



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Carlos Victor de Arruda Barros

**Barragens de Rejeitos:**

**Estimativa do Parâmetro de Estado partir de Ensaios de Piezocone**

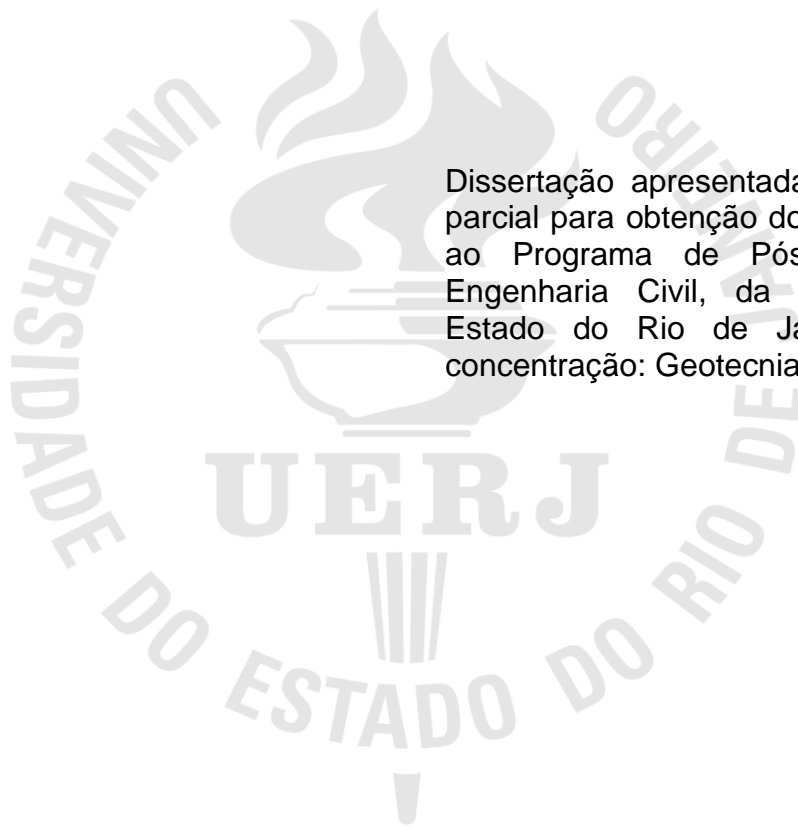
Rio de Janeiro

2023

Carlos Victor de Arruda Barros

**Barragens de Rejeitos: Estimativa do Parâmetro de Estado partir de Ensaios de Piezocone**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Geotecnia.



Orientador: Prof. Dr. Ana Cristina Castro Fontenla Sieira

Rio de Janeiro

2023

CATALOGAÇÃO NA FONTE  
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

B277 Barros, Carlos Victor de Arruda.  
Barragens de rejeitos: estimativa do parâmetro de estado a partir de  
Ensaios de Piezocone / Carlos Victor de Arruda Barros. – 2023.  
101 f.

Orientadora: Ana Cristina Castro Fontenla Sieira.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro,  
Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia civil - Teses. 2. Barragens de rejeitos - Teses. 3. Solos  
- Percolação - Teses. 4. Mecânica do solo - Teses. 5. Engenharia  
geotécnica - Teses. I. Sieira, Ana Cristina Castro Fontenla. II.  
Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.  
III. Título.

CDU 627.82

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial  
desta tese, desde que citada a fonte.

---

Assinatura

---

Data

Carlos Victor de Arruda Barros

**Barragens de Rejeitos: Estimativa do Parâmetro de Estado partir de Ensaios de Piezocone**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Geotecnia.

Aprovado em 15 de setembro de 2023.

Banca Examinadora:

---

Profa. Dra. Ana Cristina Castro Fontenla Sieira (Orientadora)  
Faculdade de Engenharia – UERJ

---

Prof. Dr. Armando Prestes de Menezes Filho  
Faculdade de Engenharia – UERJ

---

Prof. Dra. Michéle Dal Toé Casagrande  
Universidade de Brasília- UnB

Rio de Janeiro

2023

## DEDICATÓRIA

Aos meus pais e família, que sempre me apoiaram e incentivaram durante essa caminhada. Também dedico a mim, que a todo momento duvido e questiono minhas virtudes e competências.

## **AGRADECIMENTOS**

À minha base, minha família (Giselle, João Carlos, Victor e Carlito) que me ensinaram tudo que sei e sempre me incentivaram a nunca desistir. Também minha namorada (Déborah Fontes) que junto da minha família entendeu toda minha ausência nesse período de dedicação à dissertação.

À minha Orientadora e Professora, Dra. Ana Cristina que foi essencial e de incentivo incalculável para a conclusão desse trabalho.

Aos professores, pelos ensinamentos e inspiração, dentro e fora da sala de aula, durante a época da graduação (UVA) e agora do mestrado (UERJ).

Aos meus amigos da graduação e da vida, especialmente Leonel Mello pela parceria de sempre, mesmo distante.

Aos meus colegas de mestrado, especialmente a Karina Fonseca pelo companheirismo e pelo inegável apoio quando necessário.

Aos colegas da Reduc, que diariamente me reforçam o quão valioso é todo o esforço em busca da excelência e aperfeiçoamento dentro de um ambiente descontraído e agradável.

À UERJ, porque sem ela não poderia ter realizado o sonho da pós-graduação.

A todos aqueles, que embora não citados nominalmente, contribuíram direta e indiretamente para a execução deste trabalho e dessa conquista.

À Terratek, pela disponibilização dos dados necessários para a pesquisa.

À Capes pelo apoio financeiro.

E aqueles que foram vistos dançando foram julgados  
insanos por aqueles que não podiam ouvir a música.

*Friedrich Wilhelm Nietzsche*

## RESUMO

BARROS, Carlos Victor de Arruda. *Barragens de rejeitos: estimativa do parâmetro de estado partir de Ensaio de Piezocone*. 2023. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

O foco deste estudo é o fenômeno da liquefação, que acontece em solos saturados ou com elevado nível de saturação, nos quais ocorre uma perda de resistência durante a fase de cisalhamento. Esse fenômeno é frequentemente observado em solos arenosos siltosos fofos, além de argilas sensíveis. Quando dispostos hidraulicamente no interior de barragens, os rejeitos depositados manifestam uma tendência a exibir elevados níveis de saturação e índices de vazios, circunstâncias que favorecem a manifestação do fenômeno da liquefação. A ocorrência deste fenômeno tem sido apontada como a principal causa em vários incidentes de colapso de barragens de rejeitos, como por exemplo a catástrofe da Barragem B1 em Brumadinho (MG) no ano de 2019 e pelo desastre ocorrido na Barragem do Fundão em Mariana (MG) no ano de 2015. A avaliação da susceptibilidade à liquefação desempenha um papel de extrema relevância em barragens de rejeitos, especialmente quando são confirmadas características contráteis. No contexto brasileiro, o estudo da liquefação estática tem sido prioridade devido às peculiares propriedades geotécnicas dos depósitos granulares. Diversos métodos estão à disposição para a avaliação do potencial de liquefação intrínseco ao solo; entretanto, o ensaio de penetração do cone com medições de poropressão (CPTu) surge como interessante no âmbito geotécnico, uma vez que permite a estimativa direta de propriedades *insitu* dos depósitos, englobando o sendo possível estimar o parâmetro de estado ( $\psi$ ). O presente trabalho tem por objetivo realizar uma comparação de metodologias, Robertson (2010) e Plewes et. al (1992) para estimar o parâmetro de estado em três barragens de rejeito com base em ensaios do tipo CPTu. O estudo obteve resultados semelhantes para duas barragens estudadas e apresentou resultados mais distantes em outra

Palavras-chave: Barragens de Rejeitos. Liquefação. Parâmetro de Estado. Ensaio CPTu. Ensaio de campo.



## ABSTRACT

BARROS, Carlos Victor de Arruda. *Tailings dams: estimation of the state parameter from Piezocone Tests*. 2023. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

The focus of this study is the phenomenon of flow liquefaction, which occurs in saturated soils or soils with a high level of saturation and a loss of resistance during the shear phase. This phenomenon is often observed in soft silty and sandy soils, as well as sensitive clays. When hydraulically disposed within dams, the deposited tailings tend to exhibit high levels of saturation and void ratios, circumstances that favor the manifestation of liquefaction. The occurrence of this phenomenon has been identified as the main cause in several incidents of tailings dam collapses, such as the B1 Dam catastrophe in Brumadinho (MG) in 2019 and the disaster that occurred at the Fundão Dam in Mariana (MG) in 2015. Studying susceptibility to liquefaction plays an extremely important role in tailings dams, particularly when contractive characteristics are confirmed. In Brazil, liquefaction studies have been a priority due to the unique geotechnical properties of granular materials. Various methods are available to evaluate the intrinsic liquefaction potential of the soil; however, the cone penetration test with pore pressure measurements (CPTu) seems promising in the geotechnical field. It enables the direct estimation of *insitu* properties of deposits, including the possibility of estimating the state parameter ( $\psi$ ). This research aims to compare methodologies by Robertson (2010) and Plewes et al. (1992) for estimating the state parameter in three tailings dams based on cone penetration tests (CPTu). The study obtained similar results for two dams studied and presented more distant results in another.

Keywords: Tailings dam. Flow Liquefaction. State Parameter. Cone penetration test (CPTu). Field Investigation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma do processo de mineração de ferro (Albuquerque Filho, 2004) .....	21
Figura 2 - Métodos de disposição de rejeitos em barragens. (a) Vários pontos/espigotamento ( <i>spigots</i> ). (b) Descarga pontual. Vick (1983). ....	22
Figura 3 - Variação da permeabilidade no interior das barragens de rejeitos, Vick (1983).....	23
Figura 4 - Variação volumétrica em areias densas e fofas, adaptado de (Casagrande, 1936) .....	28
Figura 5 - Resultados de ensaios de cisalhamento direto em condição drenada para areias com diferentes índices de vazio – adaptado de (Casagrande, 1975).....	29
Figura 6 - Resultados de ensaios triaxiais não drenados em areias fofas Sladen et al. 1985) .....	30
Figura 7 - Linha de Estado Crítico nos planos i) $p' - q$ e ii) $p' - e$ (Sladen et al. 1985). .....	31
Figura 8 – Linha de estado crítico tridimensional nos planos $p' \times u \times q$ , sendo $u$ o volume específico ( $1 + e$ ) – (Atkinson e Bransby, 2012) .....	32
Figura 9 – Definição do parâmetro de estado $\psi$ (Jefferies e Been, 2016).....	34
Figura 10 - Ponteiros (da esquerda para a direita: 2 cm <sup>2</sup> , 10 cm <sup>2</sup> , 15 cm <sup>2</sup> , 40cm <sup>2</sup> ) e localização dos elementos filtrantes (Odebrecht e Schnaid (2012) apud Robertson (2006)).....	36
Figura 11 – Gráfico de resultado de ensaio CPTu (Jefferies e Been 2016) .....	37
Figura 12 Classificação preliminar dos solos a partir dos dados do ensaio de piezocone. (Robertson 1990) .....	39
Figura 13 – Envoltória de Fear e Robertson (1995) adotada por Olson (2001) para avaliação da susceptibilidade à liquefação através do ensaio CPTu (Olson 2001)...	41
Figura 14 – Ábaco proposto por Robertson a partir da análise de casos de ruptura por liquefação (Robertson, 2010) .....	43
Figura 15 – Sistema de classificação proposto por Robertson (2016) .....	44
Figura 16 – Proposta modificada da relação entre $K_c$ e $I_c$ (Robertson, 2022). .....	45
Figura 17 – Gráfico comparativo de Robertson 2022 incluindo os rejeitos de Feijão (Brumadinho/MG).....	46

Figura 18 – Granulometria de solos utilizados em câmaras de calibração (Jefferies e Been, 2016).....	47
Figura 19 – Exemplo de câmara de calibração (Jefferies e Been 2016) .....	48
Figura 20 – Comparação entre $q_p - \psi$ para diferentes areias (Jefferies e Been, 2016) .....	49
Figura 21 – Parâmetros de inversão do CPT versus $\lambda_{10}$ .....	50
Figura 22 - Parâmetros de inversão efetivos $\bar{k}$ e $\bar{m}$ e os parâmetros de estado crítico $\lambda_{10}$ e $M$ – (Jefferies e Been, 2016). .....	51
Figura 23 – Relação entre $\lambda_{10}$ e $F$ sugerido por plewes et al. (1992) com dados adicionais de Reid (2012). (Jefferies e Been, 2016).....	52
Figura 24 – Ábaco de classificação comportamental através da razão de atrito – (Jefferies e Been, 2016) .....	54
Figura 25 – Localização dos Ensaios CPTu da Barragem 1 .....	55
Figura 26 – Curva granulométrica típica do rejeito da barragem 1.....	56
Figura 27 - Curva granulométrica típica DO REJEITO DA BARRAGEM 1 .....	57
Figura 28 – Resultado do ensaio CPTu-03 da Barragem 1, exportado do <i>software CPeT-IT</i> .....	59
Figura 29 - Localização dos Ensaios CPTu da Barragem 2.....	60
Figura 30 - Curva granulométrica típica do rejeito da barragem 2 .....	60
Figura 31 - Curva granulométrica típica do rejeito da barragem 2 .....	61
Figura 32 – Resultado do CPTu-01 da Barragem 2, exportado do <i>software CPeT-IT</i> . .....	63
Figura 33 - Localização do Ensaio CPTu da Barragem 3 .....	64
Figura 34 - Curva granulométrica típica do rejeito da barragem 3 .....	65
Figura 35 - Curva granulométrica típica do rejeito da barragem 3 .....	65
Figura 36 - Curva granulométrica típica do rejeito da barragem 3 .....	65
Figura 37 - Resultado do CPTu-01 da Barragem 3, exportado do <i>software CPeT-IT</i> . .....	66
Figura 38 - Resultados do ensaio CPTu (Barragem 1 CPTu-03) exportados do <i>software CPeT-IT</i> . .....	68
Figura 39 – Resultado da estimativa do parâmetro de estado por Robertson (2010) e Plewes et. al (1992) - BARRAGEM 1 - CPTu-03.....	69
Figura 40 Resultado da estimativa do comportamento do rejeito conforme Robertson (2016) - BARRAGEM 1 - CPTu-03.....	70

Figura 41 – <i>Box Plot</i> comparativo do CPTU-03.....	70
Figura 42 - Resultados do ensaio CPTu (Barragem 1 CPTu-07) exportados do <i>software CPTeT-IT</i> .....	71
Figura 43 - Resultado da estimativa do parâmetro de estado por Robertson (2010) e Plewes et. al (1992) - BARRAGEM 1 - CPTu-07.....	72
Figura 44 - Resultado da estimativa do comportamento do rejeito conforme Robertson (2016) - BARRAGEM 1 - CPTu-07 .....	73
Figura 45 - <i>Box Plot</i> comparativo do CPTU-07 .....	73
Figura 46 - Resultados do ensaio CPTu (Barragem 1 CPTu-14c) exportados do <i>software CPTeT-IT</i> .....	74
Figura 47 - Resultado da estimativa do parâmetro de estado por Robertson (2010) e Plewes et. al (1992) - BARRAGEM 1 - CPTu-14c.....	75
Figura 48 - Resultado da estimativa do comportamento do rejeito conforme Robertson (2016) - BARRAGEM 1 - CPTu-14c.....	76
Figura 49 – <i>Box Plot</i> do CPTu-14c.....	76
Figura 50 - Resultados do ensaio CPTu (Barragem 1 CPTu-26) exportados do <i>software CPTeT-IT</i> .....	77
Figura 51 - Resultado da estimativa do parâmetro de estado por Robertson (2010) e Plewes et. al (1992) - BARRAGEM 1 - CPTu-26.....	78
Figura 52 - Resultado da estimativa do comportamento do rejeito conforme Robertson (2016) - BARRAGEM 1 - CPTu-26 .....	79
Figura 53 – <i>Box Plot</i> comparativo do CPTu-26 .....	79
Figura 54 - Resultados do ensaio CPTu (Barragem 1 CPTu-31) exportados do <i>software CPTeT-IT</i> .....	80
Figura 55 - Resultado da estimativa do parâmetro de estado por Robertson (2010) e Plewes et. al (1992) - BARRAGEM 1 - CPTu-31.....	81
Figura 56 - Resultado da estimativa do comportamento do rejeito conforme Robertson (2016) - BARRAGEM 1 - CPTu-31 .....	82
Figura 57 – <i>Box Plot</i> do CPTu-31.....	82
Figura 58 - Resultados do ensaio CPTu (Barragem 2 CPTu-01) exportados do <i>software CPTeT-IT</i> .....	84
Figura 59 - Resultado da estimativa do parâmetro de estado por Robertson (2010) e Plewes et. al (1992) - BARRAGEM 2 - CPTu-01.....	85

Figura 60 - Resultado da estimativa do comportamento do rejeito conforme Robertson (2016) - BARRAGEM 2 - CPTu-01 .....	86
Figura 61 – <i>Box Plot</i> comparativo do CPTu-01 .....	86
Figura 62 – Resultados do ensaio CPTu (Barragem 2 CPTu-02) exportados do software CPTeT-IT. ....	88
Figura 63 – Resultado da estimativa do parâmetro de estado por Robertson (2010) e Plewes et. al (1992) – BARRAGEM 2 – CPTu-02 .....	89
Figura 64 – Resultado da estimativa do comportamento do rejeito conforme Robertson (2016) – BARRAGEM 2 – CPTu-02.....	90
Figura 65 – <i>Box Plot</i> comparativo do CPTu-02 .....	90
Figura 66 – Resultados do ensaio CPTu (Barragem 3 CPTu-01) exportados do software CPTeT-IT. ....	92
Figura 67 – Resultado da estimativa do parâmetro de estado por Robertson (2010) e Plewes et. al (1992) – BARRAGEM 3 – CPTu-01 .....	93
Figura 68 – Resultado da estimativa do comportamento do rejeito conforme Robertson (2016) – BARRAGEM 3 – CPTu-01 .....	94
Figura 69 – <i>Box Plot</i> comparativo do CPTu-01 .....	94

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Descrições dos tipos de métodos de construção e operação em barragens de rejeito (Almeida, 2018). .....	25
Tabela 2 - Resumo de acidentes em barragens de rejeitos, (Teixeira, 2023) .....	26
Tabela 3 – Parâmetros Geotécnicos da Barragem .....	58
Tabela 4 – Parâmetros Geotécnicos da Barragem 2 .....	61
Tabela 5 – Índice de vazios referentes à Barragem 2 .....	62
Tabela 6 – Parâmetros Geotécnicos da Barragem 3 .....	66

## LISTA DE SÍMBOLOS

a	Relação das áreas do cone;
Ac	Projeção da área do cone;
Asb	Área da seção transversal da luva do cone em sua extremidade inferior;
Ast	Área da seção transversal da luva do cone em sua extremidade superior;
Bq	Parâmetro de Poropressão;
CD	Contorno utilizado por Robertson (2016) que divide o ábaco de classificação comportamental em regiões contráteis e dilatantes;
CPT	Ensaio de Penetração de Cone (Cone Penetration Test);
CPTu	Ensaio de Penetração do Piezocone (com medição das poropressões);
Dr	Densidade Relativa;
e	Índice de vazios;
ec	Índice de vazios crítico;
emáx	Índice de vazios máximo;
emin	Índice de vazios mínimo;
F	Razão de Atrito Normalizada;
Fr	Razão de Atrito Normalizada;
fs	Atrito Lateral medido no ensaio CPTu;
G	Módulo Cisalhante;
Gs	Densidade relativa dos grãos do solo;
IB	Índice de Classificação Comportamental do solo atualizado por Robertson (2016);
Ic	Índice de Classificação Comportamental do Solo proposto por Jefferies e Davies (1993);
IP	Índice de Plasticidade;
Ir	Índice de Rigidez do solo;
K0	Coefficiente de Empuxo no Repouso;
Kc	Fator de Correção para a determinação de $Q_{tn,cs}$ ;
LL	Limite de Liquidez;
OCR	Razão de Pré-Adensamento (overconsolidation ration);
$p'$	Tensão Efetiva Média;
$p'_c$	Tensão Efetiva Média no Estado Crítico;

Pa	Pressão atmosférica;
q	Tensão desviadora;
Q	Resistência de Ponta Normalizada pela tensão vertical efetiva;
qc	Resistência de ponta do ensaio CPTu;
qc1	Resistência de ponta normalizada do ensaio CPTu (usando uma tensão de referência de 100kPa);
Qp	Resistência de ponta normalizada pela tensão efetiva média;
qt	Resistência de ponta corrigida do ensaio CPTu;
Qt	Resistência de Ponta Normalizada pela tensão vertical efetiva;
Qtn	Resistência de Ponta Normalizada do ensaio CPTu introduzindo o expoente adimensional (n) que varia de acordo com o tipo de solo e estado de tensão;
Qtn,cs	Resistência de ponta normalizada e equivalente à de areais limpas;
SBTn	Ábaco de Classificação Comportamental Normalizado (Normalized Soil Behaviour Type);
SH	Strain Hardening;
SPT	Ensaio de Penetração do tipo Standard Penetration Test;
SS	Strain Softening;
Su	Resistência ao cisalhamento não drenada;
Su(LIQ)	Resistência ao cisalhamento liquefeita;
Su(Pico)	Resistência ao cisalhamento de pico;
u1	Poropressão gerada durante o ensaio CPTu e medida na ponta do cone;
u2	Poropressão gerada durante oensaio CPTu e medida na base do cone;
uo	Poropressão de equilíbrio/ou “ <i>insitu</i> ”;
w	Teor de Umidade (em %);
$\Gamma$	Índice de vazios no estado crítico associado a $p'=1$ kPa;
$\gamma$	Peso específico natural;
$\gamma_d$	Peso específico seco;
$\gamma_s$	Peso específico relativo dos grãos;
$\gamma_w$	Peso específico da água;
$\lambda$ ( $\lambda_e$ )	Inclinação da linha de estado crítico no plano $e - p'$ (eixo das abcissas utilizando logaritmo natural);
$\lambda_{10}$	Inclinação da linha de estado crítico no plano $e - p'$ (eixo das abcissas utilizando logaritmo na base 10);



$M_{tc}$	Inclinação da linha de estado crítico no plano $p' - q$ ;
$v$	Volume Específico $(1+e)$
$\sigma'_1$	Tensão Principal Maior Efetiva;
$\sigma'_3$	Tensão Principal Menor Efetiva;
$\sigma'_h$	Tensão horizontal efetiva;
$\sigma'_n$	Tensão Normal Efetiva;
$\sigma'_{oct}$	Tensão Octaédrica Efetiva;
$\sigma'_{v0}$	Tensão vertical efetiva;
$\sigma_v$	Tensão vertical Total;
$\tau$	Tensão de Cisalhamento;
$\tau'_{oct}$	Tensão de Cisalhamento Octaédrica;
$\varphi'$	Ângulo de atrito efetivo;
$\varphi_c$	Ângulo de atrito no estado crítico – (em termos de tensões efetivas);
$\psi$	Parâmetro de estado;

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>17</b>
<b>1 BARRAGENS DE REJEITO E POTENCIAL DE LIQUEFAÇÃO</b> .....	<b>20</b>
<b>2 ENSAIOS DE PIEZOCONE (CPT<sub>u</sub>)</b> .....	<b>35</b>
2.1 Avaliação da Suscetibilidade à Liquefação, Olson (2001) .....	40
2.2 Método de Robertson (2010) .....	41
2.3 Método de Plewes et al. (1992) .....	46
<b>3 CASOS DE ESTUDO</b> .....	<b>55</b>
3.1 Barragem 1 .....	55
3.2 Barragem 2 .....	59
3.3 Barragem 3 .....	63
<b>4 RESULTADOS</b> .....	<b>67</b>
4.1 Barragem 1 – CPT <sub>u</sub> -03 .....	67
4.2 Barragem 1 – CPT <sub>u</sub> -07 .....	71
4.3 Barragem 1 – CPT <sub>u</sub> -14c .....	74
4.4 Barragem 1 – CPT <sub>u</sub> -26 .....	77
4.5 Barragem 1 – CPT <sub>u</sub> -31 .....	80
4.6 Barragem 2 – CPT <sub>u</sub> -01 .....	83
4.7 Barragem 2 – CPT <sub>u</sub> -02 .....	87
4.8 Barragem 3 – CPT <sub>u</sub> -01 .....	91
<b>5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS</b> .....	<b>96</b>
5.1 Conclusões .....	96
5.2 Sugestões para Futuras Pesquisas .....	98
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>99</b>

## INTRODUÇÃO

O fenômeno da liquefação ganhou notoriedade após os acidentes ocorridos nas barragens de Fundão, Mariana/MG em 2015 e na Barragem 1, mina córrego do Feijão, Brumadinho/MG. em 2019. Em novembro de 2015, a barragem de rejeitos Fundão (Mariana/MG) rompeu, liberando 32 milhões de m<sup>3</sup> de rejeitos no meio ambiente. Anos depois, o mesmo fenômeno ocorreu na barragem de rejeitos B1 (Brumadinho/MG), em janeiro de 2019, liberando aproximadamente 9,7 milhões de m<sup>3</sup> de rejeitos e resultando na perda de centenas de vidas humanas no desastre.

Naturalmente, qualquer assunto envolvendo vidas humanas e desastres ambientais tende a gerar procura por respostas e melhores estudos acerca do tema.

Casagrande (1975) observou que solos muito fofos têm a tendência de reduzir seu volume durante a fase de cisalhamento drenado. Enquanto isso, solos mais compactos, sob condições de contorno semelhantes, tendem a aumentar seu índice de vazios até atingir o estado crítico. Nesse estado, não ocorre mais variação volumétrica com deformações axiais. Durante carregamentos não drenados, solos contráteis tendem a gerar um excesso de poropressão, o que diminui a tensão efetiva e, por conseguinte, a resistência ao cisalhamento do solo. No entanto, o oposto ocorre em solos com comportamento dilatante, que propiciam a geração de excesso de poropressões negativas durante a etapa de cisalhamento. É válido notar que a maioria dos solos com comportamento dilatante apresenta uma fase inicial de contração.

A análise da suscetibilidade à liquefação de uma barragem é de suma importância em estruturas constituídas de solos arenosos, jovens e argilas sem cimentação, não plásticos ou de baixa plasticidade e com potencial contrátil. Quanto ao estudo da mineração no Brasil, a liquefação estática tem sido um tema relevante e bem divulgado, devido às características geotécnicas dos rejeitos granulares.

A deposição hidráulica em barragens de rejeitos impõe a condição saturada e o alto índice de vazios do rejeito, ou seja, cria condições propícias para a liquefação. Em função dos métodos de alteamento e despejo do rejeito no interior das barragens, as condições estruturais favorecem o surgimento de camadas intercaladas de

materiais com comportamento argiloso e arenoso, além da mistura dos dois tipos de solo. Este fenômeno dificulta a dissipação e a drenagem da poropressão ao longo das etapas de carregamento e alteamento da estrutura.

Diversas metodologias já foram propostas para avaliar o potencial de liquefação dos solos e rejeitos. Muitas delas baseadas em análises de casos históricos de ruptura por liquefação. Essas metodologias consistem em classificar o comportamento e compacidade dos solos/rejeitos durante o cisalhamento (contrátil ou dilatante) por meio da análise de ensaios *insitu*, como o CPTu. Este ensaio é o que apresenta boa qualidade para avaliar o potencial à liquefação, devido à sua alta precisão e resultados e medições precisas, boa repetibilidade, baixa dependência do operador (fator humano) e grande quantidade de informações que podem ser obtidas. A preferência por ensaios de campo para avaliar o estado do solo é interessante principalmente no caso de materiais arenosos, visto que existe uma dificuldade de obtenção de amostras indeformadas, que conservam a estrutura e o índice de vazios do solo *insitu*.

## **Objetivos**

O presente trabalho tem como principal objetivo a apresentação, aplicação prática e comparação entre métodos de cálculo do parâmetro de estado a partir do ensaio CPTu. Para tal foram utilizados dados de ensaios de caracterização e CPTu de três barragens de rejeito localizadas no Estado de Minas Gerais, Brasil.

## **Estrutura da dissertação**

O trabalho é estruturado a fim de apresentar os problemas e desafios envolvendo as barragens de rejeito.

O Capítulo 1 apresenta uma revisão bibliográfica sobre barragens de rejeitos e potencial de liquefação, caracterizando o comportamento (contrátil ou dilatante) dos solos.

O Capítulo 2 apresenta o ensaio de piezocone (CPTu), e as principais metodologias existentes para a obtenção do parâmetro de estado e avaliação da susceptibilidade à liquefação, a partir dos resultados deste ensaio.

No Capítulo 3 são apresentados os casos de estudo, os ensaios executados e a caracterização das barragens de rejeito analisadas.

No Capítulo 4, os resultados são apresentados e posteriormente discutidos no Capítulo 5.

Finalmente, o Capítulo 5 apresenta as principais conclusões do estudo e sugestões para futuras pesquisas.

# 1 BARRAGENS DE REJEITO E POTENCIAL DE LIQUEFAÇÃO

## 1.1 Barragens de Rejeitos

As barragens de rejeito servem como solução para o descarte em ambiente controlado. Por muito tempo os resíduos da atividade de beneficiamento eram lançados em cursos d'água ou terrenos adjacentes, formando assim depósitos sem nenhum tipo de controle.

Conforme o volume de produção e a preocupação ambiental foram aumentando, foram necessárias novas tecnologias e pesquisas para construção e monitoramento seguro dessas barragens. O Brasil é um dos países com maior quantidade de barragens e tem dois recentes acidentes ocorridos no estado de Minas Gerais, na Barragem de Fundão em Mariana e na Barragem do Córrego do Feijão em Brumadinho.

As barragens de rejeitos são estruturas com o propósito principal de armazenar os resíduos indesejados do processo de extração mineral ou de fabricação. Os rejeitos podem ser depositados na forma seca, em pilhas, ou úmida, por deposição hidráulica.

Albuquerque Filho (2004) afirma que, os processos físicos e químicos que ocorrem no beneficiamento dos minerais têm como principal objetivo a promoção e separação da parcela de valor econômico (minério) daquela com baixo valor agregado (rejeitos da mineração). As etapas envolvidas no processo de mineração como, lavra, disposição de estéreis, beneficiamento, produtos finais e resíduos gerados são apresentadas no seguinte fluxograma para o minério de ferro, como exemplificado na Figura 1.



**Figura 1 - Fluxograma do processo de mineração de ferro (Albuquerque Filho, 2004)**

Segundo Magalhães (2018), as atividades de concentração são realizadas comumente de forma úmida, sendo, portanto, necessária a eliminação dessa parcela de água do concentrado até o final do processo. Tais operações são denominadas de desaguamento (espessamento e filtragem) e secagem. Sendo assim, como produto final do beneficiamento do minério são gerados três subprodutos, sendo eles: um concentrado, um rejeito granular e um rejeito fino, apresentando diferentes características e comportamentos geotécnicos e disposição dentro da planta industrial.

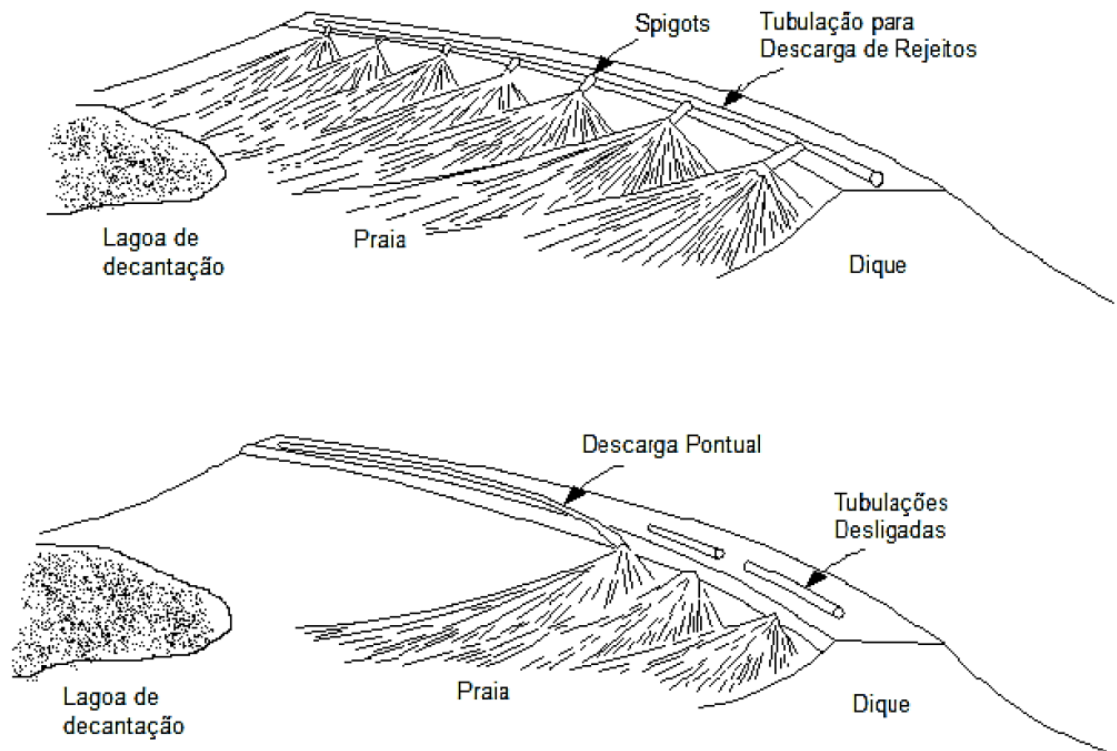
Russo (2007) afirma que os rejeitos em forma de polpa e os espessados são os que mais ocorrem no Brasil. A disposição é feita por via úmida, formando aterros hidráulicos, caracterizados pela segregação, sedimentação e adensamento dos rejeitos. Essa técnica de disposição, além de economicamente atrativa e mais prática, quando comparada aos outros métodos, se apresenta com larga aplicabilidade na concepção de barragens de rejeito de minério de ferro, com capacidade para transportar e depositar, de maneira teoricamente segura, os intensos e grandes volumes de rejeitos produzidos diariamente.

Dependendo do teor de sólidos e consequente percentual de água no material, os rejeitos podem ser classificados como (Davies et al., 2010):

- Rejeitos em polpa: Rejeitos com uma menor concentração de sólidos;

- Rejeitos espessados: Rejeitos com uma maior concentração de sólidos devido ao processo mecânico de espessamento;
- Rejeitos em pasta: Rejeitos com uma concentração de sólidos intermediária (com uma concentração próxima ao de uma pasta de dentes);
- Rejeitos em torta (ou filtrados): Rejeitos com alta concentração de sólidos;

Soares (2010), a disposição do resíduo pode ser realizada em um ponto único ou por espigotamento/vários pontos (*spigots*), como mostrado na Figura 2. Os rejeitos se espalham, formando uma praia na forma aproximada de um cone com seu foco na linha de drenagem ou tubo de descarga.



**Figura 2 - Métodos de disposição de rejeitos em barragens. (a) Vários pontos/espigotamento (*spigots*). (b) Descarga pontual. Vick (1983).**

Albuquerque Filho (2004) comenta que a descarga de um único ponto exige que a extremidade aberta do tubo seja realocada de tempos em tempos a fim de formar uma série de sequenciais depósitos e adjacentes. Quando o espigotamento é utilizado como solução, a lama é disposta através de *spigots* espaçados na tubulação



(normalmente com cerca de 15 a 20 metros de distância), não sendo então necessária a realocação frequente da tubulação ou desconexão dos segmentos da tubulação. A declividade das praias é proporcional à porcentagem de sólidos presentes na polpa. Normalmente essa inclinação varia de 0,5 a 2%, para regiões próximas ao ponto de lançamento, mas também pode chegar a 0,1% em regiões mais distantes.

A granulometria do rejeito localiza-se normalmente nas faixas de areia, silte e argila. As partículas mais grossas assentam rapidamente, em densidade baixa, próximo à ponto de descarga. Esta região é denominada praia. Entretanto, os materiais mais finos são transportados para região central do lago de rejeito (barragem). Os materiais finos sedimentam lentamente, formando uma lama de baixa densidade e conforme o tempo avança adensam sob seu próprio peso. A Figura 3 mostra esquematicamente a variação granulométrica em depósitos de rejeito.



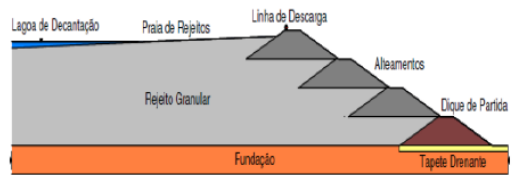
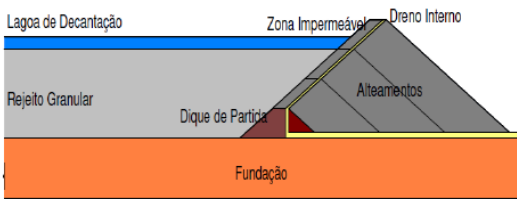
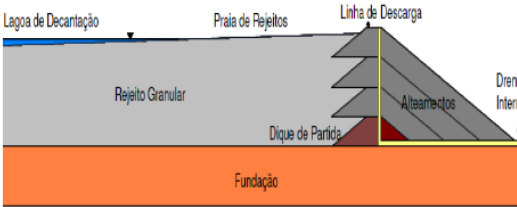
**Figura 3 - Variação da permeabilidade no interior das barragens de rejeitos, Vick (1983)**

Naturalmente, conforme a produção da planta industrial aumenta junto da demanda por mais espaços e volumes de disposição de rejeitos, é necessário, portanto, que sejam alteados mais diques a fim de conter o material gerado no processo de beneficiamento do minério. Vick (1983), as barragens começam inicialmente a partir da construção de um dique de partida, normalmente construído de solo natural competente (Tabela 1). Após a construção inicial do dique de partida, a jusante do pé da barragem, todos os rejeitos são posteriormente lançados da crista do dique. Dessa forma, é construída a praia de rejeitos, entre os *spigots* e a lagoa de rejeitos. O Tabela 2 resume os três métodos de alteamento e suas particularidades (Albuquerque Filho, 2004).

Ainda Vick (1983), os alteamentos seguintes são planejados para acompanhar a produção e avanço dos rejeitos advindos das minas e para suportar as possíveis inundações no interior da barragem. O alteamento pode ser construído por uma ampla variedade de materiais, o que inclui empréstimos naturais de solo, ou até mesmo utilizando os sólidos grossos advindos dos rejeitos, classificados pelo processo de ciclonagem (processo industrial).

Teixeira (2023), muitos acidentes em estruturas de barragens de rejeito foram divulgados no Brasil, principalmente no Quadrilátero Ferrífero, MG, região de maior extração de minério de ferro. Na maioria dos casos as consequências ambientais e de perdas humanas foram devastadoras e incalculáveis. **O Erro! Fonte de referência não encontrada.** resume alguns dos principais acidentes.

**Tabela 1 - Descrições dos tipos de métodos de construção e operação em barragens de rejeito (Almeida, 2018).**

Método	Características	Modelo	Vantagens	Desvantagens
<b>Montante</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• início de construção dado por um dique de inicial/partida;</li> <li>• estruturada com aterro compactado ou enrocamento;</li> <li>• alteamentos realizados a montante do dique de partida.</li> </ul>	 <p>Fonte: Albuquerque Filho (2004)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• facilidade de construção;</li> <li>• custo para construção relativamente baixo;</li> <li>• o próprio rejeito serve de fundação para os próximos diques.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• susceptibilidade de a erosão interna;</li> <li>• liquefação;</li> <li>• baixa segurança.</li> </ul>
<b>Jusante</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• possui um caráter mais conservador;</li> <li>• estrutura inicial se desenvolve a partir de um dique primário;</li> <li>• alteamento realizados à jusante do dique de partida;</li> <li>• processo de construção, ampliação, e alteamentos ocorrem de forma independente da disposição do rejeito.</li> </ul>	 <p>Fonte: Albuquerque Filho (2004)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• inexistência de restrições para a altura final da estrutura;</li> <li>• melhor controle do lençol freático e do nível d'água;</li> <li>• método de construção e operação dão melhores condições de estabilidade para as estruturas;</li> <li>• drenagem interna pode ser instalada durante qualquer etapa de expansão;</li> <li>• os alteamentos da barragem podem ser construídos com o próprio rejeito.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• a grande quantidade de material necessário para a estrutura de aterro;</li> <li>• altos custos dispendiosos.</li> </ul>
<b>Linha de centro</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• estrutura inicial se desenvolve a partir de um dique de partida;</li> <li>• estrutura física se aproxima do método à jusante;</li> <li>• é lançado de modo periférico à sua crista, formando a praia de deposição;</li> <li>• alteamentos são feitos com material argiloso sobre a divisa do talude à jusante do maciço de partida e da praia de rejeitos.</li> </ul>	 <p>Fonte: Albuquerque Filho (2004)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• material argiloso pode ser oriundo de decapeamento da mina, estéril ou empréstimo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• os alteamentos da barragem não podem ser construídos com o próprio rejeito</li> <li>• logística e custo para transporte de material argiloso</li> </ul>

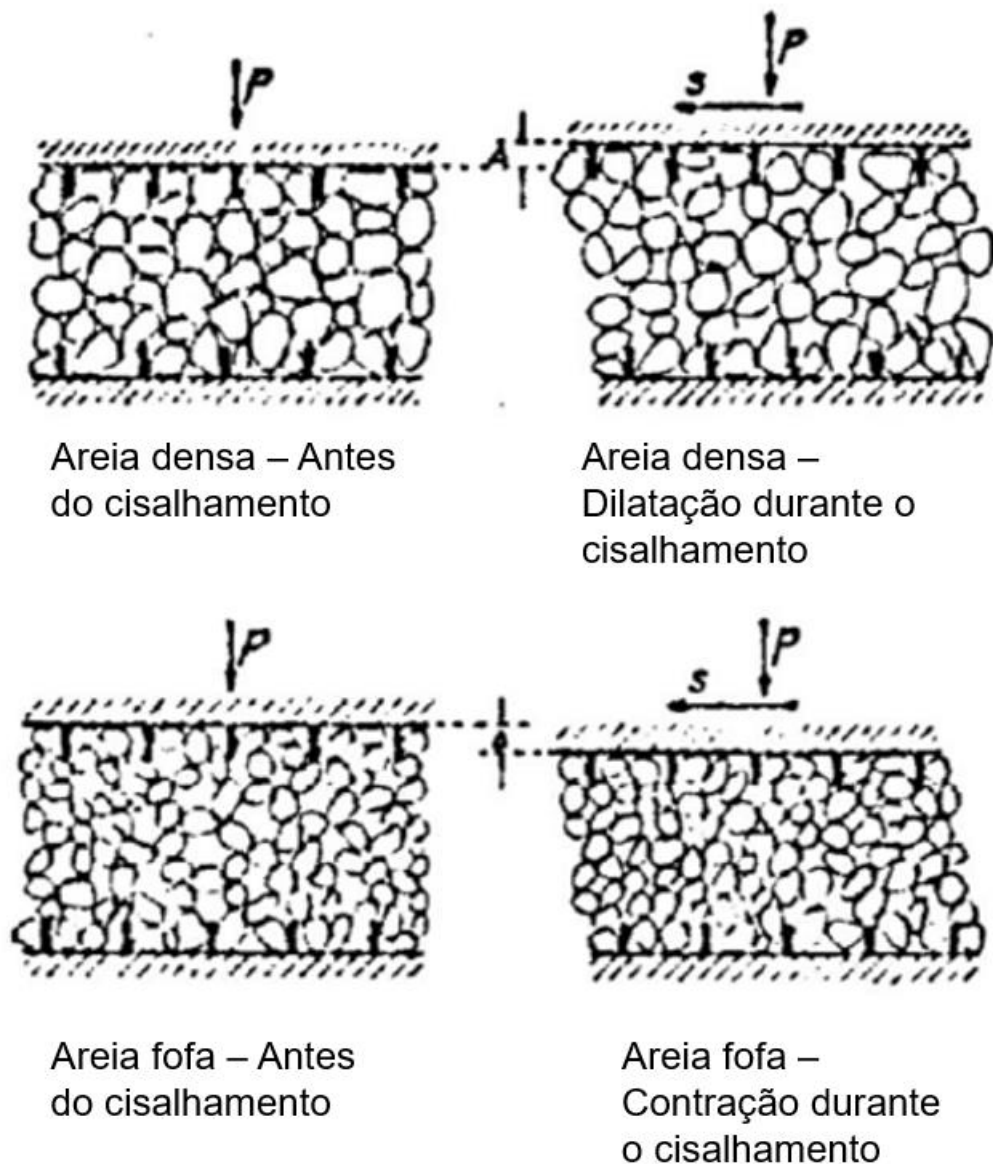
**Tabela 2 - Resumo de acidentes em barragens de rejeitos, (Teixeira, 2023)**

BARRAGEM	ANO	OCORRIDO	FONTE
Barragem de contenção da Mina de Fernandinho	1986	No município de Itabirito, MG, a barragem continha rejeitos de minério de ferro e possuía um volume próximo a 350.000 m <sup>3</sup> . Inicialmente a ruptura ocorreu na ombreira direita. As consequências foram a morte de 7 pessoas e danos à vegetação local.	CARVALHO, 2018
Barragem de Contenção de Rejeitos da Mina do Pico de São Luís	1986	Ocorreu na região de Itabirito, MG. Construída pelo método à jusante, sua ruptura não gerou óbitos, mas danos ambientais, com a lama fluindo até 10 km à jusante.	CARVALHO, 2018
Barragem de contenção de Rejeitos de Macacos	2001	Localizada na região de São Sebastião das Águas Claras, Nova Lima, MG. Cerca de 600.000 m <sup>3</sup> de rejeito de minério de ferro foi liberado, matando 5 pessoas e 79 hectares de mata Atlântica foram devastadas.	CARVALHO, 2018
Barragem de contenção de rejeitos industriais da floresta Cataguases Ltda	2003	O acidente ocorreu na Zona da Mata Mineira e liberou uma lama tóxica de aproximadamente 1,4 milhões de litros, da sobra industrial da produção de celulose. Contaminou o Córrego do Cágado e do Rio Pomba, afluente do Rio Paraíba do sul.	CARVALHO, 2018
Barragem São Francisco da Mineradora Rio Pomba Cataguases Ltda	2007	Em Miraf, MG, a barragem continha rejeitos do beneficiamento da bauxita, produzido pela deslamagem do minério. Os 2 milhões de rejeitos liberados inundaram os municípios de Miraf e Muriaé. Desalojou mais de 4000 pessoas e interrompeu o abastecimento de água.	CARVALHO, 2018
Barragem B1 Herculano Mineradora	2014	No município de Itabirito, MG, a barragem acumulou 3.200.000 m <sup>3</sup> em rejeitos de minério de ferro, e sua ruptura provocou uma inundação na área a jusante, gerando impactos ambientais e a morte de três operários. Por ser uma	CARVALHO, 2018

BARRAGEM	ANO	OCORRIDO	FONTE
		barragem em cascata, acabou comprometendo as barragens B2 e B3.	
Barragem Fundão da Mineradora Samarco S. A	2015	Localizada no distrito de Bento Rodrigues, no município de Mariana, MG, sua ruptura foi considerada o maior desastre ambiental do Brasil. Com um volume do reservatório de aproximadamente 45.000.000 m <sup>3</sup> , o rompimento iniciou na ombreira direita e provocou o galgamento da barragem de Santarém, que acumulava água. Isso fez com que o rejeito se diluísse e formasse uma lama de maior velocidade e alcance. Foram vários impactos, como contaminação de rios, fauna e flora e a morte de 19 pessoas.	CARVALHO, 2018
Barragem B1 do complexo Córrego do Feijão Vale S. A	2019	Na região de Brumadinho, MG, 13 milhões de m <sup>3</sup> de rejeito de minério de ferro foram lançados, no efluente do rio Paraopeba, causando a morte de 252 pessoas e 18 desaparecidos	Robertson <i>et al.</i> , 2019

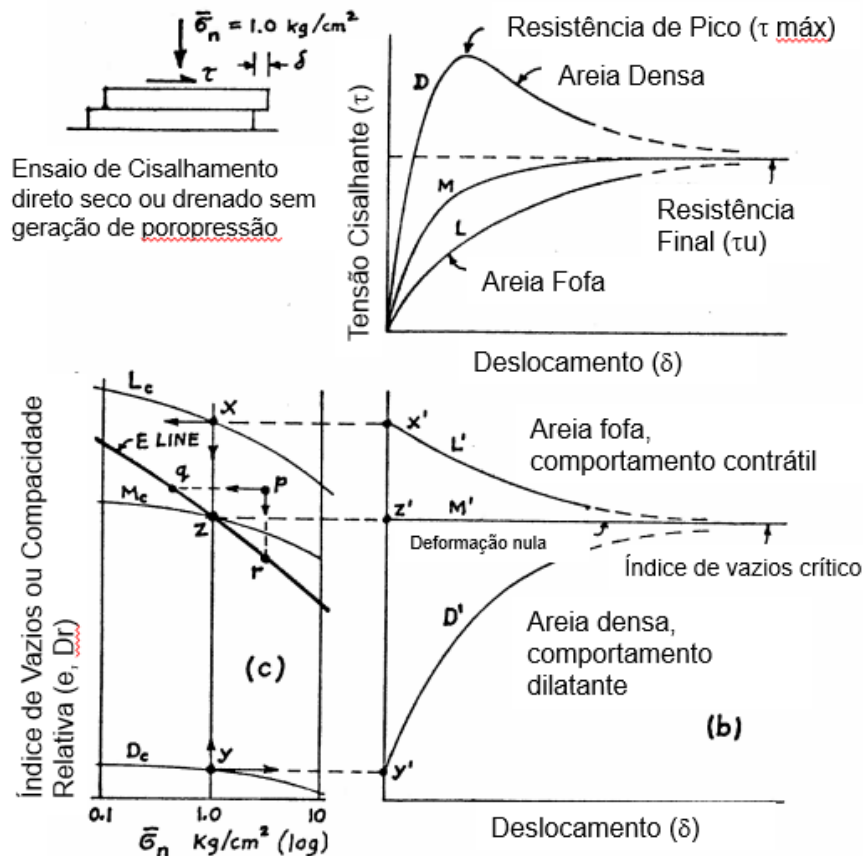
## 1.2 Potencial de Liquefação

Casagrande (1936) introduziu o conceito de liquefação em solos granulares antes mesmo da execução de ensaios mais complexos onde fosse possível simular a condição de carregamento sob volume constante. A partir de ensaios de cisalhamento direto (condição drenada) foi possível perceber que areias muito fofas tinham tendência à contração durante o cisalhamento, ao passo que areias muito densas tendiam à dilatação. A Figura 4 ilustra esse comportamento.



**Figura 4 - Variação volumétrica em areias densas e fofas, adaptado de (Casagrande, 1936)**

O conceito de índice de vazios crítico foi introduzido após a percepção de que ambas as areias, fofas e densas, atingem o mesmo índice de vazios a grandes deformações. Após realizar ensaios com diferentes níveis de tensão percebeu que o índice de vazios crítico possui relação inversa com a tensão confinante (Figura 5). As areias fofas tendem a reduzir o índice de vazios com o incremento das deformações, enquanto as areias densas tendem a dilatar até atingir o mesmo valor de índice de vazios em grandes deformações, sendo esse o índice de vazios crítico ( $e_c$ ).



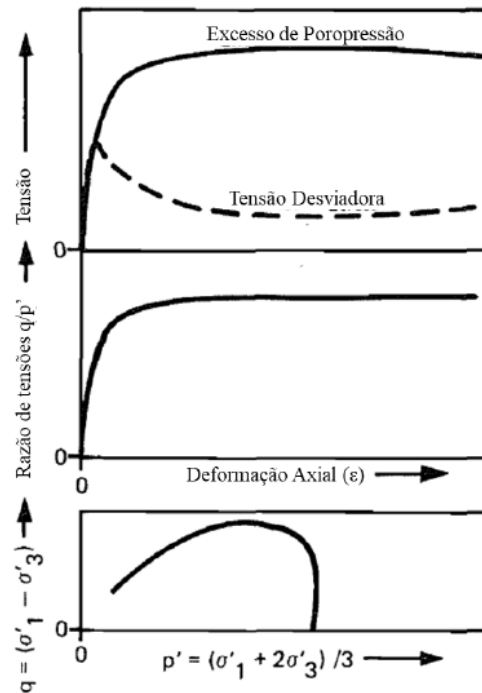
**Figura 5 - Resultados de ensaios de cisalhamento direto em condição drenada para areias com diferentes índices de vazio – adaptado de (Casagrande, 1975)**

Casagrande (1975) destaca 3 pontos acerca das hipóteses do índice de vazios crítico:

1. Todos os pares de índice de vazios e tensão normal efetiva localizados abaixo da linha E (*E line*) representam situações em que o solo tende a exibir comportamento dilatante, portanto sem apresentar risco à ocorrência de liquefação;
2. Todos os pares de índice de vazios e tensão normal efetiva localizados acima da linha E (*E line*) representam situações em que o solo tende a exibir comportamento contrátil, apresentando assim risco de ocorrência de liquefação;
3. A relação tensão confinante x índice de vazios é inversamente proporcional.

Castro (1969) a partir de ensaios de compressão triaxial conseguiu avançar mais no estudo do comportamento das areias fofas e densas. A determinação da linha de

estado crítico foi possível a partir de ensaios triaxiais não drenados sob tensão controlada e deformação controlada. O comportamento típico dos solos arenosos contráteis pode ser observado na Figura 6 onde é possível observar que a tensão desviadora atinge o valor máximo a baixas deformações, resultando em significativa perda de resistência ao cisalhamento após atingir o pico.



**Figura 6 - Resultados de ensaios triaxiais não drenados em areias fofas (Sladen et al. 1985)**

É possível traçar a linha de estado crítico no plano  $p' \times q$  ou no plano  $p' \times e$  como mostra Figura 7. As amostras com o mesmo índice de vazios ( $e_a$ ) e tensões confinantes distintas ( $p'_1$ ,  $p'_2$  e  $p'_3$ ) atingem o mesmo estado de tensão no estado crítico ou estado permanente, correspondendo aos pontos  $q_{ssa}$  e  $p'_{ssa}$  (tensão desviadora e tensão efetiva média no estado permanente, que se refere ao ponto com índice de vazios inicial  $e_a$ ). Conforme mostrado por Sladen et al. (1985), o estado de tensão que corresponde à condição de resistência de pico pode ser ajustado por uma envoltória de colapso, que também passa pelo ponto correspondente ao estado crítico para um dado índice de vazios.



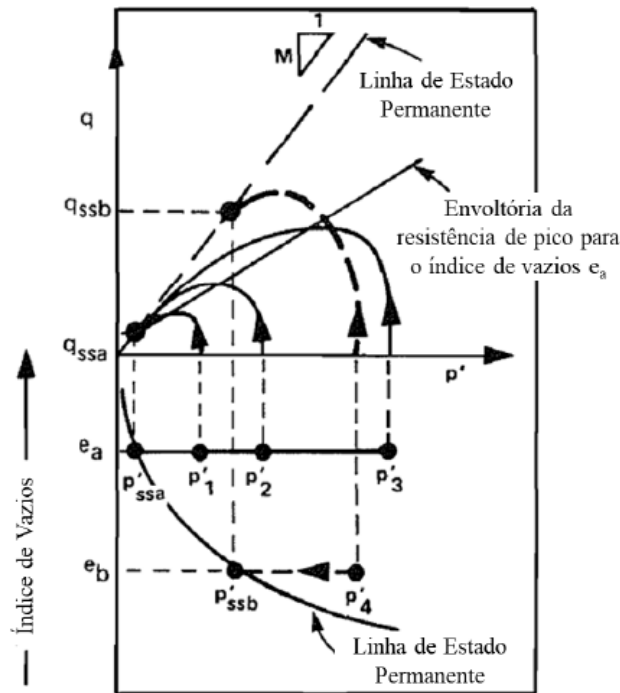


Figura 7 - Linha de Estado Crítico nos planos i)  $p' - q$  e ii)  $p' - e$  (Sladen et al. 1985).

O parâmetro  $M$  indica a inclinação da linha no plano  $p' \times q$  (relação entre a tensão desviadora e a tensão efetiva média no estado crítico). Sendo o subscrito "tc" referido para o parâmetro  $M$  obtido em ensaio triaxial e no estado crítico.

$$M_{tc} = \frac{q_c}{p'_c} \quad (1)$$

Onde  $q_c$  representa a resistência de ponta do ensaio CPTu e  $p'_c$  a tensão efetiva média no estado crítico. O valor de  $M_{tc}$  também pode ser obtido e expresso em termos de ângulo de atrito no estado crítico ou ângulo de atrito a volume constante -  $\Phi_c$

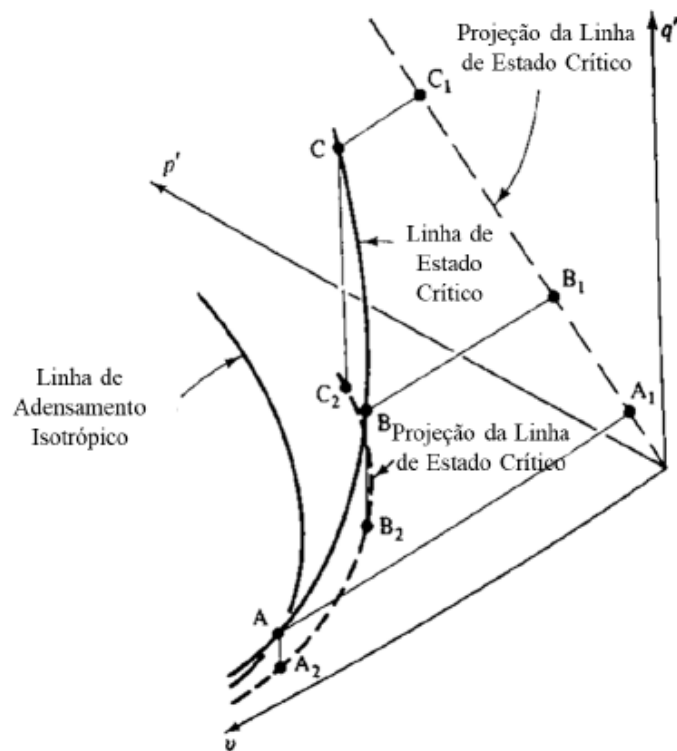
$$M_{tc} = \frac{6 \sin \Phi_c}{3 - \sin \Phi_c} \quad (2)$$

No plano  $p' \times e$ , a linha de estado crítico é expressa no eixo semi-logarítmico nas abcissas e é escrita da seguinte forma:

$$e_c = \Gamma - \lambda \ln p'_c \quad (3)$$

Onde  $\lambda$  (Inclinação da linha de estado crítico) e  $\Gamma$  (Índice de vazios no estado crítico quando  $p' = 1$  kPa;) bem como o parâmetro  $M$  são propriedades do solo. Como a linha de estado crítico pode ser ilustrada com o eixo das abcissas em logaritmo natural ou logaritmo na base 10, é usual o uso de  $\lambda$  (ou  $\lambda_e$ ) para se referenciar à primeira condição e  $\lambda_{10}$  para esta última, sendo que  $\lambda_{10} = 2,303.\lambda$ .

Dessa forma, é possível apresentar uma envoltória tridimensional nos planos  $p' x$  e  $x q$ , como ilustrado na Figura 8.



**Figura 8 – Linha de estado crítico tridimensional nos planos  $p' x u$  e  $x q$ , sendo  $u$  o volume específico ( $1 + e$ ) – (Atkinson e Bransby, 2012)**

### 1.3 Parâmetro de Estado

Segundo Jefferies e Been (2016), um importante parâmetro pode ser adotado para a avaliação da tendência à contração ou dilatação do solo: o parâmetro de Estado ( $\Psi$ ). Este parâmetro pode ser obtido a partir da seguinte relação no plano  $p'$  x  $e$ :

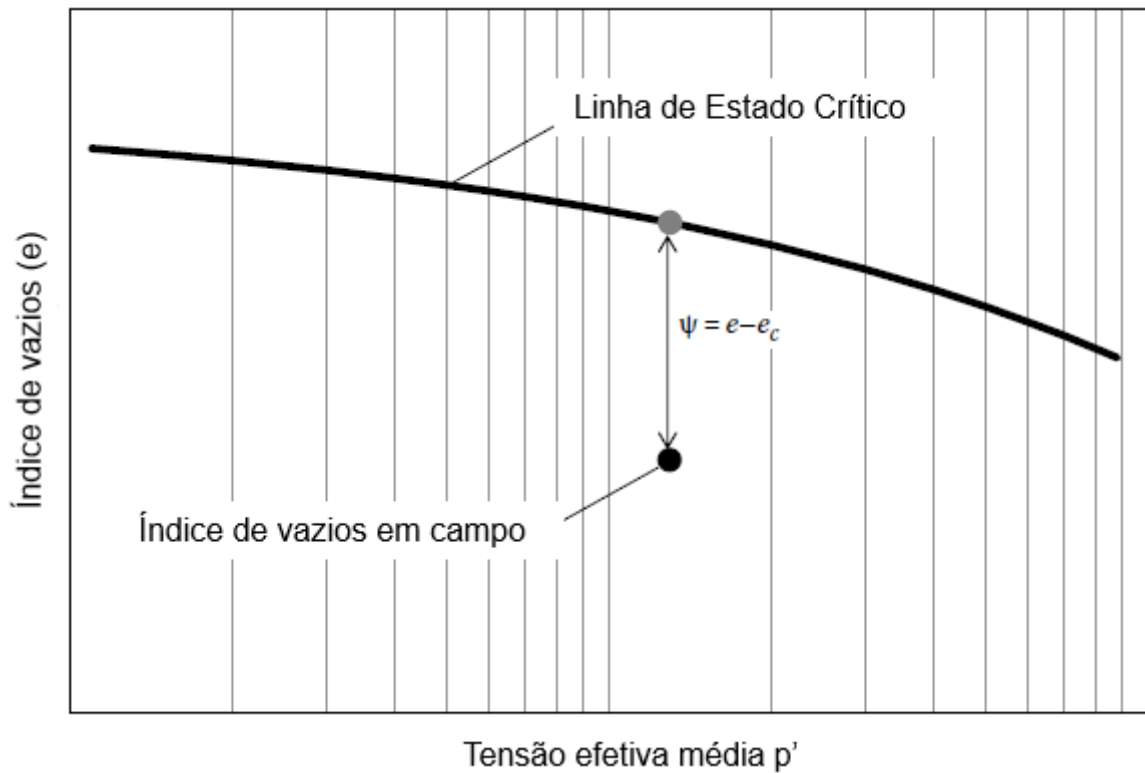
$$\Psi = e - e_c \quad (4)$$

Onde “e” indica o índice de vazios no campo e “ $e_c$ ” representa o índice de vazios no estado crítico para a mesma tensão efetiva.

O parâmetro de estado é, basicamente, a diferença de índice de vazios entre o estado *insitu* e o estado crítico para a mesma tensão média (Figura 9). Solos dilatantes têm  $\psi$  negativo e não apresentam perda abrupta de resistência ao cisalhamento em carregamentos não drenados. Entretanto solos fofos e contráteis têm  $\psi$  positivo e são então suscetíveis à ocorrência de liquefação.

Os trabalhos experimentais de Jefferies e Been (2016) e Shuttle e Cunning (2007) indicam um valor para os solos apresentarem um comportamento SS (*strain softening*), sendo esse:  $\psi > -0,05$ .

Definir o tipo de comportamento durante o cisalhamento em um material pode indicar se o material apresenta potencial à liquefação ou não. Os materiais dilatantes não são propensos a sofrer liquefação estática, mas poderiam ser liquefeitos segundo características de carga cíclica. Entretanto materiais contráteis são potencialmente suscetíveis à liquefação. (Robertson, 2010).



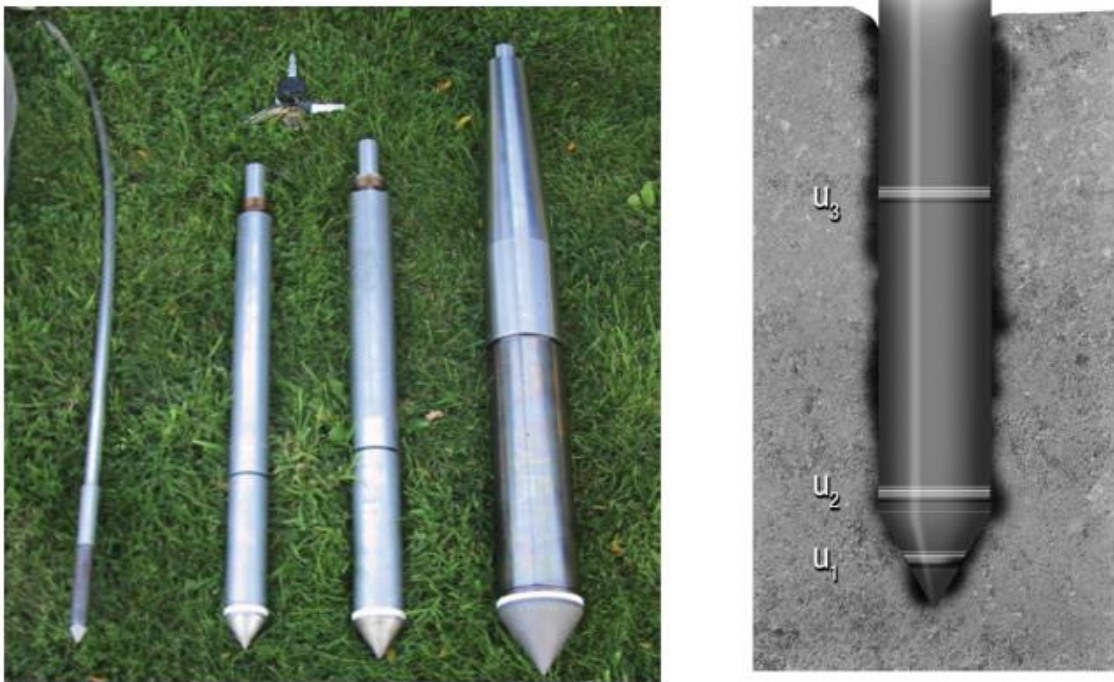
**Figura 9 – Definição do parâmetro de estado  $\psi$  (Jefferies e Been, 2016)**

Portanto, o parâmetro de estado pode ser utilizado como parâmetro de entrada em modelos constitutivos aplicados em análises numéricas. Como exemplo, tem-se diversos trabalhos divulgados na literatura sendo um bem recente: a análise da ruptura em Brumadinho em 2019 (Orbegoso, 2021).

## 2 ENSAIOS DE PIEZOCONE (CPT<sub>u</sub>)

Segundo Velloso e Lopes (2010), o ensaio de cone CPT (*cone penetration test*) teve origem na Holanda na década de 1930 para investigar os solos moles da região, e também estratos arenosos onde se apoiariam as fundações. O ensaio se difundiu graças à qualidade das informações obtidas ao longo de uma vertical. Em meados da década de 1970, com o avanço da tecnologia introduziu-se um transdutor (medidor) de pressão da água (através de elemento poroso) localizado próximo à ponta do cone para medição das poropressões durante o ensaio. Este ensaio passou a se chamar Piezocone, com a sigla CPT<sub>u</sub> (*piezocone penetration test*), indicando que o ensaio de cone mede também as poropressões ao longo da profundidade.

Segundo Robertson (1990), o ensaio de piezocone consiste na cravação estática contínua com velocidade média de 2 cm/s, em concordância com a NBR 12069 (MB340) 1991. O cone consiste em um elemento cilíndrico com ponta cônica (Figura 10 - Ponteiros (da esquerda para a direita: 2 cm<sup>2</sup>, 10 cm<sup>2</sup>, 15 cm<sup>2</sup>, 40cm<sup>2</sup>) e localização dos elementos filtrantes (Odebrecht e Schnaid (2012) apud Robertson (2006)) Figura 10) que mede continuamente valores da resistência de ponta  $q_c$ , da resistência por atrito lateral  $f_s$  e da poropressão  $u$ . A sonda CPT<sub>u</sub>, utilizada em solos moles, comumente tem área da ponta de 10 cm<sup>2</sup>, porém sondas com áreas menores podem ser utilizadas para acelerar o ensaio de dissipação de poropressões. Os autores salientam para a importância do equipamento CPT<sub>u</sub> em solos muito moles ser bastante leve, a fim de facilitar a acessibilidade, sobretudo em área de baixa capacidade de carga.



**Figura 10 - Ponteiros (da esquerda para a direita: 2 cm<sup>2</sup>, 10 cm<sup>2</sup>, 15 cm<sup>2</sup>, 40cm<sup>2</sup>) e localização dos elementos filtrantes (Odebrecht e Schnaid (2012) apud Robertson (2006))**

Odebrecht e Schnaid (2012) afirmam que, no caso do ensaio de cone, as grandezas medidas são a resistência de ponta ( $q_c$ ) e o atrito lateral ( $f_s$ ), sendo a razão de atrito ( $R_f = f_s/q_c$ ) o primeiro parâmetro derivado do ensaio, utilizado para a classificação dos solos através de correlações e ábacos. Um aspecto importante do piezocone é a falta de consenso nacional em relação à localização do elemento filtrante para registro das poropressões durante a cravação, e a escolha de uma posição em particular – ponta ( $u_1$ ), base ( $u_2$ ) ou luva ( $u_3$ ) do cone conforme pode ser observado na Figura 10. Sabe-se, porém, que as medidas de resistência à penetração são influenciadas pelo efeito de poropressões atuando em áreas desiguais da geometria da ponta do cone. Portanto se utiliza a medição na base do cone,  $u_2$ , para calcular a resistência real mobilizada no ensaio,  $q_t$ .

$$q_t = q_c + (1 - a) \cdot u_2 \quad (5)$$

Onde:  $\alpha$  é obtido através de calibração do cone. Os parâmetros  $q_t$ ,  $q_c$  e  $u_2$  são resultados do ensaio de Piezocone. Analogamente à correção de  $q_c$ , o atrito lateral  $f_s$  também pode ser corrigido conforme a expressão:

$$f_t = f_s - \frac{u_2 A_{st}}{A_l} + \frac{u_3 A_{st}}{A_l} \quad (6)$$

Onde:

$f_t$  é o atrito lateral corrigido;

$A_{st}$  é a área da luva de atrito;

$A_l$  é a área lateral da luva de atrito.

Segundo Odebrecht e Schnaid (2012), é fundamental corrigir a resistência de ponta em todos os ensaios de piezocone, especialmente para determinação das propriedades de solos mais finos. A Figura 11 ilustra um gráfico de resultado CPTu típico.

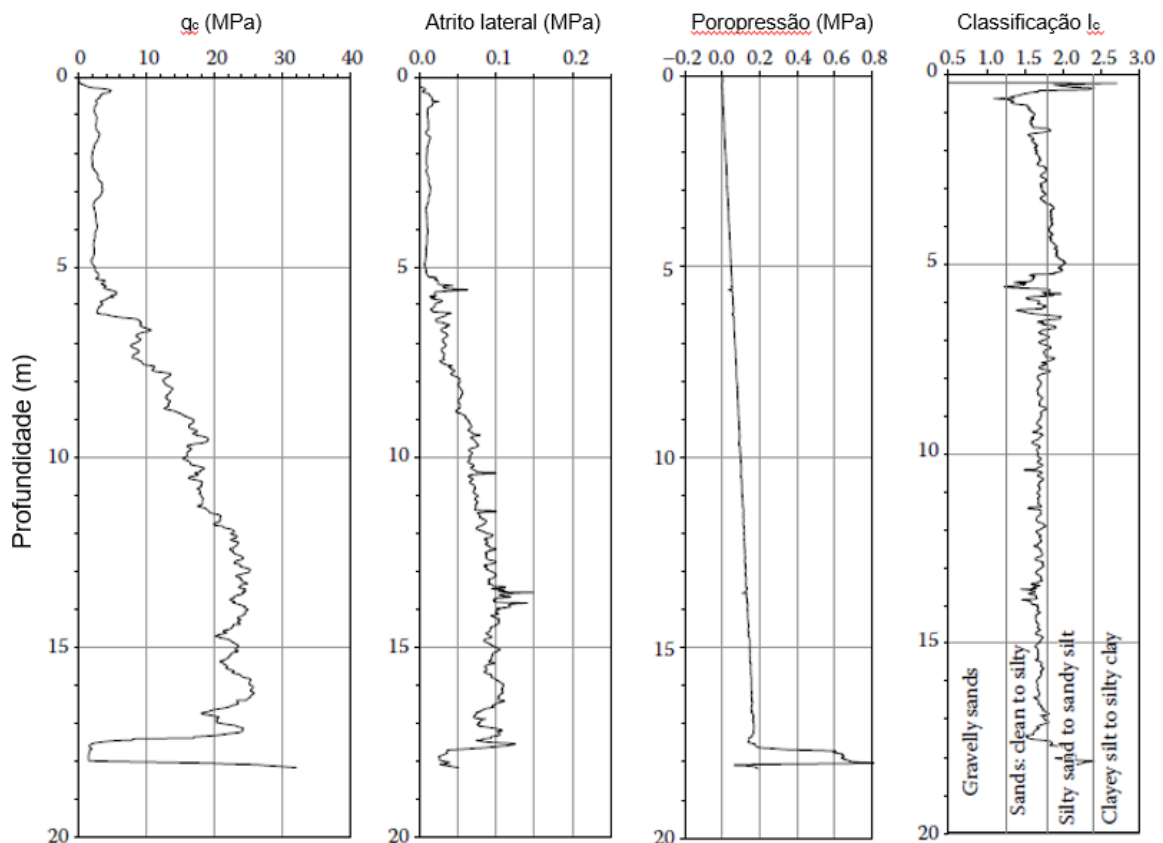


Figura 11 – Gráfico de resultado de ensaio CPTu (Jefferies e Been 2016)

Existem diversas propostas divulgadas na literatura quanto às correlações dos ensaios para obtenção de outros parâmetros. O ábaco (Figura 12 proposto por Robertson (1990) é um dos mais utilizados. A partir dos parâmetros utilizados no ábaco é possível obter a estratigrafia para cada profundidade de leitura, em geral a cada 2 cm, a partir dos parâmetros:

$$Q_t = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{\sigma_{v0}} \quad (7)$$

$$B_q = \frac{u_2 - u_0}{q_t - \sigma_{v0}} \quad (8)$$

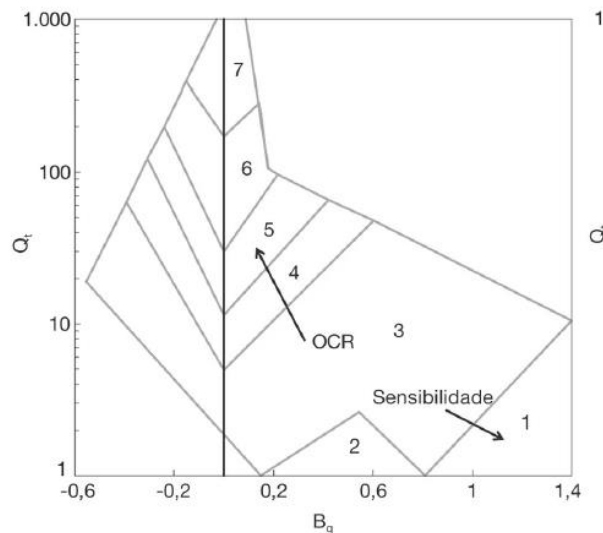
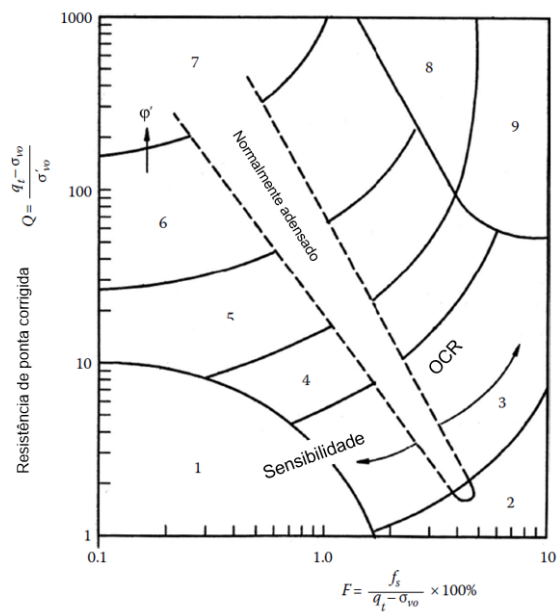
$$F_r = \frac{f_s}{q_t - \sigma_{v0}} \times 100\% \quad (9)$$

Onde:  $Q_t$  é a resistência de ponta normalizada;

$B_q$  é o parâmetro de poropressão;

$F_r$  é a razão de atrito normalizado.





**Figura 12 Classificação preliminar dos solos a partir dos dados do ensaio de piezocone. (Robertson 1990)**

Os itens subsequentes apresentam três métodos de avaliação do potencial à liquefação a partir do ensaio CPTu. Ressalta-se que, para esse trabalho, serão utilizados dois desses métodos (Robertson (2010) e Plewes et. al (1992)). A metodologia de Olson (2001) utiliza apenas um parâmetro do ensaio CPTu ( $Q_{c1}$ ) e não considera a compressibilidade presente nos rejeitos. A envoltória de Fear e Robertson (1995) sugerida por Olson (2001) tende a ser conservadora demais para materiais de alta compressibilidade, cuja relação  $q_c/N_{60}$  é geralmente muito inferior a 0,60.

Diferente dos métodos de Robertson (2010) e Plewes et. al (1992) que procuram estimar um valor para o parâmetro de estado através de parâmetros de poropressão.

## 2.1 Avaliação da Suscetibilidade à Liquefação, Olson (2001)

Olson (2001) fez a retroanálise de 33 casos de ruptura por liquefação. O objetivo era propor uma metodologia para o estudo de liquefação em estruturas sujeitas ao cisalhamento. O autor dividiu o trabalho em três etapas: 1) Avaliação da susceptibilidade à liquefação, 2) Análise do gatilho à liquefação e 3) Análise pós liquefação/fluxo por liquefação.

A primeira etapa do estudo proposto por Olson (2001) é a avaliação da condição do material estudado e sua susceptibilidade à liquefação, observando suas zonas de comportamento ao longo do perfil em contráteis e dilatantes. Para essa avaliação, o autor utilizou dados de ensaios SPT e CPTu e metodologias propostas na literatura e endossou a utilização da envoltória de Fear e Robertson (1995). Essa envoltória foi proposta para a avaliação de susceptibilidade à liquefação em materiais arenosos a partir de ensaios de laboratório.

Na envoltória sugerida por Fear e Robertson (1995) ilustrada na Figura 13 foi adotada a relação  $q_c/N_{60} = 0,60$  para conversão da envoltória, onde  $q_c/N_{60} = 0,60$  é um valor típico de solos arenosos e tende a ser menor para solos siltsos e argilosos, gerando a necessidade de correção dessa envoltória nessa faixa de materiais.

$$(\sigma_{v0})'_{envoltória} = 1,1047 \times 10^{-2} (q_{c1})^{4,7863} \quad (10)$$

Onde  $q_{c1}$  = Resistência de ponta normalizada do ensaio CPTu.

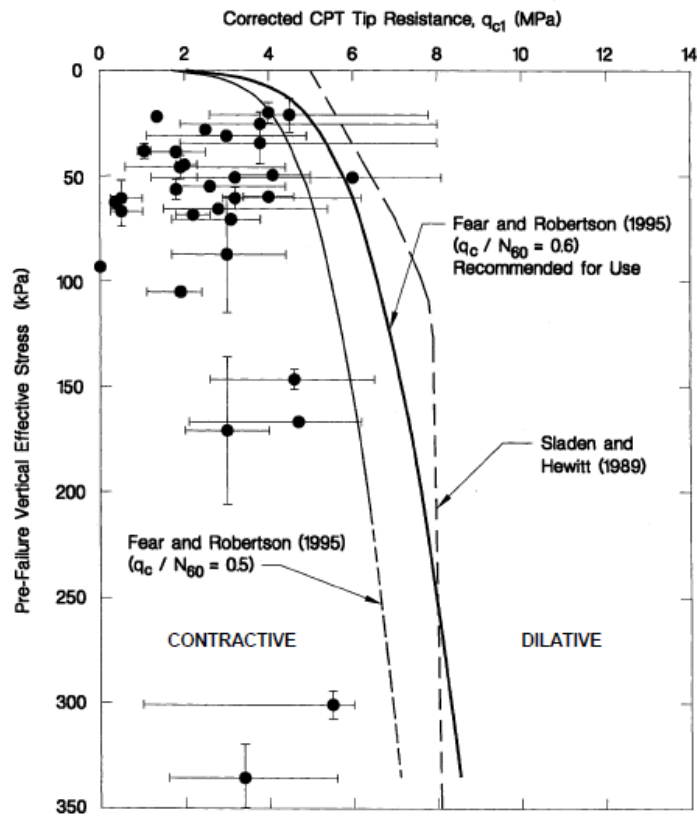


Figure 7.2. Relationships separating contractive from dilative conditions using flow failure case histories and corrected CPT tip resistance

**Figura 13 – Envoltória de Fear e Robertson (1995) adotada por Olson (2001) para avaliação da susceptibilidade à liquefação através do ensaio CPTu (Olson 2001)**

A seguir serão apresentados dois métodos para a estimativa do parâmetro de estado ( $\psi$ ) a partir de resultados de ensaios de piezocone (CPTu).

## 2.2 Método de Robertson (2010)

Robertson (2010) utilizou os casos históricos de Olson (2001), o qual recorreu a uma divisão desses resultados em classes, A, B, C, D e E tendo como base a confiabilidade nos ensaios CPT. Segundo o autor, os dados classe A são os que permitem a determinação do atrito lateral ( $f_s$ ) e a resistência de ponta ( $q_c$ ). Os de classe B são os ensaios CPT mecânicos disponíveis, apenas com leitura de ( $q_c$ ). As demais classes C, D e E são os ensaios SPT, aliados de densidade relativa ( $D_r$ ) e outros dados estimados, respectivamente.

Robertson (2010) apresentou casos de ruptura por liquefação denominados Classe A plotados no gráfico  $Q_{tn} \times F_r$ , onde  $Q_{tn}$  é o parâmetro corrigido sugerido por Robertson (2010) a partir do CPTu. A Figura 14 considera os valores de  $Q_{tn}$  e  $F_r$  inseridos na faixa do valor médio  $\pm 1$  desvio padrão para os materiais em que a liquefação de fato ocorreu.

Robertson (2010) sugere a correção da resistência de ponta normalizada ( $Q_{tn}$ ) para obtenção da resistência de ponta equivalente à areais limpas ( $Q_{tn,cs}$  – *equivalent clean sand cone resistance*), segundo as equações 11, 12 e 13:

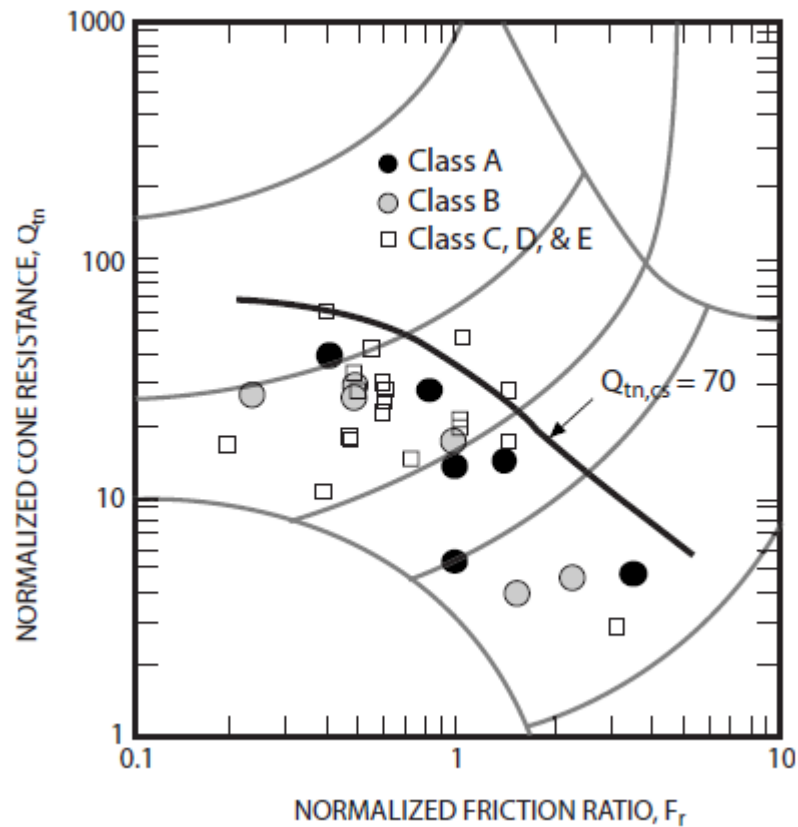
$$Q_{tn,cs} = K_c Q_{tn} \quad (11)$$

Onde,  $K_c$  é o fator de correção considerando a função da fração de finos, mineralogia e plasticidade em função de  $I_c$  (Índice de Classificação Comportamental a partir do ensaio CPTu). Sendo:

$$K_c = 1 \text{ se } I_c \leq 1,64 \quad (12)$$

$$K_c = 5,581I_c^3 - 0,403I_c^4 - 21,63I_c^2 + 33,75I_c - 17,88 \text{ se } I_c > 1,64 \quad (13)$$

A partir do Parâmetro  $Q_{tn}$  e da razão de atrito  $F_r$ , o autor sugere um ábaco a partir dos dados de ruptura por liquefação. Sendo assim, o autor concluiu que se pode adotar como critério esse valor  $Q_{tn,cs}=70$  para dividir os materiais em contráteis ( $Q_{tn,cs}<70$ ) e dilatantes ( $Q_{tn,cs}>70$ ), como mostra a Figura 14.



**Figura 14 – Ábaco proposto por Robertson a partir da análise de casos de ruptura por liquefação (Robertson, 2010)**

O parâmetro de estado pode ser estimado pela equação 14:

$$\psi = 0,56 - 0,33\log(Q_{tn,cs}) \quad (14)$$

Robertson (2016) sugere um novo parâmetro de classificação comportamental do solo, conforme a equação 15. Dessa forma, o autor divide o ábaco em novas regiões que apresentam comportamento argiloso (*clay-like*), arenoso (*sand-like*) e um comportamento transicional.

$$I_B = \frac{100(Q_{tn}+10)}{(Q_{tn}F_r+70)} \quad (15)$$

Nesse ábaco o autor inclui o valor de  $CD = 70$  para representar a fronteira entre o comportamento dilatante e o contrátil a grandes deformações. Para esse ábaco foi utilizado o valor de  $Q_{tn,cs} = 70$  considerando a incorporação de  $OCR = 4$  na região de materiais transicionais e argilosos. Sendo assim, o contorno  $CD=70$  pode ser descrito conforme a equação 16.

$$CD = 70 = (Q_{tn} - 11)(1 + 0,06F_r)^{17} \quad (16)$$

Como pode ser observado no ábaco, o sistema tem como base dois índices. O primeiro é referente ao tipo de material sendo “S” as regiões referentes aos materiais arenosos (*sand-like*) com valor de  $I_B > 32$ . A inicial “C” refere-se ao comportamento argiloso (*clay-like*) com valores de  $I_B < 22$  e as regiões transicionais para valores de  $I_B$  ( $22 < I_B < 32$ ). O segundo índice se refere ao comportamento dilatante ou contrátil do material. Valores de  $CD$  (no ábaco) menores que 70 indicam materiais contráteis (C) e valores de  $CD$  maiores que 70 se referem aos materiais dilatantes (D). As regiões podem ser observadas na Figura 15.

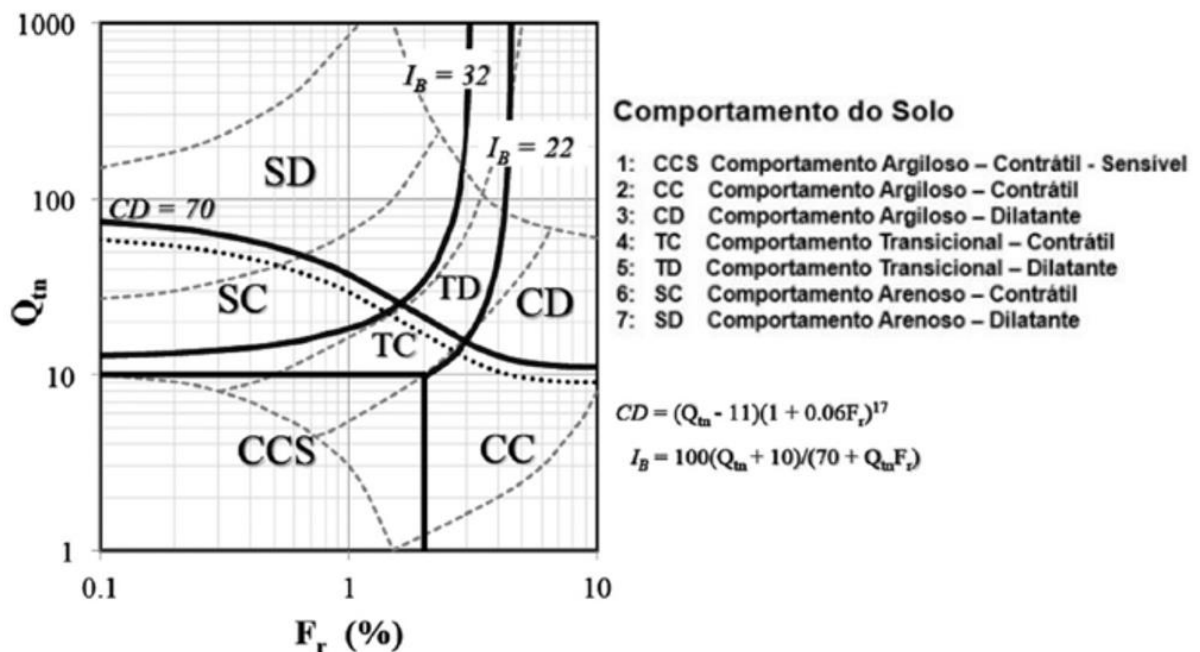


Figura 15 – Sistema de classificação proposto por Robertson (2016)

A partir da ampliação do banco de dados de casos históricos, Robertson (2022) sugere uma nova abordagem para a estimativa do parâmetro de estado a partir do

ensaio CPTu. Para areias com  $I_c$  menores ou iguais a 3 pode-se utilizar a equação 17 e 18 para a correção do parâmetro  $Q_{tn,cs}$ . Onde:

$$Q_{tn,cs} = K_c \times Q_{tn} \quad (17)$$

$$K_c = 15 - \frac{14}{1 + (I_c/2,95)^{11}} \quad (18)$$

Onde  $K_c$  é o fator de correção proposto para obtenção de  $Q_{tn,cs}$

Se  $I_c \leq 1,7$ , não há correção; ou seja,  $K_c=1,0$

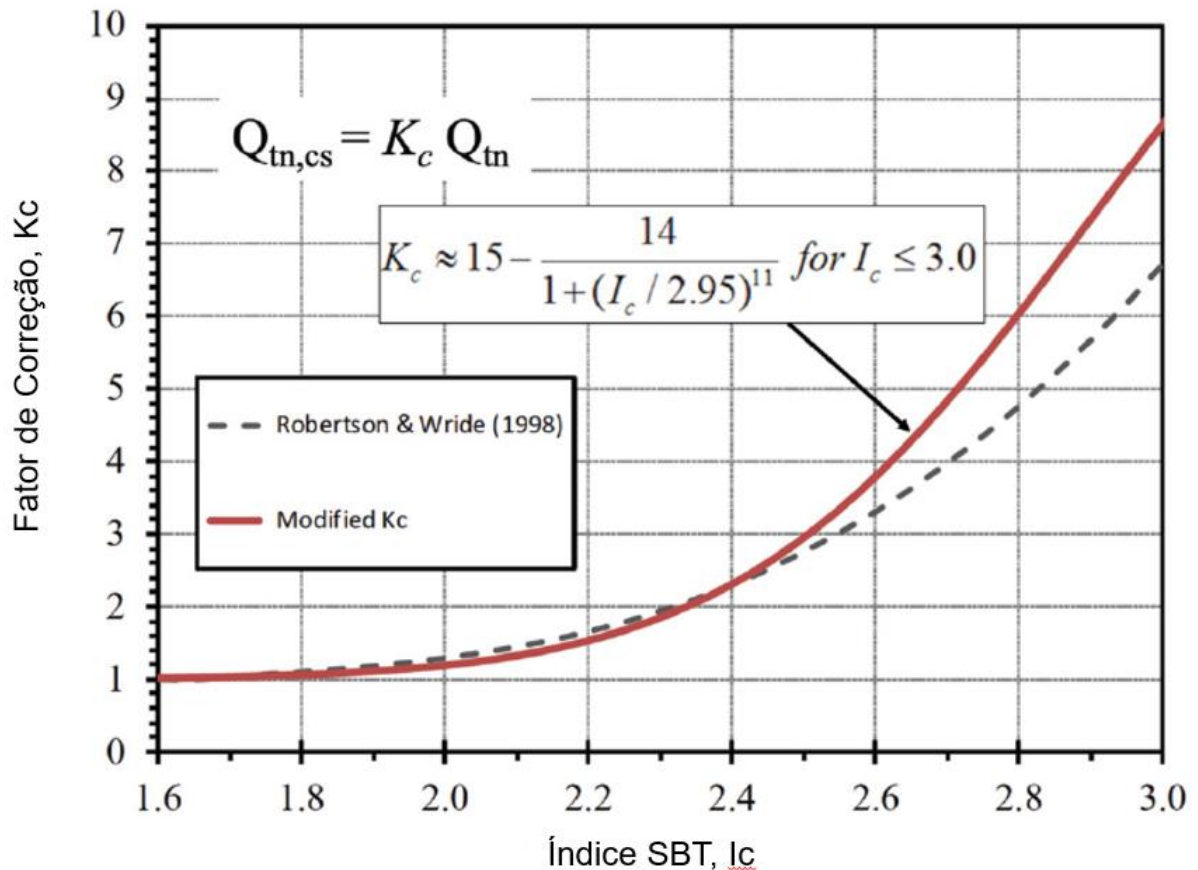


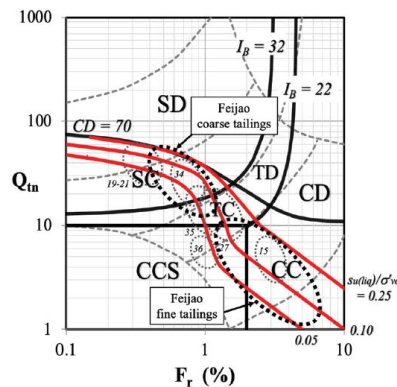
Figura 16 – Proposta modificada da relação entre  $K_c$  e  $I_c$  (Robertson, 2022).

A Figura 16 compara as formulações definidas para o fator de correção  $K_c$  e  $I_c$ . A nova correlação agrega um maior banco de dados e se limita a  $I_c = 3,0$ . Quando  $I_c < 2,40$  as duas relações são basicamente idênticas e quando  $2,40 < I_c < 2,60$  a diferença é menor. A aplicação de  $K_c$  modificado para avaliar a liquefação cíclica terá,

resumidamente, um resultado insignificante visto que a liquefação cíclica é, na maioria das vezes, limitada a solos com comportamento arenosos, ou seja,  $I_c < 2,60$ .

Porém o autor destaca que as estimativas devem ser consideradas até tensões efetivas menores que 300 kPa. Quando ocorrerem situações de níveis de tensões efetivas acima de 300 kPa, recomenda-se estudos complementares de laboratório para definição da Linha de Estado Crítico (LEC).

A Figura 17 indica nova abordagem incluindo dados de Feijão, onde ocorreu ruptura, esses contornos utilizam de fórmulas como a Figura 16 bem como valores de  $Q_{tn,cs}$  para a estimativa de  $Su(liq)/\sigma'_{v0}$ .



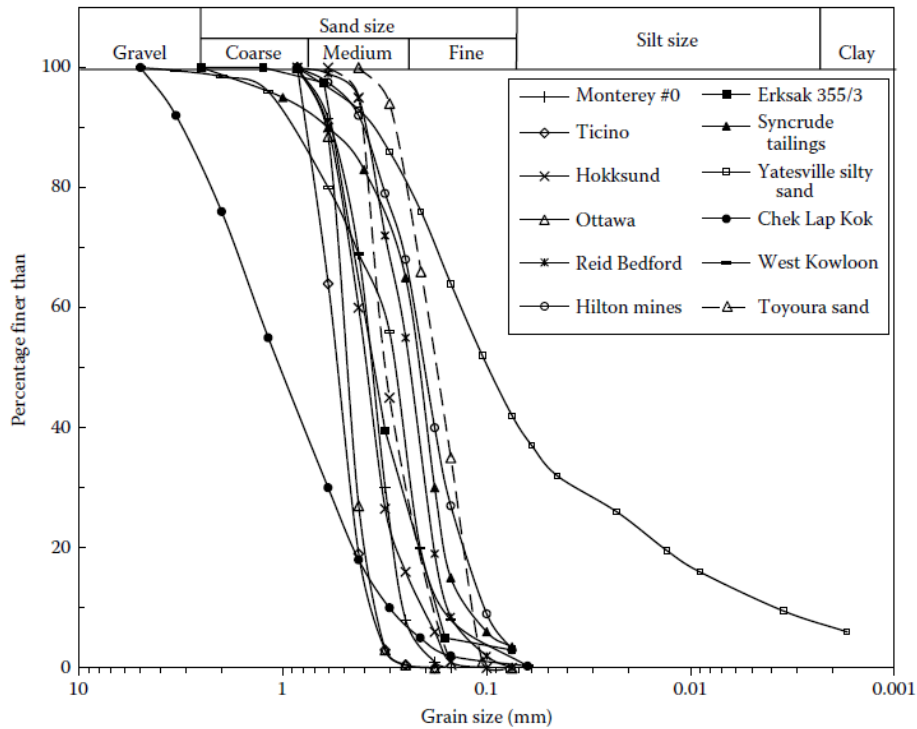
**Figura 17 – Gráfico comparativo de Robertson 2022 incluindo os rejeitos de Feijão (Brumadinho/MG)**

### 2.3 Método de Plewes et al. (1992)

Conforme abordado em Jefferies e Been (2016), utilizar o ensaio CPTu para obter uma estimativa do parâmetro de estado requer a resolução de uma equação inversa. A partir dos dados de câmara de calibração de Been et al (1986 e 1987), Plewes et al. (1992) sugerem uma estimativa para o parâmetro de estado.

Os trabalhos de Been et al. (1986/1987) apresentam uma forma de interpretar o ensaio CPTu para diferentes areias (Figura 18) em câmaras de calibração, entretanto muitas areias contém uma fração de silte e argila maior do que a que foi utilizada nesses trabalhos.





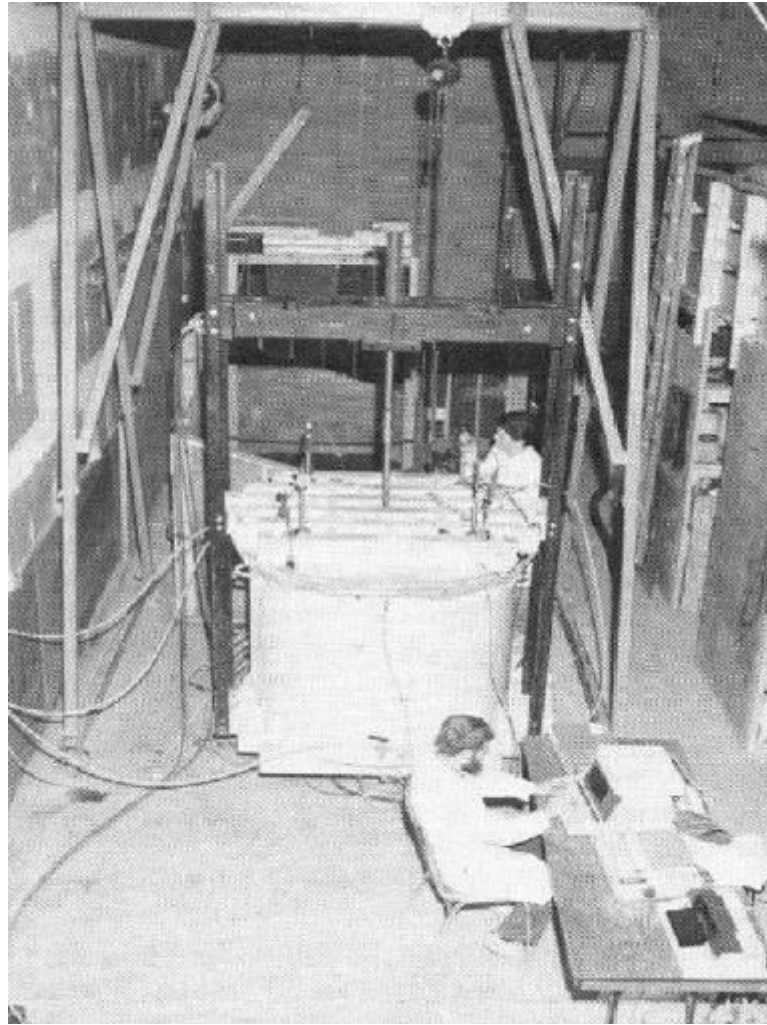
**Figura 18 – Granulometria de solos utilizados em câmaras de calibração (Jefferies e Been, 2016)**

A partir da teoria de expansão de cavidade, Jefferies e Been (2016) apresentaram a seguinte equação inversa para o parâmetro de estado.

$$\Psi = -\frac{\ln(Q_p/k)}{m} \quad (19)$$

$$Q_p = -\frac{(q_t - \sigma_0)}{\sigma'_0} \quad (20)$$

Onde:  $k$  e  $m$  são parâmetros de inversão e dependentes da rigidez e parâmetros de estado crítico tais como inclinação da linha de estado crítico  $\lambda$ . Os parâmetros  $k$  e  $m$  são obtidos a partir dos ensaios em câmaras de calibração como pode ser visto na Figura 19.



**Figura 19 – Exemplo de câmara de calibração (Jefferies e Been 2016)**

Esses equipamentos são semelhantes a ensaios triaxiais (porém em dimensões maiores), onde para esse estudo foram utilizados areais com índices de vazios conhecidos e submetidas a diferentes estados de tensão. Em sequência, prossegue-se com a cravação do cone dentro da câmara para estudo e avaliação das correlações desenvolvidas entre a resistência à penetração e as propriedades geotécnicas dos materiais.

A Figura 20 ilustra a comparação entre  $Q_p$  e o parâmetro de estado  $\psi$  e os parâmetros de inversão do CPT  $k$  e  $m$  (Figura 21). Os autores propõem as equações 21 e 22 para os parâmetros  $k$  e  $m$  a partir de correlações com a inclinação da linha de estado crítico ( $\lambda_{10}$ ).

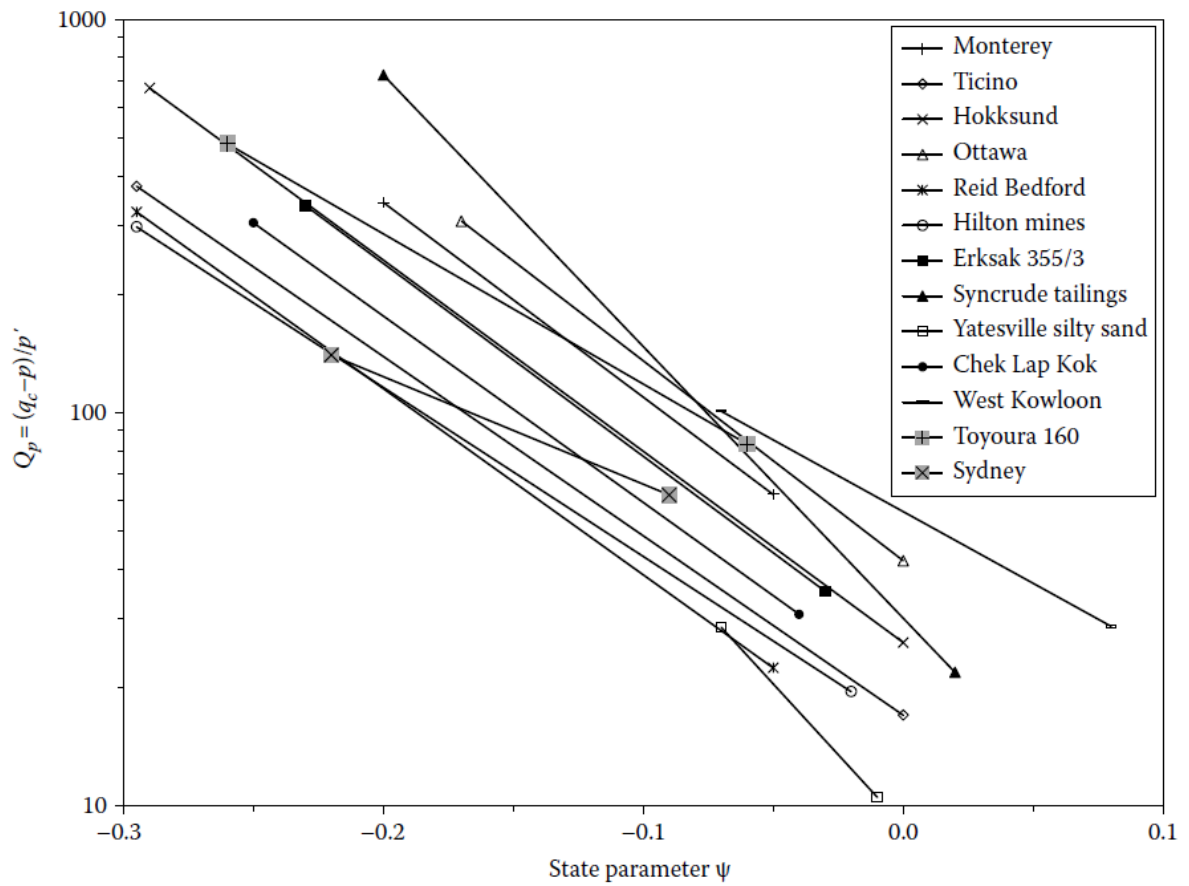
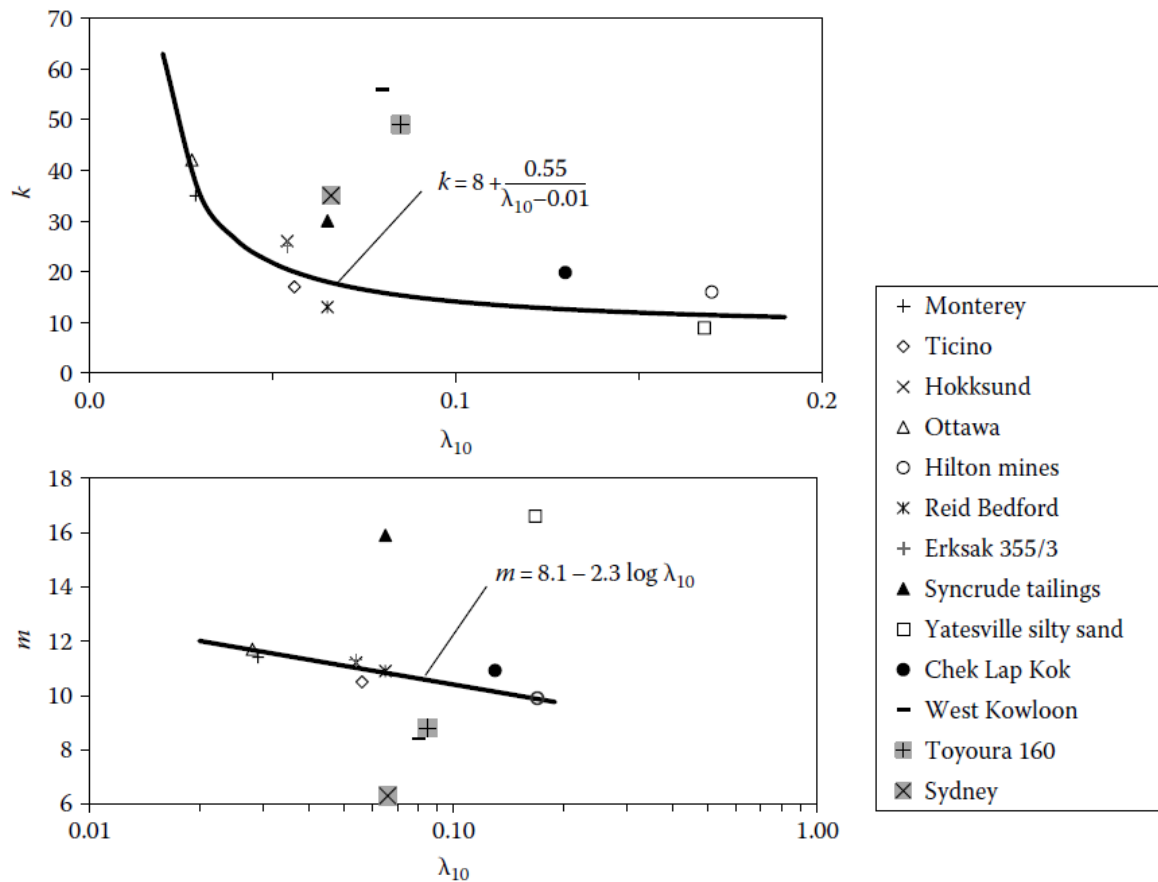


Figura 20 – Comparação entre  $q_p - \psi$  para diferentes areias (Jefferies e Been, 2016)

$$K = 8 + \frac{0,55}{\lambda_{10} - 0,01} \quad (21)$$

$$m = 8,1 - 2,3 \log \lambda_{10} \quad (22)$$



**Figura 21 – Parâmetros de inversão do CPT versus  $\lambda_{10}$**

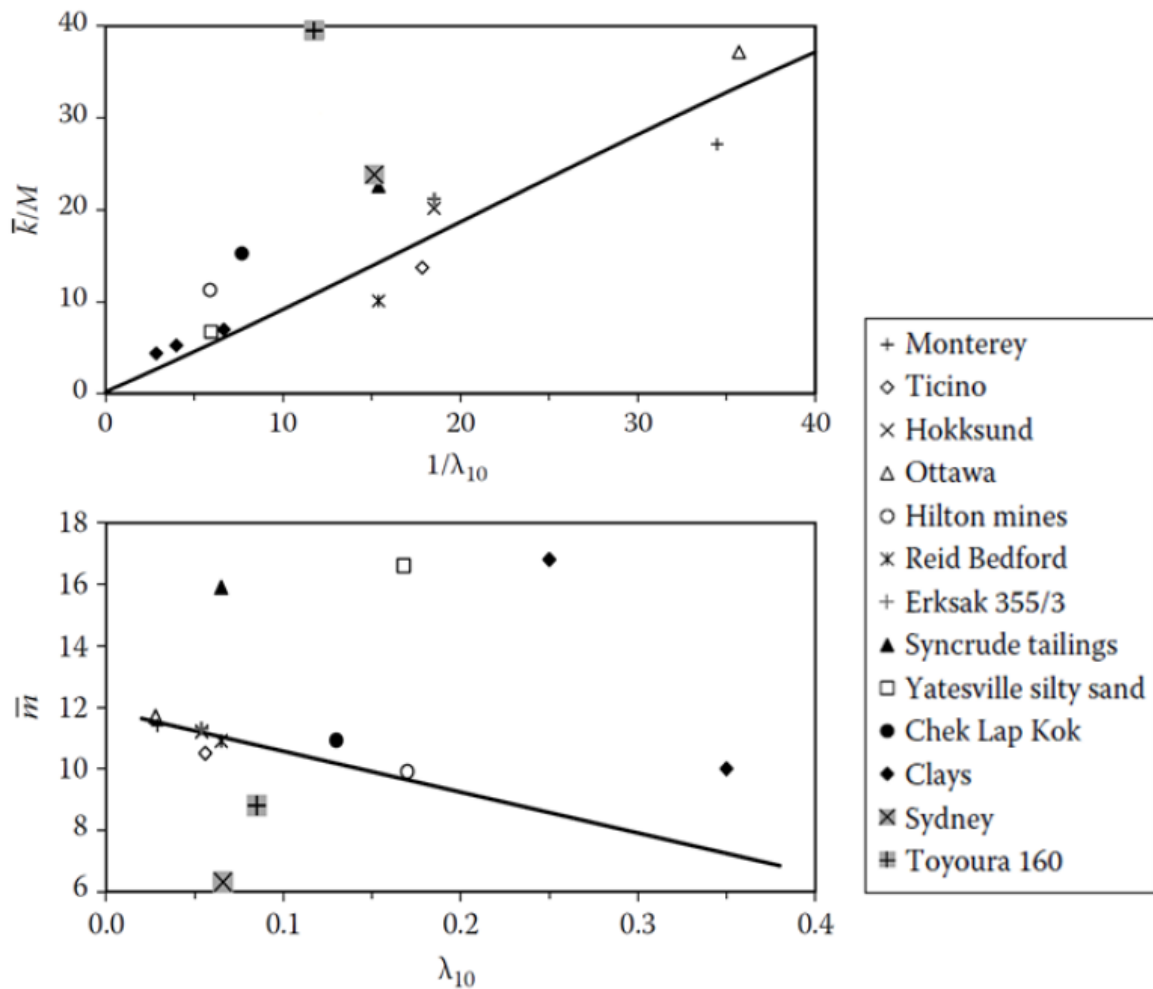
Shuttle e Cunning (2007), a partir do mesmo modelo de expansão de cavidade, propuseram a situação da cravação em condições não drenadas, onde há a geração do excesso de poropressão. Conforme equação 23 para a determinação do parâmetro de estado:

$$Q_p(1 - B_q) + 1 = \bar{k} \exp^{-\bar{m}\psi} \quad (23)$$

Onde  $\bar{k}$  e  $\bar{m}$  são constantes semelhantes a  $k$  e  $m$  só que aplicados a condições não drenadas. Como a equação 23 é específica para solos arenosos (cravação do cone sem geração do excesso de poropressão) os autores sugerem as equações 21 e 22 para a determinação dos parâmetros de inversão  $\bar{k}$  e  $\bar{m}$  através de correlações com a inclinação da linha de estado crítico ( $M$  e  $\lambda_{10}$ ), como pode ser observado na Figura 22.

$$\frac{\bar{k}}{M} = 3 + \frac{0,85}{\lambda_{10}} \quad (24)$$

$$\bar{m} = 11,9 - 13,3\lambda_{10} \quad (25)$$



**Figura 22 - Parâmetros de inversão efetivos  $\bar{k}$  e  $\bar{m}$  e os parâmetros de estado crítico  $\lambda_{10}$  e  $M$  – (Jefferies e Been, 2016).**

Resumidamente, Jefferies e Been (2016) apresentam as seguintes opções acerca do cálculo do parâmetro de estado a partir do ensaio CPTu:

1. Necessário determinar experimentalmente as propriedades de estado crítico do solo e a partir da teoria de expansão de cavidade determinar as constantes  $k$  e  $m$  ou  $\bar{k}$  e  $\bar{m}$  em condições não drenadas.
2. Utilizar metodologias que relacionam o ensaio CPTu com os parâmetros de estado crítico através de ábacos e as fórmulas apresentadas. Os autores destacam que esse método deve ser adotado como avaliação preliminar.

Para estimar a inclinação da linha de estado crítico ( $\lambda_{10}$ ), Jefferies e Been (2016) reforçam a utilização da metodologia de Plewes et al. (1992) considerando a razão de atrito normalizada conforme as equações 26 e 27. A relação entre  $\lambda_{10}$  e  $F$  é ilustrada na Figura 23.

$$\lambda_{10} = \frac{F}{10} \quad (26)$$

$$F = \frac{f_s}{(q_t - \sigma_{v0})} \times 100\% \quad (27)$$

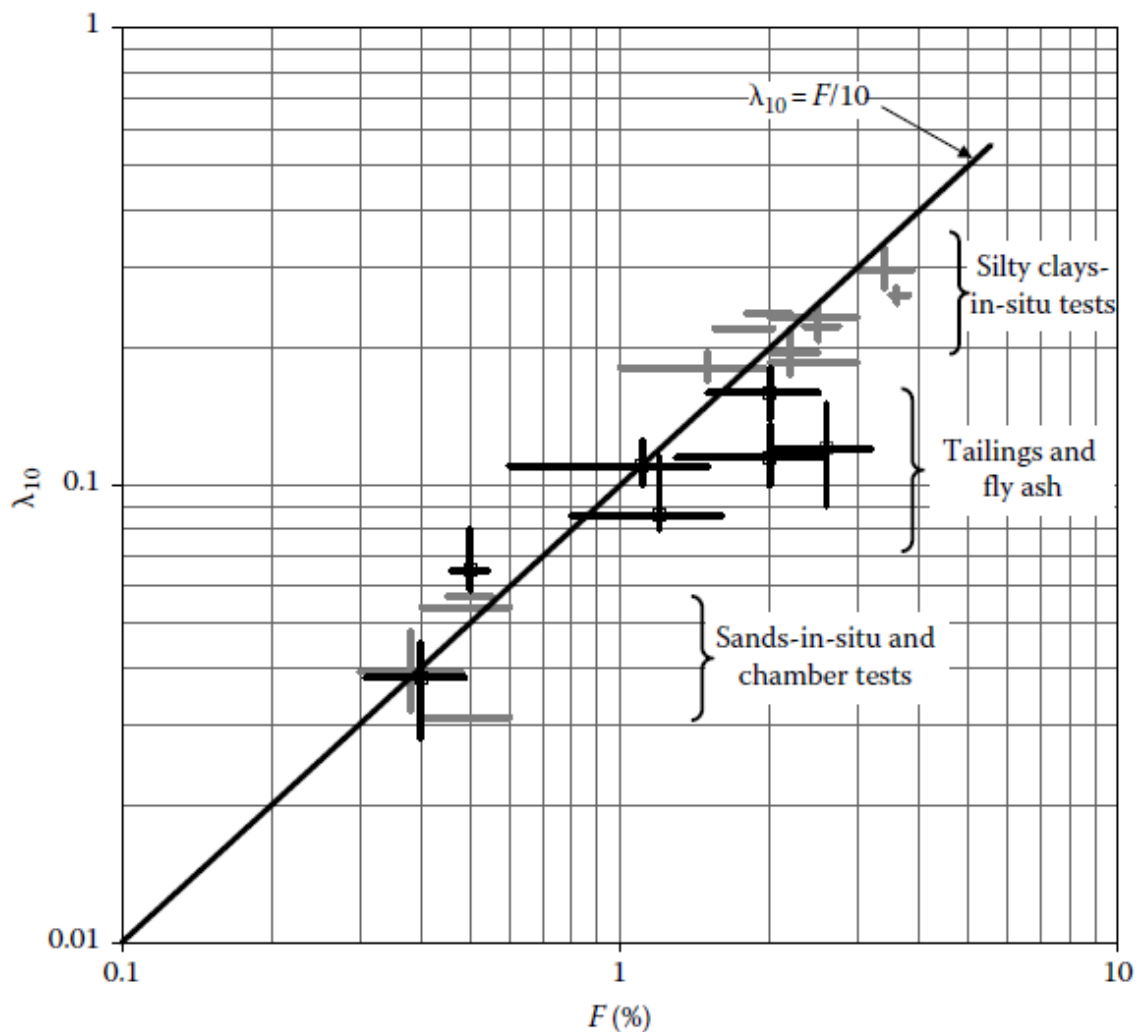


Figura 23 – Relação entre  $\lambda_{10}$  e  $F$  sugerido por plewes et al. (1992) com dados adicionais de Reid (2012). (Jefferies e Been, 2016)

A estimativa do parâmetro de estado sugerido em Been e Jefferies (2016) também leva em consideração no ábaco o índice de classificação comportamental do solo ( $I_c$ ) apresentado em Jefferies e Davies (1993) conforme equação 28. A Figura 24 ilustra a classificação comportamental através da razão de atrito.

$$I_c = \sqrt{3 - \log(Q(1 - B_q) + 1))^2 + (1,5 + 1,3 \log(F))^2} \quad (28)$$

Em que:  $Q$  é a resistência de ponta normalizada pela tensão vertical efetiva e  $B_q$  é o parâmetro de poropressão.

$$Q = \frac{(q_t - \sigma_{v0})}{\sigma'_{v0}} \quad (29)$$

$$B_q = \frac{(u - u_0)}{(q_t - \sigma_{v0})} \quad (30)$$

$$Q_p = \frac{3Q}{(1 + 2k_0)} \quad (31)$$

Onde  $K_0$  é a razão de tensões geostáticas.

$$K_0 = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v} \quad (32)$$

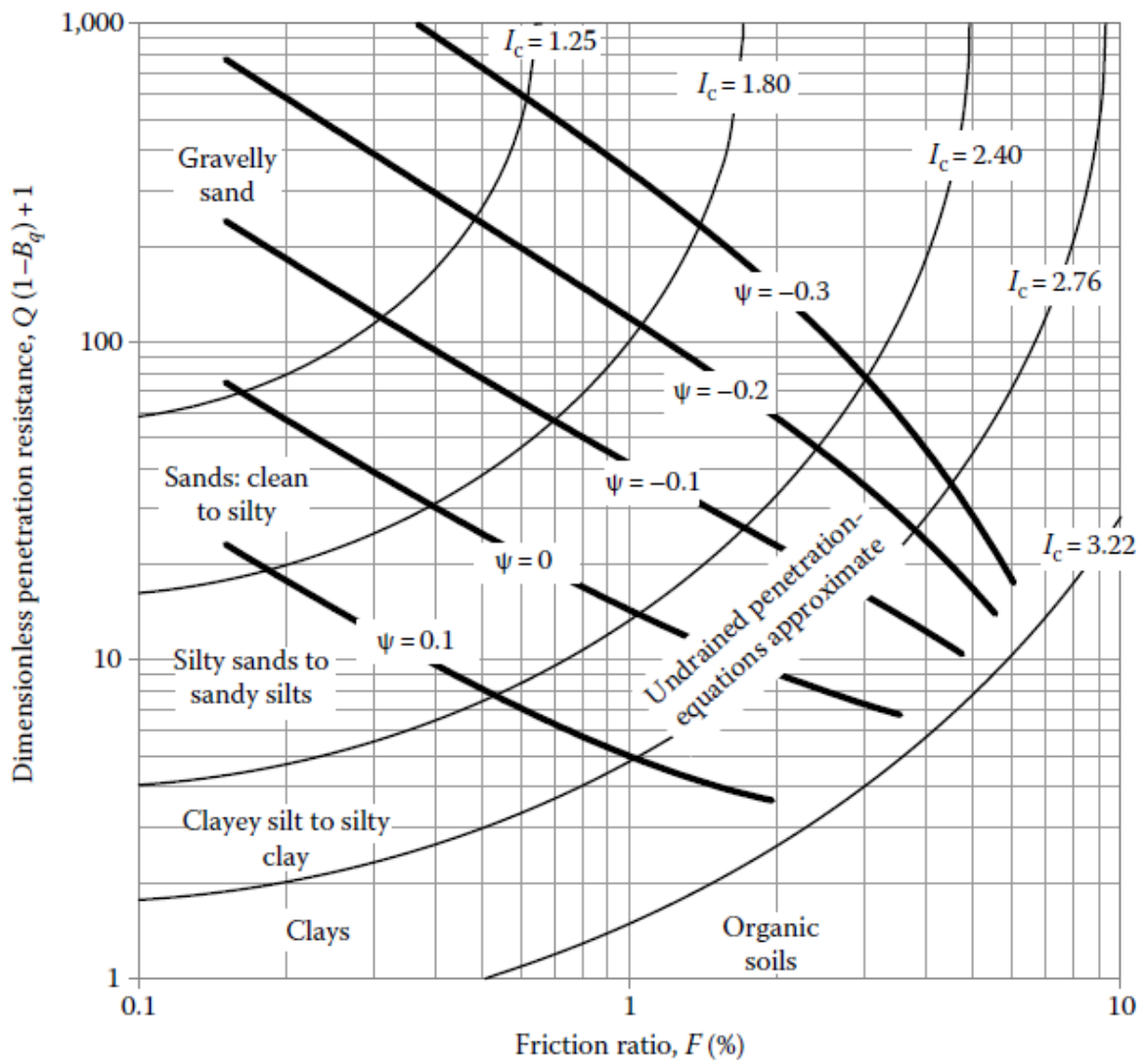


Figura 24 – Ábaco de classificação comportamental através da razão de atrito – (Jefferies e Been, 2016)



### 3 CASOS DE ESTUDO

Para esse trabalho, foram utilizados dados de três barragens de rejeitos, denominadas Barragem 1, Barragem 2 e Barragem 3. A estimativa do parâmetro de estado foi realizada a partir dos resultados de ensaios CPTu executados nestas barragens.

No presente Capítulo, serão apresentados os resultados dos ensaios de caracterização e Piezocone executados na área das barragens. A estimativa do parâmetro de estado será realizada no Capítulo 5.

#### 3.1 Barragem 1

Para essa estrutura foram estudados 5 perfis de CPTu, executados nos diques e no interior da barragem. A barragem é alteada à montante com os próprios rejeitos ciclados, a partir de um dique inicial de terra compactada. A Figura 25 apresenta a localização dos ensaios estudados. As curvas granulométricas são apresentadas na Figura 26 e Figura 27.



Figura 25 – Localização dos Ensaios CPTu da Barragem 1

As curvas granulométricas apresentadas na Figura 26 indicam um material predominantemente arenoso (60% - 74%), seguido de uma fração silteosa (21% - 40%).

As curvas granulométricas da Figura 27 apresentaram resultados semelhantes. Observa-se que os materiais apresentam maiores frações de areia (40%-74%) seguidas de frações de silte (16%- 46%). Vale salientar, também, que a fração de pedregulho é significativa (24% - 32%).

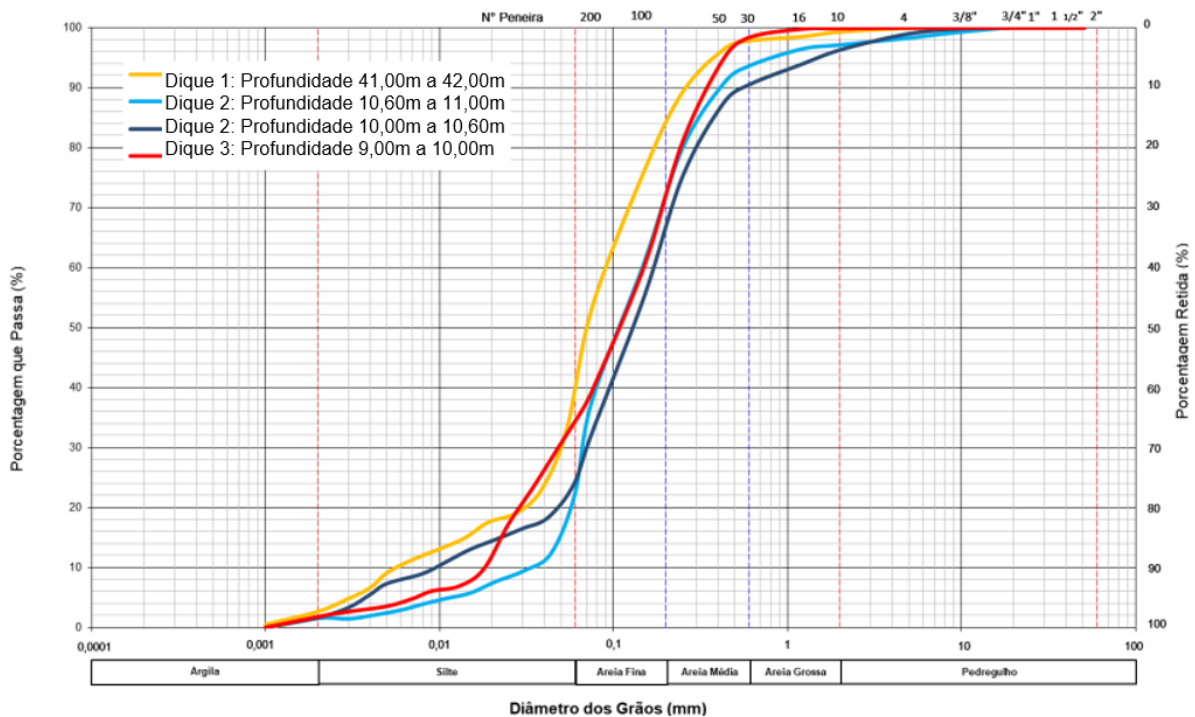


Figura 26 – Curva granulométrica típica do rejeito da barragem 1

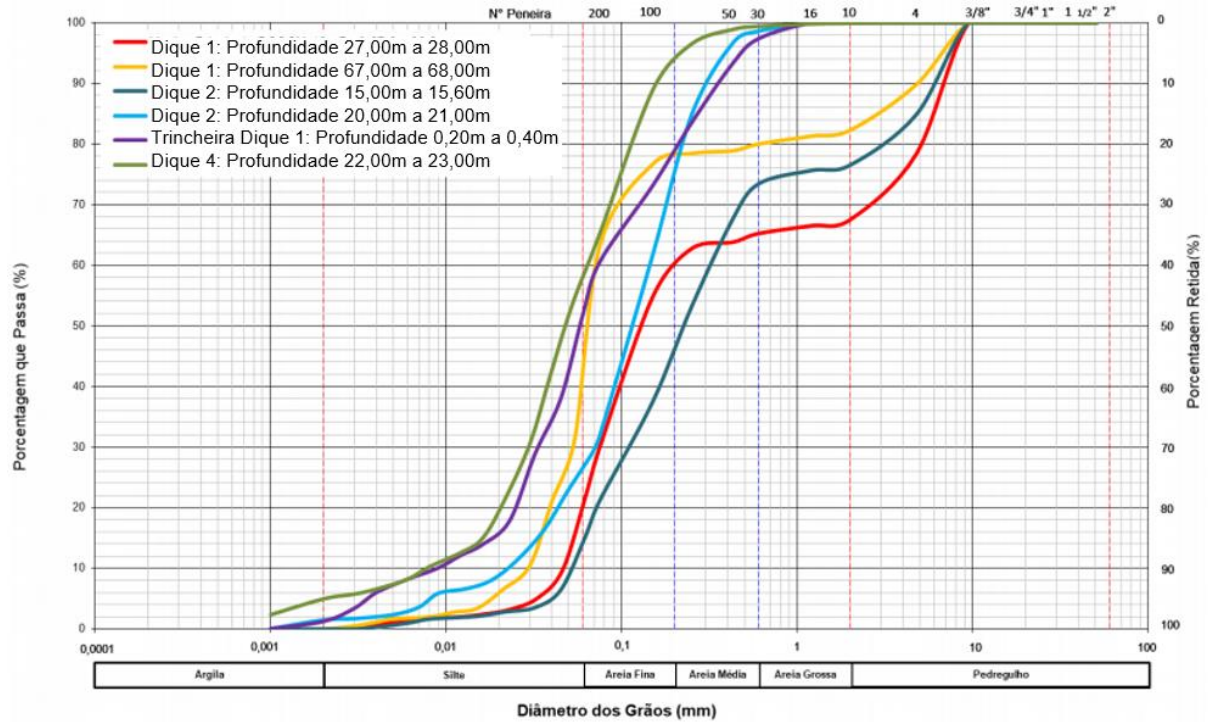


Figura 27 - Curva granulométrica típica DO REJEITO DA BARRAGEM 1

A Tabela 3 – Parâmetros Geotécnicos da Barragem Tabela 3 reúne os parâmetros geotécnicos referentes à Barragem 1.

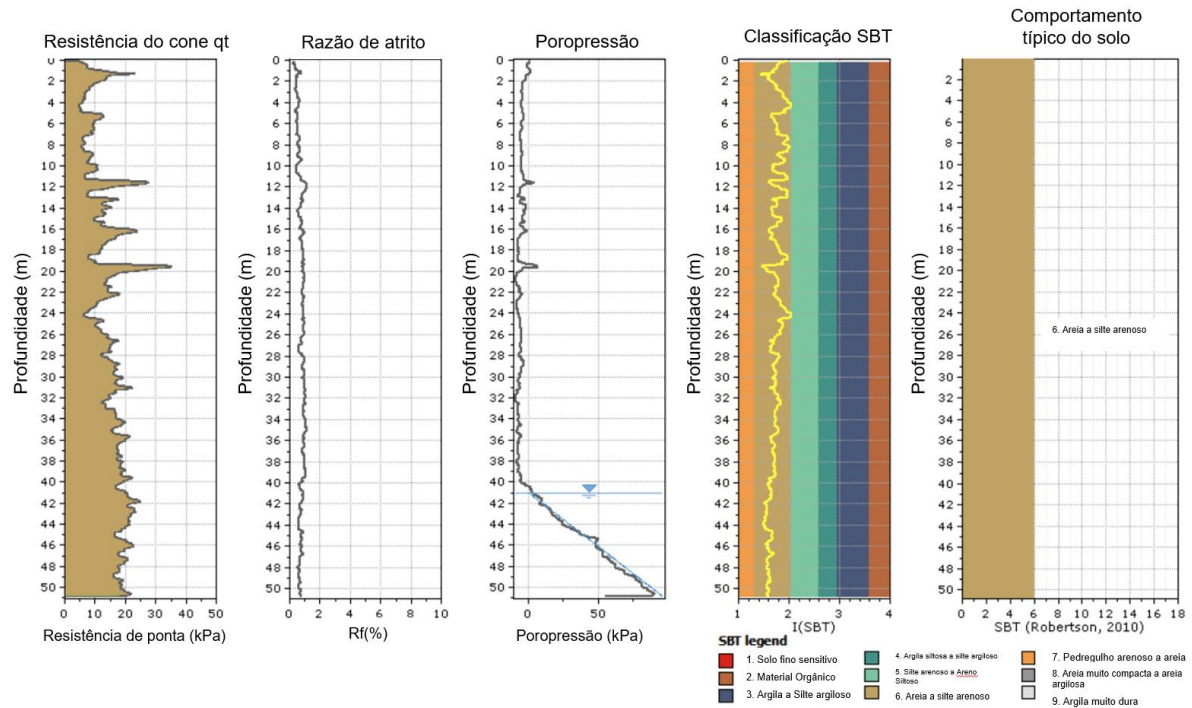
**Tabela 3 – Parâmetros Geotécnicos da Barragem**

Amostra	Localização	$\gamma_{nat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	w (%)	$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	Gs
AM-01	Dique 1	19,72	27,70	28,94	2,894
AM-02	Dique 2	18,54	36,10	29,33	2,933
AM-03	Dique 2	18,44	43,80	29,14	2,914
AM-04	Dique 3	20,70	41,50	27,76	2,776
AM-05	Trincheira Dique 1	17,27	22,00	27,47	2,747
AM-06	Dique 1	18,74	15,90	38,95	3,895
AM-07	Dique 2	24,13	21,70	36,79	3,679
AM-08	Dique 2	-	18,60	34,73	3,473
AM-09	Dique 3	20,80	14,90	27,96	2,796
AM-10	Dique 1	23,35	4,17	35,05	3,505
AM-11	Dique 1	18,25	4,60	31,69	3,169
AM-12	Dique 1	21,97	26,50	32,57	3,257
AM-13	Dique 1	25,41	16,50	36,59	3,659
AM-14	Dique 2	20,90	16,50	33,55	3,355
AM-15	Dique 2	20,60	17,80	28,45	2,845
AM-16	Dique 3	20,99	18,50	33,06	3,306
AM-17	Dique 1	22,07	6,55	32,66	3,266
AM-18	Dique 1	20,80	12,09	31,29	3,129

Os valores de peso específico natural variaram de 17,27 kN/m<sup>3</sup> a 25,41 kN/m<sup>3</sup>, com teores de umidade entre 4,17% e 43,8%. A densidade real dos grãos (Gs) variou de 2,747 a 3,895.

A Figura 28 ilustra os parâmetros obtidos no ensaio CPTu, os quais são característicos do rejeito encontrado no interior e dique da barragem. O material está de acordo com a granulometria apresentada anteriormente e pode ser observado na profundidade de 41m a superfície freática da barragem. As classificações comportamentais de Robertson também indicam o material como predominantemente arenoso com pequena fração siltosa.

Para essa Barragem não foi possível saber o índice de vazios para o rejeito estudado.



**Figura 28 – Resultado do ensaio CPTu-03 da Barragem 1, exportado do software CPeT-IT.**

### 3.2 Barragem 2

Para essa estrutura foram estudados 2 perfis de sondagem CPTu, realizados nos diques e interior da barragem. A barragem foi alteada a montante com os próprios rejeitos ciclados, a partir de um dique inicial de terra compactada. A Figura 29 apresenta a localização dos ensaios estudados, que estão próximos ao último alteamento da barragem. As curvas granulométricas são apresentadas na Figura 30 e na Figura 31.

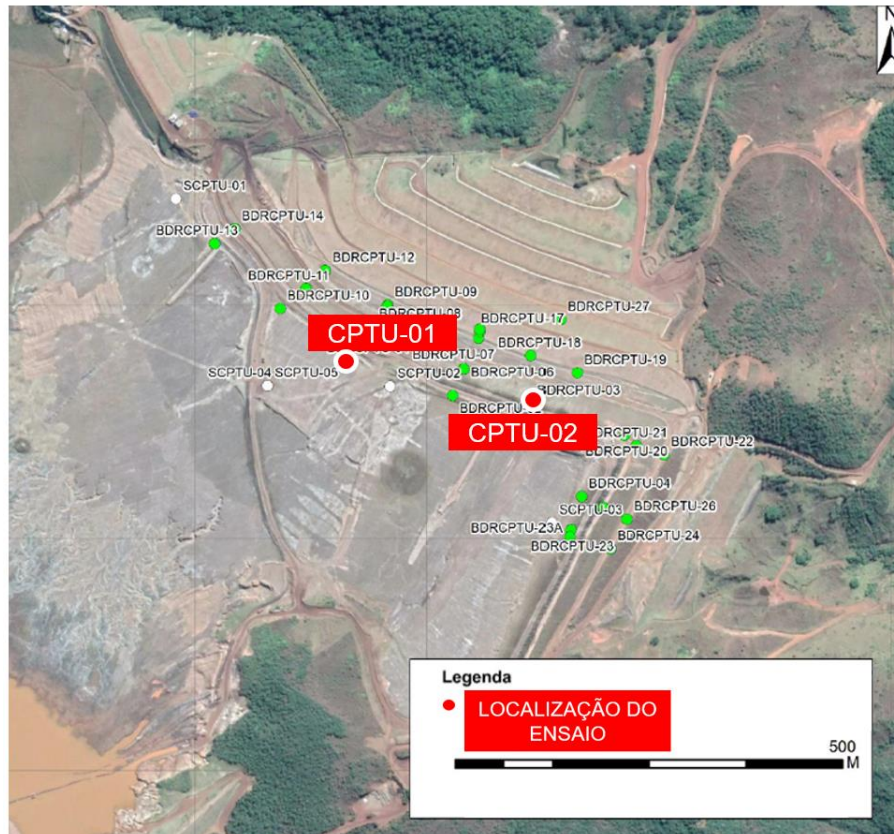


Figura 29 - Localização dos Ensaios CPTu da Barragem 2

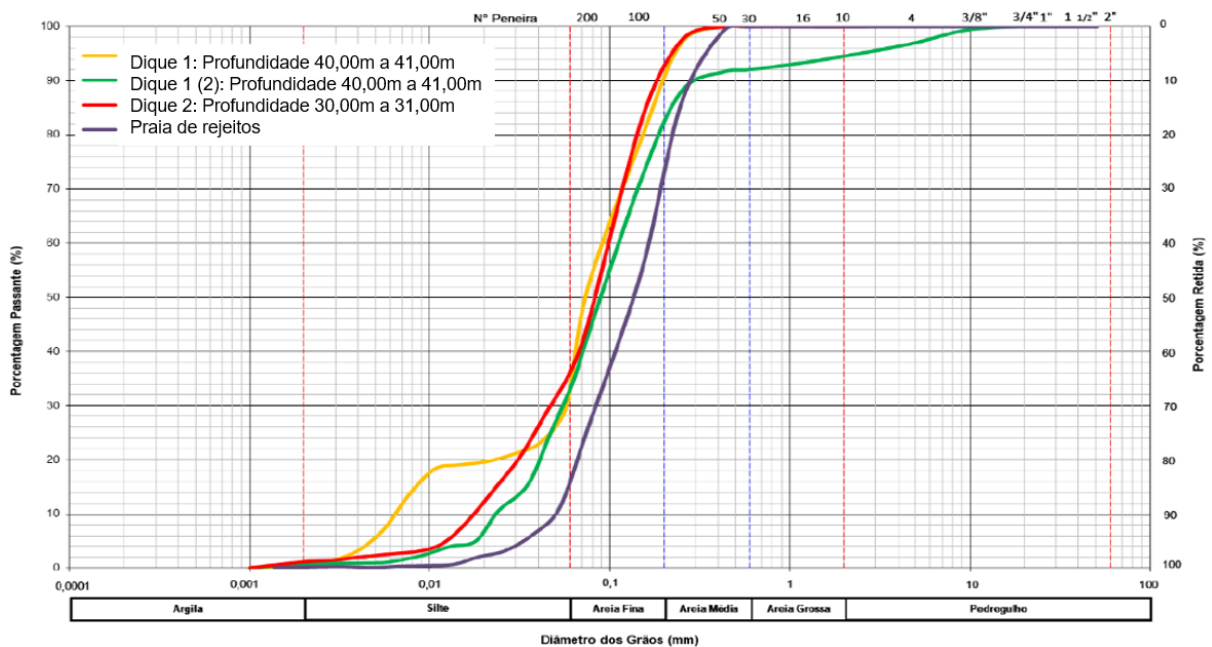
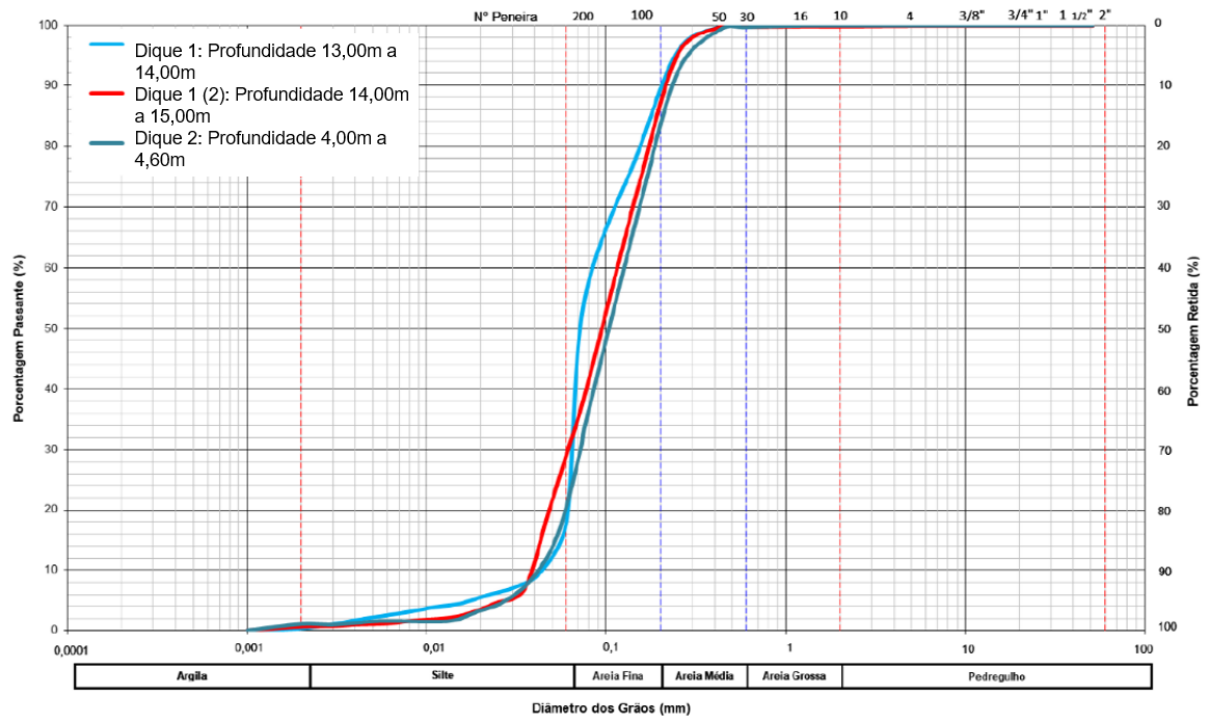


Figura 30 - Curva granulométrica típica do rejeito da barragem 2



**Figura 31 - Curva granulométrica típica do rejeito da barragem 2**

As curvas representam material predominantemente arenoso e mal graduados, semelhantes ao da barragem 1 com cerca de 20% de material passante na peneira #200.

A Tabela 4 resume os parâmetros geotécnicos referentes à Barragem 2.

**Tabela 4 – Parâmetros Geotécnicos da Barragem 2**

Amostra	Localização	Profundidade (m)	$\gamma_{\text{nat}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	w (%)
AM-01	Dique 1	9,0 - 10,0	21,90	36,50
AM-02	Dique 2	13,0 - 14,0	21,00	28,50
AM-03	Dique 2	8,0 - 9,0	22,60	18,20
AM-04	Dique 1	8,0 - 9,0	21,90	18,80
AM-05	Dique 1	13,0 - 14,0	24,10	15,10
AM-06	Dique 1	14,0 - 15,0	21,80	17,50
AM-07	Dique 2	4,0 - 4,6	20,80	17,10
AM-08	Dique 1	40,0 - 41,0	23,80	15,90
AM-09	Dique 1	40,0 - 41,0	23,00	13,30
AM-10	Dique 1	30,0 - 31,0	23,50	21,00

Os valores de peso específico natural variaram de 20,80 kN/m<sup>3</sup> a 24,10 kN/m<sup>3</sup> sendo 22,44 kN/m<sup>3</sup> o valor médio. A umidade do material variou de 13,30% a 36,50% sendo 20,19% o valor médio para esse parâmetro. Para a barragem 2 também são conhecidos os valores de índice de vazios, conforme a Tabela 5. Para essa barragem não foi possível obter valores de Gs do rejeito estudado.

A Tabela 5 – Índice de vazios referentes à Barragem 2 Tabela 5 apresenta o índice de vazios encontrado em algumas amostragens realizadas nessa barragem.

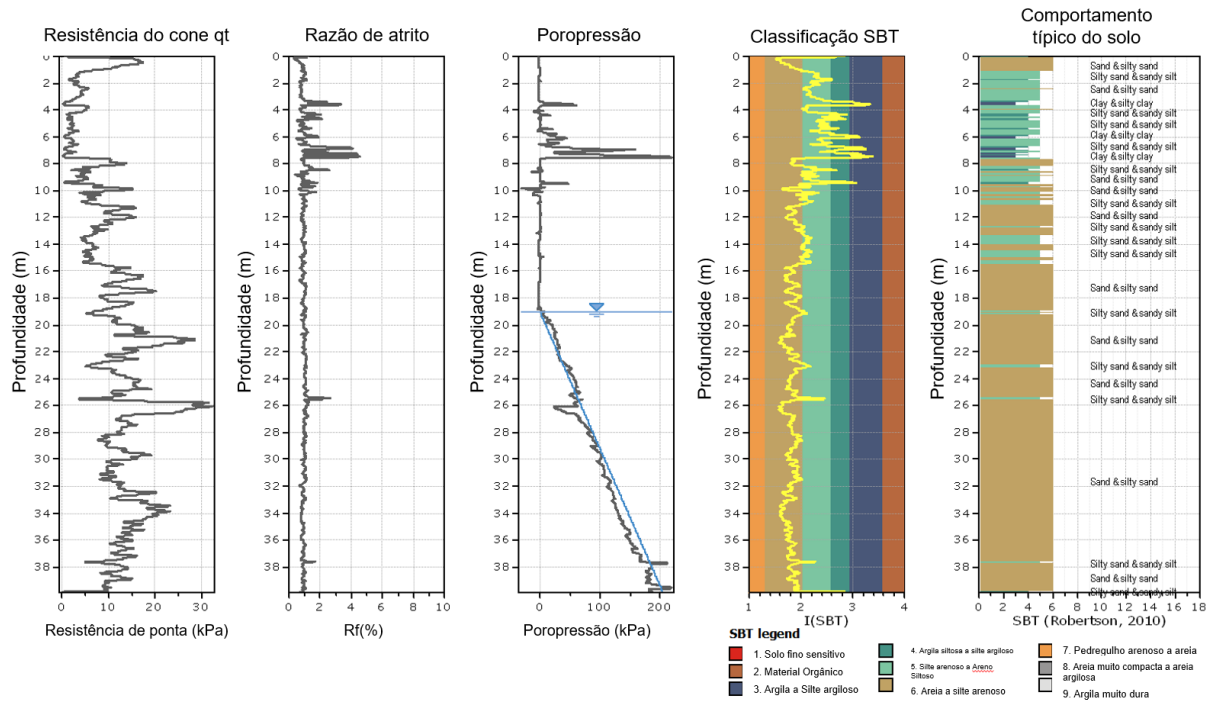
A Figura 32 ilustra o resultado exportado do *software* CPeT-IT, pode ser observado uma camada de material siltoso nos 10 primeiros metros e a superfície freática foi encontrada com 19m de profundidade.

Os resultados de comportamento do material estão de acordo com a granulometria apresentada na caracterização, sendo a de um material areno siltoso.

**Tabela 5 – Índice de vazios referentes à Barragem 2**

Campanha	Local	e
1 <sup>a</sup>	Talude	0,7
	Crista	0,75
	Praia	0,81
2 <sup>a</sup>	Talude	0,87
	Crista	0,65
	Praia	0,9
3 <sup>a</sup>	Talude	0,76
	Crista	0,6
	Praia	0,81
4 <sup>a</sup>	Talude	0,77
	Crista	0,55
	Praia	0,82
5 <sup>a</sup>	Talude	0,77
	Jusante	0,55
	Crista	0,65
6 <sup>a</sup>	Talude	0,64
	Jusante	
	Praia	0,81
	Crista	0,58

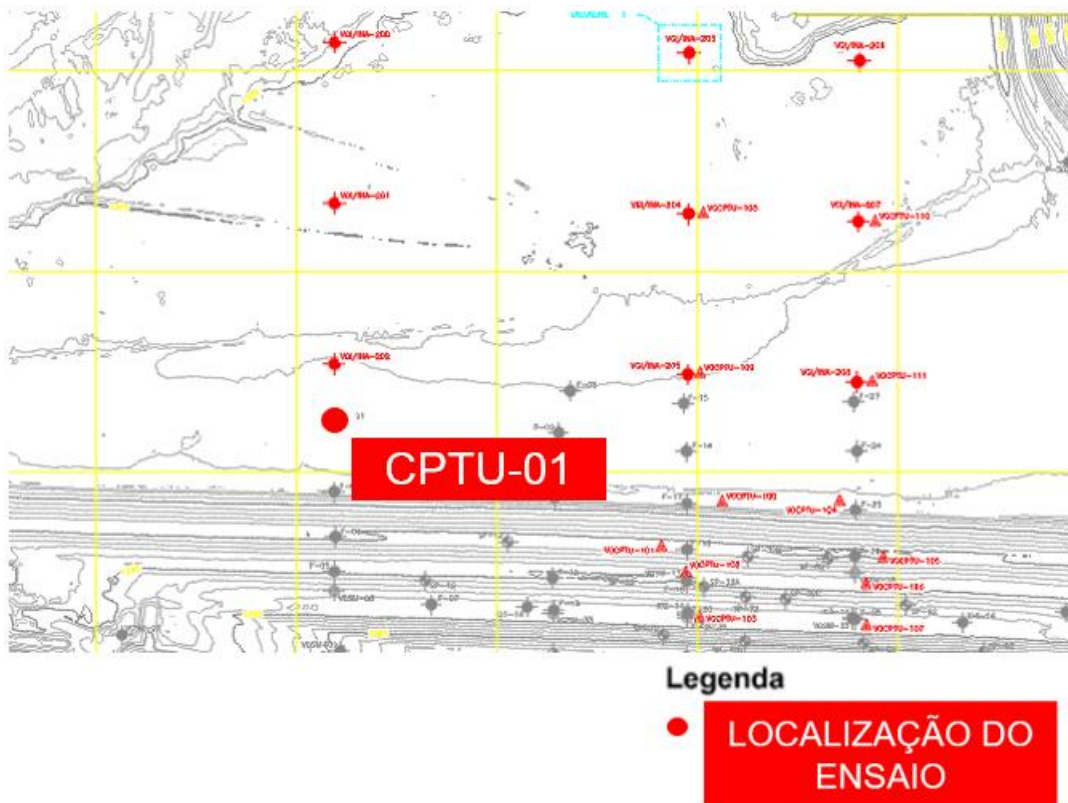




**Figura 32 – Resultado do CPTu-01 da Barragem 2, exportado do software CPeT-IT.**

### 3.3 Barragem 3

Para essa estrutura foi estudado um perfil de sondagem CPTu. A localização do CPTu-01 é localizada próximo a crista da barragem e está indicada na Figura 33. Os resultados da estimativa do parâmetro de estado serão apresentados no capítulo posterior. A barragem é alteada à montante e as curvas granulométricas são apresentadas na Figura 34, Figura 35 e Figura 36.



**Figura 33 - Localização do Ensaio CPTu da Barragem 3**

Diferentemente das barragens 1 e 2, o rejeito da barragem 3 apresenta granulometria mais silto-argilosa. A Figura 34 apresentou apenas 6% de material arenoso em concordância com a Figura 35 e Figura 36, com apenas 8% e 7% de material arenoso.

Para essa barragem não foi possível obter valores de índices de vazios para comparação e análise. A Figura 37 resume alguns resultados exportados do *software CPeT-IT*, o qual indica classificação comportamental argilosa em todo o ensaio. A superfície freática foi encontrada com 9m de profundidade.

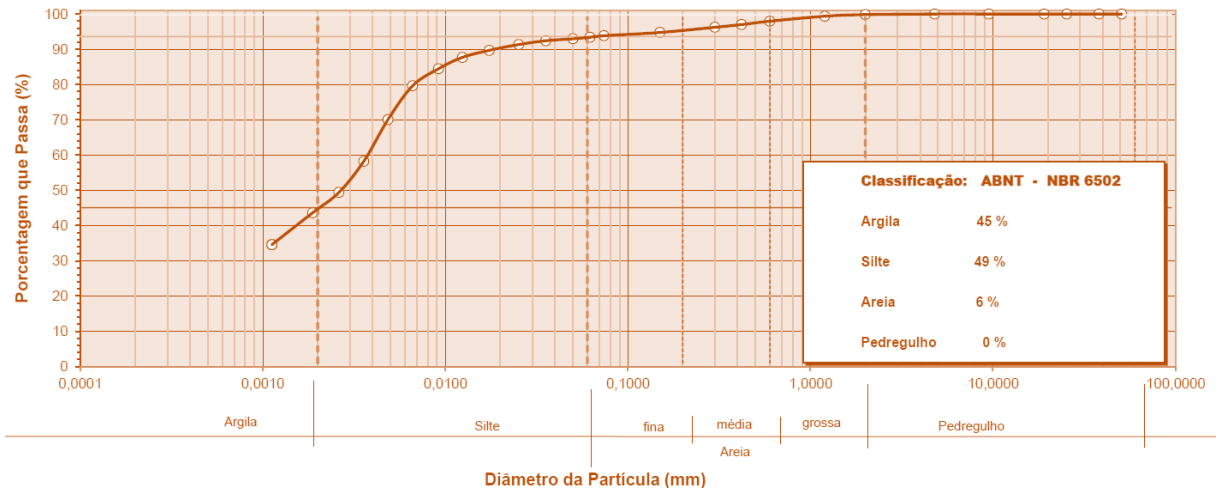


Figura 34 - Curva granulométrica típica do rejeito da barragem 3

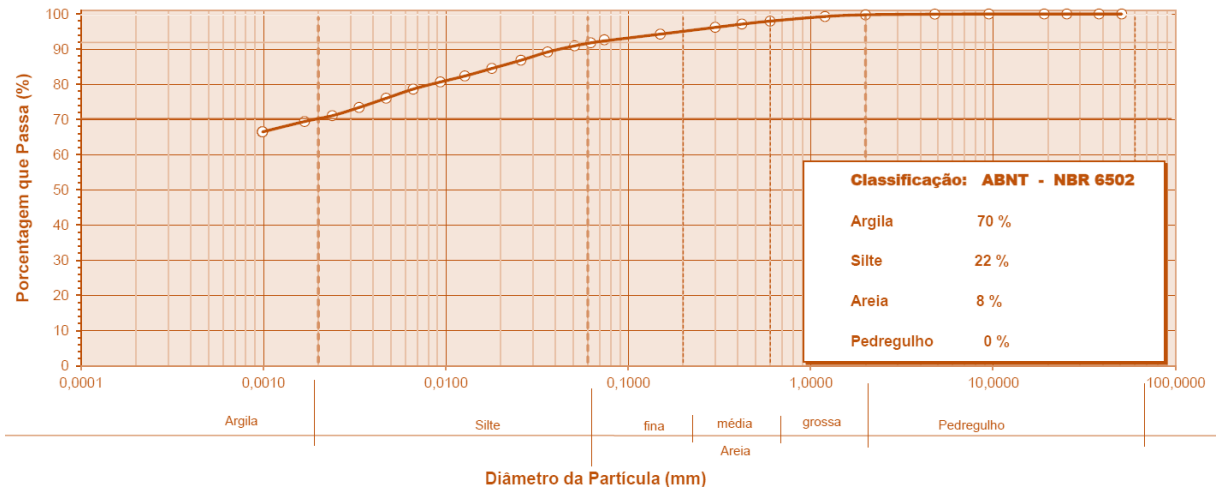


Figura 35 - Curva granulométrica típica do rejeito da barragem 3

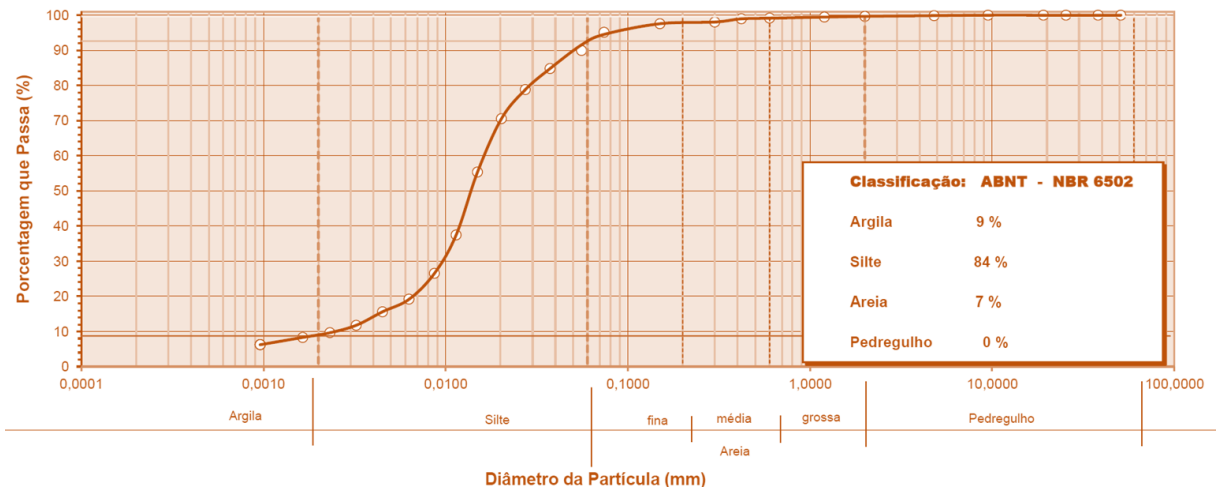
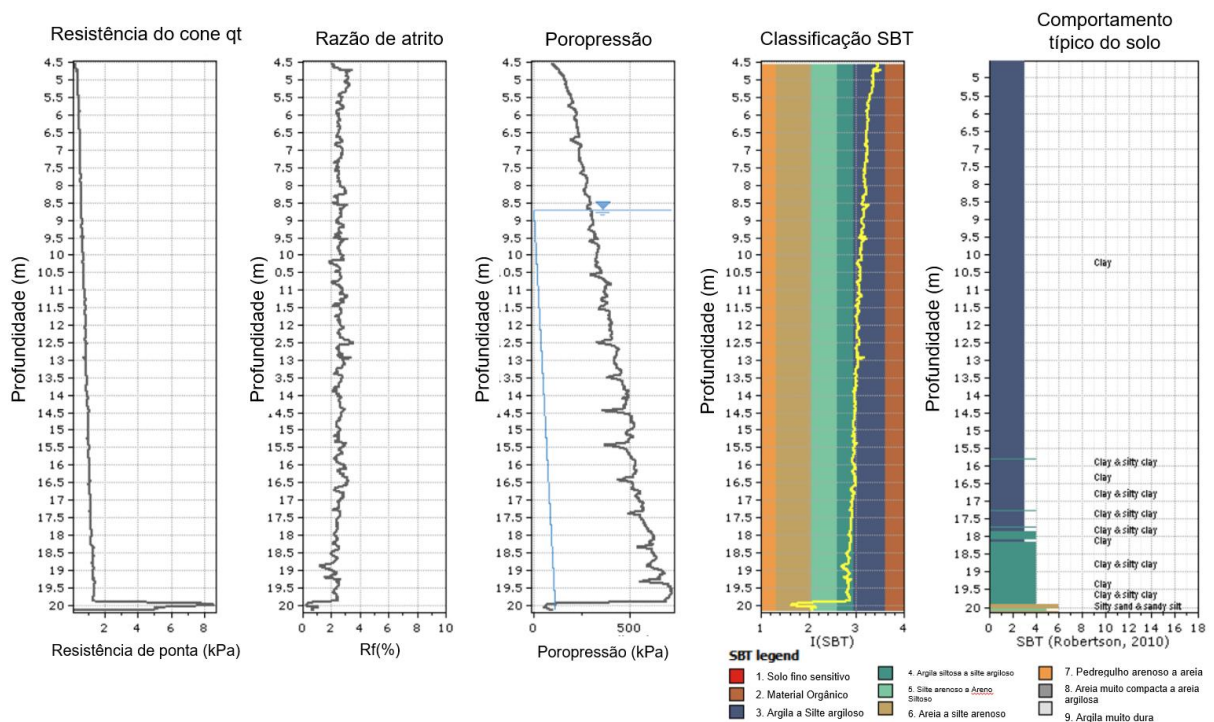


Figura 36 - Curva granulométrica típica do rejeito da barragem 3

**Tabela 6 – Parâmetros Geotécnicos da Barragem 3**

Amostra	Localização	Profundidade (m)	$\gamma_{nat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	w (%)	$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	Gs
AM-01	Barragem 3	23,50-24,50	18,10	44,76	31,21	3,121
AM-02	Barragem 3	5,50-6,00	17,77	37,73	30,42	3,042
AM-03	Barragem 3	14,00-14,50	18,81	40,21	31,34	3,134
AM-04	Barragem 3	9,00 - 9,50	19,86	35,60	29,86	2,986
AM-05	Barragem 3	17,00-18,00	-	14,61	30,58	3,058
AM-06	Barragem 3	5,00-5,50	18,95	39,79	29,97	2,997
AM-08	Barragem 3	2,50-3,00	22,42	17,32	30,90	3,090
AM-09	Barragem 3	35,00-36,00	17,47	56,35	30,76	3,076

Os valores de Peso específico natural variaram de 17,47 kN/m<sup>3</sup> a 22,42 kN/m<sup>3</sup> sendo 19,05 kN/m<sup>3</sup> o valor médio. A umidade do material variou de 14,61% a 56,35% sendo 35,80% o valor médio para esse parâmetro.



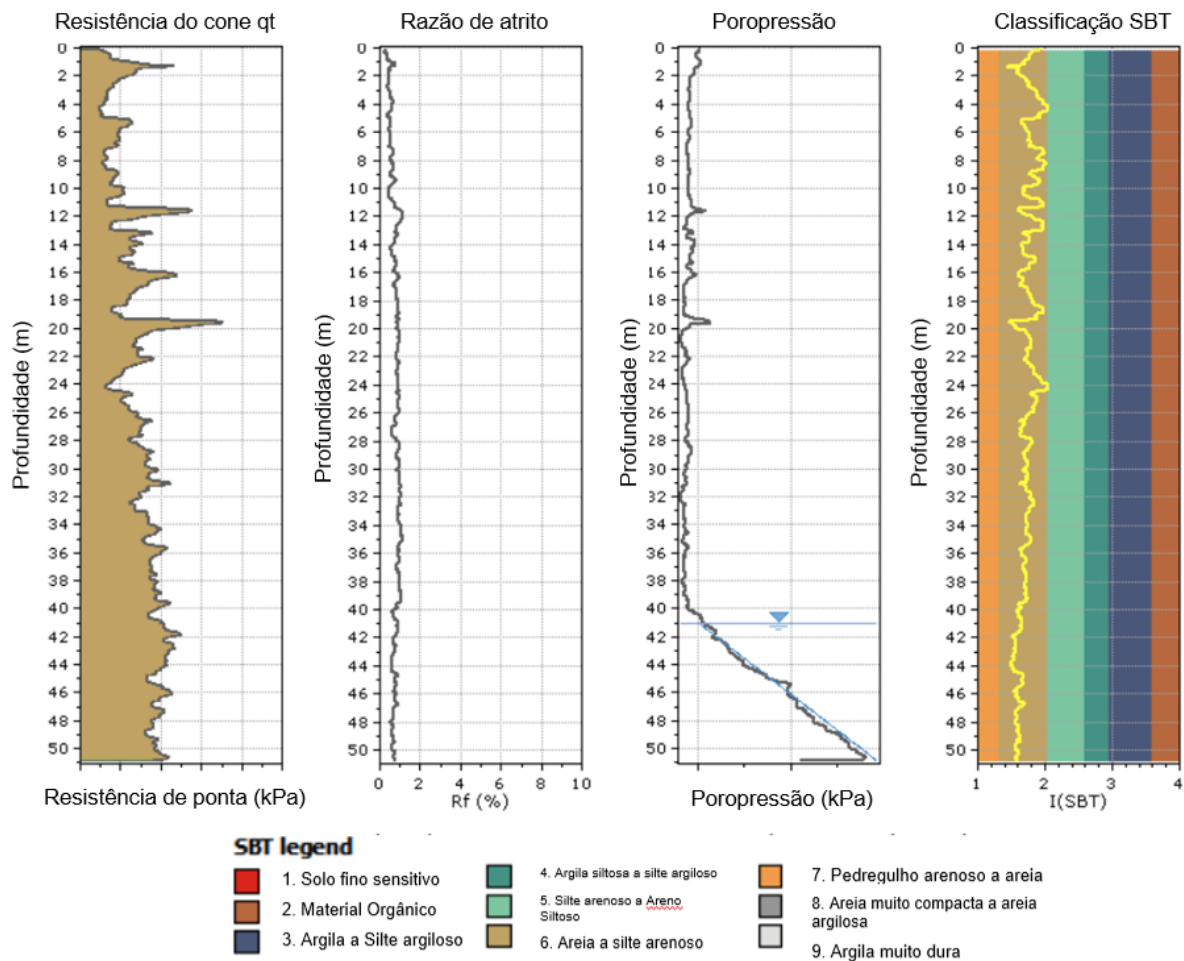
**Figura 37 - Resultado do CPTu-01 da Barragem 3, exportado do software CPeT-IT.**

## 4 RESULTADOS

O presente Capítulo apresenta as verticais definidas pelos métodos de Robertson (2010) e Plewes et. Al. (1992). Serão apresentados também os resultados exportados do *software CPet-IT* a fim de identificar características do ensaio e do material estudado. Também são apresentados os resultados encontrados do ábaco  $Q_{tn} \times SBT_n$  exportado do *software CPeT-IT*, conforme abordado em Robertson (2016).

### 4.1 Barragem 1 – CPTu-03

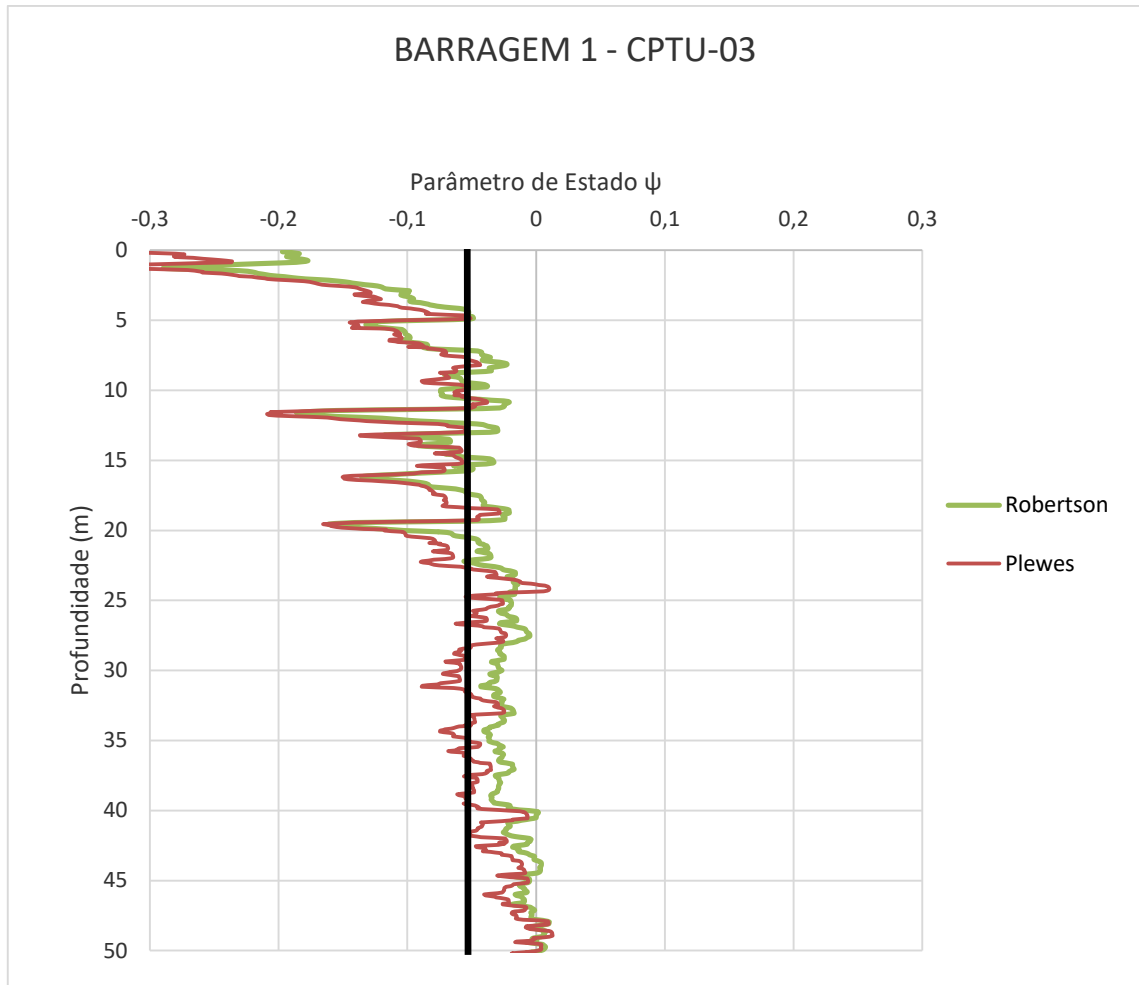
A Figura 38 já foi apresentada no capítulo anterior como característica dessa barragem, porém vale destacar a profundidade de 41 m da superfície freática da barragem. As classificações comportamentais de Robertson (2016) também indicam o material como predominantemente arenoso com pequena fração siltosa.



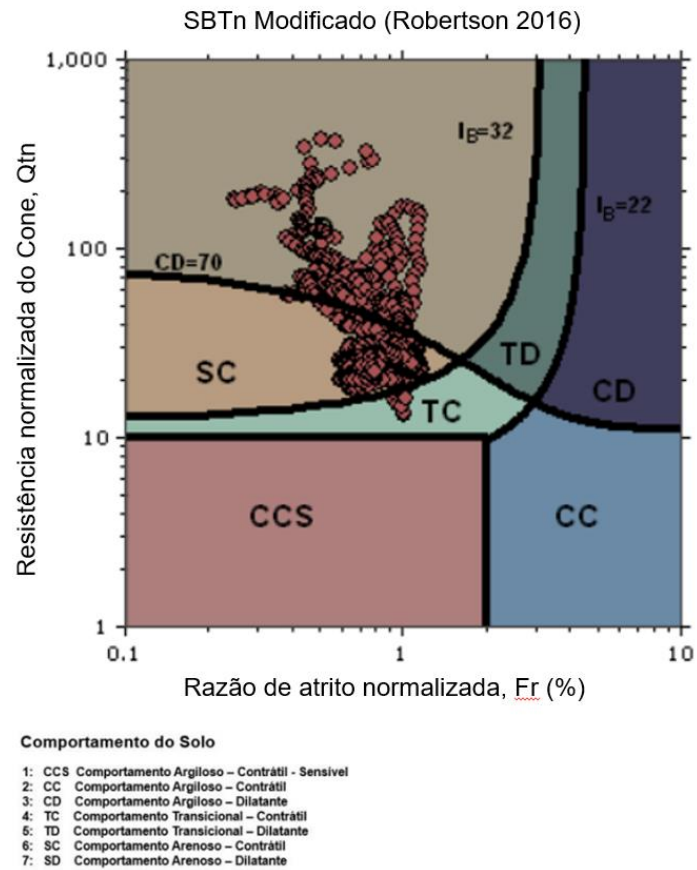
**Figura 38 - Resultados do ensaio CPTu (Barragem 1 CPTu-03) exportados do software CPTeT-IT.**

Os resultados da estimativa do parâmetro de estado são apresentados na Figura 39. Em linhas gerais, ambos os métodos tiveram resultados próximos, os primeiros 5 metros resultaram em valores de  $\psi < 0,05$ , sendo segundo Jefferies e Been (2016), não suscetíveis à liquefação. A partir da profundidade 20 m, o método de Robertson (2010) apresentou resultado e comportamento contrátil ( $\psi > 0,05$ ) enquanto o método de Plewes et. al (1992) mostrou que, em algumas profundidades, a linha limite ( $\psi = 0,05$ ) foi ultrapassada. A partir de 35 m, ambos os métodos apresentaram valores de  $\psi$  indicando comportamento contrátil.

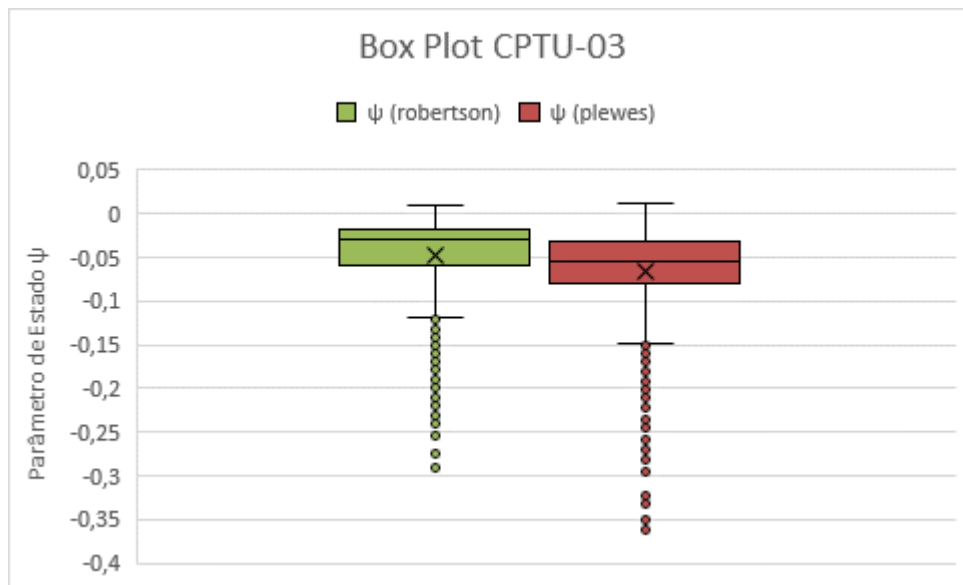
A Figura 40 apresenta diversos pontos abaixo e acima do  $CD = 70$  no ábaco proposto por Robertson (2016). As regiões contidas nos pontos são tanto SD (areia dilatante) quanto SC (areia contrátil).



**Figura 39 – Resultado da estimativa do parâmetro de estado por Robertson (2010) e Plewes et. al (1992) - BARRAGEM 1 - CPTu-03**



**Figura 40 Resultado da estimativa do comportamento do rejeito conforme Robertson (2016) - BARRAGEM 1 - CPTu-03**



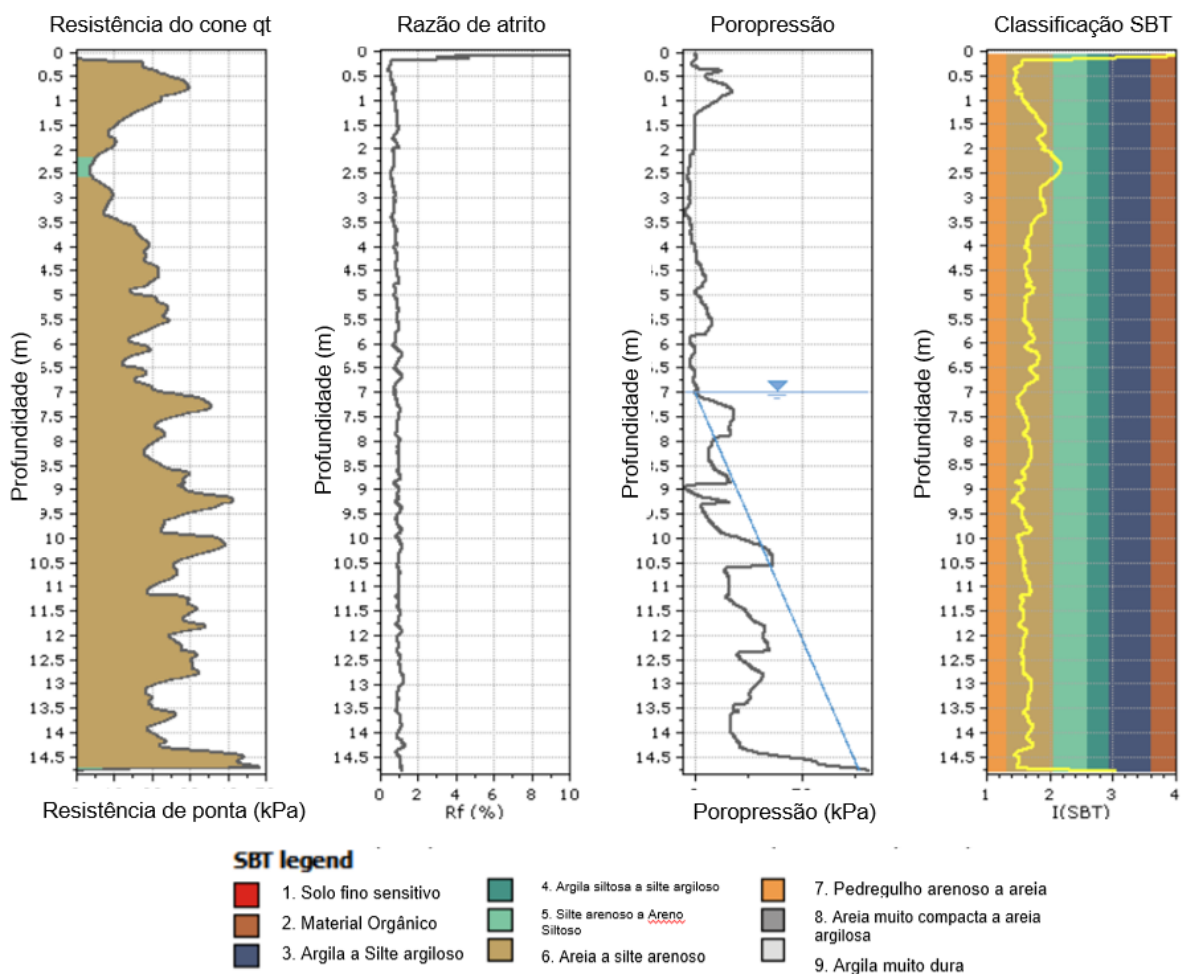
**Figura 41 – Box Plot comparativo do CPTU-03**



A Figura 41 representa os resultados e indica comportamento contrátil em algumas profundidades e dilatante em outras. Apresenta mediana próximo de  $\psi = -0,05$  entre o primeiro e o terceiro quartil.

#### 4.2 Barragem 1 – CPTu-07

A Figura 42 apresenta dos dados exportados do *CPeT-IT* para o CPTu-07. A classificação SBT indica material predominantemente arenoso com superfície freática encontrada a 7 m de profundidade.



**Figura 42 - Resultados do ensaio CPTu (Barragem 1 CPTu-07) exportados do software *CPeT-IT*.**

Os resultados da estimativa do parâmetro de estado são apresentados na Figura 43. Ambos os métodos tiveram resultados próximos onde praticamente durante

toda a vertical do ensaio resultaram em valores de  $\psi < 0,05$ , que segundo Jefferies e Been (2016) podem ser considerados não suscetíveis à liquefação.

O ábaco de classificação comportamental (Figura 44) de Robertson (2016) está de acordo com a estimativa de  $\psi$ , pois praticamente todos os pontos do ensaio são encontrados na região SD (areia com comportamento dilatante).

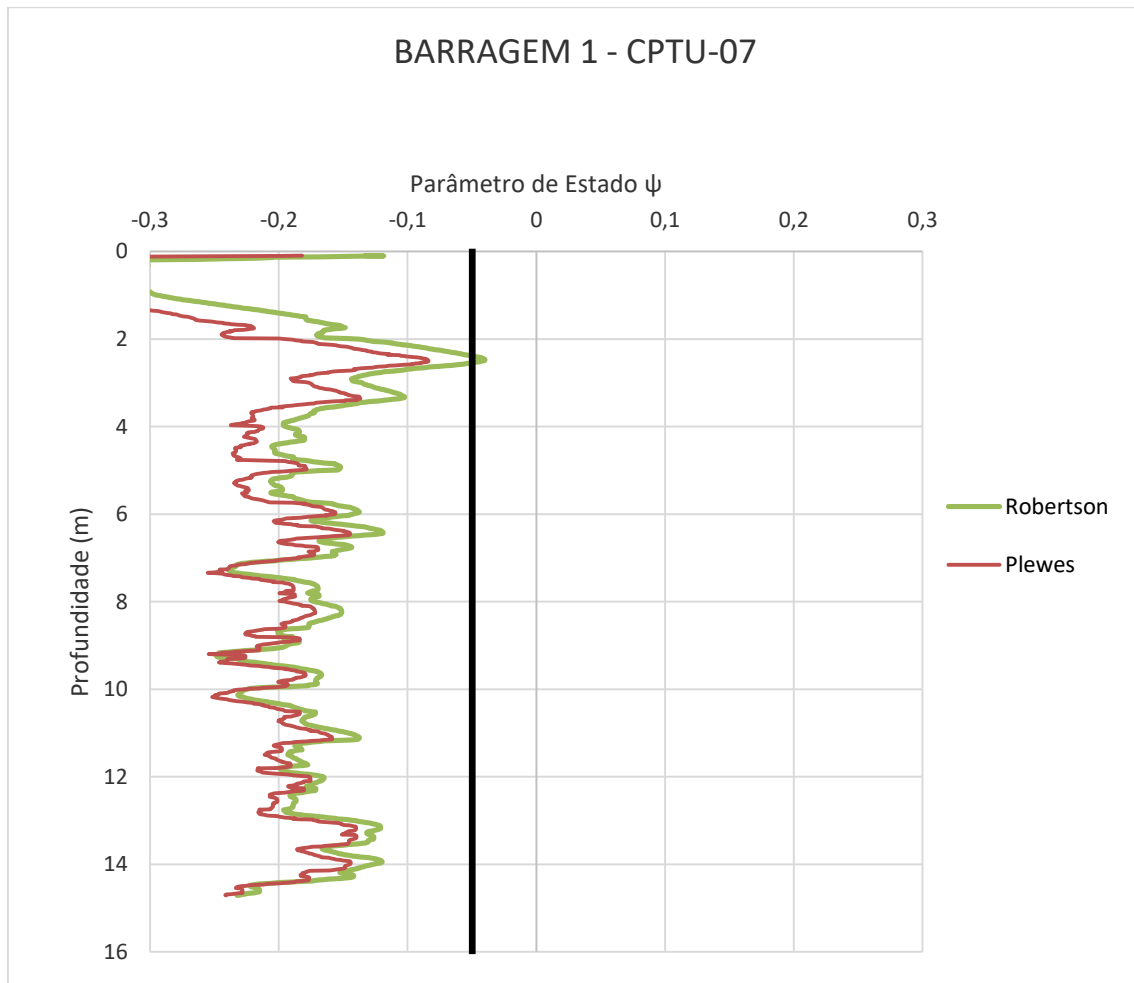
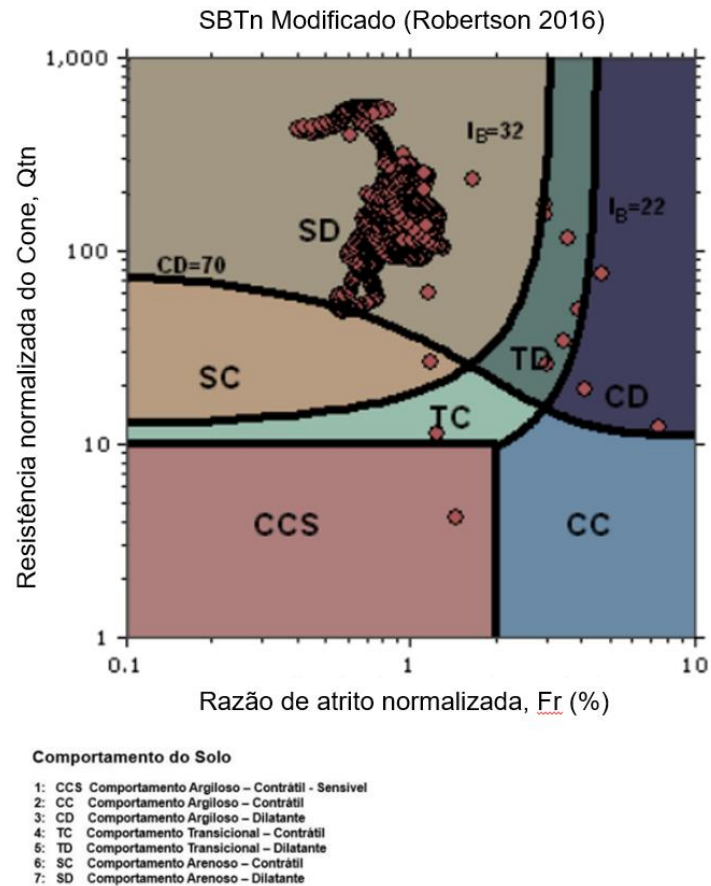
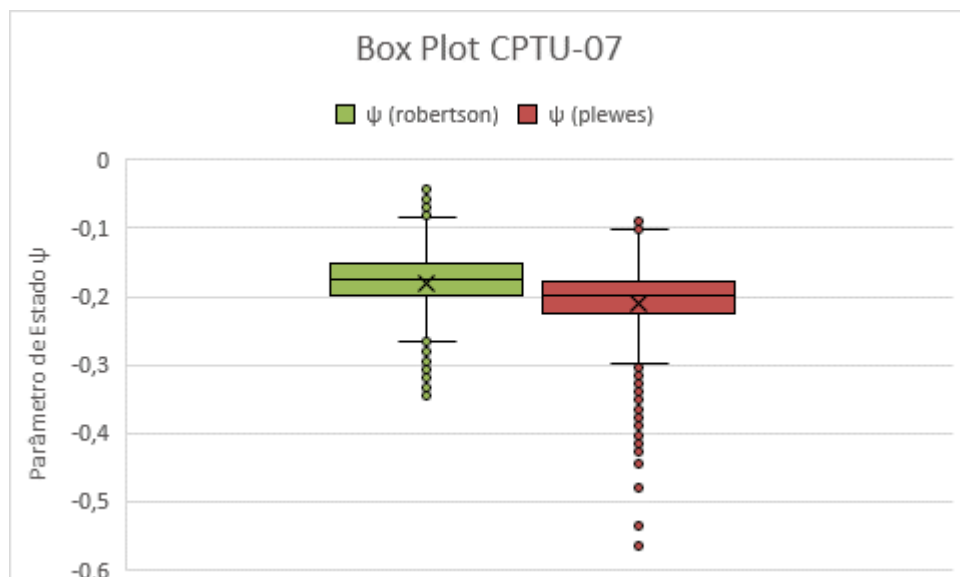


Figura 43 - Resultado da estimativa do parâmetro de estado por Robertson (2010) e Plewes et. al (1992) - BARRAGEM 1 - CPTu-07



**Figura 44 - Resultado da estimativa do comportamento do rejeito conforme Robertson (2016) - BARRAGEM 1 - CPTu-07**



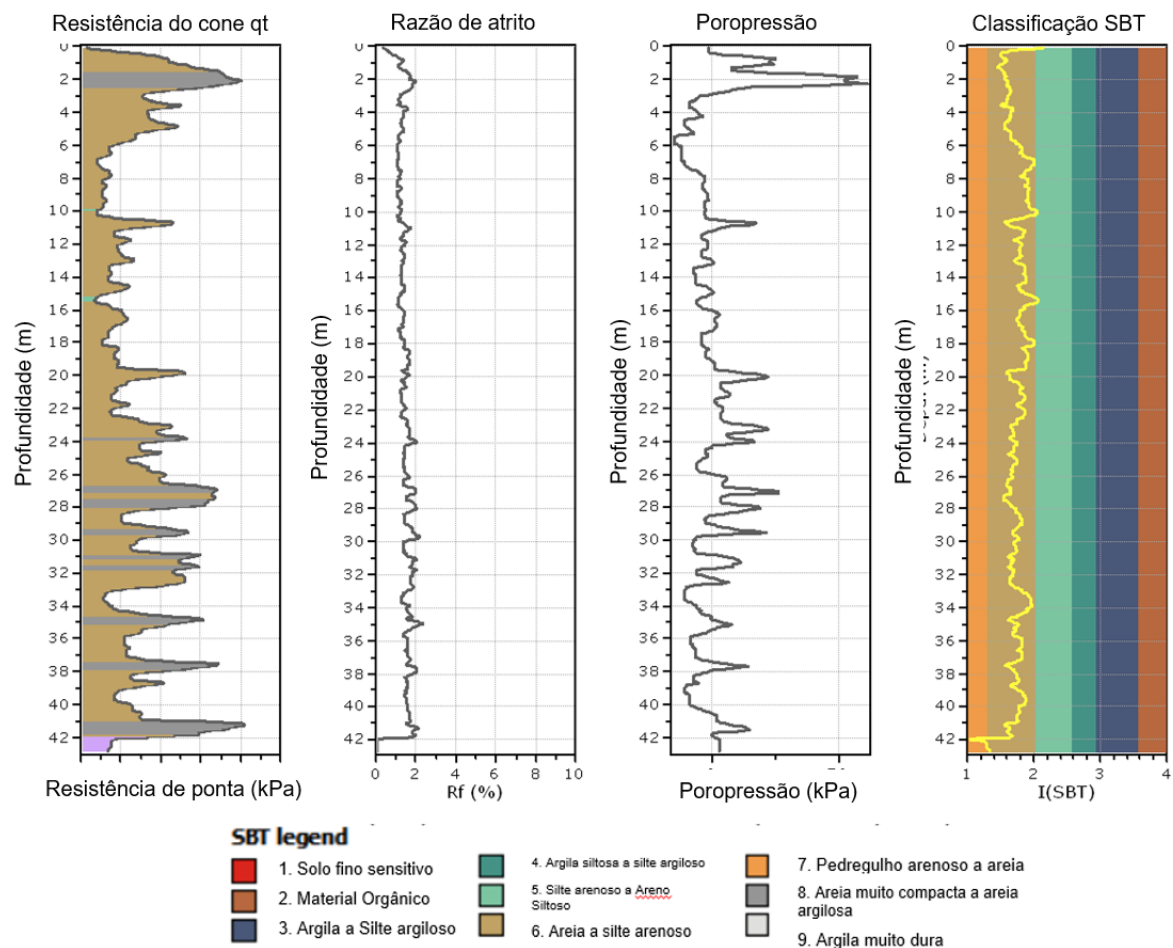
**Figura 45 - Box Plot comparativo do CPTU-07**

A Figura 45 apresenta os resultados e indica comportamento dilatante todas as profundidades com exceção de alguns resultados classificados acima do limite

superior segundo o *box plot*. É possível perceber boa concordância entre os valores de ambos os métodos.

#### 4.3 Barragem 1 – CPTu-14c

A Figura 46 apresenta os resultados exportados do *CPTeT-IT*, diferentemente dos resultados anteriores para a Barragem 1. Esse ensaio (CPTu-14c) apresenta algumas lentes de material mais fino, que podem ser observadas também pelos picos de poropressão indicados na Figura 46.



**Figura 46 - Resultados do ensaio CPTu (Barragem 1 CPTu-14c) exportados do software *CPTeT-IT*.**

Apesar do método de Plewes et. al (1992) apresentar valores de  $\psi$  na maioria das vezes menor que Robertson (2010), ambos estão de acordo com a classificação

do material como suscetível à liquefação, com valores de  $\psi < 0,05$ , salvo na profundidade de 34 m, onde ambos os métodos apresentaram valor de  $\psi > 0,05$ .

O ábaco da Figura 48 indica presença dos pontos predominantemente na região SD (areia de comportamento dilatante) com alguns poucos pontos em regiões de transição contráteis.

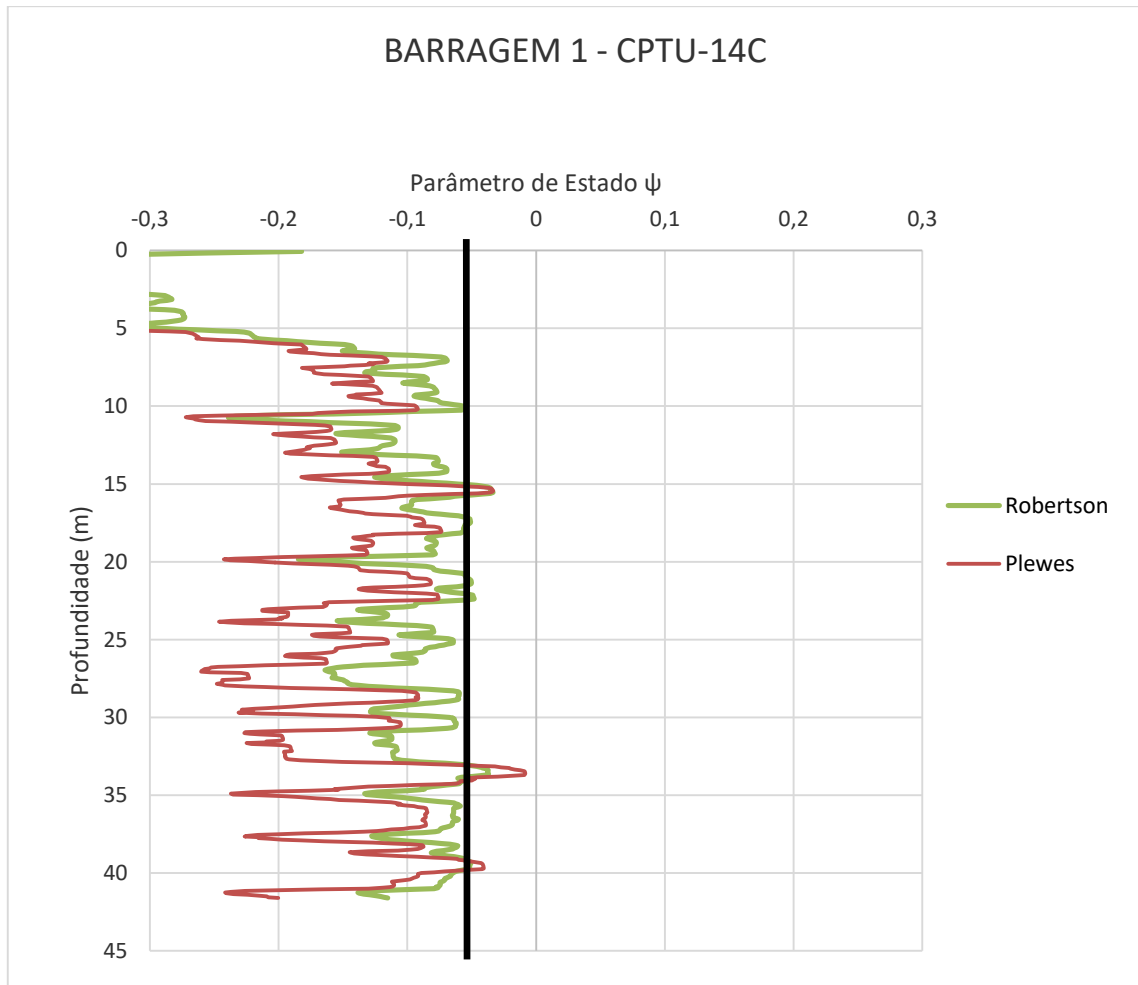
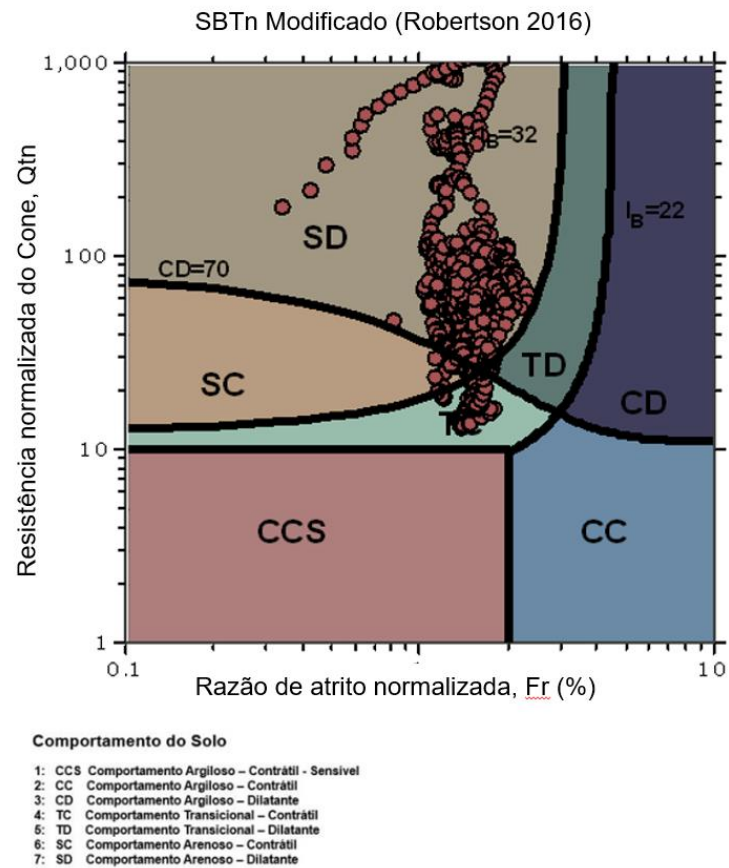
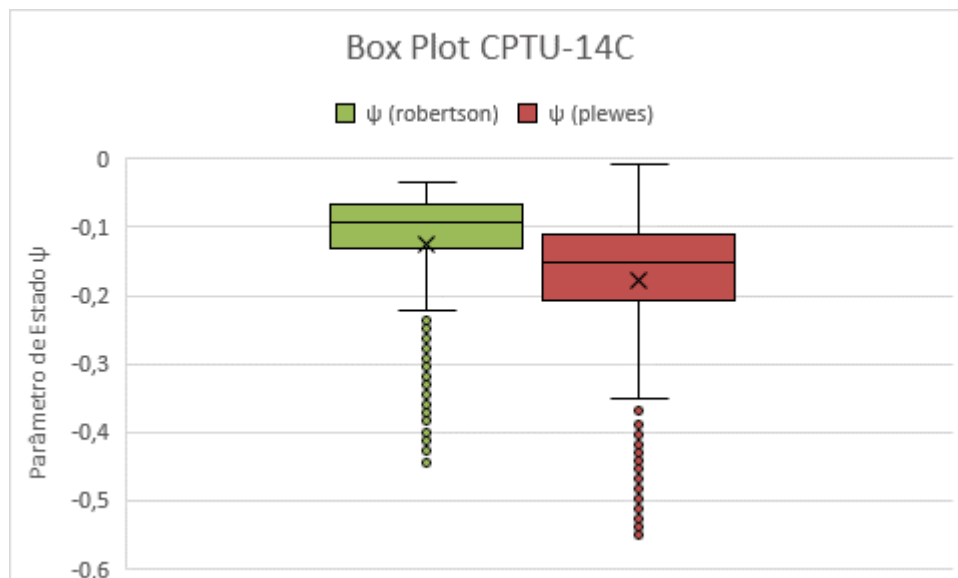


Figura 47 - Resultado da estimativa do parâmetro de estado por Robertson (2010) e Plewes et. al (1992) - BARRAGEM 1 - CPTu-14c



**Figura 48 - Resultado da estimativa do comportamento do rejeito conforme Robertson (2016) - BARRAGEM 1 - CPTu-14c**



**Figura 49 – Box Plot do CPTu-14c**

A Figura 49 representa a comparação entre os métodos, onde é possível perceber grande parte dos resultados abaixo de  $\psi = -0,05$ . Sendo apenas o limite superior de Plewes et. al (1992) tendendo ao lado contrátil.

#### 4.4 Barragem 1 – CPTu-26

A Figura 50 apresenta os dados exportados do CPTeT-IT. É possível perceber pequenas regiões de material argiloso conforme a classificação SBT e alguns picos de poropressão durante a cravação do cone.

A Figura 51 apresenta os resultados dos métodos de Robertson (2010) e Plewes et. al. (1992). Ambos os métodos resultaram em valores de  $\psi < 0,05$ , indicando materiais não suscetíveis à liquefação, sendo os primeiros 4 m com valores bastantes consideráveis.

Nos primeiros 10 m, o método de Robertson (para o CPTu-26) resultou em valores de parâmetro de estado levemente superiores aos definidos por Plewes et. al (1992).

O ábaco da Figura 52 também reporta pontos do ensaio predominantemente em regiões dilatantes, SD (areia dilatante).

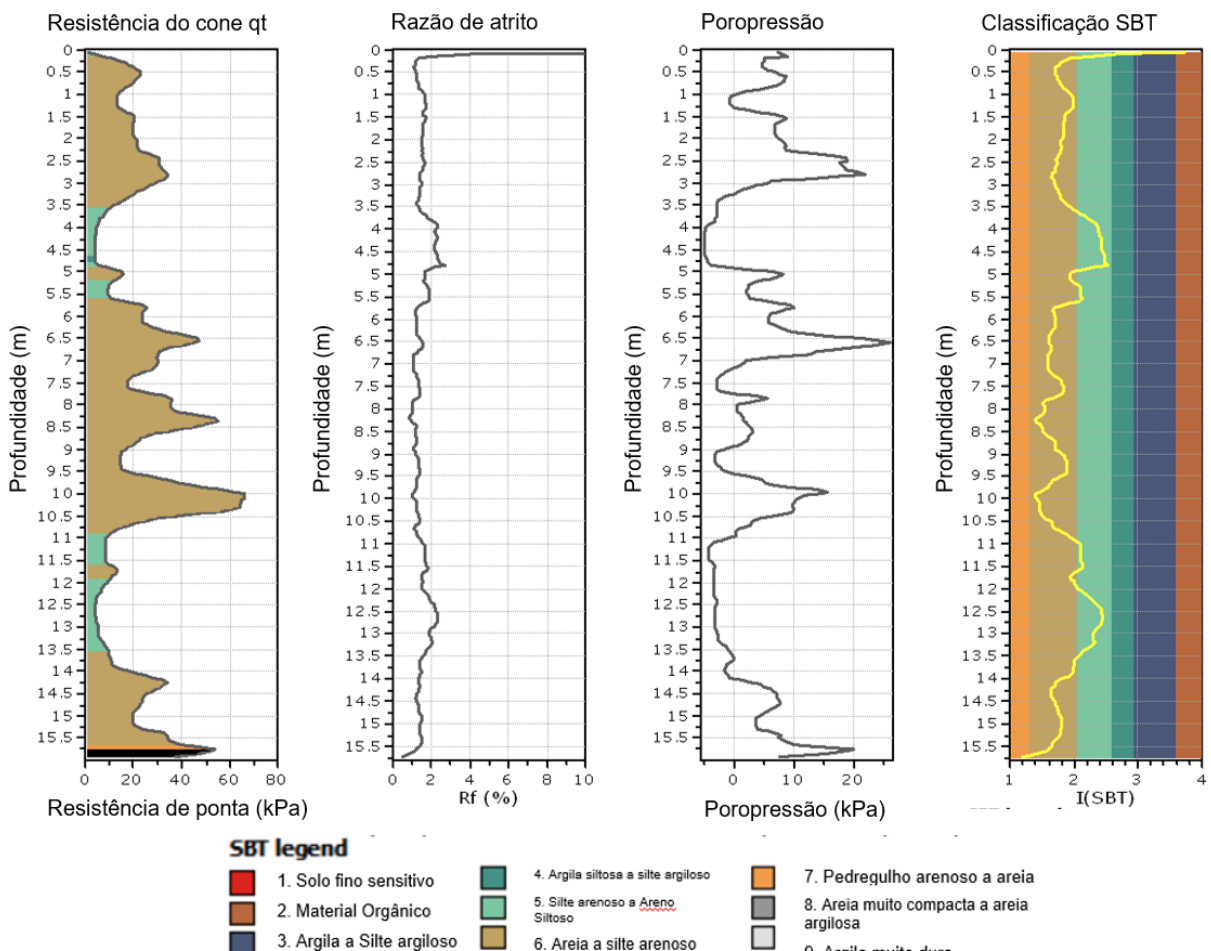
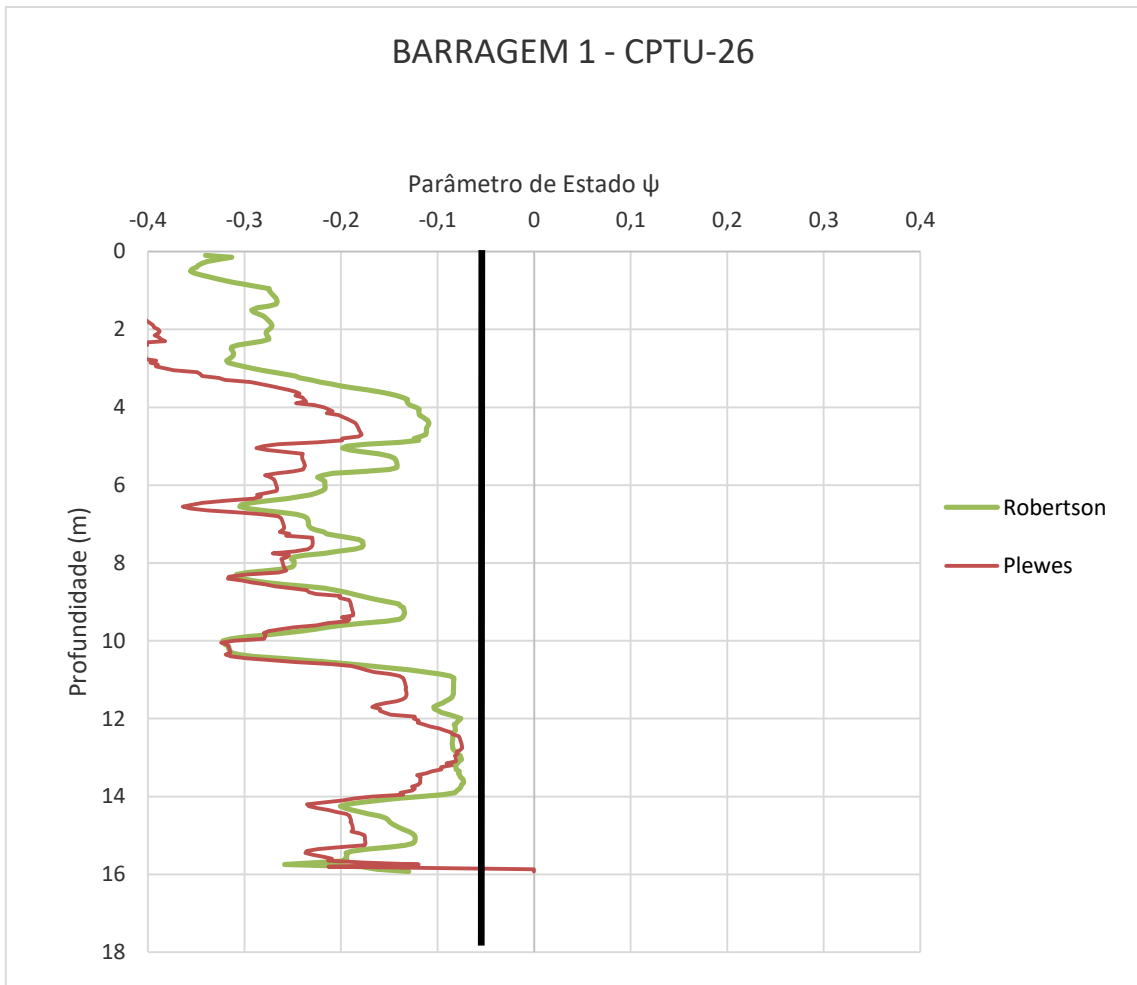
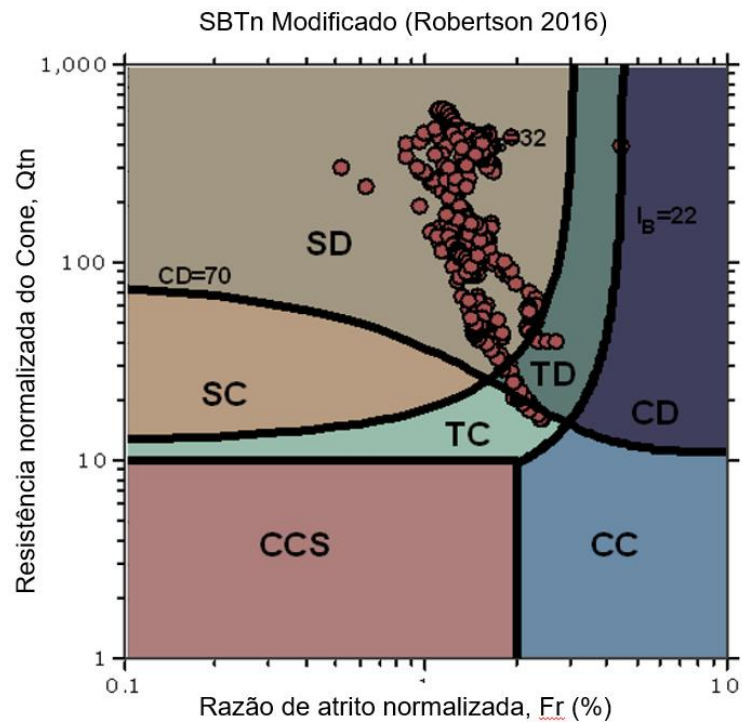


Figura 50 - Resultados do ensaio CPTu (Barragem 1 CPTu-26) exportados do software CPTeT-IT.



**Figura 51 - Resultado da estimativa do parâmetro de estado por Robertson (2010) e Plewes et. al (1992) - BARRAGEM 1 - CPTu-26**

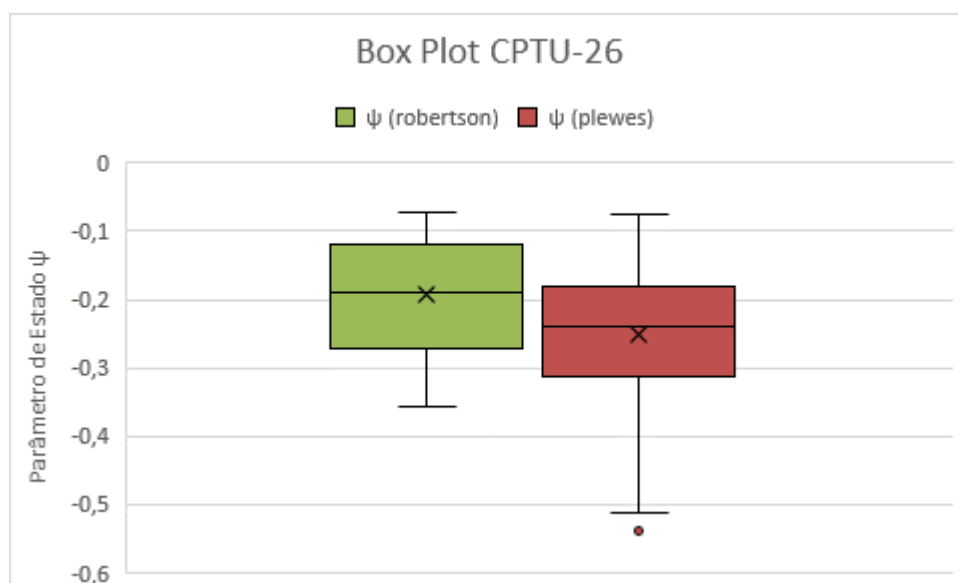




**Comportamento do Solo**

- 1: CCS Comportamento Argiloso – Contrátil - Sensível
- 2: CC Comportamento Argiloso – Contrátil
- 3: CD Comportamento Argiloso – Dilatante
- 4: TC Comportamento Transicional – Contrátil
- 5: TD Comportamento Transicional – Dilatante
- 6: SC Comportamento Arenoso – Contrátil
- 7: SD Comportamento Arenoso – Dilatante

**Figura 52 - Resultado da estimativa do comportamento do rejeito conforme Robertson (2016) - BARRAGEM 1 - CPTu-26**



**Figura 53 – Box Plot comparativo do CPTu-26**

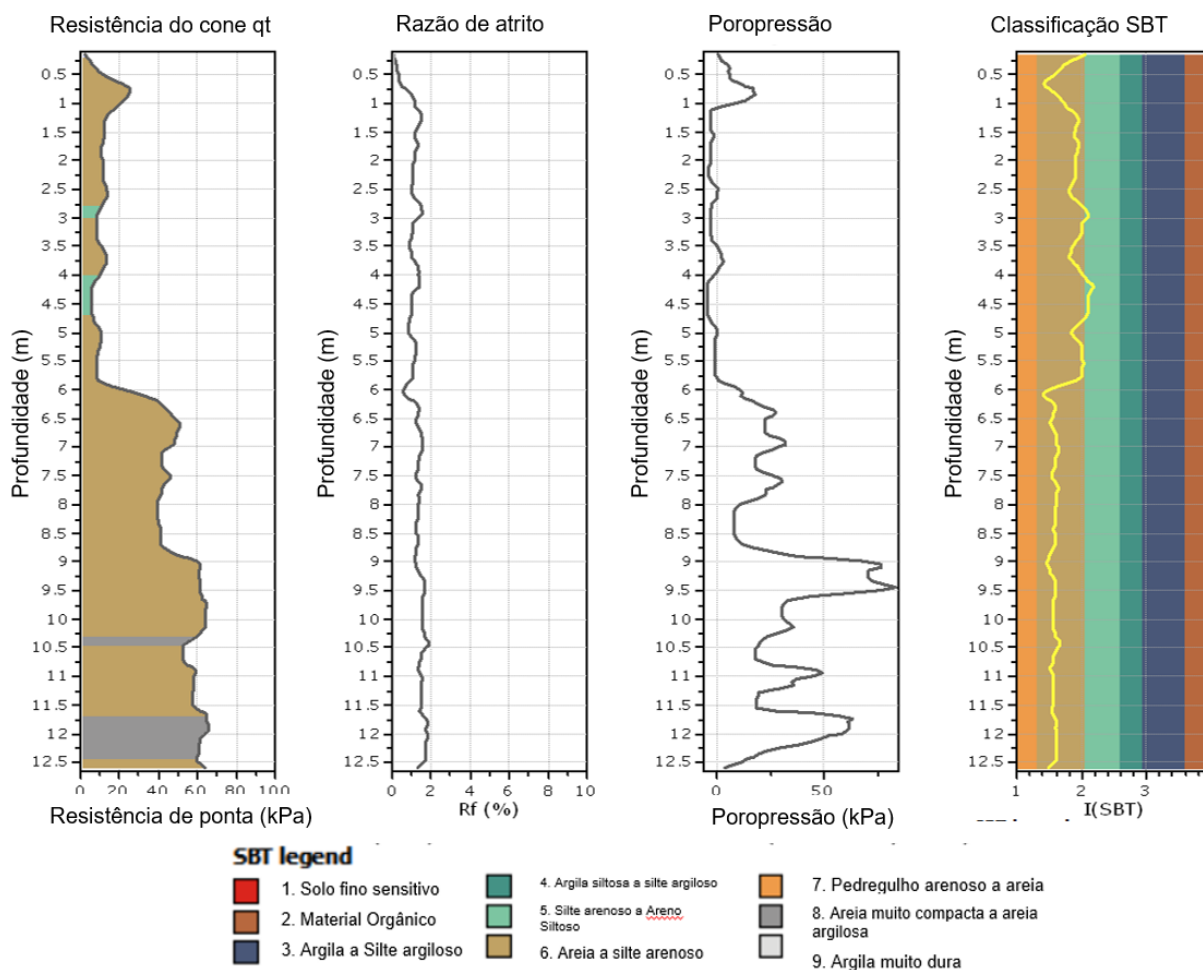
A Figura 53 representa os resultados comparativos entre os dois métodos, onde ambos resultaram em valores de  $\psi$  menores que 0,05.

#### 4.5 Barragem 1 – CPTu-31

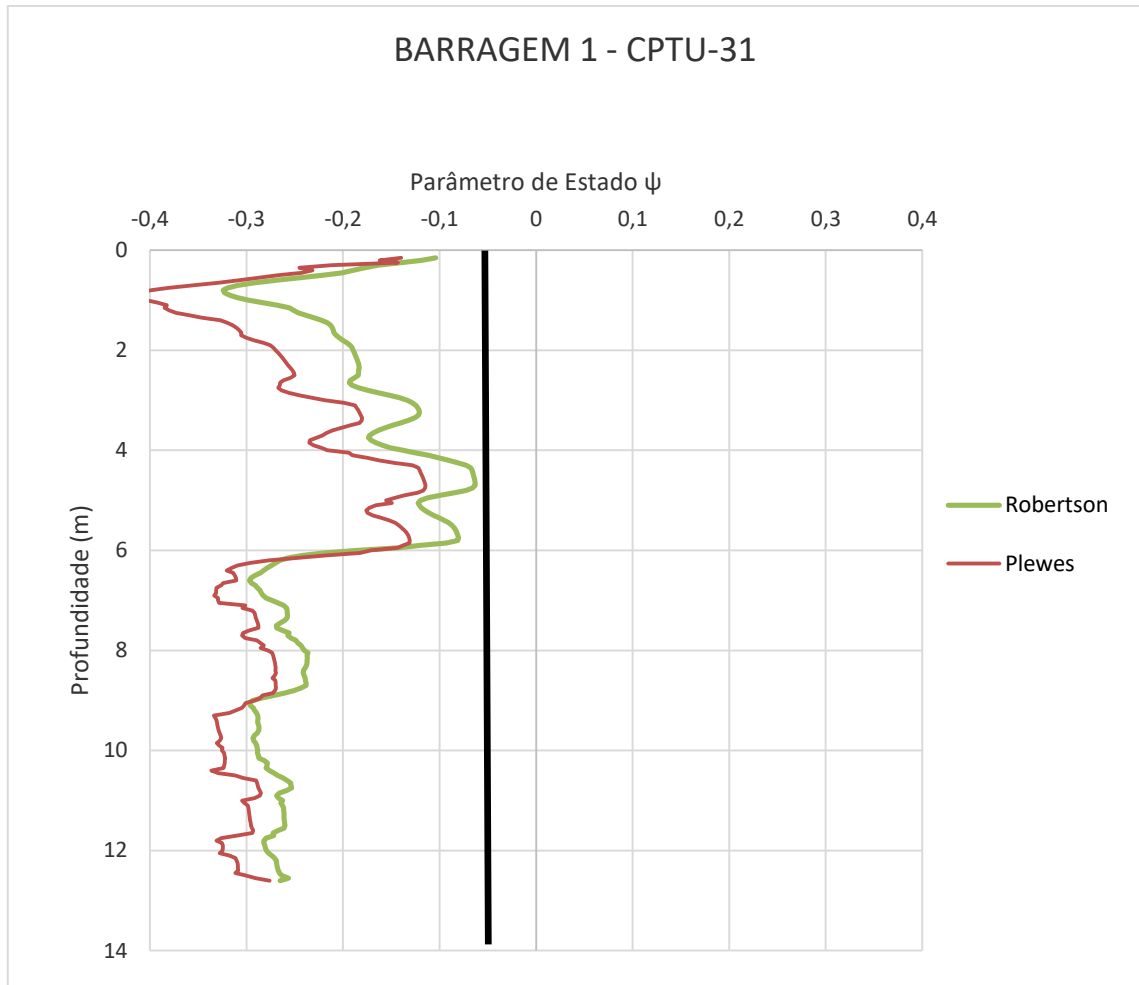
A Figura 54 apresenta resultados exportados do *CPEt-IT*, indicando segundo classificação SBT, material predominantemente arenoso. Existe um considerável aumento na resistência de ponta do cone a partir de 6 m de profundidade.

Ambos os métodos de estimativa do parâmetro de estado resultaram em valores de  $\psi < 0,05$ , ou seja, não suscetíveis à liquefação. Vale destacar que, novamente, para esse rejeito o método de Robertson (2010) apresentou valores de  $\psi$  levemente superiores aos de Plewes et. Al (1992). É possível perceber, também, uma diferença abrupta nos valores de  $\psi$  na profundidade de 6 m, quando a resistência de ponta aumentou e o parâmetro de estado diminuiu ainda mais.

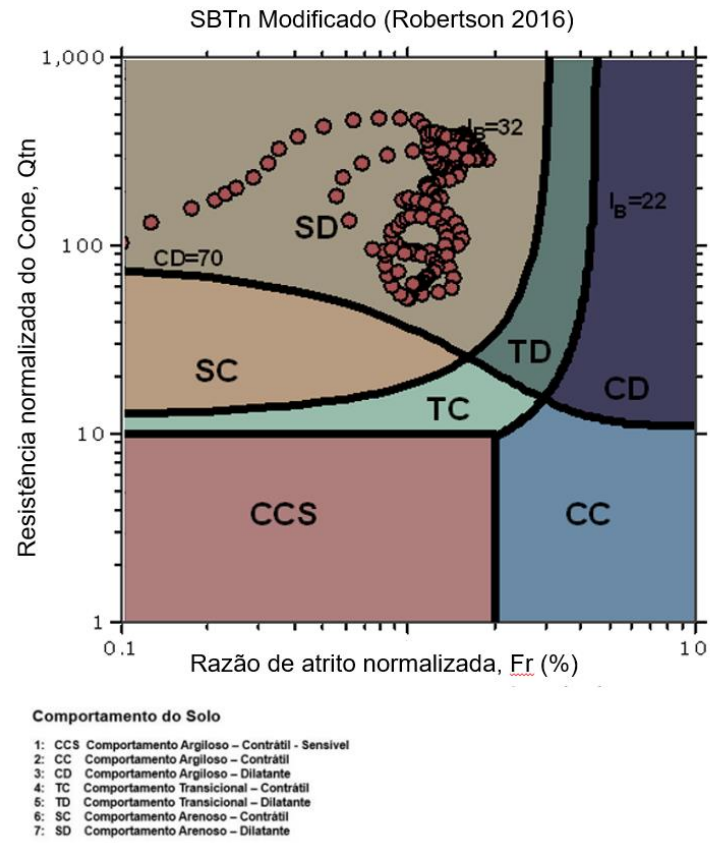
O Ábaco de Robertson (2016) contido na Figura 56 corrobora com os resultados de parâmetro de estado, com todos os pontos acima da envoltória  $CD=70$  e na região de areia dilatante.



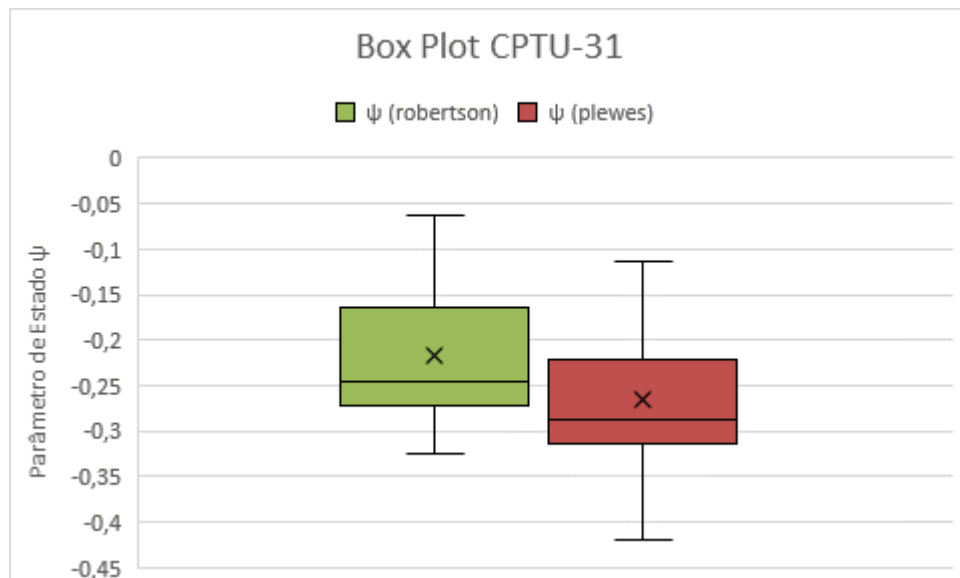
**Figura 54 - Resultados do ensaio CPTu (Barragem 1 CPTu-31) exportados do software *CPEt-IT*.**



**Figura 55 - Resultado da estimativa do parâmetro de estado por Robertson (2010) e Plewes et. al (1992) - BARRAGEM 1 - CPTu-31**



**Figura 56 - Resultado da estimativa do comportamento do rejeito conforme Robertson (2016) - BARRAGEM 1 - CPTu-31**



**Figura 57 – Box Plot do CPTu-31**

A Figura 57 representa a boa concordância entre os métodos para essa vertical analisada. É possível perceber que não existem valores de parâmetro de estado acima de 0,05 ( $\psi > -0,05$ )

#### 4.6 Barragem 2 – CPTu-01

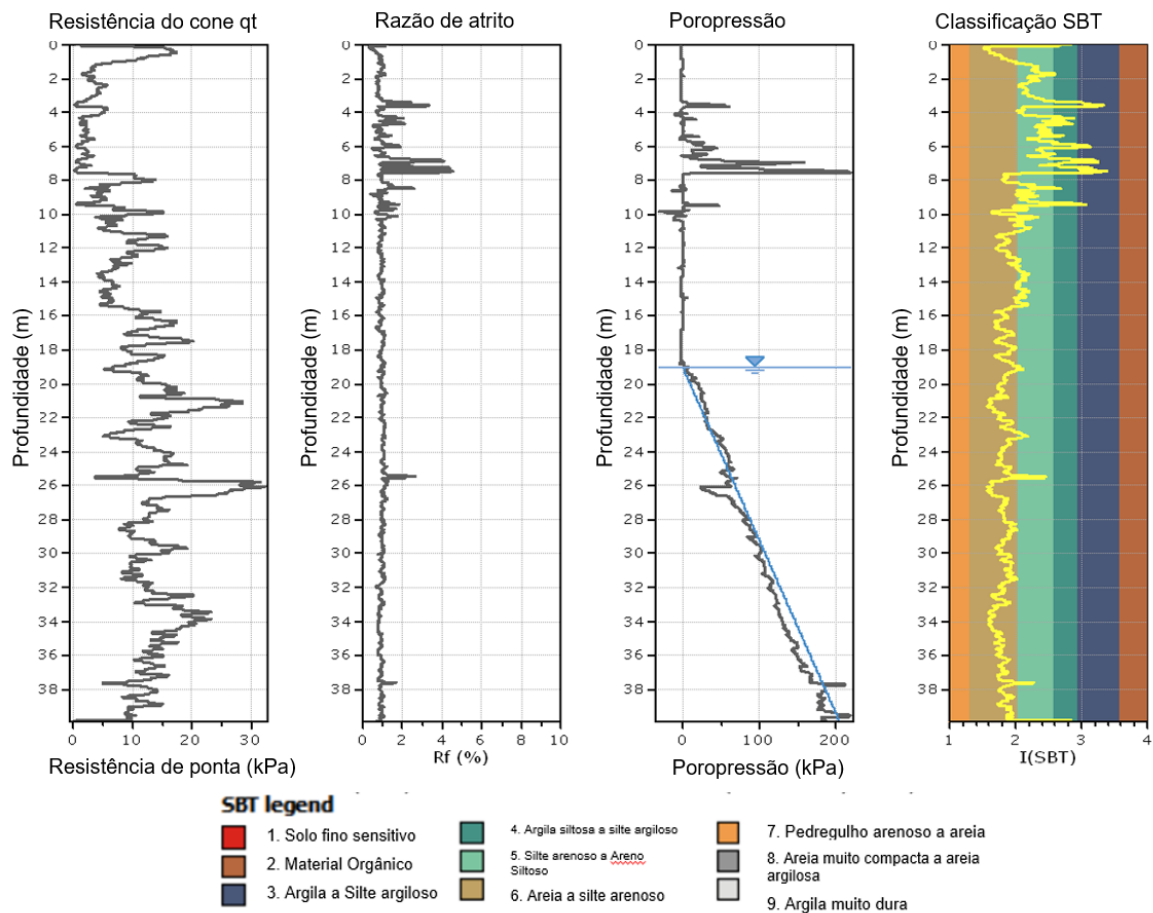
A barragem 2, apesar de armazenar outro tipo de material e rejeito, apresenta granulometria semelhante.

Na Figura 58 é possível identificar regiões mais superficiais com classificações SBT de caráter argiloso. A superfície freática foi encontrada na profundidade de 19 m.

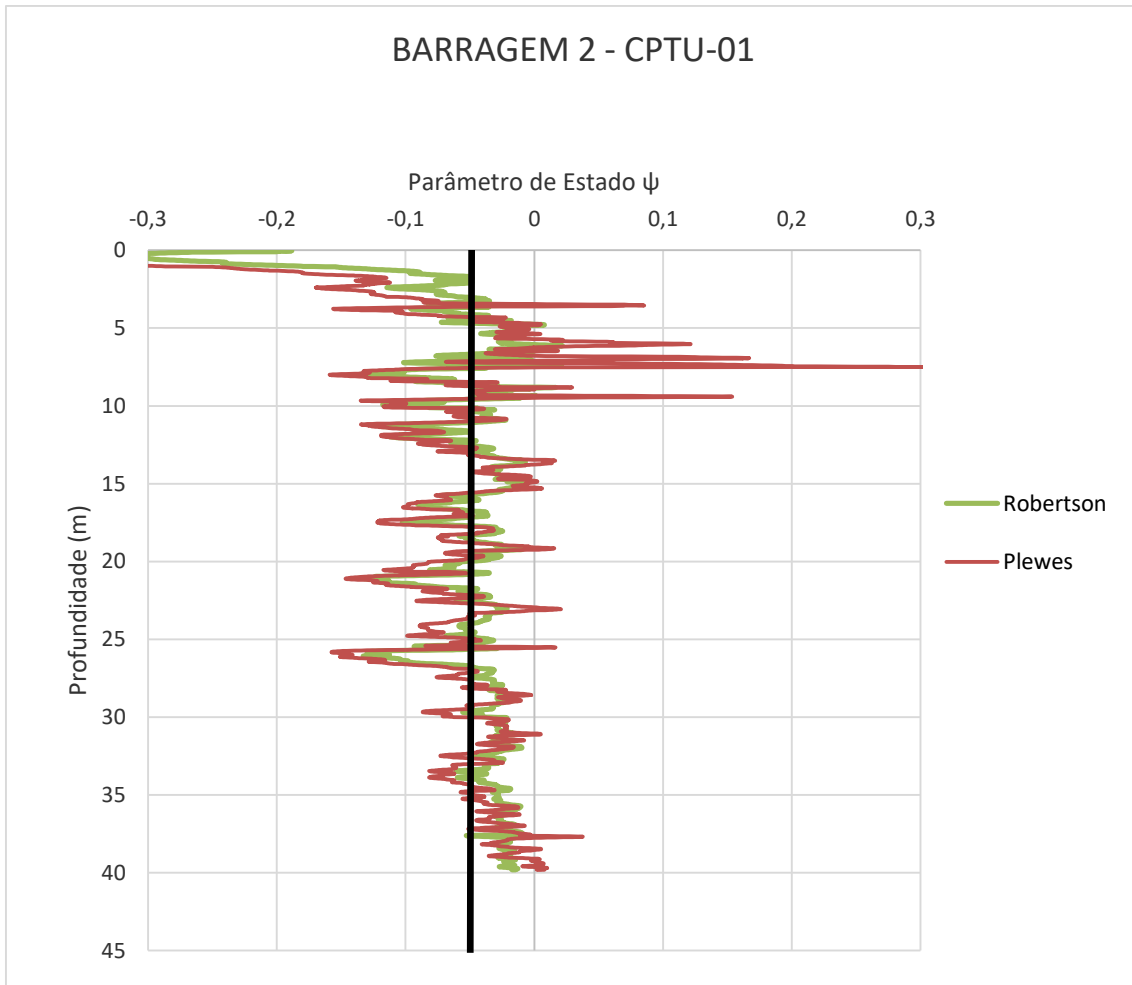
A estimativa do parâmetro de estado para ambos os métodos foi bastante coerente, sendo que para os primeiros 5 m resultou em comportamento dilatante  $\psi < 0,05$ , ou seja, não suscetível à liquefação, enquanto para o restante do ensaio os

valores do parâmetro de estado se mantiveram próximo de  $\psi = 0,05$ , como pode ser observado na Figura 59.

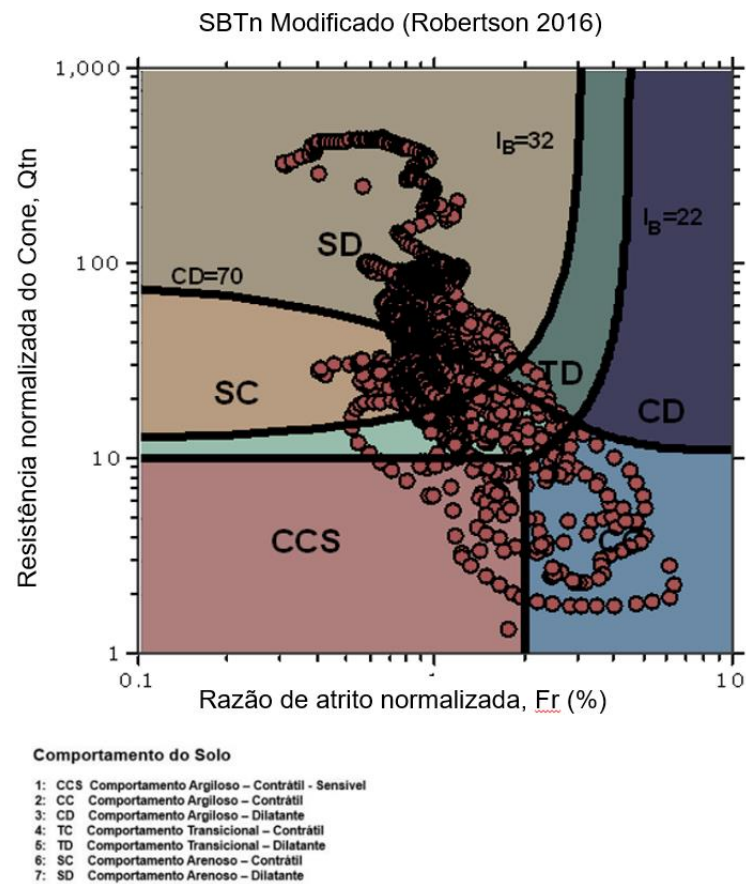
Os valores encontrados para a classificação de Robertson (2016) incluíram pontos tanto na região de comportamento contrátil quanto na região de comportamento dilatante, valores esses que corroboram com os cálculos do parâmetro de estado.



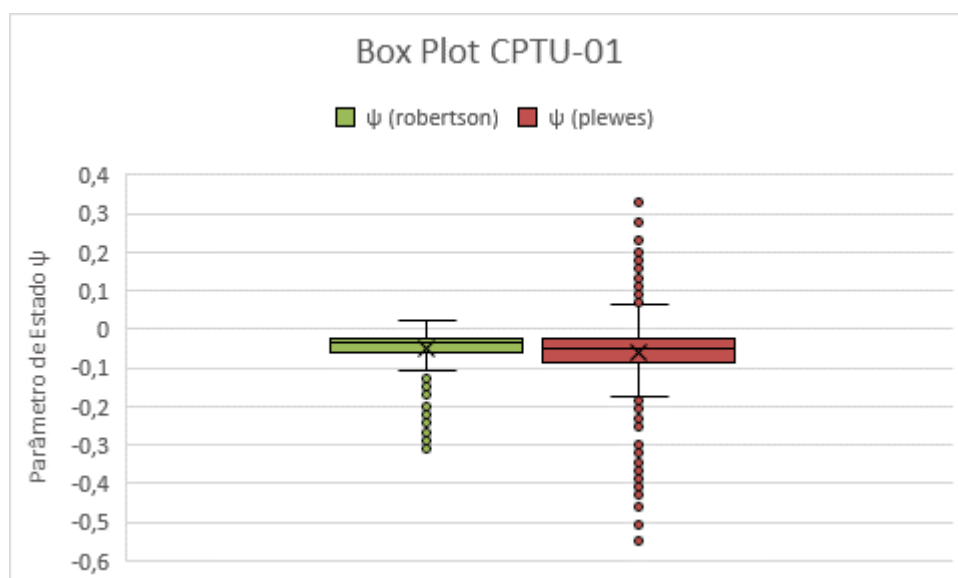
**Figura 58 - Resultados do ensaio CPTu (Barragem 2 CPTu-01) exportados do software CPTeT-IT.**



**Figura 59 - Resultado da estimativa do parâmetro de estado por Robertson (2010) e Plewes et. al (1992) - BARRAGEM 2 - CPTu-01**



**Figura 60 - Resultado da estimativa do comportamento do rejeito conforme Robertson (2016) - BARRAGEM 2 - CPTu-01**



**Figura 61 – Box Plot comparativo do CPTu-01**

A Figura 61 indica boa concordância entre os métodos, sendo método de Plewes at. Al (1992) indicando mais valores de parâmetro de estado além dos limites inferior e



superior. Os valores para primeiro e terceiro quartil são semelhantes para essa vertical analisada indicando alerta pois o intervalo interquartil está na região de  $\psi = -0,05$

#### 4.7 Barragem 2 – CPTu-02

Os resultados do CPTu-02 da Barragem 2 estão apresentados na Figura 62, onde é possível observar comportamentos semelhantes ao CPTu-01. A superfície freática está indicada a 24 m de profundidade e é possível perceber algumas lentes de material mais resistente no gráfico de resistência de ponta na cravação do cone.

Nos primeiros 12 m o material apresenta um comportamento diferente do restante do ensaio, sendo caracterizado por material mais argiloso conforme classificação SBT.

A Figura 63 apresenta valores de  $\psi < 0,05$  para as profundidades de 10 m a 15 m e de 20 m a 25 m. De um modo geral, ambos os métodos resultaram em valores semelhantes, onde a maioria dos valores encontrados nas estimativas indicam comportamento contrátil. A Figura 64 apresentou pontos em diversas regiões, mas

grande maioria fica concentrada na região SC (areia contrátil) e TC (material de transição contrátil), ou seja, suscetíveis à liquefação.

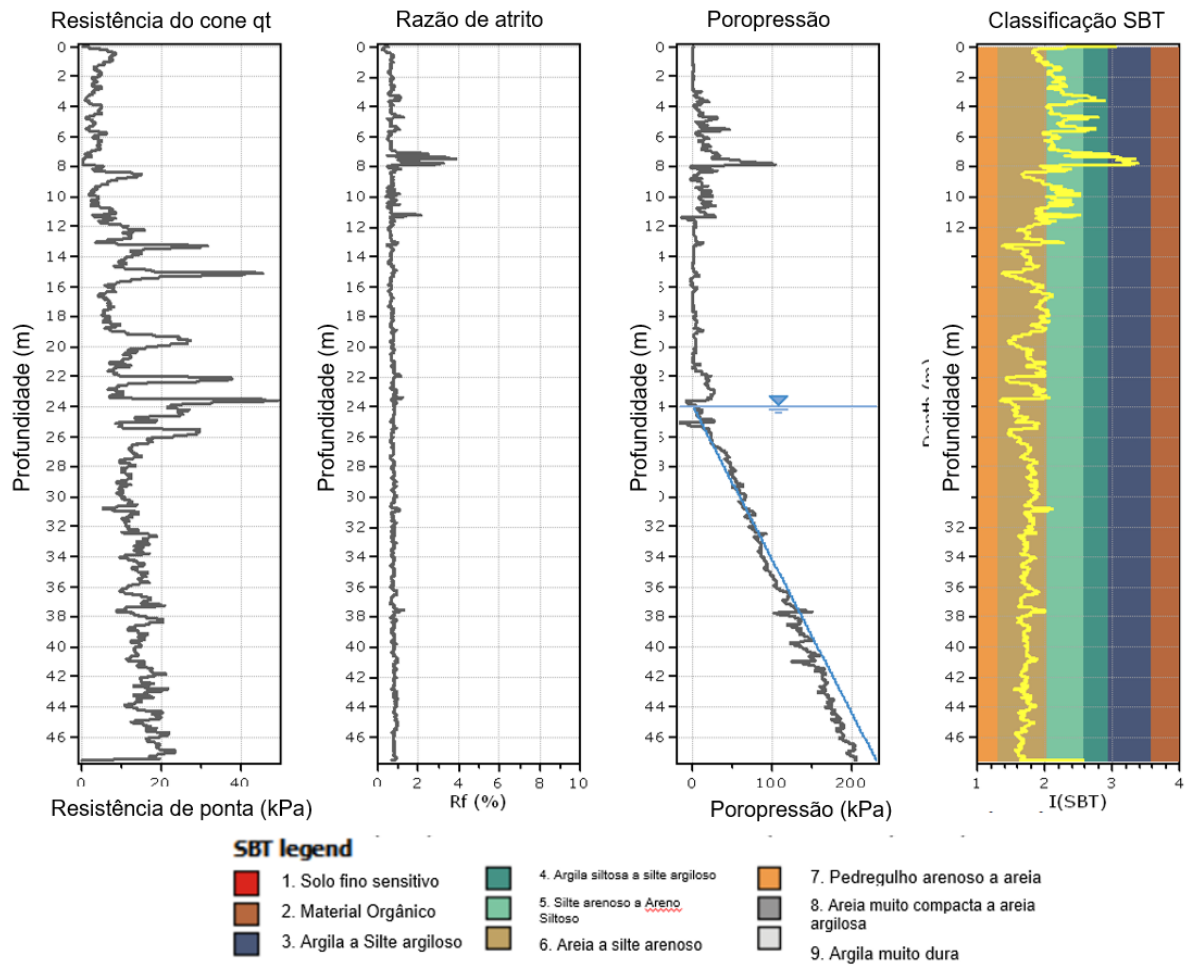
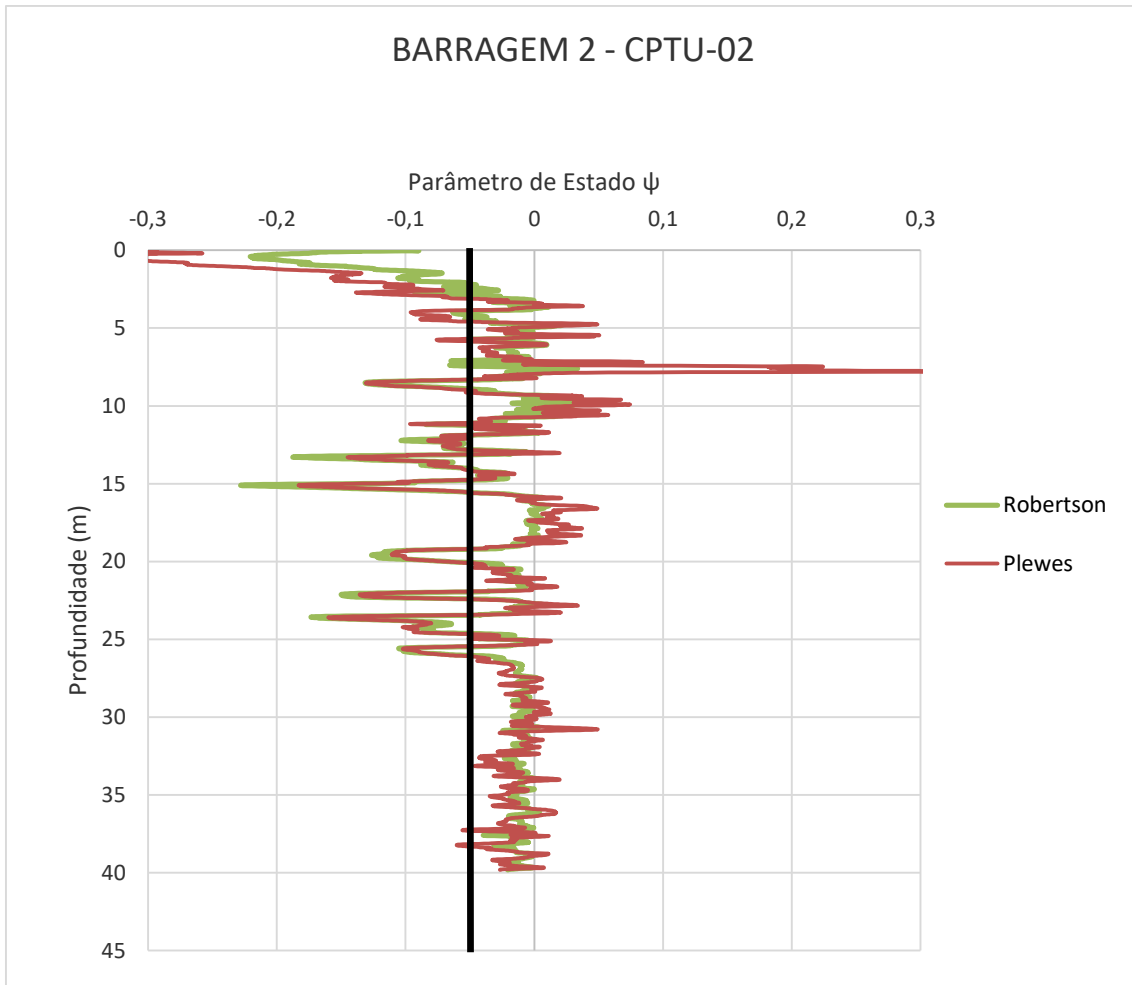
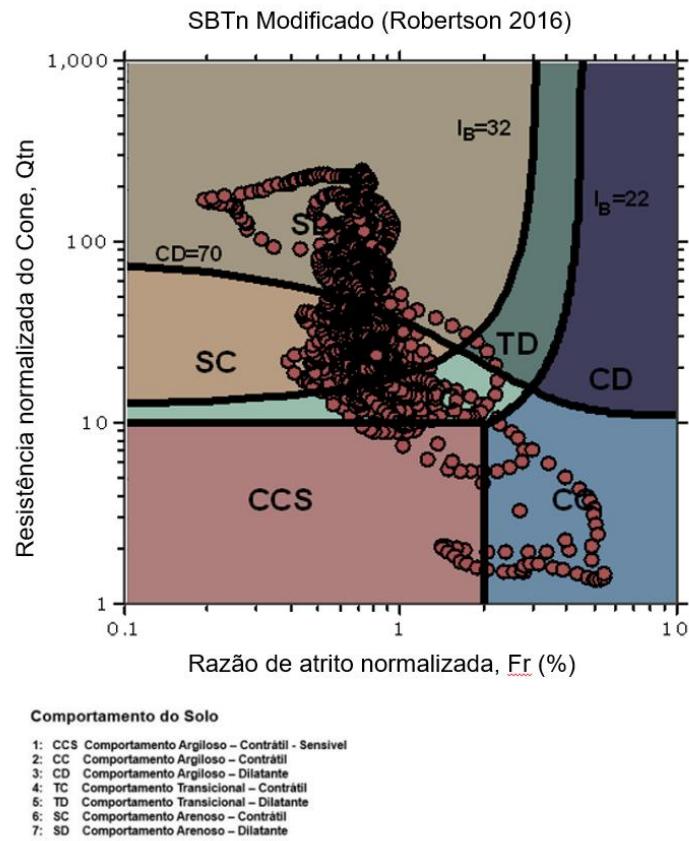


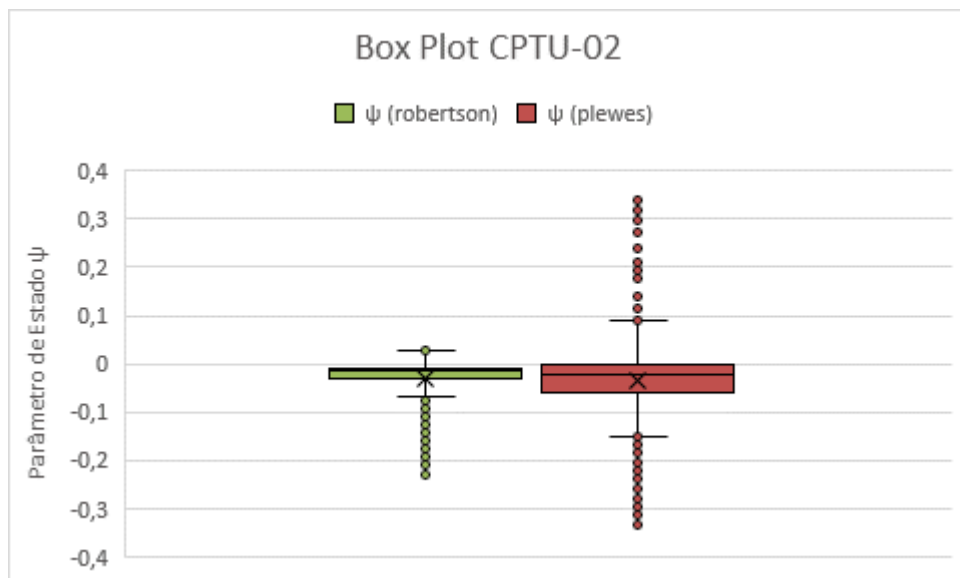
Figura 62 – Resultados do ensaio CPTu (Barragem 2 CPTu-02) exportados do software CPTeT-IT.



**Figura 63 – Resultado da estimativa do parâmetro de estado por Robertson (2010) e Plewes et. al (1992) – BARRAGEM 2 – CPTu-02**



**Figura 64 – Resultado da estimativa do comportamento do rejeito conforme Robertson (2016) – BARRAGEM 2 – CPTu-02**



**Figura 65 – Box Plot comparativo do CPTu-02**

A Figura 65 representa bem os valores que foram encontrados para estimativa do parâmetro de estado no CPTu-02. Muitos valores acima de  $\psi = -0,05$  indicando comportamento contrátil, portanto frágil.

#### 4.8 Barragem 3 – CPTu-01

Os resultados exportados do *CpeT-it* para a barragem 3 são apresentados na Figura 66. É possível perceber grande divergência para os materiais apresentados anteriormente, pois segundo classificação SBT, quase a totalidade do ensaio é

caracterizada por material argiloso e está em concordância com a granulometria apresentada.

Os métodos de Robertson (2010) e Plewes et. al (1992) tiveram resultados bem diferentes, porém ambos apresentaram valores de  $\psi > 0,05$ , ou seja, suscetíveis à liquefação. O ábaco proposto por Robertson (2016) apresenta grande maioria dos pontos em regiões contráteis CC (argila de comportamento contrátil) e TC (material de transição contrátil)

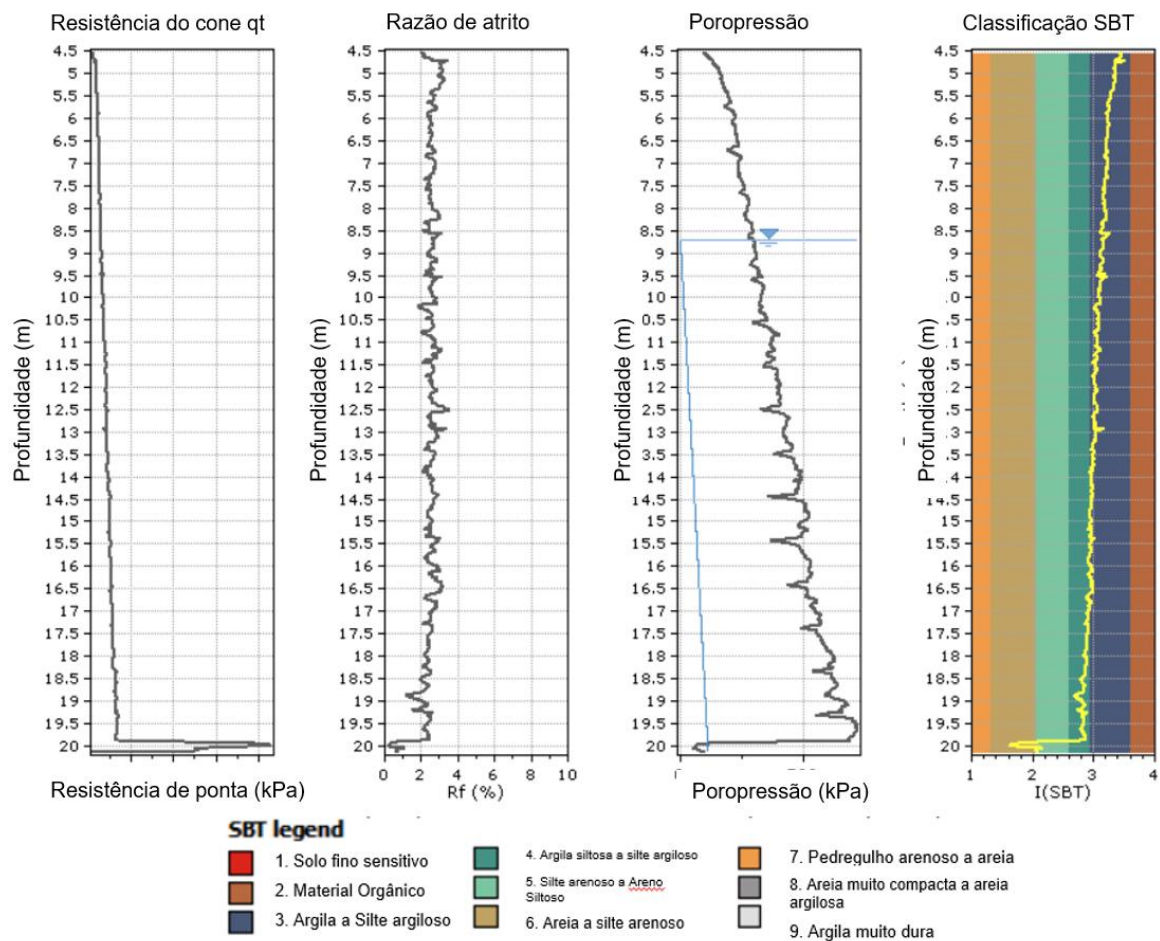
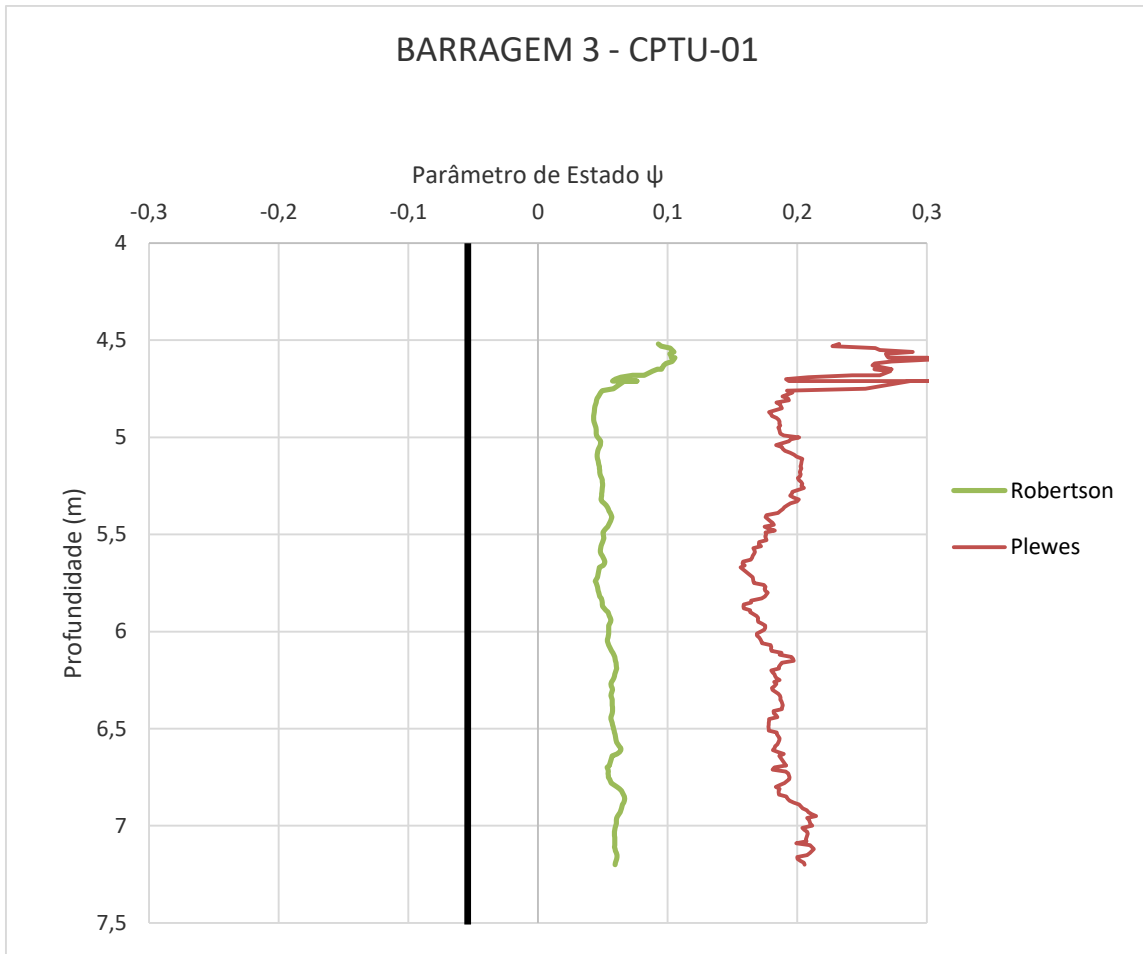
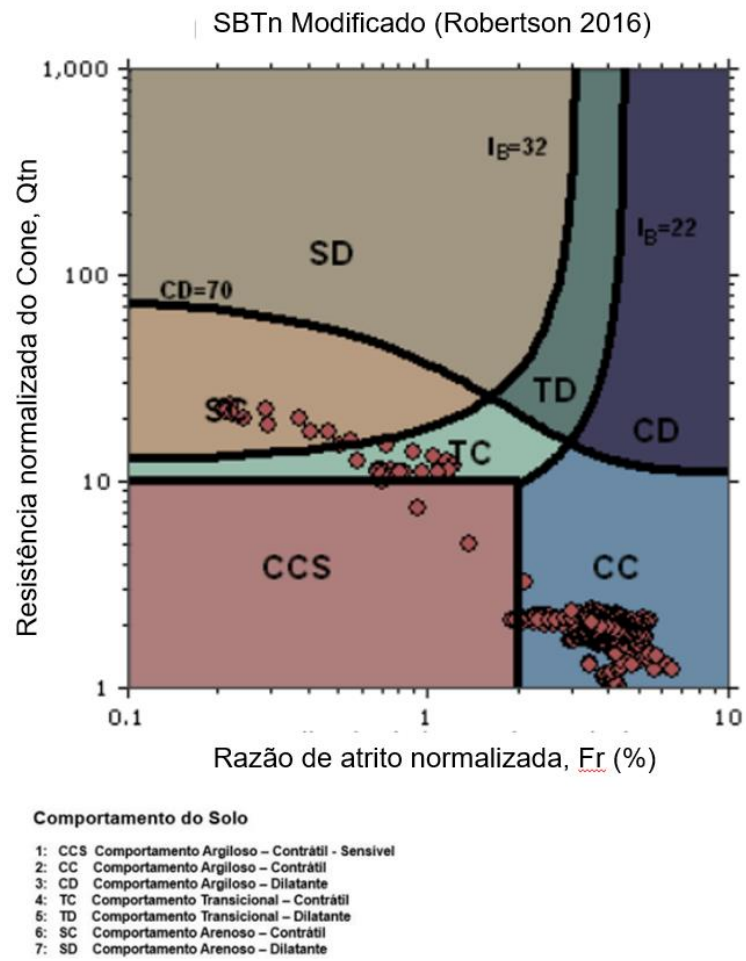


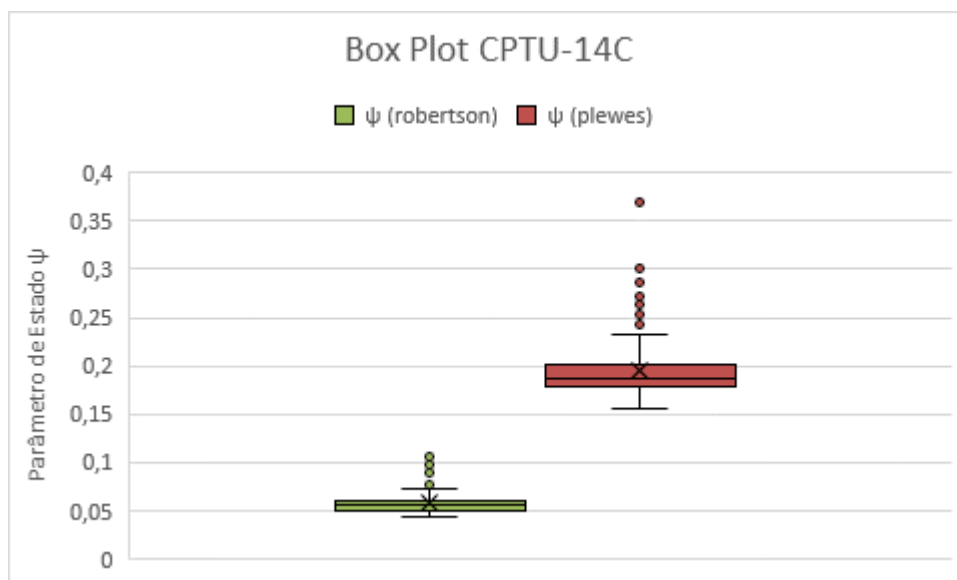
Figura 66 – Resultados do ensaio CPTu (Barragem 3 CPTu-01) exportados do software CPTeT-IT.



**Figura 67 – Resultado da estimativa do parâmetro de estado por Robertson (2010) e Plewes et. al (1992) – BARRAGEM 3 – CPTu-01**



**Figura 68 – Resultado da estimativa do comportamento do rejeito conforme Robertson (2016) – BARRAGEM 3 – CPTu-01**



**Figura 69 – Box Plot comparativo do CPTu-01**



A Figura 69 nos ajuda a identificar a maior diferença entre os métodos encontrada nessa pesquisa, muito em função da diferença de granulometria frente ao restante dos resultados. Ambos os métodos estimaram valores de  $\psi > -0,05$ , ou seja, solo no estado contrátil.

Os resultados analisados sugerem boa concordância quanto ao comportamento contrátil/dilatante quando comparado por diferentes metodologias. A barragem 3 foi a que apresentou maior diferença entre os métodos e será discutido no capítulo 5 as conclusões.

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

### 5.1 Conclusões

O presente trabalho utilizou resultados de ensaios CPTu para análise de duas metodologias de estimativa do parâmetro de estado e de avaliação do comportamento de rejeitos, a saber: Robertson (2010) e Plewes et. al (1992).

Robertson (2010) utilizou os casos históricos de Olson (2001) para chegar a uma estimativa (equação 14) do parâmetro de estado. Também foram apresentados os resultados em forma de ábaco, proposto por Robertson (2016), o qual utiliza de parâmetros do ensaio CPTu para separação dos resultados em regiões comportamentais do solo (contrátil / dilatante).

O método de Plewes et. al (1992) utiliza o ensaio CPTu para obter uma estimativa do parâmetro de estado através da resolução de uma equação inversa. A partir dos dados de câmara de calibração de Been et al (1986 e 1987), Plewes et al. (1992) também sugerem uma estimativa para o parâmetro de estado, conforme equação 19.

As abordagens utilizadas por Plewes et. al (1992), Robertson (2010) e o ábaco de Robertson (2016) na elaboração de seus métodos são distintas. Isso consequentemente conduz à expectativa de disparidade nos resultados obtidos ao empregar essas metodologias. Plewes et al. (1992) com os parâmetros de Shuttle e Cuning (2007) diferem de Robertson (2010) ao incorporar o parâmetro de poropressão ( $B_q$ ) no critério de susceptibilidade à liquefação e estimativa do parâmetro de estado.

É possível concluir que para os materiais arenosos, ambas as metodologias forneceram resultados próximos e, em poucas ocasiões, divergiram em valores de parâmetro de estado para as devidas zonas de comportamento (contrátil / dilatante).

Um aspecto de considerável relevância no contexto da aplicabilidade das abordagens delineadas por e Plewes et al. (1992) na caracterização de depósitos de rejeitos com composições siltosas e arenosas, diz respeito à consideração da possibilidade de drenagem parcial. Em cenários que envolvem depósitos de alta permeabilidade, a taxa de penetração padrão do CPTu (2 cm/s) pode revelar-se

insuficiente para mobilizar a condição não drenada. Tal cenário subestima os valores referentes à poropressão registrada durante o processo de penetração (e, por extensão, os valores pertinentes ao parâmetro  $B_q$ ).

A barragem 3, a qual tem material mais fino, foi a que teve mais discrepância entre os valores de parâmetro de estado. Porém, ainda assim, está de acordo com a metodologia de Robertson (2016) quando plotados os pontos no ábaco de classificação do material.

É possível perceber que o método de Plewes et. Al (1992) para os 8 ensaios estudados resultou em valores um pouco menores para o parâmetro de estado. Quando comparado no ensaio da Barragem 3 (CPTu-01) foi possível perceber o que houve diferença de 0,10 a 0,15 entre os dois métodos, diferença maior que quando comparado em material arenoso.

O contorno de  $CD=70$ , utilizado por Robertson (2016), é uma combinação do contorno de  $Q_{tn,cs}=70$  na região de solos arenosos ( $IB > 32$ ) e  $OCR = 4$  para as faixas denominadas Transicional (*Transitional*) do método de Plewes et al. (1992) na região de solos finos e a maior diferença entre os métodos dos ensaios estudados neste trabalho.

Ainda que existam resultados diferentes entre as estimativas do parâmetro de estado e o comportamento do rejeito, ambos os métodos resultaram em valores que indicam alerta e necessidade de maiores investigações para algumas profundidades dentre as verticais analisadas.

É possível concluir que, independentemente do método utilizado para os ensaios disponíveis, as três barragens apresentam estimativas de parâmetro de estado maiores que  $-0,05$  ( $\psi > -0,05$ ), sendo a barragem 1 a considerada mais segura conforme estimativa dos métodos pois apresentou valores de  $\psi > -0,05$  apenas em uma vertical (CPTu-03)

Sendo assim, o ensaio CPTu, aliado às metodologias aqui apresentadas, serve de grande valia quando se pretende estudar previamente o comportamento de barragens de rejeito, podendo indicar de imediato possíveis condições de segurança (potencial de liquefação) e necessidade de estudos e investigações mais detalhadas.

## 5.2 Sugestões para Futuras Pesquisas

Esse trabalho utilizou de ensaios com características geotécnicas semelhantes para a maioria dos casos analisados. É interessante que sejam analisadas a aplicabilidade e a comparação dos métodos em diversos tipos de rejeitos encontrados nas barragens brasileiras com granulometrias e características diferentes.

Também é aconselhável a realização de novas investigações em câmaras de calibração, empregando rejeitos de mineração, sobretudo com o propósito de ajustar as equações empregadas na obtenção dos coeficientes de inversão ( $k$  e  $m$ ). Esses coeficientes são essenciais para a determinação do parâmetro de estado, conforme delineado na abordagem de Plewes et al. (1992).

A abordagem de Jefferies e Been (2016) é frequentemente empregada em projetos de alto risco, demandando um conhecimento profundo do modelo constitutivo amplamente aceito do estado crítico do solo (modelo Norsand). Além disso, requer a realização de ensaios capazes de mensurar a velocidade da onda de cisalhamento *insitu*, bem como ensaios triaxiais de laboratório em amostras reconstituídas. Para a calibração dos parâmetros  $k$  e  $m$ , empregados nas equações de Been et al. (1987) para cenários drenados e nas equações de Shuttle e Cunning (2007) para situações não drenadas, recorre-se a simulações numéricas da expansão da cavidade por meio do modelo.

## REFERÊNCIAS

- [1] ALBUQUERQUE FILHO, L.H. (2004). Análise do comportamento geotécnico de barragens de rejeitos de minério de ferro através de ensaios de piezocone, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 194 p.
- [2] ALMEIDA, L. G. (2018) - Classificação do índice de perigo (ip) em barragens de rejeito nas bacias hidrográficas da região do Quadrilátero Ferrífero - Minas Gerais. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Núcleo de Geotecnia. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia. 153p.
- [3] ANCOLD. 1999. 1999 - World Commission on Dams, The Australian National Committee on large Dams Incorporated.
- [4] ATKINSON, J. L., BRANSBY, P. L. 1978. The Mechanics of Soils: An Introduction to Critical State Soil Mechanics. 2 ed. Londres, McGraw-Hill.
- [5] BEEN, K., CROOKS, J.H.A., BECKER, D.E., JEFFERIES, M.G. CPT 1988. Interpretation in Clays. First International Symposium on Penetration Testing. Orlando, Florida, Vol. 2, p. 715-722.
- [6] BEEN, K., JEFFERIES, M.G., CROOKS, J.H.A., ROTHENBURG, L. 1987. The Cone Penetration Test in Sands, Part 2: General Inference of State. Geotechnique, Vol. 37, No. 3, p. 285-299.
- [7] CASAGRANDE, A. 1936. Characteristics of Cohesionless Soils Affecting the Stability of Slopes and Earth Fills. Journal of the Boston Society of Civil Engineers,; 257–275.
- [8] CASAGRANDE, A. 1975. Liquefaction and cyclic deformation of sands: A critical review. In Proceedings of the Fifth Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. pp. 79–133.
- [9] CASTRO, G. 1969. Liquefaction of Sands.
- [10] CARVALHO, G. B. Incidência de Impactos Decorrentes de Acidentes com Barragens de Rejeito. Dissertação De Mestrado. Escola de Minas. Núcleo de Geotecnia. Universidade Federal de Ouro Preto, MG, 2018. 207p.
- [11] DAVIES M., LUPO J., MARTIN T., MCROBERTS E., MUSSE M., RITCHIE D. 2010. Dewatered Tailings Practice – Trends and Observation. International conference; 14th, Tailings and mine waste. October, p. 133-142.

- [12] JEFFERIES, M., AND BEEN, K. 2016. Soil Liquefaction: A Critical State Approach.
- [13] ICOLD. 2001. Tailings Dams-Risk of Dangerous Occurrences: Lessons Leant From Practical Experiences. Bulletin 121.
- [14] MAGALHÃES, T.E.T. 2018. Proposta De Metodologia De Classificação De Risco E Dano Potencial Associado De Barragens De Rejeito De Mineração No Quadrilátero Ferrífero Utilizando O Analytic Hierarchy Process (Ahp). Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, MG.
- [15] OLSON, S.M. 2001. Liquefaction Analysis of Level and Sloping Ground Using Field Case Histories and Penetration Resistance.
- [16] OLSON, S.M., AND STARK, T.D. 2003. Yield strength ratio and liquefaction analysis of slopes and embankments. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 129(8): 727–737. doi:10.1061/(ASCE)1090-0241(2003)129:8(727).
- [17] ORBEGOSO, V.R.R. 2021. Evaluación del parámetro de estado de relaves mineros a partir de ensayos de penetración con piezocono (CPTu). Dissertação de Mestrado, Cedex, Espanha.
- [18] PLEWES, H.D., DAVIES, M.P., AND JEFFERIES, M.G. 1992. CPT based screening procedure for evaluating liquefaction susceptibility. In *Proceedings of the 45th Canadian Geotechnical Conference*.
- [19] POULOS, S.J., CASTRO, G., AND FRANCE, J.W. 1985. Liquefaction Evaluation Procedure. *Journal of Geotechnical Engineering*, 111(2): 772–792. doi:10.1061/(ASCE)0733-9410(1988)114:2(243).
- [20] REID, D. 2012. Update on the Plewes method for liquefaction screening. In *Proceedings of Tailings and Mine Waste 2012*. pp. 337–345.
- [21] ROBERTSON, P.K. 1990. Soil classification using the cone penetration test. *Canadian Geotechnical Journal*, 27(1): 151–158. doi:10.1139/t90-014.
- [22] ROBERTSON, P.K. 2010b. Estimating in-situ state parameter and friction angle in sandy soils from CPT, 136(6): 842–853. doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000286.
- [23] ROBERTSON, P.K. 2016. Cone penetration test (CPT)-based soil behaviour type (SBT) classification system — An update. *Canadian Geotechnical Journal*, 53(12): 1910–1927. doi:10.1139/cgj-2016-0044.

- [24] ROBERTSON, P.K., and Cabal, K.L. 2014. Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering.
- [25] RUSSO, F. M. 2007. Comportamento de Barragens de Rejeito Construídas por Aterro Hidráulico: Caracterização Laboratorial e Simulação numérica do Processo Construtivo. Tese de Doutorado em Geotecnia. Universidade Federal de Brasília, Brasília, DF.
- [26] SCHNAID, F., AND ODEBRECHT, E. 2012. Ensaio de Campo e suas aplicações à Engenharia de Fundações.
- [27] SEED, H.B., IDRIS, I.M., AND ARANGO, I. 1983. Evaluation of liquefaction potential using field performance data. *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 109(3): 458–482.
- [28] SHUTTLE, D.A., AND CUNNING, J. 2007. Liquefaction potential of silts from CPTu. *Canadian Geotechnical Journal*, 44(1): 1–19. doi:10.1139/T06-086.
- [29] SHUTTLE, D.A., AND CUNNING, J. 2008. Reply to the discussion by Robertson on “Liquefaction potential of silts from CPTu.” *Canadian Geotechnical Journal*, 45(1): 142–145. doi:10.1139/T07-119.
- [30] SLADEN, J.A., D’HOLLANDER, R.D., AND KRAHN, J. 1985. The liquefaction of sands, a collapse surface approach. *Canadian Geotechnical Journal*, 22(4): 564–578.
- [31] STARK, T.D., and Olson, S.M. 1995. Liquefaction resistance using CPT and field case histories. *Journal of Geotechnical Engineering*, 121(12): 856–869. doi:10.1061/(ASCE)0733-9410(1995)121:12(856).
- [32] TEIXEIRA, Thiago A. Avaliação da suscetibilidade à liquefação com base em ensaios CPTu, com aplicação à Barragem de Fundão, Mariana (MG). 2023. 156 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.
- [33] VICK, S. G. *Planning, Design and analysis of Tailing Dams*. 1 Ed. New York: John Wiley and Sons, 1983. 369 p.