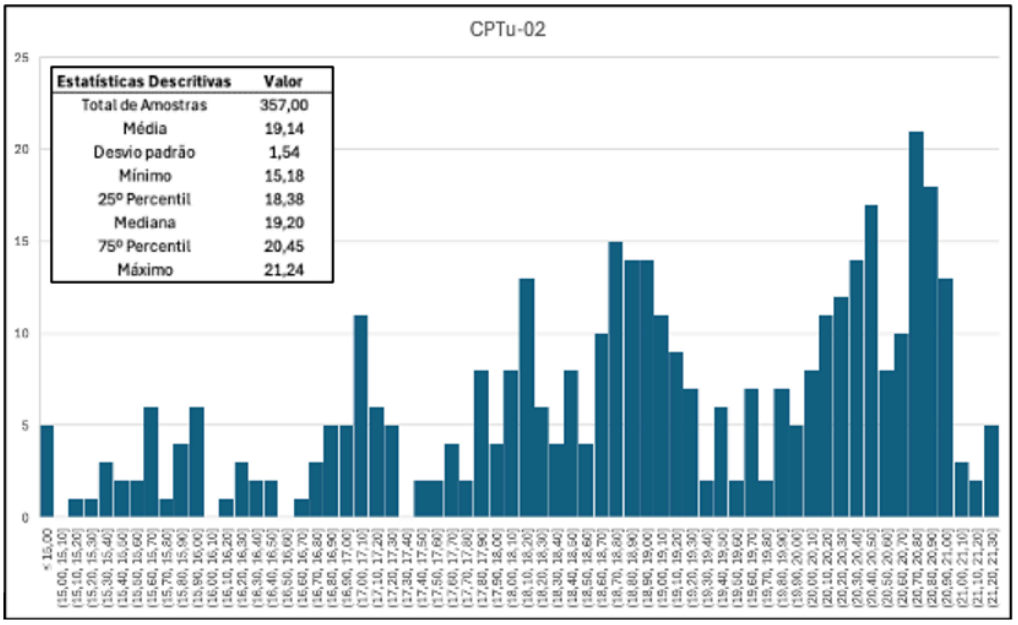
Fonte: Elaborado pelos autores, 2026.

Figura 10. Histograma de frequência do peso específico estimado – Ensaio CPTu-01



Fonte: Elaborado pelos autores, 2026.

Figura 11. Histograma de frequência do peso específico estimado – Ensaio CPTu-02



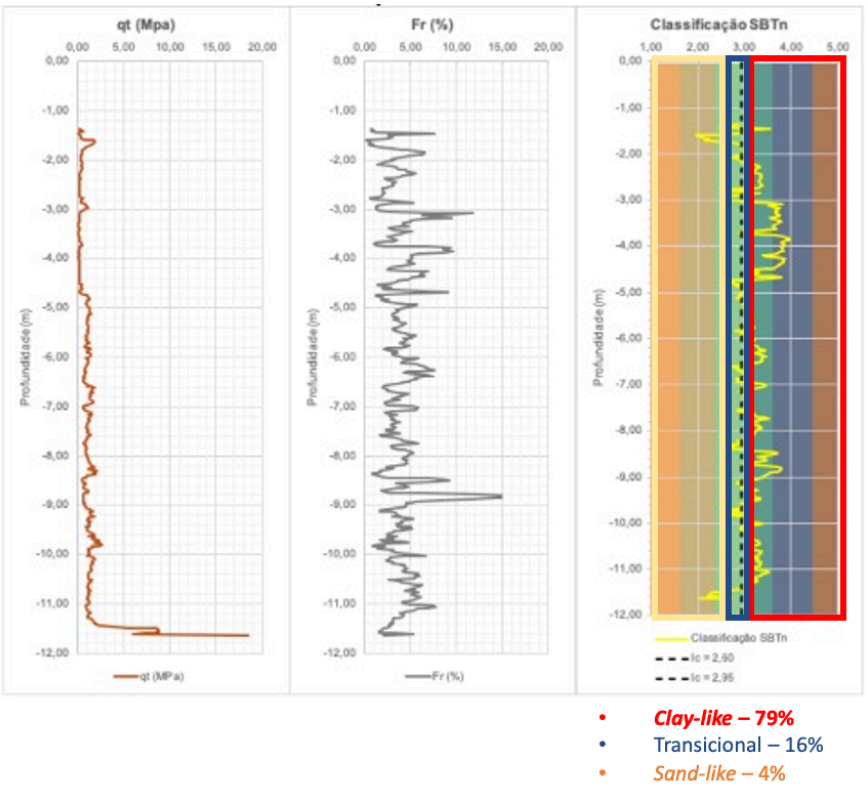
Fonte: Elaborado pelos autores, 2026.

4.3. Determinação do Índice de Classificação Comportamental dos Rejeitos

A Figura 12 apresenta a resistência de ponta corrigida, a razão de atrito normalizada e o índice de classificação comportamental do ensaio CPTu-01. A resistência corrigida apresentou comportamento semelhante ao da resistência de ponta anteriormente apresentada,

e grande parte das razões de atrito permaneceu até 10%. Das 515 leituras, 408 (79%) foram classificadas como clay-like, 84 (16%) como transicionais e 23 (4%) como sand-like. Os percentuais apresentados são aproximados. Esses resultados indicam predominância de comportamento clay-like, mas não substituem a caracterização granulométrica necessária para confirmar a textura do rejeito.

Figura 12. Resistência de ponta corrigida, razão de atrito normalizado e índice de classificação comportamental – Ensaio CPTu-01

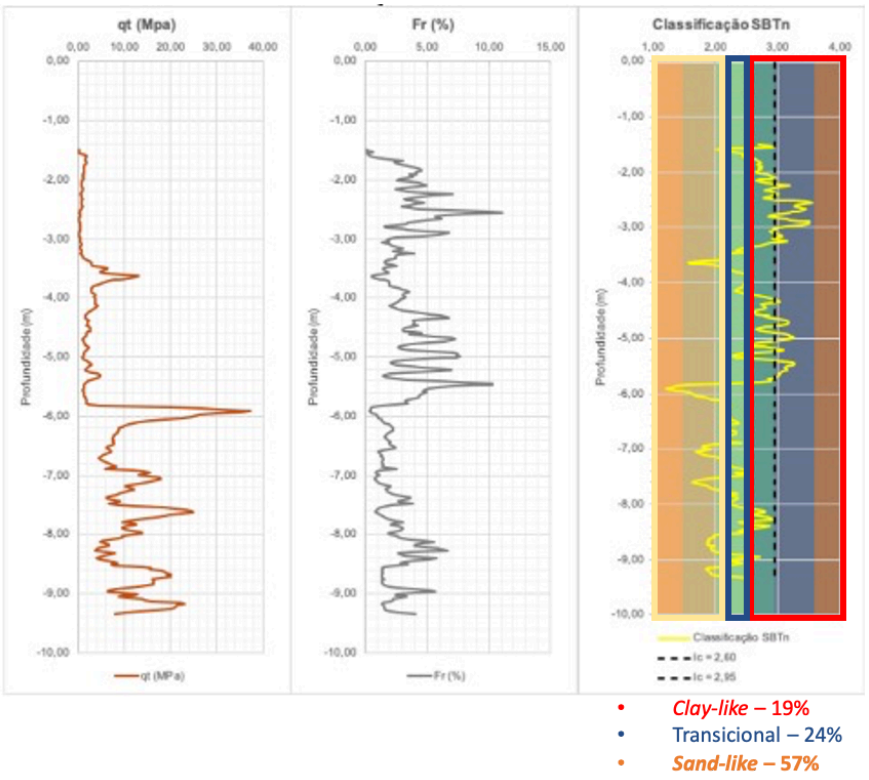


Fonte: Elaborado pelos autores, 2026.

A Figura 13 apresenta a resistência de ponta corrigida, a razão de atrito normalizada e o índice de classificação comportamental do ensaio CPTu-02. A resistência corrigida apresentou comportamento semelhante ao da resistência de ponta anteriormente apresentada, e a maioria das razões de atrito permaneceu até 10%. Das 393 leituras, 74 (19%) foram classificadas como clay-like, 94 (24%) como transicionais e 225 (57%) como sand-like. Em comparação com o

CPTu-01, o perfil apresentou maior participação de comportamento sand-like. Essa diferença comportamental não confirma, isoladamente, uma granulometria mais grossa, cuja verificação depende de caracterização direta.

Figura 13. Resistência de ponta corrigida, razão de atrito normalizado e índice de classificação comportamental – Ensaio CPTu-02



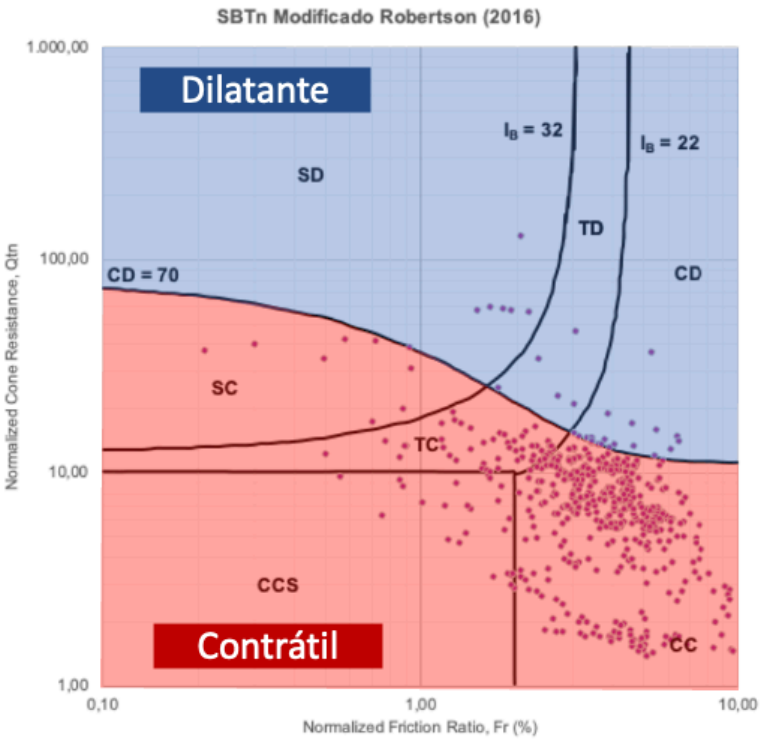
Fonte: Elaborado pelos autores, 2026.

4.4. Verificação da Suscetibilidade à Liquefação

Pelo método de Robertson (2016), o CPTu-01 apresentou predominância de comportamento argiloso e contrátil (CC), conforme a Figura 14. No CPTu-02, os pontos distribuíram-se entre as categorias dilatantes SD, TD e CD, conforme a Figura 15. Assim, entre os dois perfis e segundo esse critério interpretativo, os indícios de suscetibilidade à liquefação concentraram-se no CPTu-01. Essa interpretação se restringe aos locais investigados e não demonstra,

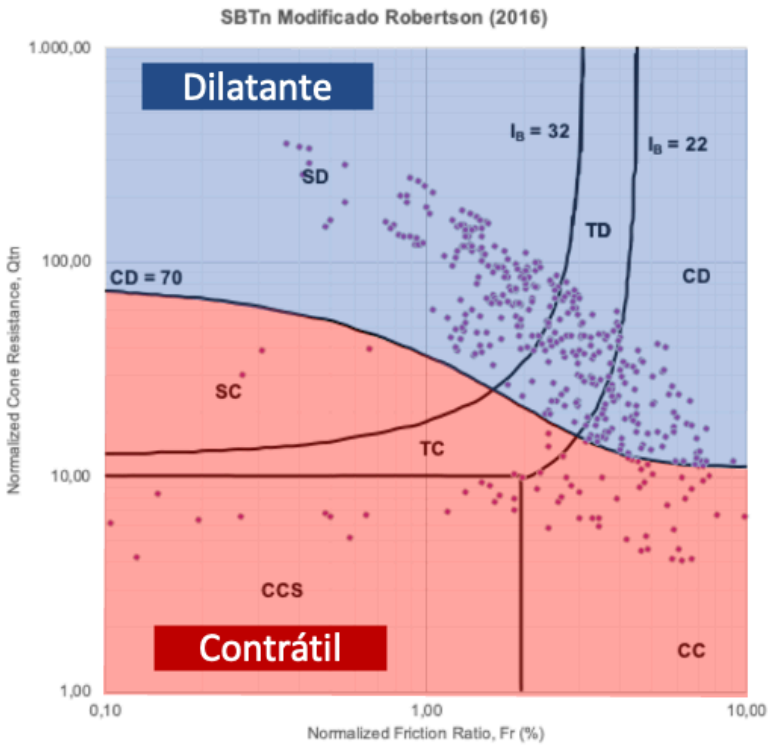
por si só, a ocorrência de liquefação ou a condição de estabilidade da barragem.

Figura 14. Ábaco SBTn – Método de Robertson (2016) – Ensaio CPTu-01



Fonte: Elaborado pelos autores, 2026.

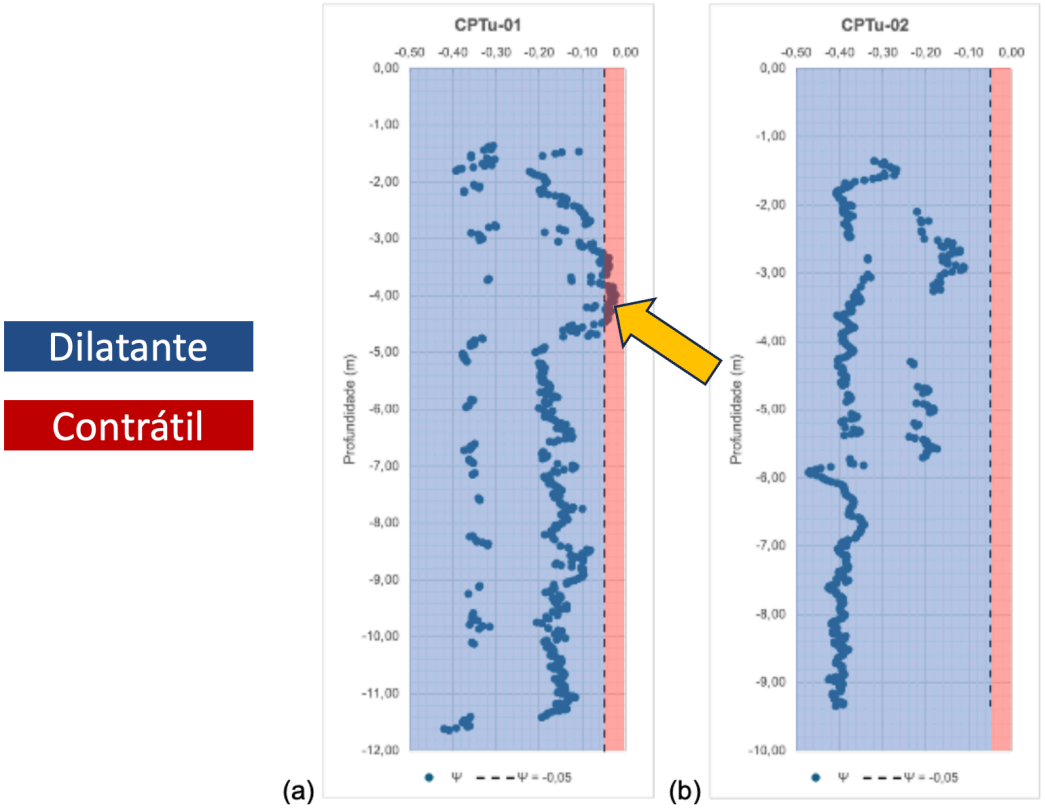
Figura 15. Ábaco SBTn – Método de Robertson (2016) – Ensaio CPTu-02



Fonte: Elaborado pelos autores, 2026.

A Figura 16 apresenta as estimativas do parâmetro de estado para os dois ensaios, interpretadas à luz do critério discutido por Jefferies e Been (2006). No CPTu-01, alguns valores entre aproximadamente 3,20 m e 4,50 m de profundidade situaram-se entre −0,05 e 0, intervalo associado ao comportamento contrátil na interpretação adotada. Fora desse trecho e em toda a profundidade analisada do CPTu-02, os valores foram inferiores a −0,05. Portanto, esse procedimento indicou suscetibilidade localizada no CPTu-01, enquanto a classificação de Robertson (2016) apontou predominância contrátil nesse perfil. Os critérios convergem quanto ao perfil que requer atenção, mas não demonstram a mesma extensão de material potencialmente suscetível.

Figura 16. Parâmetro de Estado – Ensaios CPTu-01 e CPTu-02



Fonte: Elaborado pelos autores, 2026.

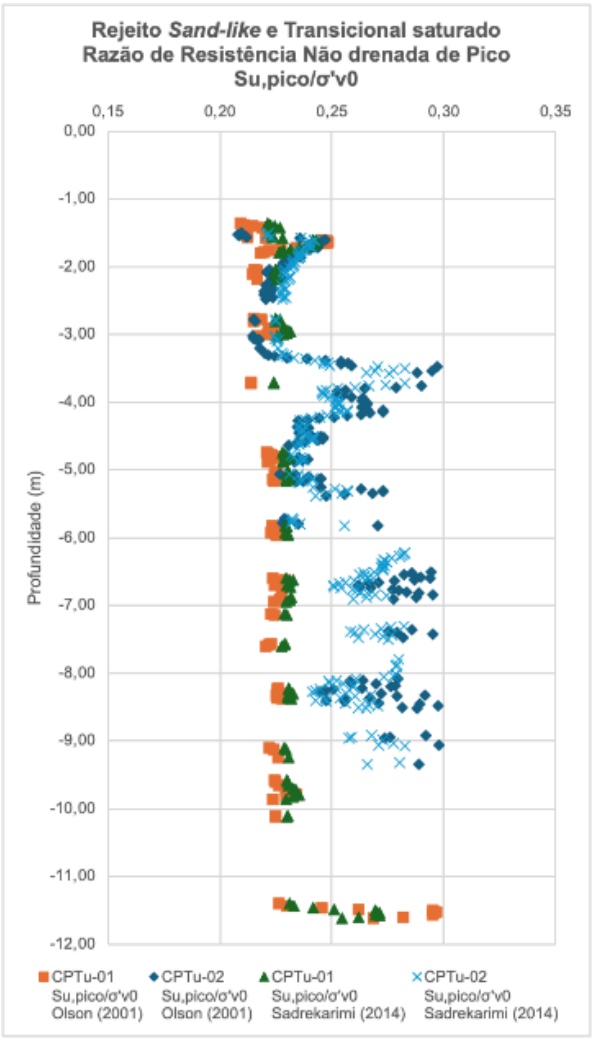
4.5. Estimativa dos Parâmetros de Resistência Ao Cisalhamento Não Drenados

Os resultados da estimativa da razão de resistência ao cisalhamento não drenada de pico ($S_u,pico / \sigma'_{v0}$) para rejeito classificado como *sand-like* e transicional ao longo da profundidade dos ensaios foram apresentados de forma gráfica na Figura 17. Observou-se que os valores de $S_u,pico / \sigma'_{v0}$ se encontraram na faixa de 0,20 a 0,30, sendo sempre superiores para CPTu-02, comparado a CPTu-01. As estimativas através método de Sadrekarimi (2014) resultou em valores ligeiramente mais elevados do que através do método de Olson (2001).

As estatísticas descritivas constam da Tabela 3, e os coeficientes de ajuste e percentis, da Tabela 4. Entre as três distribuições avaliadas, a Lognormal apresentou os maiores coeficientes de determinação para as razões de resistência não drenada de pico estimadas por Olson (2001) e Sadrekarimi (2014). No CPTu-01, esses coeficientes

foram 0,685 e 0,661, respectivamente; no CPTu-02, foram 0,964 e 0,957. A superioridade relativa da Lognormal, portanto, não representa a mesma qualidade de ajuste nos dois perfis nem valida as estimativas geotécnicas.

Figura 17. Razão de resistência ao cisalhamento não drenada de pico para rejeito classificado como sand-like e transicional, estimada pelos Métodos e Olson (2001) e Sadrekarimi (2014) – Ensaios CPTu-01 e CPTu-02



Fonte: Elaborado pelos autores, 2026.

Tabela 3. Resumo das estatísticas descritivas da razão de resistência ao cisalhamento não drenada de pico para rejeito classificado como sand-like e transicional, estimada pelos Métodos de Olson (2001) e Sadrekarimi (2014)

Estatística	Olson (2001)		Sadrekarimi (2014)	
	CPTu-01	CPTu-02	CPTu-01	CPTu-02
Número de Amostras	104,00	185,00	106,00	221,00
Valor Mínimo	0,21	0,21	0,22	0,22
Valor Máximo	0,30	0,30	0,27	0,28
Média	0,23	0,25	0,23	0,25
Mediana	0,22	0,25	0,23	0,25
Desvio Padrão	0,02	0,02	0,01	0,02
1° Quartil	0,22	0,23	0,23	0,24
3° Quartil	0,23	0,27	0,23	0,26

Fonte: Elaborado pelos autores, 2026.

Tabela 4. Resumo dos percentis da razão de resistência ao cisalhamento não drenada de pico para rejeito classificado como sand-like e transicional, estimada pelos Métodos de Olson (2001) e Sadrekarimi (2014)

Percentil	CPTu-01			CPTu-	
	Normal	Lognormal	Weibull	Normal	Lognor l
	Olson (2001)				
R^2	0,654	0,685	0,545	0,960	0,96
0,30	0,22	0,22	0,21	0,24	0,24
0,40	0,22	0,22	0,22	0,24	0,24

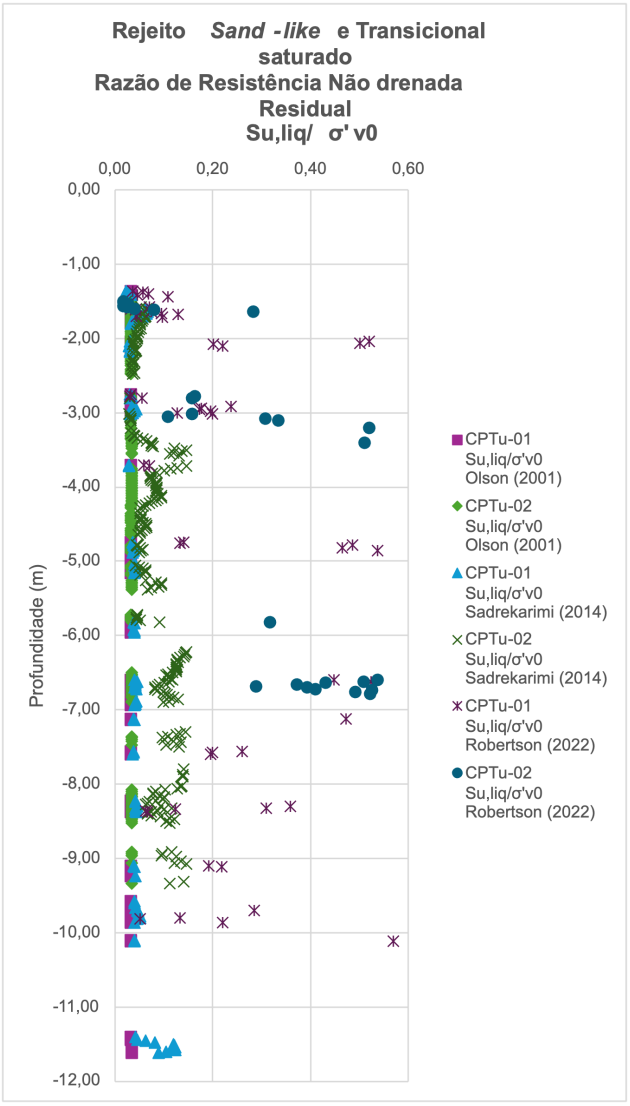
⚠ Esta tabela possui muitas colunas e foi cortada para impressão. Para visualizá-la completa, acesse o artigo original em: https://revistatopicos.com.br/artigos/classificacao-do-comportamento-geotecnico-e-obtencao-de-parametros-de-resistencia-ao-cisalhamento-de-rejeitos-do-beneficiamento-do-minerio-de-carvao-atraves-de-correlacoes-propostas-para-ensaio-com-piezocone?noblockage

Fonte: Elaborado pelos autores, 2026.

Os resultados da estimativa da razão de resistência ao cisalhamento não drenada residual para rejeito classificado como *sand-like* e transicional ao longo da profundidade dos ensaios foram apresentados de forma gráfica na Figura 18. Observou-se que os valores se encontraram na faixa de 0 a 0,60, sendo sempre superiores para CPTu-02, comparado a CPTu-01. De forma similar ao comportamento verificado na resistência ao cisalhamento de pico, o método de Sadrekarimi (2014) resultou em valores ligeiramente superiores aos do método de Olson (2001). A metodologia de Robertson (2022) resultou em valores significativamente superiores aos encontrados nas metodologias anteriores.

As estatísticas descritivas das razões de resistência não drenada residual constam da Tabela 5, e os coeficientes de ajuste e percentis, da Tabela 6. No CPTu-01, a Lognormal apresentou o maior coeficiente de determinação para Olson (2001) e Sadrekarimi (2014), enquanto a Weibull apresentou o maior valor para Robertson (2022). No CPTu-02, os maiores coeficientes corresponderam à Lognormal para Olson (2001), à Weibull para Sadrekarimi (2014) e à Normal para Robertson (2022). Essa seleção é específica de cada combinação entre método e perfil e expressa comparação entre os modelos avaliados.

Figura 18. Razão de resistência ao cisalhamento não drenada residual para o rejeito classificado como sand-like e transicional – Ensaios CPTu-01 e CPTu-02



Fonte: Elaborado pelos autores, 2026.

Tabela 5. Resumo das estatísticas descritivas da razão de resistência ao cisalhamento não drenada residual para rejeito classificado como sand-like e transicional, estimada pelos Métodos de Olson (2001), Sadrekarimi (2014) e Robertson (2022)

Estatística	Olson (2001)		Sadrekarimi (2014)		Rob
	CPTu-01	CPTu-02	CPTu-01	CPTu-02	CPTu-
Número de	104,00	185,00	106,00	221,00	51,0

Amostras					
Valor Mínimo	0,03	0,03	0,02	0,02	0,03
Valor	0,03	0,03	0,12	0,15	0,57

⚠ Esta tabela possui muitas colunas e foi cortada para impressão. Para visualizá-la completa, acesse o artigo original em: https://revistatopicos.com.br/artigos/classificacao-do-comportamento-geotecnico-e-obtencao-de-parametros-de-resistencia-ao-cisalhamento-de-rejeitos-do-beneficiamento-do-minerio-de-carvao-atraves-de-correlacoes-propostas-para-ensaio-com-piezocone?noblockage

Fonte: Elaborado pelos autores, 2026.

Tabela 6. Resumo dos percentis da razão de resistência ao cisalhamento não drenada de residual para rejeito classificado como sand-like e transicional, estimada pelos Métodos de Olson (2001), Sadrekarimi (2014) e Robertson (2022)

Percentil	CPTu-01			CPTu-	
	Normal	Lognormal	Weibull	Normal	Lognor l
			Olson (2001)		
R^2	0,654	0,657	0,494	0,960	0,96
0,30	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03
0,40	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03

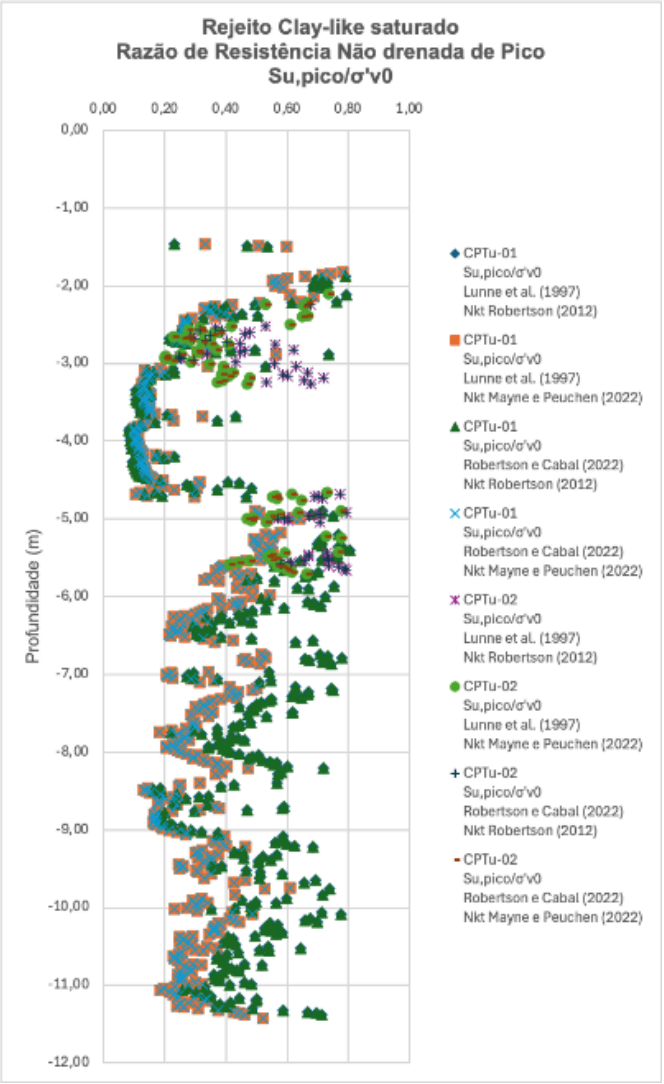
⚠ Esta tabela possui muitas colunas e foi cortada para impressão. Para visualizá-la completa, acesse o artigo original em: https://revistatopicos.com.br/artigos/classificacao-do-comportamento-geotecnico-e-obtencao-de-parametros-de-resistencia-ao-cisalhamento-de-rejeitos-do-beneficiamento-do-minerio-de-carvao-atraves-de-correlacoes-propostas-para-ensaio-com-piezocone?noblockage

Fonte: Elaborado pelos autores, 2026.

Os resultados da estimativa da razão de resistência ao cisalhamento não drenada de pico para rejeito classificado como *clay-like* ao longo da profundidade dos ensaios foram apresentados de forma gráfica na ***Figura 19***. Observou-se que os valores ($S_{u,pico} / \sigma'_{v0}$) se encontraram na faixa de 0,10 a 0,80. Os resultados obtidos para as metodologias propostas por Lunne et al. (1997) e Robertson e Cabal (2022) apresentaram valores idênticos, sendo assim, sobrepostos no gráfico.

As estatísticas descritivas e os percentis das razões de resistência não drenada de pico dos materiais clay-like são apresentados nas Tabelas 7 e 8. A distribuição Weibull apresentou os maiores coeficientes de determinação, isoladamente ou em empate, entre os modelos avaliados para os dois perfis e os cenários de fator de cone. No CPTu-01, para o cenário com Nkt de Robertson (2012) aplicado às propostas de Lunne et al. (1997) e Robertson e Cabal (2022), as distribuições Normal e Weibull apresentaram o mesmo coeficiente de determinação, 0,963. Nesse caso, o critério adotado não distingue um ajuste superior entre essas duas distribuições.

Figura 19. Razão de resistência ao cisalhamento não drenada de pico para rejeito classificado como clay-like – Ensaios CPTu-01 e CPTu-02



Fonte: Elaborado pelos autores, 2026.

Tabela 7. Resumo das estatísticas descritivas da razão de resistência ao cisalhamento não drenada de pico para rejeito classificado como clay-like, estimada pelos Métodos de Lunne et al. (1997) e Robertson e Cabal (2022), com N_{KT} determinado pelas propostas de Robertson (2012) e Mayne e Peuchen (2022)

Estatística	**Lunne et al. (1997) e Robertson e Cabal (2022) - Nkt Robertson (2012)**		**Lunne et al. (1997) e Robertson e Cabal (2022) - Nkt Mayne e Peuchen (2022)**	
	CPTu-01	**CPTu-02**	**CPTu-01**	**CPTu-02**
Número de Amostras	392,00	55,00	407,00	69,00

Valor Mínimo	0,08	0,25	0,10	0,20
Valor Máximo	0,80	0,79	0,78	0,78
Média	0,41	0,56	0,31	0,48
Mediana	0,42	0,60	0,29	0,48
Desvio Padrão	0,20	0,17	0,14	0,16
1° Quartil	0,26	0,44	0,21	0,35
3° Quartil	0,57	0,70	0,38	0,60

Fonte: Elaborado pelos autores, 2026.

Tabela 8. Resumo dos percentis da razão de resistência ao cisalhamento não drenada de pico para rejeito classificado como clay-like, estimada pelos Métodos de Lunne et al. (1997) e Robertson e Cabal (2022), com N_{KT} determinado pelas propostas de Robertson (2012) e Mayne e Peuchen (2022)

Percentil	CPTu-01			CPTu-	
	Normal	Lognormal	Weibull	Normal	Lognor l
Lunne et al. (1997) e Robertson e Cabal (2022) - Nkt Robertson					
p^2	0,963	0,780	0,963	0,931	0,82
0,30	0,31	0,26	0,29	0,48	0,45
0,40	0,36	0,30	0,35	0,52	0,49

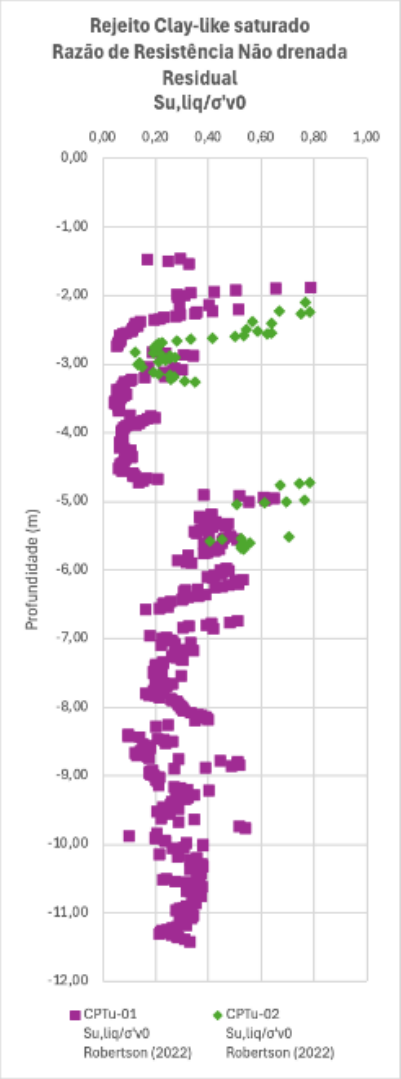
⚠ Esta tabela possui muitas colunas e foi cortada para impressão. Para visualizá-la completa, acesse o artigo original em: https://revistatopicos.com.br/artigos/classificacao-do-comportamento-geotecnico-e-obtencao-de-parametros-de-resistencia-ao-cisalhamento-de-rejeitos-do-beneficiamento-do-minerio-de-carvao-atraves-de-correlacoes-propostas-para-ensaio-com-piezocone?noblockage

Fonte: Elaborado pelos autores, 2026.

Os resultados da estimativa da razão de resistência ao cisalhamento não drenada liquefeita ($S_{u,pico} / \sigma'_{v0}$) para rejeito classificado como *clay-like* ao longo da profundidade dos ensaios foram apresentados de forma gráfica na ***Figura 20***. Observou-se que os valores de $S_{u,liq} / \sigma'_{v0}$ se encontraram na faixa de 0 a 0,80. Os resultados para CPTu-02 apresentaram-se sutilmente superiores aos de CPTu-01.

De acordo com as estatísticas descritivas demonstradas na Tabela 9 e na Tabela 10, notou-se que os resultados obtidos apresentaram melhor ajuste para o modelo de distribuição Weibull para ambos os ensaios.

Figura 20. Razão de resistência ao cisalhamento não drenada residual para rejeito classificado como clay-like – Ensaios CPTu-01 e CPTu-02



Fonte: Elaborado pelos autores, 2026.

Tabela 9. Resumo das estatísticas descritivas da razão de resistência ao cisalhamento não drenada residual para rejeito classificado como clay-like, estimada pelo Método de Robertson (2022)

Estatística	**Robertson (2022)**	
	CPTu-01	**CPTu-02**
Número de Amostras	405,00	55,00
Valor Mínimo	0,04	0,12
Valor Máximo	0,79	0,78
Média	0,26	0,43

Mediana	0,27	0,45
Desvio Padrão	0,13	0,21
1° Quartil	0,17	0,23
3° Quartil	0,35	0,60

Fonte: Elaborado pelos autores, 2026.

Tabela 10. Resumo dos percentis da razão de resistência ao cisalhamento não drenada residual para rejeito classificado como clay-like, estimada pelo Método de Robertson (2022)

Percentil	CPTu-01			CPTu-	
	Normal	Lognormal	Weibull	Normal	Lognor l
	Robertson (2022)				
R^2	0,971	0,868	0,984	0,924	0,82
0,30	0,19	0,16	0,18	0,32	0,28
0,40	0,23	0,19	0,22	0,38	0,33

⚠ Esta tabela possui muitas colunas e foi cortada para impressão. Para visualizá-la completa, acesse o artigo original em: https://revistatopicos.com.br/artigos/classificacao-do-comportamento-geotecnico-e-obtencao-de-parametros-de-resistencia-ao-cisalhamento-de-rejeitos-do-beneficiamento-do-minerio-de-carvao-atraves-de-correlacoes-propostas-para-ensaio-com-piezocone?noblockage

Fonte: Elaborado pelos autores, 2026.

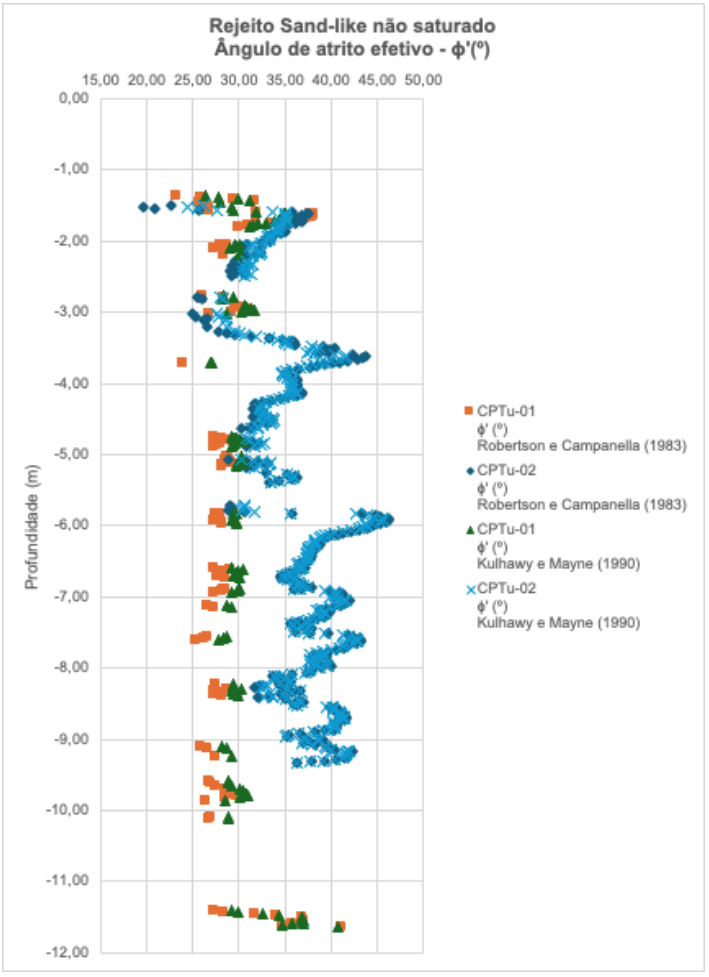
4.6. Estimativa dos Parâmetros de Resistência Ao Cisalhamento Drenados

Conforme detalhado no capítulo de Metodologia, a coesão efetiva dos rejeitos foi considerada como nula. Os valores estimados para o ângulo de atrito interno efetivo foram apresentados a seguir.

Os resultados da estimativa do ângulo de atrito interno para rejeito classificado como *sand-like* e transicional ao longo da profundidade dos ensaios foram apresentados de forma gráfica na Figura 21. Observou-se que os valores obtidos por meio do método de Robertson e Campanella (1983) se encontraram na faixa de 19° a 45°. Já para o método de Kulhawy e Mayne, os valores abrangeram a faixa de 20° a 45°. Os resultados para CPTu-02 apresentaram-se predominantemente superiores aos de CPTu-01.

De acordo com as estatísticas descritivas demonstradas na Tabela 11 e Tabela 12, notou-se que os resultados obtidos apresentaram melhor ajuste para o modelo de distribuição Weibull para o ensaio CPTu-02 e método de Robertson e Campanella (1983); normal para o ensaio CPTu-02 e método de Kulhawy e Mayne (1990); e lognormal para CPTU-01 e ambos os métodos.

Figura 21. Ângulo de atrito interno efetivo para rejeito classificado como sand-like e transicional – Ensaios CPTu-01 e CPTu-02



Fonte: Elaborado pelos autores, 2026.

Tabela 11. Resumo das estatísticas descritivas do ângulo de atrito interno efetivo para rejeito classificado como sand-like e transicional, estimado pelos Métodos de Robertson e Campanella (1983) e Kulhawy e Mayne (1990)

Estatística	Robertson e Campanella (1983)		Kulhawy e Mayne (1990)	
	CPTu-01	CPTu-02	CPTu-01	CPTu-02
Número de Amostras	107,00	319,00	107,00	319,00
Valor Mínimo	23,20	19,59	26,35	24,42
Valor Máximo	41,14	46,31	40,79	45,63
Média	29,41	36,43	30,63	36,34

Mediana	28,26	36,63	29,88	36,24
Desvio Padrão	3,62	4,50	2,53	3,83
1° Quartil	27,31	33,51	29,23	33,66
3° Quartil	29,86	39,65	30,99	39,12

Fonte: Elaborado pelos autores, 2026.

Tabela 12. Resumo dos percentis do ângulo de atrito interno efetivo para rejeito classificado como sand-like e transicional, estimado pelos Métodos de Robertson e Campanella (1983) e Kulhawy e Mayne (1990)

Percentil	CPTu-01			CPTu-	
	Normal	Lognormal	Weibull	Normal	Lognor l
	Robertson e Campanella (1983)				
R^2	0,829	0,869	0,753	0,981	0,95
0,30	27,52	27,50	27,06	34,07	33,7
0,40	28,50	28,37	28,41	35,29	34,9

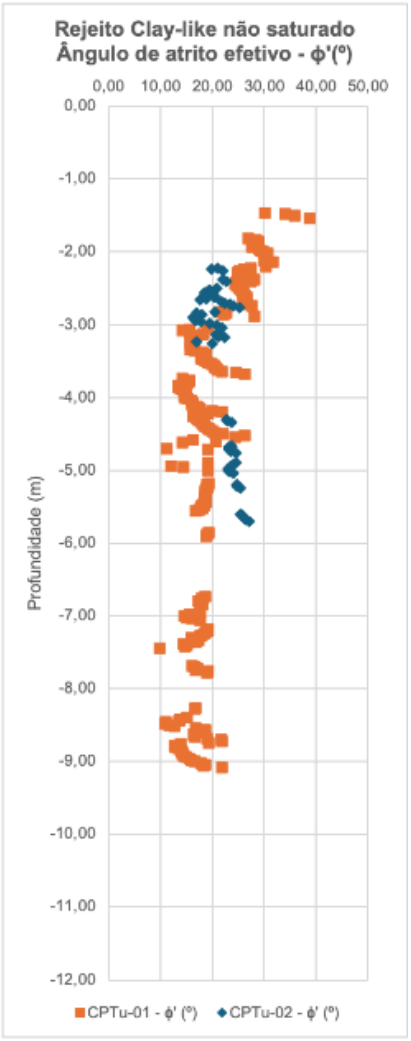
⚠ Esta tabela possui muitas colunas e foi cortada para impressão. Para visualizá-la completa, acesse o artigo original em: https://revistatopicos.com.br/artigos/classificacao-do-comportamento-geotecnico-e-obtencao-de-parametros-de-resistencia-ao-cisalhamento-de-rejeitos-do-beneficiamento-do-minerio-de-carvao-atraves-de-correlacoes-propostas-para-ensaio-com-piezocone?noblockage

Fonte: Elaborado pelos autores, 2026.

Os resultados da estimativa do ângulo de atrito interno para rejeito classificado como *clay-like*, determinados pelo método de Senneset et al. (1989), ao longo da profundidade dos ensaios foram apresentados de forma gráfica na FIGURA 53. Observou-se que os valores obtidos se encontraram na faixa de 10° a 40°.

De acordo com as estatísticas descritivas demonstradas na **Tabela 13** e na **Tabela 14,** notou-se que os resultados obtidos apresentaram melhor ajuste para o modelo de distribuição Weibull para o ensaio CPTu-02 e e Lognormal para o ensaio CPTu-01.

Figura 22. Ângulo de atrito interno efetivo para rejeito classificado como clay-like – Ensaios CPTu-01 e CPTu-02



Fonte: Elaborado pelos autores, 2026.

Tabela 13. Resumo das estatísticas descritivas do ângulo de atrito interno efetivo para rejeito classificado como clay-like, estimado pelo Método de Senneset et al. (1989)

Estatística	Senneset *et al.* (1989)	
	CPTu-01	CPTu-02
Número de Amostras	223,00	62,00
Valor Mínimo	9,91	16,26
Valor Máximo	38,72	27,09
Média	19,46	21,88
Mediana	18,39	22,38
Desvio Padrão	5,05	2,80
1° Quartil	16,08	19,92
3° Quartil	21,86	23,68

Fonte: Elaborado pelos autores, 2026.

Tabela 14. Resumo dos percentis do ângulo de atrito interno efetivo para rejeito classificado como clay-like, estimado pelo Método de Senneset et al. (1989)

Percentil	CPTu-01			CPTu-	
	Normal	Lognormal	Weibull	Normal	Lognor l
	Senneset et al. (1989)				
R^2	0,913	0,965	0,902	0,973	0,95

0,30	16,82	16,60	16,44	20,42	20,2

⚠ Esta tabela possui muitas colunas e foi cortada para impressão. Para visualizá-la completa, acesse o artigo original em: https://revistatopicos.com.br/artigos/classificacao-do-comportamento-geotecnico-e-obtencao-de-parametros-de-resistencia-ao-cisalhamento-de-rejeitos-do-beneficiamento-do-minerio-de-carvao-atraves-de-correlacoes-propostas-para-ensaio-com-piezocone?noblockage

Fonte: Elaborado pelos autores, 2026.

Sugere-se que a escolha dos parâmetros geotécnicos para realização de possíveis análises de estabilidade ou emprego em projetos seja feito conforme a seguinte abordagem:

- Para o rejeito *sand-like* saturado, adotaram-se razões de resistência não drenada de pico e residual de 0,23 e 0,03, respectivamente, e ângulo de atrito efetivo de 27,50°. Todos os parâmetros correspondem ao 30° percentil das distribuições lognormais, com base nas correlações de Olson (2001) e Robertson e Campanella (1983), conforme aplicável;

- Para o rejeito saturado *clay-like*, adotaram-se razões de resistência não drenada de pico e residual de 0,22 e 0,18, respectivamente, e ângulo de atrito efetivo de 16,60°. Os valores correspondem ao 30° percentil das distribuições de Weibull (resistências) e lognormal (ângulo de atrito), conforme as correlações aplicáveis. A razão de resistência de pico foi similar à observada em rejeitos de minério de ferro (0,24 a 0,28), enquanto a residual foi superior (0,18, frente a 0,04–0,05);

- Pesos específicos medianos de 17,30 kN/m³ para os rejeitos *clay-like*, com base no CPTu-01, e 19,20 kN/m³ para os rejeitos *sand-like*, com base no CPTu-02, conforme o comportamento predominante identificado em cada ensaio.

De forma resumida, pode-se observar a sugestão de parâmetros a serem adotados para os rejeitos do beneficiamento do minério de carvão, com base nas correlações de ensaios com piezocone e tratamento estatístico, conforme disposto na **Tabela 15.**

Tabela 15. Quadro resumo dos parâmetros geotécnicos sugeridos para os rejeitos do beneficiamento de carvão, com base em correlações a partir de ensaios CPTu

Material	**Peso específico (kN/m3)**	**Coesão (kPa)**	**Ângulo de atrito interno (°)**	**Razão de resistência não drenada**
Rejeito *clay-like* saturado – pico	17,3	0	-	0,22
Rejeito *clay-like* saturado – residual	17,3	0	-	0,18
Rejeito *clay-like* não saturado	17,3	0	16,6	-
Rejeito *sand-like* e transicional saturado – pico	19,2	0	-	0,23
Rejeito *sand-like* e	19,2	0	-	0,03

transicional saturado – residual				
Rejeito *sand-like* e transicional não saturado	19,2	0	27,5	-

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo atingiu seu objetivo de avaliar o comportamento geotécnico dos rejeitos do beneficiamento de carvão da Barragem da Bacia de Finos da Mina do Cerro, em Cachoeira do Sul/RS, por meio de correlações aplicadas a dois ensaios CPTu. Os resultados evidenciaram a variabilidade das propriedades dos materiais ao longo da profundidade, com predominância de comportamento *clay-like* no perfil CPTu-01 e *sand-like* e transicional no CPTu-02. A suscetibilidade à liquefação foi identificada apenas no perfil CPTu-01, demonstrando a importância da avaliação individualizada dos materiais investigados.

As correlações empregadas permitiram estimar parâmetros de resistência ao cisalhamento drenados e não drenados, bem como o peso específico dos rejeitos. De modo geral, as distribuições Lognormal e Weibull apresentaram os melhores ajustes estatísticos para a estimativa dos parâmetros de resistência. Esses resultados demonstram a aplicabilidade dos dados de CPTu associados a correlações empíricas na investigação das propriedades geotécnicas de rejeitos de carvão, constituindo uma contribuição para estudos de engenharia relacionados a esses materiais.

Entretanto, os resultados devem ser interpretados considerando as limitações da investigação, especialmente a disponibilidade de

apenas dois ensaios CPTu e a ausência de ensaios laboratoriais para caracterização dos materiais e determinação direta dos parâmetros de resistência. Recomenda-se, portanto, a realização de ensaios CPTu adicionais em diferentes regiões da estrutura e de ensaios laboratoriais complementares, visando ampliar a avaliação da variabilidade espacial dos rejeitos e verificar os parâmetros estimados pelas correlações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). Resolução nº 130, de 24 de fevereiro de 2023. **Diário Oficial da União.** Brasília, n. 39, 27 fev. 2023. Seção 1, p. 69. Disponível em: https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-anm-n-130-de-24-de-fevereiro-de-2023-466161726. Acesso em: 30 mar. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). Resolução nº 175, de 1º de agosto de 2024. **Diário Oficial da União.** Brasília, n. 148, 02 fev. 2024. Seção 1, p. 165. Disponivel em: https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-anm-n-175-de-1-de-agosto-de-2024-575984378. Acesso em: 15 ago. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). Resolução nº 95, de 7 de fevereiro de 2022. **Diário Oficial da União.** Brasília, n. 33, 16 fev. 2022. Seção 1, p. 49. Disponível em: https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-n-95-de-7-de-fevereiro-de-2022-380760962. Acesso em: 3 ago. 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). **Sistema Integrado de Gestão de Barragens de Mineração:** Relatório Quantitativo. Disponível em: https://app.anm.gov.br/SIGBM/Publico/Estatistica. Acesso em: 4 set. 2024.

AGUIAR, A. L. S. **Estudo da variabilidade da resistência não drenada do rejeito plástico da barragem de Germano por meio de ensaios de campo.** 2022. 90f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: http://www.coc.ufrj.br/pt/documents2/mestrado/2022/3974-dissertacao-ana-luiza-salgueiro-de-aguiar-versao-final. Acesso em: 3 set. 2023.

American Society for Testing and Materials – ASTM. 2020. **ASTM D5778/2020:** Standard Test Method for Electronic Friction Cone and Piezocone Penetration Testing of Soils. ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org. https://doi.org/10.1520/D5778-20.

ANDRADE, G. S. **Análise de risco integrada à gestão de segurança de barragens.** 2021. 218 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento de Tecnologia) – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, Curitiba, 2021. Disponível em: https://mestrado.lactec.org.br/wp-content/uploads/2021/02/335_PT.pdf. Acesso em: 2 ago. 2022.

BALBINO, J. de B. **Caracterização geotécnica de um rejeito clay-like do Quadrilátero Ferrífero.** 2022. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2022. Disponível em: https://locus.ufv.br//handle/123456789/30576. Acesso em: 9 abr. 2024.

BRASIL. Lei Nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o

Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei no 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4o da Lei no 9.984, de 17 de julho de 2000. **Presidência da República** - Casa Civil - Subchefia para Assuntos Jurídicos. Brasília, 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12334.htm. Acesso em: 03 ago. 2022.

BRASIL. Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020. Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), a Lei nº 7.797, de 10 de julho de 1989, que cria o Fundo Nacional do Meio Ambiente (FNMA), a Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, e o Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967 (Código de Mineração). **Diário Oficial da União,** Brasília, DF, n. 189, 01 out. 2020. Seção 1, p. 3. Disponível em: https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/lei-n-14.066-de-30-de-setembro-de-2020-280529982. Acesso em: 3 ago. 2022.

COMISSÃO INTERNACIONAL DE GRANDES BARRAGENS. As Barragens e a Água do Mundo: um livro educativo que explica como as barragens ajudam a administrar a água do mundo. **Comissão Internacional de Grandes Barragens,** p. 74, 2008.

FREIRE NETO, J. P. **Estudo da liquefação estática em rejeitos e aplicação de metodologia de análise de estabilidade.** 2009. 154 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009. Disponível em: http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/3232. Acesso em: 2 ago. 2024.

GEOMZ. **Mina do Cerro:** Relatório de Inspeção de Segurança Regular (RISR). Set. 2023.

HATJE, V. et al. The environmental impacts of one of the largest tailing dam failures worldwide. **Scientific Reports,** v. 7, n. 1, p. 1–13, 2017. Disponível em: https://www.nature.com/articles/s41598-017-11143-x.pdf. Acesso em: 2 ago. 2022.

HEITOR, A. *et al.* Drained and undrained shear behavior of compacted coal wash. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.** v. 142, n. 04016006, 2016.

HUMMES, R. A. Compressibilidade e resistência ao cisalhamento de rejeitos de beneficiamento de carvão mineral em equipamentos de grandes dimensões. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007. Disponível em: https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/106604. Acesso em: 12 abr. 2024.

JEFFERIES, M. G.; BEEN, K. **Soil liquefaction:** a critical state approach. London: Taylor & Francis, 2006. 478 p. ISBN 0-419-16170-8.

KULHAWY, F.H; MAYNE, P.H., 1990. **Manual on estimating soil properties for foundation design,** Report EL-6800 Electric Power Research Institute, EPRI, August 1990.

LUNNE, T., ROBERTSON, P.K., and POWELL, J.J.M., 1997. **Cone penetration testing in geotechnical practice.** Blackie Academic, EF Spon/Routledge Publ., New York, 1997, 312 pp.

MIRANDA, T. M. **Análise do potencial de liquefação de um rejeito de minério de ferro por meio de ensaios de laboratório e de**

campo. 2018. 136 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018. Disponível em: http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/10442. Acesso em: 4 mar. 2023.

MORRIS, D. V. A note on earthquake-induced liquefaction. **Géotechnique.** v. 44, n. 4, p. 451-454, 1983.

OLIVEIRA, R. P. de. **Estudo comparativo da estimativa da resistência não-drenada liquefeita a partir de correlações propostas para ensaios de campo de CPTU.** 2020. 120 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020. Disponível em: http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/13191. Acesso em: 5 mai. 2024.

OLSON, S.M. 2001. **Liquefaction analysis of level and sloping ground using Field case histories and penetration resistance.** Ph.D. thesis, University of Illinois at Urbana – Champaign, Urbana, Ill.

PINTO, C. de S. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas.** 3ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

ROBERTSON, P. K.; CABAL, K. L. 2014. **Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering.** Gregg Drilling & Testing, Inc. 6th edition, December 2014.

ROBERTSON, P. K.; CABAL, K. L. 2022. **Guide to Cone Penetration Testing.** Gregg Drilling Llc. Seventh Edition.

ROBERTSON, P. K.; CABAL, K. L. **Estimating soil unit weight from CPT.** In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON CONE PENETRATION TESTING, 2., 2010, Huntington Beach, California. Huntington Beach: 2010.

ROBERTSON, P.K. 2010. **Evaluation of flow liquefaction and liquefied strength using the cone penetration test.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 136(6), 842–853.

ROBERTSON, P.K. 2016. **Cone penetration test (CPT) based soil behaviour type (SBT) classification system** – an update. Gregg Drilling & Testing, Inc. Site Investigation Services.

ROBERTSON, P.K.; CAMPANELLA, R.G. 1983. **Interpretation of cone penetration tests** – Part II (clay). Canadian Geotechnical Journal, 20(4): 734–745. doi:10.1139/t83-079.

ROCHA, F. F. **Retroanálise da ruptura da barragem São Francisco – Miraí, Minas gerais, Brasil.** Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015. Disponível em: https://www.smarh.eng.ufmg.br/defesas/1135M.PDF. Acesso em: 3 ago. 2022.

ROSSI, C. L. C. U. **Proposta de abordagem simplificada para avaliação dos efeitos oriundos da ruptura de barragens.** Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020. Disponível em: https://lume.ufrgs.br/handle/10183/211245. Acesso em: 4 ago. 2022.

SAAR, R. C. *et al*. Avaliação da ocorrência de drenagem parcial nos ensaios de CPTu em Rejeito de Minério de Ferro. In: ANAIS DO XXI COBRAMSEG, 2024, Balneário Camboriú. **Anais eletrônicos...** Balneário Camboriú, Santa Catarina, 2024. Disponível em: https://cobramseg.com.br/evento/cobramseg2024/trabalhosaprovados/naintegra/1186. Acesso em: 29 out. 2024.

SADREKARIMI, A. (2014). **Effect of the Mode of Shear on Static Liquefaction Analysis.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. v. 140. n. 12. P. 2.100-2.119.

SANTOS JUNIOR, M. P. *et al*. Análise da susceptibilidade à liquefação estática por meio de ensaios de campo e de laboratório. **XXXII Seminário Nacional de Grandes Barragens.** Salvador, 2019. Disponível em: https://www.pimentadeavila.com.br/wp-content/uploads/2019/06/Liquefação-2019.pdf. Acesso em: 14 ago. 2024.

SAUSEN NETTO, A. **Análise de estabilidade de uma barragem de terra.** 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Guarapuava, 2019.

SCHNAID, F. 2009. **In situ testing in geomechanics:** the main tests. 1ª ed., Oxon: Taylor & Francis, Vol. 1. pp. 329.

SCHNAID, F.; ODEBRECHT, E. **Ensaios de campo e suas aplicações à engenharia de fundações.** 2ª ed., São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

SENNESET, K., *et al*. 1989. Evaluation of soil parameters from piezocone tests. Transportation Research Record: **Journal of the**

Transportation Research Board, (1235), 24-37. Disponível em: https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1989/1235/1235-003.pdf. Acesso em: 26 mai. 2024.

SILVA, I. T. C. **Susceptibilidade à liquefação para disposição de rejeitos em reservatórios:** comparação entre metodologias e análise da disposição. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2023. Disponível em: https://sig.cefetmg.br/sigaa/verArquivo%3FidArquivo%3D4847356%26key%3Dd2e470fbdd751c815e880d88795d77a3&ved=2ahUKEwjX69en0u2IAxUSpZUCHZJ5IloQFnoECBYQAQ&usg=AOvVaw1BLGZjwQNMA5FJgCyg5De2. Acesso em: 7 jul. 2023.

SILVA, T. B. S. **Análise de fluxo, estabilidade e tensão-deformação de uma barragem no Agreste de Pernambuco.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2020. Disponível em: https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/39125. Acesso em: 3 ago. 2022.

---

[1] Mestre em Desenvolvimento de Tecnologia. Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC. Campus Curitiba. E-mail: acesse o artigo original para visualizar o e-mail

[2] Doutor em Engenharia Civil - Geotecnia. Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC. Campus Curitiba. E-mail: acesse o artigo original para visualizar o e-mail