

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**LETÍCIA PERINI**

**MÉTODO QUANTITATIVO PARA ANÁLISE DA VARIABILIDADE  
EM ENSAIOS DE PIEZOCONE: APLICAÇÃO A RESÍDUOS DE  
MINERAÇÃO**

Florianópolis

2017

Letícia Perini

**MÉTODO QUANTITATIVO PARA ANÁLISE DA VARIABILIDADE EM ENSAIOS  
DE PIEZOCONE: APLICAÇÃO A RESÍDUOS DE MINERAÇÃO**

Trabalho de conclusão de curso submetido ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do Título de Engenheira Civil.  
Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dra. Gracieli Dienstmann

Florianópolis

2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Perini, Letícia  
METODOLOGIA QUANTITATIVA PARA ANÁLISE DA VARIABILIDADE  
EM ENSAIOS DE PIEZOCONO: APLICAÇÃO À RESÍDUOS DE MINERAÇÃO  
/ Letícia Perini ; orientadora, Gracieli Dienstmann, 2017.  
76 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,  
Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2017.

Inclui referências.

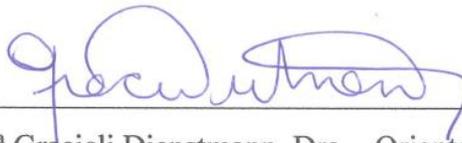
1. Engenharia Civil. 2. Rejeitos de mineração. 3. Ensaio de Piezocone. 4. Drenagem parcial. 5. Análise da variabilidade estratigráfica. I. Dienstmann, Gracieli . II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

Letícia Perini

**MÉTODO QUANTITATIVO PARA ANÁLISE DA VARIABILIDADE EM  
ENSAIOS DE PIEZOCONE: APLICAÇÃO A RESÍDUOS DE MINERAÇÃO**

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de engenheiro civil e aprovado em sua forma final pelo Departamento de Engenharia Civil

Florianópolis, 30 de novembro de 2017.



---

Prof.<sup>a</sup> Gracieli Dienstmann, Dra. - Orientadora

Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho aos meus pais, por todo amor e dedicação.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Nelson e Rita, pelo infinito amor, pelo exemplo, pela paciência, por acreditarem em mim, por estarem sempre presentes e por me fazerem acreditar que tudo sempre vai acabar bem. Sou imensamente grata por me apoiarem em todas as fases do meu desenvolvimento e por não medirem esforços para que eu possa realizar meus sonhos.

Agradeço às minhas irmãs, Alessandra e Larissa, por estarem sempre do meu lado, por me incentivarem, por entenderem a distância e por todo amor que nos une. Também às minhas tias Darci, Lídia e Miranda, pelo carinho e pela força nos momentos em que mais precisamos.

Agradeço à minha orientadora, Prof<sup>a</sup> Gracieli Dienstmann por todo o conhecimento transmitido, pela paciência, pelas contribuições e correções. Muito obrigada pelas conversas, pelo incentivo e pela confiança.

À Priscilla Klahold, Jonatas Sosnoski e Jucélia Bedin, por disponibilizarem material para este trabalho.

Aos membros da banca, Rafael A. R. Higashi e Ângela Grando, por aceitarem fazer parte deste trabalho.

A todos os mestres que fizeram parte do meu desenvolvimento, pelo incentivo, pelas contribuições e oportunidades.

A minhas amigas Regina, Daniela e Paola por todas as conversas e desabafos. Obrigada pela amizade e pela confiança em mim.

A todas minhas amigas da acrobacia, pela parceria e pelos momentos de descontração. Agradeço pela compreensão nos momentos em que estive ocupada e por estarem sempre dispostas a dedicar um tempo para a amizade.

Aos grandes amigos que fiz na engenharia, por nossos encontros e brincadeiras. Por dividirmos as angústias durante o curso e também as alegrias. Obrigada pela parceria durante todos esses anos.

Ao João, por todos momentos felizes, pelo carinho e compreensão. Obrigada por me alegrar e me apoiar nesta etapa.

Ama-se mais o que se conquista com esforço.  
(Benjamin Disraeli)

## RESUMO

PERINI, L. **Metodologia quantitativa para análise da variabilidade em ensaios de piezocone: aplicação à resíduos de mineração**. 2017. Trabalho de conclusão de curso – Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis.

A indústria mineradora é responsável pela geração de grandes quantidades de resíduos, despertando a preocupação de diversos órgãos ambientais. Acidentes em barragens de rejeitos costumam provocar o vazamento do material e desastres que podem envolver perdas econômicas, ambientais e humanas. Para garantir a segurança ao longo do projeto e vida útil das estruturas, a execução de ensaios geotécnicos de campo e laboratório é imprescindível. O ensaio de piezocone tem sido bastante utilizado para análise de campo dos resíduos de mineração. Entretanto, a execução e interpretação de ensaios de piezocone em resíduos de mineração requer maior atenção, dada a alta variabilidade do material e possibilidade de drenagem parcial durante a execução do ensaio em velocidade padronizada (20mm/s). Nos casos de drenagem parcial, a realização de ensaios com diferentes velocidades tem se mostrado útil para identificar qual a velocidade de ensaio necessária para que o comportamento seja totalmente drenado ou não-drenado, somente nestas condições é que parâmetros geotécnicos podem ser derivados do ensaio. O desafio reside em separar os efeitos da variabilidade estratigráfica dos efeitos da variação da velocidade. Neste sentido, o presente trabalho estuda ensaios em rejeitos de mineração de ouro buscando diminuir a interferência da heterogeneidade do material na avaliação dos efeitos de velocidade. Para isso, é sugerida uma metodologia para identificar intervalos homogêneos em perfis heterogêneos. O método consiste em uma análise qualitativa visual, separação de camadas de acordo com o índice de classificação, avaliação do coeficiente de variação das leituras e de suas curvas de frequências acumuladas. A aplicação da metodologia em resíduos de mineração de ouro, ensaiados sob diferentes velocidades de cravação possibilitou a eliminação de heterogeneidades do material. As curvas de drenagem indicaram que a transição de não drenado para parcialmente drenado ocorre em torno de  $V$  (velocidade normalizada) igual a 20 e que os valores de  $S_u$  (resistência não-drenada) seriam superestimados caso fossem calculados a partir de ensaios que resultassem em velocidades normalizadas inferiores a 20. A curva de drenagem construída após a aplicação da metodologia apresentou considerável diminuição na dispersão de dados. Sendo assim, o método se demonstrou eficiente para análise da variabilidade estratigráfica nos resíduos de mineração de ouro, tornando a curva de drenagem mais representativa e diminuindo o nível de incerteza na determinação da transição de comportamento não drenado para parcialmente drenado.

**Palavras-chave:** Rejeitos de mineração. Ensaio de Piezocone. Drenagem parcial. Análise da variabilidade estratigráfica.

## ABSTRACT

PERINI, L. **Qualitative analysis of spatial variability in piezocone soundings: application to a gold tailings deposit.** 2017. Capstone Project. Civil Engineering, UFSC, Florianópolis.

The mining industry is responsible for generating large amounts of tailings, raising concern in several environmental agencies. Failures in tailings dams usually cause material leakage and disasters that may involve economic, environmental and human losses. In order to guarantee the safety throughout project and lifetime of structures, execution of field and laboratory geotechnical tests are essential. The piezocone test has been widely used for field analysis of mining tailings. Although, for a correct interpretation drainage conditions during cone soundings in tailings must be carefully evaluated, since this geomaterials usually have intermediate permeability, between clays and sand (silty materials). In intermediate permeability materials a partially drainage can occur during standard penetration rate, which introduces errors in interpretation. In these cases, adjacent soundings executed at different penetration rates has been shown to be useful in identifying specific rates to achieve a fully drained or undrained behavior. Mining tailings usually have, besides intermediate permeability, high stratigraphic variability, making the analyzes even more complex. In this sense, the present research studies tests on gold tailings aiming to reduce the interference caused by heterogeneity in the evaluation of rate effects. In order to achieve that, a methodology is suggested to identify homogeneous intervals within heterogeneous profiles. The method consists of a visual qualitative analysis, layers separation according to the classification index, evaluation of the coefficient of variation and cumulative frequency curves. The methodology applied to the gold tailings tested under different rates allowed the elimination of heterogeneities.. Drainage curves indicated that the transition from undrained to partially drained occurs around  $V$  (normalized rate) equal to 20 and values of  $S_u$  (undrained shear strength) would be overestimated if they were obtained from the standard penetration rate. Drainage curves constructed after the current analysis showed a considerable decrease in data dispersion. Thus, the method was efficient in the analysis of stratigraphic variability in gold tailings, making the drainage curve more representative and reducing the level of uncertainty.

**Keywords:** Mining tailings. Piezocone test. Partial drainage. Stratigraphic variability.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Barragem de rejeitos: método de alteamento à montante .....	17
Figura 2 - Fluxograma típico do tratamento de minério.....	22
Figura 3 - Métodos de alteamento em barragens de rejeitos: montante, jusante e linha de centro .....	23
Figura 4 - Fluxograma simplificado da Usina Fazenda Brasileiro .....	25
Figura 5 - Granulometria de diferentes resíduos .....	26
Figura 6 - Curvas granulométricas dos rejeitos de ouro analisados por Bedin .....	27
Figura 7 - Desenho esquemático de uma ponteira de piezocone.....	29
Figura 8 - Ponteira cônica e posições possíveis do elemento poroso .....	30
Figura 9 - Efeito da poropressão nos parâmetros medidos.....	31
Figura 10 - Calibração do piezocone .....	31
Figura 11 - Gráficos típicos do ensaio.....	32
Figura 12 - Ábaco de identificação do comportamento típico de solos .....	33
Figura 13 - Gráfico típico do ensaio de dissipação .....	37
Figura 14 - Condições de drenagem nos ensaios de piezocone.....	40
Figura 15 - Avaliação das condições de drenagem em resíduos de mineração.....	41
Figura 16 - Curvas $\Delta u/\sigma'_{v0} \times V$ e $Q_t \times U$ para resíduos de ouro .....	42
Figura 17 - Exemplo de histograma para distribuição de frequência .....	44
Figura 18 - Exemplo de curva de frequência acumulada .....	44
Figura 19 - Exemplo do perfil de $q_c$ para 3 velocidades de cravação diferentes em um material homogêneo (a) e um material não homogêneo (b) .....	49
Figura 20 - Identificação de camadas homogêneas no perfil heterogêneo.....	50
Figura 21 - Curvas de frequência acumulada de $q_c$ para 3 velocidades de cravação diferentes em um material homogêneo (a) e um material não homogêneo (b).....	52
Figura 22 - Incremento na resistência visto pelas curvas de frequência acumulada .....	52
Figura 23 - Localização do lago de estudos da MFB .....	55
Figura 24 - Lago de estudos de MFB .....	56
Figura 25 - Perfis característicos para Ilha 01 e Ilha 02 .....	58
Figura 26 - Coeficiente de adensamento vertical .....	59
Figura 27 - Perfil da resistência de ponta .....	59
Figura 28 - Análise granulométrica .....	60

Figura 29 - $q_c$ , $f_s$ e $u_2$ nos ensaios com diferentes velocidades .....	61
Figura 30 - $I_c$ nos ensaios com diferentes velocidades .....	63
Figura 31 - Curvas de frequência acumulada entre 3,80 e 4,74 m de profundidade .....	64
Figura 32 - Curvas de frequência acumulada entre 3,94 e 4,10 m de profundidade .....	66
Figura 33 - Curvas de frequência acumulada entre 4,36 e 4,50 m de profundidade .....	67
Figura 34 - Incremento efetivo da resistência na velocidade mais baixa .....	67
Figura 35 - Efeito do fator de velocidade sobre o excesso de poropressão normalizada em escala linear (a) e logarítmica (b) .....	69
Figura 36 - Efeito do fator de velocidade sobre a resistência normalizada em escala linear (a) e logarítmica (b) .....	69
Figura 37 - Efeito do fator de velocidade sobre o excesso de poropressão normalizada em escala linear (a) e logarítmica (b) após aplicação da metodologia.....	70
Figura 38 - Efeito do fator de velocidade sobre a resistência normalizada em escala linear (a) e logarítmica (b) após aplicação da metodologia .....	70
Figura 39 - Curva de resistência não drenada normalizada pela velocidade normalizada .....	72

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação entre volume de minério extraído e resíduo .....	21
Tabela 2 - Distribuição granulométrica e índices físicos dos rejeitos de ouro analisados por Bedin.....	27
Tabela 3 - Classificação de solos em função do índice de classificação do material I <sub>c</sub> .....	34
Tabela 4 - Coeficientes de ajuste para resíduos de ouro.....	41
Tabela 5 - Exemplo de distribuição de frequência .....	43
Tabela 6 - Classificação de solos pelo I <sub>c</sub> .....	50
Tabela 7 - Coeficientes de variação entre 3,80 e 4,74m de profundidade.....	65
Tabela 8 - Coeficientes de variação entre 3,94 e 4,10m de profundidade.....	65
Tabela 9 - Coeficientes de variação entre 4,36 e 4,50m de profundidade.....	66

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

$\gamma$ : Peso específico

$\gamma_s$ : Peso específico real dos grãos

$\sigma_{vo}$ : Tensão total vertical

$\sigma'_{vo}$ : Tensão efetiva vertical

$\sigma'_{vm}$ : Pressão de pré adensamento

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

a: Razão entre as áreas desiguais do cone (= AN/AT)

AN: Área interna da seção transversal do cone

AT: Área externa da seção transversal do cone

$B_q$ : Parâmetro de poropressão

Ch: Coeficiente de adensamento horizontal

CPT: Cone Penetration Test

CPTU: Piezocone Penetration Test

$c_v$ : Coeficiente de adensamento vertical

cv: Coeficiente de variação

d: Diâmetro do cone/piezocone

Dr: Densidade relativa

e: índice de vazios

FA: Frequência acumulada

$f_s$ : Atrito lateral

$F_r$ : Razão de atrito normalizada

$I_c$ : Índice de comportamento do tipo de solo

$I_r$ : Índice de rigidez

LL: Limite de liquidez

LP: Limite de plasticidade

$N_{kt}$ : Fator de capacidade de carga

OCR: Razão de pré-adensamento

$q_c$ : Resistência de ponta medida do cone/piezocone

$q_t$ : Resistência real mobilizada piezocone

$Q_t$ : Resistência à penetração normalizada

$q_{tdr}$ : Resistência a penetração medida em condição drenada

$q_{tund}$ : Resistência a penetração medida em condição não drenada

$R_f$ : Razão de atrito

$S_u$ : Resistência ao cisalhamento não-drenada

$t_{50}$ : Tempo de dissipação correspondente a 50 % de dissipação do excesso de poropressão

T: Fator tempo adimensional

U: Grau de drenagem

$u_2$ : Poropressão gerada medida na base da luva

$u_o$ : Poropressão medida no ensaio

$u_o$ : Pressão hidrostática

v: Velocidade de cravação do cone/piezocone

V: Velocidade adimensional

w: Teor de umidade

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
1.1	APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA .....	17
1.2	JUSTIFICATIVA .....	19
1.3	OBJETIVO GERAL.....	19
1.4	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	19
1.5	ORGANIZAÇÃO DO TEXTO .....	20
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>21</b>
2.1	BENEFICIAMENTO DE MINÉRIO .....	21
2.2	CARACTERÍSTICAS DOS REJEITOS DE MINERAÇÃO DE OURO .....	23
<b>2.2.1</b>	<b>Caracterização mineralógica.....</b>	<b>25</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Análise granulométrica e índices físicos.....</b>	<b>25</b>
2.3	ENSAIO DE PIEZOCONE.....	27
<b>2.3.1</b>	<b>Equipamentos e procedimentos .....</b>	<b>29</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Grandezas medidas .....</b>	<b>30</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Identificação de materiais presentes ao logo do perfil .....</b>	<b>32</b>
<b>2.3.4</b>	<b>Classificação dos solos.....</b>	<b>33</b>
<b>2.3.5</b>	<b>Estimativa de parâmetros geotécnicos .....</b>	<b>34</b>
2.3.5.1	Argilas .....	35
2.3.5.2	Areias.....	37
2.3.5.3	Solos intermediários .....	38
2.4	CONDIÇÕES DE DRENAGEM NO ENSAIO DE PIEZOCONE .....	38
2.5	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	42
<b>2.5.1</b>	<b>Distribuição de frequência de dados.....</b>	<b>42</b>
2.5.1.1	Histograma .....	43
2.5.1.2	Polígono de frequência acumulada (ou ogiva) .....	44
<b>2.5.2</b>	<b>Dispersão de dados .....</b>	<b>45</b>

2.5.2.1	Amplitude.....	45
2.5.2.2	Variância .....	45
2.5.2.3	Desvio padrão.....	45
2.5.2.4	Coeficiente de variação .....	46
<b>3</b>	<b>MÉTODO DE ANÁLISE .....</b>	<b>47</b>
3.1	ANÁLISE QUALITATIVA.....	48
3.2	ÍNDICE DE CLASSIFICAÇÃO $I_c$ .....	50
3.3	AVALIAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO E DISPERSÃO DOS DADOS: CURVAS DE FREQUÊNCIA ACUMULADA E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO .....	51
<b>4</b>	<b>LOCAL DE ESTUDO.....</b>	<b>54</b>
4.1	LOCALIZAÇÃO E CARACTERÍSTICAS DO TERRENO ESTUDADO.....	54
4.2	CAMPANHA DE INVESTIGAÇÃO DE KLAHOLD (2012).....	56
4.3	RESULTADOS CARACTERÍSTICOS .....	57
<b>4.3.1</b>	<b>Perfil com a profundidade.....</b>	<b>57</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Caracterização de laboratório.....</b>	<b>60</b>
<b>4.3.3</b>	<b>Efeitos da velocidade.....</b>	<b>61</b>
<b>5</b>	<b>APLICAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO .....</b>	<b>62</b>
5.1	ANÁLISE QUALITATIVA VISUAL.....	62
5.2	ÍNDICE DE CLASSIFICAÇÃO.....	63
5.3	AVALIAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO E DISPERSÃO DOS DADOS: CURVAS DE FREQUÊNCIA ACUMULADA E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO .....	64
<b>6</b>	<b>AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS COM A APLICAÇÃO DO MÉTODO.....</b>	<b>68</b>
<b>7</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>73</b>
7.1	CONCLUSÕES.....	73
7.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	74
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>76</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

A indústria mineradora tem grande relevância econômica no Brasil, porém é alvo de preocupações de diversos órgãos ambientais pelos riscos de possíveis rupturas em barragens de rejeitos envolvendo grandes perdas econômicas, ambientais e humanas.

No processo de extração mineral, após a etapa de tratamento/beneficiamento do minério, a fração que não foi aproveitada chama-se de rejeito. Esse material geralmente possui grande volume devido à pequena concentração dos metais encontrada e necessita ser descartado e armazenado através de alguma técnica de disposição. O método de armazenamento mais utilizado são as barragens de rejeitos, pois são econômicas e possibilitam a utilização do próprio rejeito na construção dos diques de contenção.

Uma das maneiras mais comuns de execução dessas estruturas consiste na construção de um dique de partida, seguida do lançamento de rejeitos a montante do mesmo, formando uma lagoa de deposição. Conforme ilustra a Figura 1, essa sequência se repete várias vezes, sendo denominada de método de alteamento a montante. Apesar de ser econômico, o método é crítico em relação à segurança.

De acordo com o Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM), os rejeitos costumam ser transportado para a área de disposição com alto teor de água (10% a 25% de sólidos) e a presença da água nos poros do material acaba sendo um elemento instabilizador. Segundo Araújo (2006) esses materiais costumam apresentar baixa resistência ao cisalhamento, em razão da condição saturada e do estado de compactidade fofo, estando suscetíveis à liquefação.

Figura 1 - Barragem de rejeitos: método de alteamento à montante



Fonte: IBRAM (2006).

Em caso de acidentes nas barragens, estão envolvidos riscos como o vazamento de rejeitos e desastres industriais com altos impactos ambientais, o que revela o grande desafio geotécnico e ambiental presente no armazenamento de resíduos e ilustra a importância da geologia de engenharia e da geotecnia, tanto nas fases de projeto quanto de monitoramento, para assegurar segurança dessas estruturas.

Após o rompimento da barragem de Fundão, em 2015, localizada a 35 km do município de Mariana, o Ministério Público Federal divulgou a RECOMENDAÇÃO Nº 60/2016 a respeito do método de alteamento a montante. O documento recomenda que o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) abstenha-se de aprovar Plano de Lavra que contemple a construção de barragens de contenção de rejeitos de mineração pelo método de alteamento a montante, com o intuito de evitar os alteamentos sobre o próprio rejeito. Este é um exemplo de medida cautelar em relação ao tipo de processo construtivo, entretanto, o desafio quanto à caracterização do comportamento geomecânico dos resíduos ainda é evidente.

O projeto de uma barragem de rejeitos tem como demanda básica, a caracterização geotécnica, física e química dos rejeitos e a avaliação da estabilidade geotécnica da barragem. Ensaios geotécnicos de campo e laboratório fazem parte dos estudos e investigações necessários ao longo do projeto e vida útil das estruturas (BRITO et al., 2011).

A realização de ensaios de laboratório para caracterizar esses materiais é problemática, dada a dificuldade em se retirar amostras indeformadas do solo (Bedin, 2006). Além disso, a alta variabilidade da mineralogia e dos aspectos físicos e químicos do material constituem-se em uma maior complexidade na obtenção dos parâmetros geotécnicos. Em razão disso, é importante que a interpretação dos resultados seja a mais crítica possível, e que análises da variabilidade sejam efetuadas.

Dentre as tecnologias disponíveis, o ensaio de piezocone tem sido bastante utilizado para análise de campo dos resíduos de mineração. Porém, a tentativa de estimar parâmetros para esses materiais muitas vezes não é confiável, uma vez que os resíduos de mineração costumam ser classificados como materiais de granulometria siltosa, o que lhes confere um comportamento entre argilas e areias (comportamento intermediário). Conforme relata Krage (2014), materiais com características intermediárias de permeabilidade podem apresentar um comportamento de drenagem transiente frente as solicitações de carregamento: conforme o conteúdo de finos no material aumenta, ocorre a transição de comportamento drenado para não drenado.

Conforme a padronização do ensaio de piezocone, e segundo os métodos de interpretação a caracterização de parâmetros só pode ser feita utilizando-se tensões efetivas,

caso das areias, em que a resposta é drenada, ou tensões totais, caso das argilas, em que a resposta é não drenada. Materiais que como siltes, argilas arenosas e resíduos de mineração costumam apresentar drenagem parcial durante a execução padronizada do ensaio, o que dificulta a interpretação dos resultados, visto que as correlações existentes podem levar a uma avaliação errônea dos parâmetros geotécnicos (BEDIN, 2006).

## 1.2 JUSTIFICATIVA

O ensaio de piezocone só poder ser interpretado em condições não-drenadas ou perfeitamente drenadas e, portanto, não existe somente um método de interpretação para materiais sujeitos à drenagem parcial (Klahold, 2013). Devido a este fato, nos resíduos de mineração faz-se necessária a realização de ensaios com velocidades diferentes da padrão, para que o material apresente um comportamento de drenagem bem definido e possa então ser interpretado. A ideia consiste em identificar qual a velocidade necessária do ensaio para que o comportamento seja totalmente drenado ou não-drenado.

Além da dificuldade de interpretação imposta pelo efeito da drenagem parcial, os resíduos possuem alta variabilidade estratigráfica, visto que são materiais essencialmente heterogêneos, o que torna as análises ainda mais complexas. Para melhorar a interpretação de resultados de ensaios de piezocone em resíduos, e aumentar a segurança na avaliação das condições de drenagem, análises estatísticas da variabilidade dos parâmetros geotécnicos são necessárias.

## 1.3 OBJETIVO GERAL

Introduzir uma metodologia quantitativa para análise da estratigrafia do terreno, visando contornar a dificuldade de interpretação dos resultados imposta pela heterogeneidade do material e alta variabilidade estratigráfica.

## 1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Oferecer maior segurança para a análise da estratigrafia do terreno, através da eliminação de heterogeneidades nas leituras do ensaio de piezocone;

- Proporcionar maior confiabilidade no processo de identificação das condições de drenagem, através da diminuição da dispersão de pontos na curva de drenagem do material;
- Aplicar o método em resíduos de mineração de ouro para fornecer maior segurança na previsão de parâmetros geotécnicos através identificação do valor de V (velocidade normalizada) que identifica a transição de não drenado para parcialmente drenado.

## 1.5 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este trabalho é apresentado em 7 capítulos. Inicia-se com este capítulo introdutório, onde é apresentada a importância do tema os objetivos da pesquisa.

O segundo capítulo apresenta a revisão bibliográfica detalhada dos principais assuntos envolvidos nesta pesquisa, dentre eles: características de resíduos de mineração, execução e interpretação do ensaio de piezocone e a problemática da avaliação das condições de drenagem em materiais siltsos.

No Capítulo 3 é apresentada o método desenvolvido nesta monografia para análise de variabilidade estratigráfica. São apresentados os critérios de análise que formam o método. O capítulo 4 descreve o material que foi disponibilizado para as análises (ensaio de piezocone em rejeitos de ouro) e o resumo da caracterização. No capítulo 5, são apresentadas as análises de variabilidade estratigráfica por meio da aplicação da metodologia desenvolvida. O capítulo 6 apresenta uma comparação dos resultados obtidos com e sem o processamento dos dados.

O Capítulo 7 reúne as considerações finais e conclusões obtidas a partir deste trabalho. Adicionalmente são propostas sugestões para pesquisas futuras. Ao final do trabalho são apresentadas as referências bibliográficas consultadas e citadas durante a construção da monografia presente.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Uma revisão da literatura é apresentada, com objetivo de contextualizar de maneira crítica as características de resíduos de minério de ouro, o ensaio de piezocone e a problemática da avaliação das condições de drenagem durante os ensaios em materiais com permeabilidade intermediária (materiais siltsos).

### 2.1 BENEFICIAMENTO DE MINÉRIO

A denominação de rejeitos refere-se aos materiais residuais do processo de beneficiamento do minério. Segundo Braga (2010), o tratamento ou beneficiamento diz respeito às etapas de extração mineral que visam modificar a granulometria, a concentração dos minerais ou a forma, sem modificar as características químicas ou físicas. As etapas do beneficiamento, conforme representado na Figura 2, são todas as etapas pós-lavra pelas quais o minério passa, como a britagem, peneiramento, moagem, a concentração, o espessamento, a filtragem e a secagem (LUZ et al., 2010).

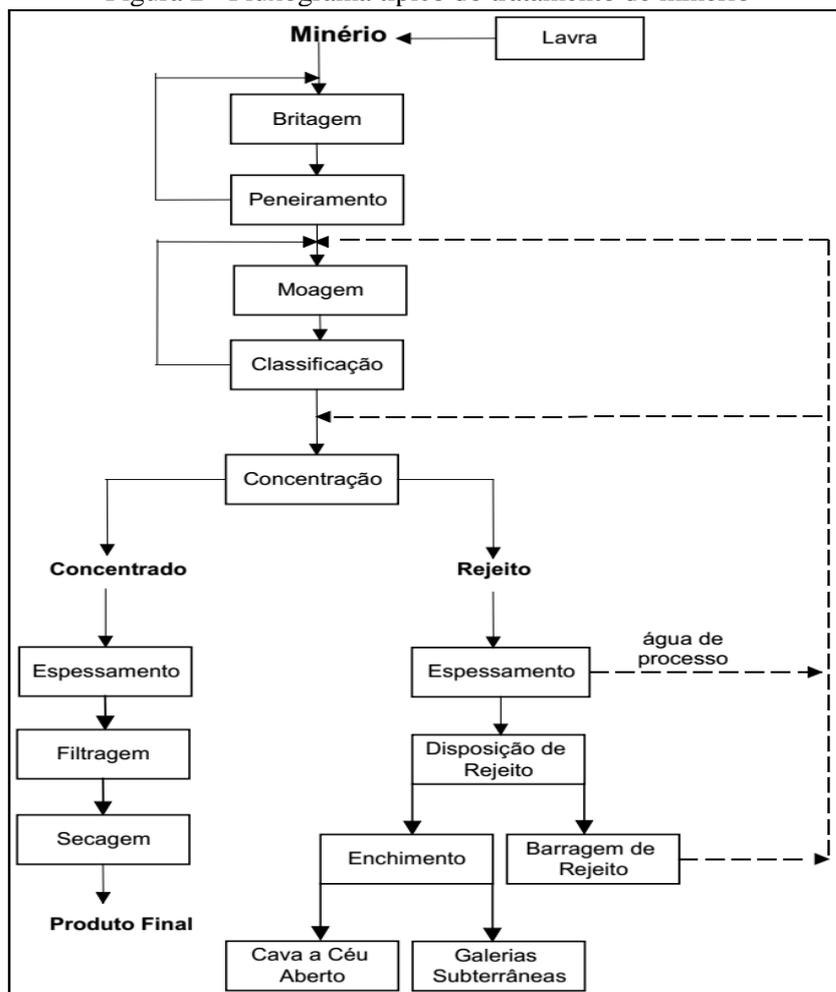
Devido às baixas concentrações na qual os metais se encontram nas jazidas, o processo de beneficiamento gera uma quantidade de resíduos muito maior do que o produto que é aproveitado. A relação de volume entre o minério extraído e os resíduos produzidos varia de acordo com o tipo do minério, sendo a extração do ouro a que mais produz rejeitos, conforme representado pela **Erro! Fonte de referência não encontrada.** (ABRÃO, 1987, *apud* NIERWINSKI, 2013).

Tabela 1 - Relação entre volume de minério extraído e resíduo

	Minério	Resíduo
Ferro	2	1
Carvão	1	3
Fosfato	1	5
Cobre	1	30
Alumina (bauxita)	1	0,3 - 2,5
Ouro	1	10000

Fonte: Abrão (1987) *apud* Nierwinski (2013).

Figura 2 - Fluxograma típico do tratamento de minério



Fonte: Luz et al (2010).

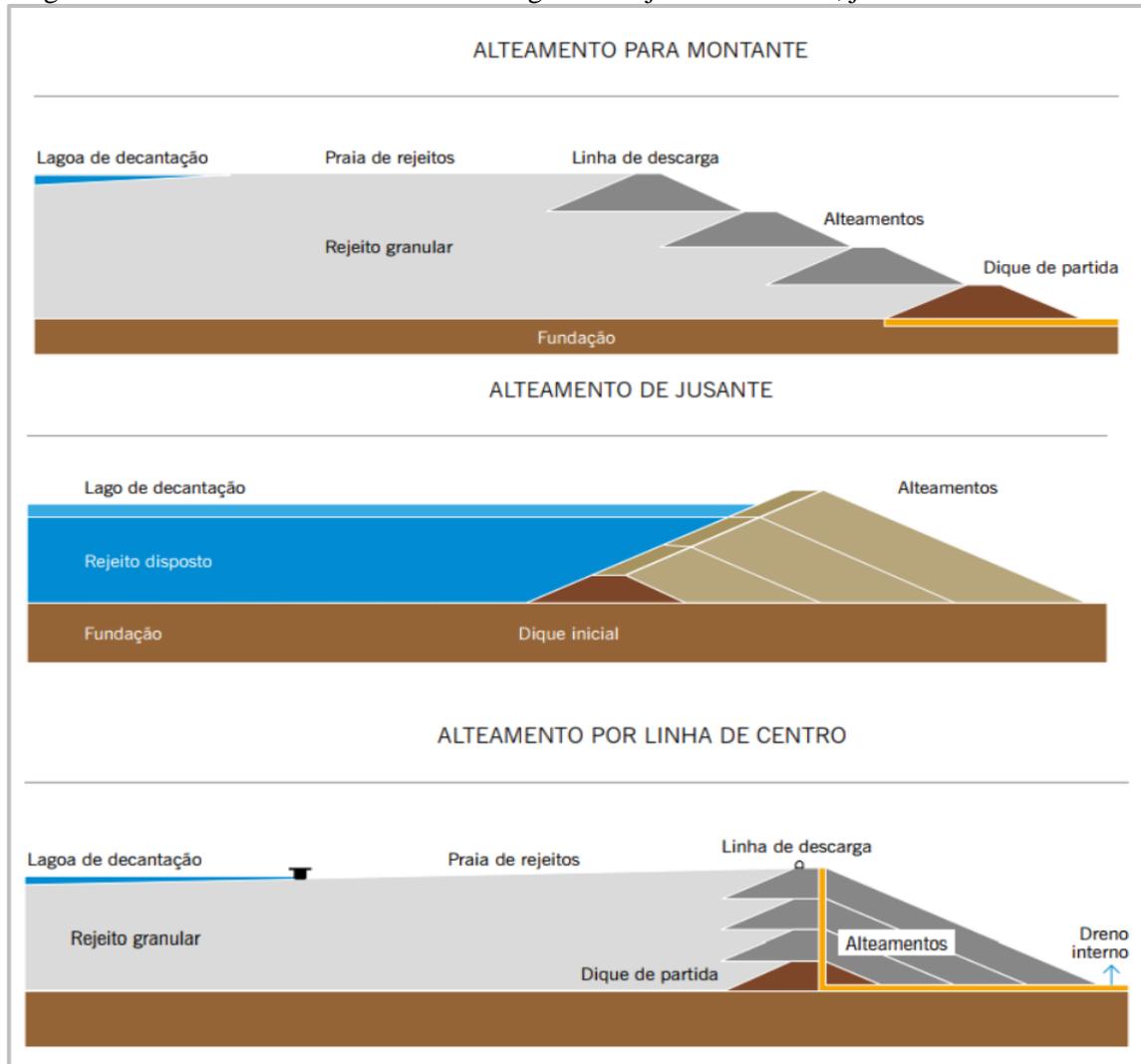
A disposição de rejeitos pode ser feita a céu aberto, de forma subterrânea ou de forma subaquática. A disposição mais comum é a céu aberto, podendo ser feita em pilhas controladas ou em estruturas de contenção, como barragens. As barragens de contenção de rejeitos podem ser do tipo de montante, a jusante ou de linha de centro, conforme Figura 3.

De acordo com o Instituto Brasileiro de Mineração (2016), o método de disposição mais utilizado é o de montante, que, apesar de ser econômico, é um método crítico em relação à segurança. Um elemento instabilizador da segurança é a presença da água nos poros do material, visto que o material é transportado para a área de disposição com alto teor de água (10% a 25% de sólidos).

“Embora seja o mais utilizado pela maioria das mineradoras o método de montante apresenta um baixo controle construtivo tornando-se crítico principalmente em relação à segurança. O agravante neste caso, está ligado ao fato dos alteamentos serem realizados sobre materiais previamente depositados e não consolidados. Assim, sob condição saturada e estado de

compacidade fofo, estes rejeitos (granulares) tendem a apresentar baixa resistência ao cisalhamento e susceptibilidade à liquefação por carregamentos dinâmicos e estáticos. (ARAUJO, 2006, pg 14).

Figura 3 - Métodos de alteamento em barragens de rejeitos: montante, jusante e linha de centro



Fonte: IBRAM (2006).

## 2.2 CARACTERÍSTICAS DOS REJEITOS DE MINERAÇÃO DE OURO

Além dos resíduos de mineração possuírem aspectos físicos, químicos e mineralógicos muito variáveis, suas características variam em função do tipo de beneficiamento e do minério processado. Em geral, pode-se dizer que os rejeitos possuem granulometria predominantemente siltsosa e condutividade hidráulica intermediária (GAUER, 2010).

As características geotécnicas dos resíduos de mineração se diferem dos solos usuais, pois o beneficiamento do minério envolve diversos processos físicos que alteram suas características. Diferentemente de solos naturais, nos rejeitos não há necessariamente uma

relação entre a granulometria e a mineralogia do material. A extração do ouro, em especial, apresenta características um pouco diferentes dos demais minérios e a escolha do tipo de beneficiamento depende da mineralogia do minério que contém o ouro (BEDIN, 2010). O esquema da Figura 4 ilustra o processo de tratamento do ouro da usina Fazenda Brasileiro. Nas etapas envolvidas, destacam-se: britagem, moagem, classificação e separação.

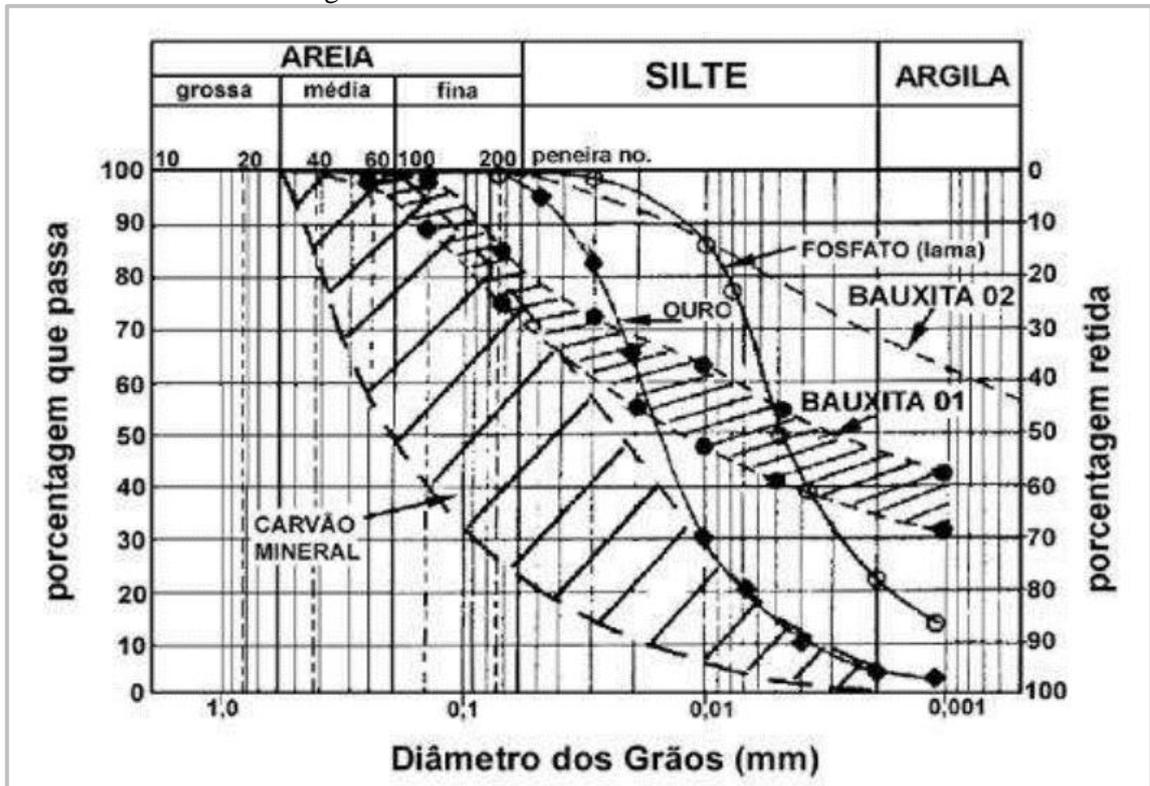
A primeira etapa no beneficiamento dos minérios é a britagem. Ela pode ser realizada tanto em britadores de mandíbulas eixos, quanto em britadores de impacto e visa diminuir o tamanho dos materiais grosseiros. Em seguida, o material britado passa por peneiras vibratórias e chega aos moinhos. O processo de moagem constitui-se na segunda etapa de redução de tamanho, podendo ser feito a seco ou a úmido (BRAGA, 2010). A classificação consiste em separar grupos de partículas de diferentes tamanhos: a porção "underflow" compreende as partículas mais grossas, enquanto que a porção "overflow" é composta de partículas mais finas. As partículas que não passam por este processo são denominadas de não-ciclonadas (CHAVES, 2002 *apud* NIERWINSKI, 2013).

Após a preparação (britagem, moagem e classificação), ocorre a separação, que pode ser do tipo gravítica, por flotação ou por ataques químicos hidrometalúrgicos. Conforme relata Gauer (2010), na usina Fazenda Brasileiro a separação é feita por ataques químicos através da adsorção em carvão ativado por cianetação e adsorção CIP (com carvão em polpa). De acordo com a autora, ao final do processo de tratamento na Usina CIP, são produzidos resíduos à uma vazão de 190 m<sup>3</sup>/h, sendo que 40% são sólidos.



na Figura 5, onde pode-se observar que a granulometria dos resíduos de ouro encontra-se principalmente na faixa dos siltes.

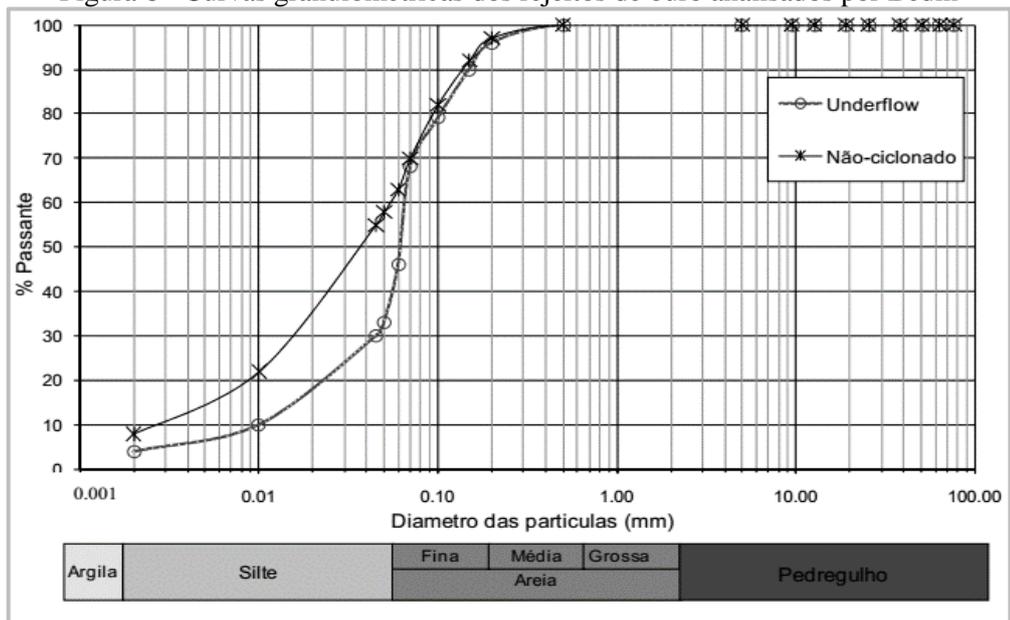
Figura 5 - Granulometria de diferentes resíduos



Fonte: Abrão (1987) *apud* Gauer (2010).

Bedin (2010) realizou ensaios para caracterizar resíduos de ouro da Usina Fazenda Brasileiro. A curva granulométrica do material é apresentada na Figura 6 e a Tabela 2 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta a distribuição da granulometria e os índices físicos com a profundidade. A análise da autora revelou que os resíduos do tipo *underflow* têm granulometria de um silte enquanto que os rejeitos não-ciclonado se aproximam de um material silto arenoso argiloso. Além disso, o material mostrou-se não plástico e com altos valores de massa específica real dos grãos.

Figura 6 - Curvas granulométricas dos rejeitos de ouro analisados por Bedin



Fonte: Bedin (2010).

Tabela 2 - Distribuição granulométrica e índices físicos dos rejeitos de ouro analisados por Bedin

Material	Posição	w (%)	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\gamma_{nat}$ (KN/m <sup>3</sup> )	e	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	LP	IP
Underflow	Superfície	40,1	3,0	18,6	1,23	7	63	30	NP	NP
	Profundidade	30,0	3,15	20,5	1,10					
Não-ciclizado	Superfície	38,7	3,3	19,3	1,30	15	57	28	NP	NP
	Profundidade	40,0	3,0	19,0	1,25					

Fonte: Bedin (2010).

### 2.3 ENSAIO DE PIEZOCONE

Conhecido internacionalmente pela sigla CPTu (*piezocone penetration test*), o ensaio de piezocone é consolidado internacionalmente como uma das mais importantes ferramentas de investigação geotécnica. Através da cravação de uma ponteira cônica à velocidade constante, as medidas da resistência à cravação ( $q_c$ ), do atrito lateral da luva ( $f_s$ ) e poropressão ( $u$ ) são tiradas diretamente do equipamento, com aquisição contínua de dados durante a penetração, o que confere um registro detalhado do solo com a profundidade. O ensaio possibilita determinar a estratigrafia de perfis de solos, identificar os materiais presentes, estimar os parâmetros geotécnicos e prever a resistência do material para projetos geotécnicos (LUNNE et al., 1997).

Uma extensa contextualização histórica da prática internacional e dos avanços nas técnicas do ensaio é apresentada no livro de Lunne et al. (1997). De acordo com a bibliografia, o primeiro cone foi desenvolvido na Holanda em 1932. Ele mede a resistência à penetração e

sua cravação era manual. Com os avanços que surgiram na década de 1950, um dispositivo para leitura do atrito lateral foi acrescentado, o que possibilitou a classificação do tipo de solo, sugerida pela primeira vez em 1965. O primeiro cone elétrico foi desenvolvido provavelmente durante a Segunda Guerra Mundial, pela Sociedade de Pesquisa Alemã de Mecânica dos Solos, conforme relata Lunne et al. (1997).

O sistema elétrico trouxe como vantagem leituras contínuas e mais precisas, além de uma menor probabilidade de erros, já que as leituras não dependem do operador. Apesar das vantagens do cone elétrico, o cone de penetração mecânico é amplamente utilizado até os dias de hoje, por ser robusto e de baixo custo de operação. De acordo com Lunne et al. (1997), o cone mecânico pode ser adequado em situações mais simples, como em solos competentes e homogêneos, que não possuem grandes variações na resistência de ponta. Porém, em solos moles e perfis muito estratificados se faz necessário o uso do cone elétrico.

Conforme relata Schnaid e Odebreccht (2012), através dos resultados obtidos no ensaio de piezocone, é possível determinar as propriedades dos materiais ensaiados e traçar um perfil estratigráfico de alta resolução, identificando até mesmo camadas de areia de poucos centímetros de espessura em um perfil argiloso. Além disso, o ensaio possibilita a obtenção de medidas mais exatas, por serem leituras livres de influência do operador durante a realização do ensaio.

A diferença entre o cone (CPT) e o piezocone (CPTu) é que o último possui um elemento filtrante que possibilita a medida das poropressões geradas durante a cravação do equipamento. O primeiro piezocone surgiu na década de 1970, quando o monitoramento das pressões neutras  $u$  geradas durante o processo de cravação começou a ter sua importância reconhecida na interpretação de ensaios de cone (LUNNE et al., 1997). A possibilidade de prever a resistência não drenada do solo é uma das principais razões da importância que o ensaio de piezocone tem na caracterização de argilas moles, caso em que o ensaio de SPT não atende às necessidades básicas de projeto (SCHNAID e ODEBRECCHT, 2012).

Quando se comparam as vantagens entre o ensaio de piezocone e o ensaio SPT, um aspecto positivo do SPT é a possibilidade de se obter uma amostra geológica do material que está sendo ensaiado, o que não é obtido com o CPT ou CPTU. Porém, isso é compensado de duas maneiras. Primeiro, existem gráficos confiáveis para estimar o tipo de solo. Além disso, o ensaio de cone ou piezocone pode identificar camadas de solo tão finas quanto 50 mm de espessura, detalhes que não apareceriam no ensaio de SPT. Segundo, o interesse principal de uma investigação costuma ser a identificação do comportamento mecânico do solo e as três grandezas medidas pelo ensaio de piezocone ( $q_c$ ,  $f_s$  e  $u$ ) fornecem subsídios para uma

interpretação mais robusta e derivação de parâmetros de comportamento (JEFFERIES E BEEN, 2006).

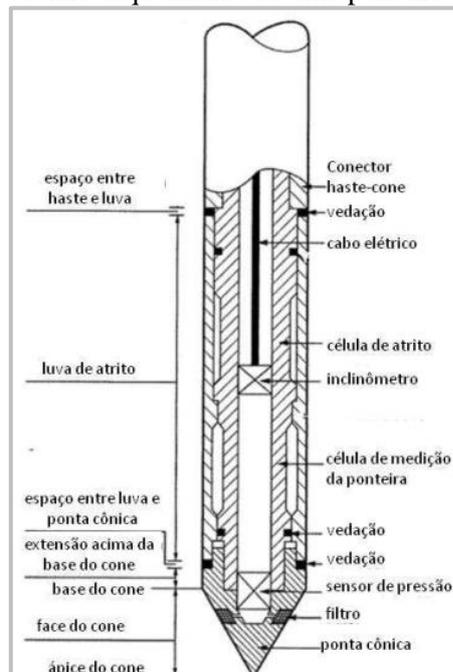
### 2.3.1 Equipamentos e procedimentos

A realização do ensaio é bem descrita no livro Schnaid e Odebreccht (2012). A cravação do piezocone no solo é realizada a uma velocidade constante de 2cm/s através de sistemas hidráulicos que possuem um controle preciso da velocidade de penetração.

A ponteira de aço é instrumentada e normalizada, possuindo um ângulo de 60° na ponta, diâmetro de 35,68mm (seção transversal de 10cm<sup>2</sup> de área). Internacionalmente, o ensaio é acompanhado de normas e códigos de várias instituições, entre elas, ASTM (1979) e ISSMFE (1977, 1988<sup>a</sup>). No Brasil, o ensaio segue a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) Método Brasileiro MB-3406 (1991), onde constam diretrizes a respeito do equipamento e procedimento a serem adotados. Tal padronização possibilita a comparação de resultados obtidos com diferentes equipamentos (SCHNAID e ODEBRECCHT, 2012).

A geometria básica do piezocone, ilustrada pelo desenho esquemático da Figura 7, é composta por ponta cônica, luva e elemento filtrante.

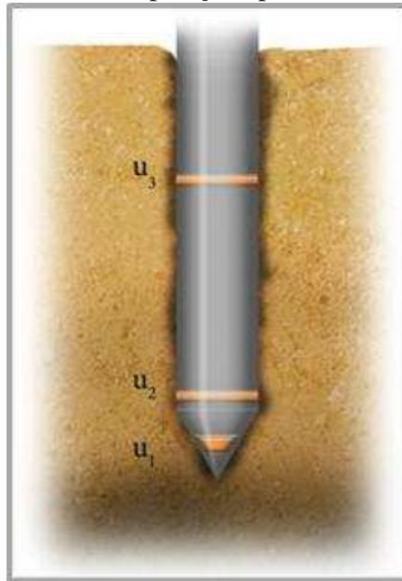
Figura 7 - Desenho esquemático de uma ponteira de piezocone



Fonte: Lunne et al. (1995).

O diâmetro da luva (D) deve ser igual ou maior que o diâmetro do cone. O filtro em formato de anel é o responsável pela medição das poropressões e pode ser posicionado em três regiões distintas:  $u_1$ ,  $u_2$  e  $u_3$ , conforme ilustra a Figura 8. A posição considerada padrão é a  $u_2$  (entre a ponta e a luva).

Figura 8 - Ponteira cônica e posições possíveis do elemento poroso



Fonte: Schnaid e Odebrecht (2012).

### 2.3.2 Grandezas medidas

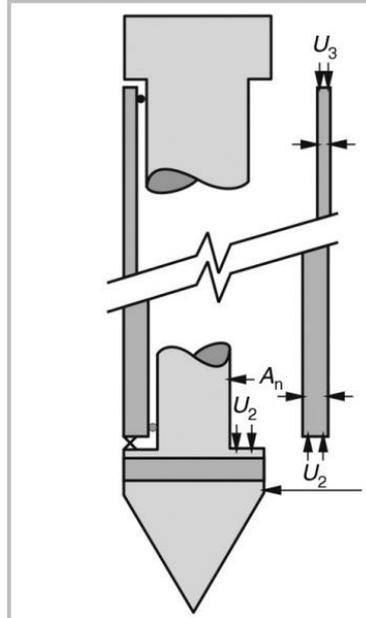
Conforme a ponteira atravessa os materiais, os sensores eletrônicos medem continuamente a resistência de ponta ( $q_c$ ), o atrito lateral ( $f_s$ ) e a poropressão gerada ( $u_2$ ). A partir dessas grandezas medidas diretamente do ensaio, parâmetros fundamentais para a identificação do tipo de solo podem ser determinados.

De acordo com Schnaid e Odebrecht (2012), a posição do elemento filtrante tem grande influência nas medidas de resistência à penetração. Independentemente da posição, sabe-se que a resistência medida ( $q_c$ ) é influenciada pelo efeito da poropressão, que atua na parte superior da ponta cônica e na parte inferior da luva de atrito, conforme ilustra a Figura 9, gerando um efeito de áreas desiguais (área interna AN e área externa AT da seção transversal). Para corrigir tal efeito e obter a resistência real mobilizada no ensaio, utiliza-se a Equação (1).

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

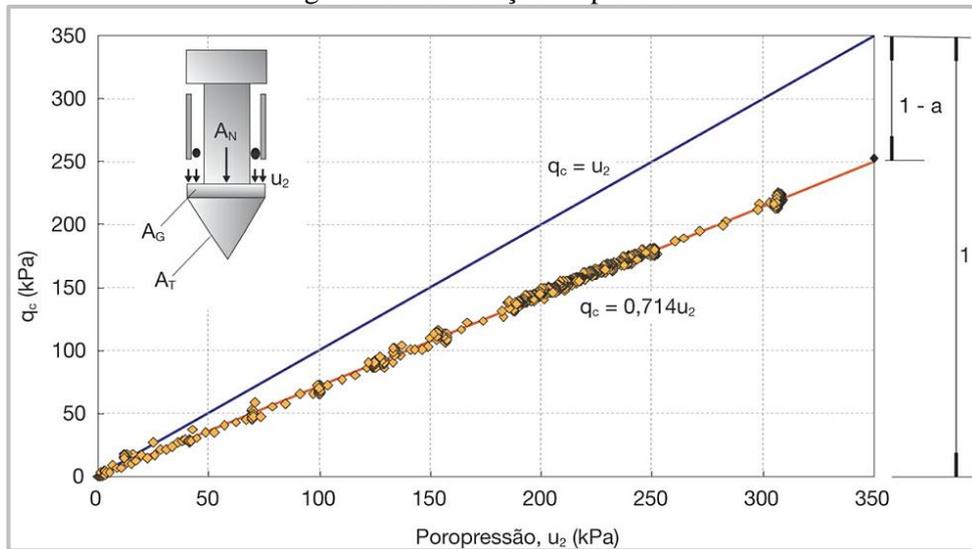
em que  $q_t$  é a resistêndia real,  $q_c$  é a resistêndia medida,  $u_2$  são as pressões neutras medidas na base do cone e o coeficiente  $a$  ( $= A_N/A_T$ ) é a razão entre as áreas desiguais, obtido através de procedimento de calibração, conforme ilustrado na Figura 10.

Figura 9 - Efeito da poropressão nos parâmetros medidos



Fonte: Schnaid (2009).

Figura 10 - Calibração do piezocone



Fonte: Schnaid e Odebrecht (2012).

A partir das grandezas medidas, podem ser calculados os dois principais parâmetros do ensaio: a razão de atrito  $R_f$  (Equação 2) e o parâmetro de poropressão  $B_q$  (Equação 3), que auxiliam na identificação do tipo de solo.

$$R_f = \frac{f_s}{q_c} \quad (2)$$

$$B_q = \frac{u_2 - u_0}{q_t - \sigma_{v0}} \quad (3)$$

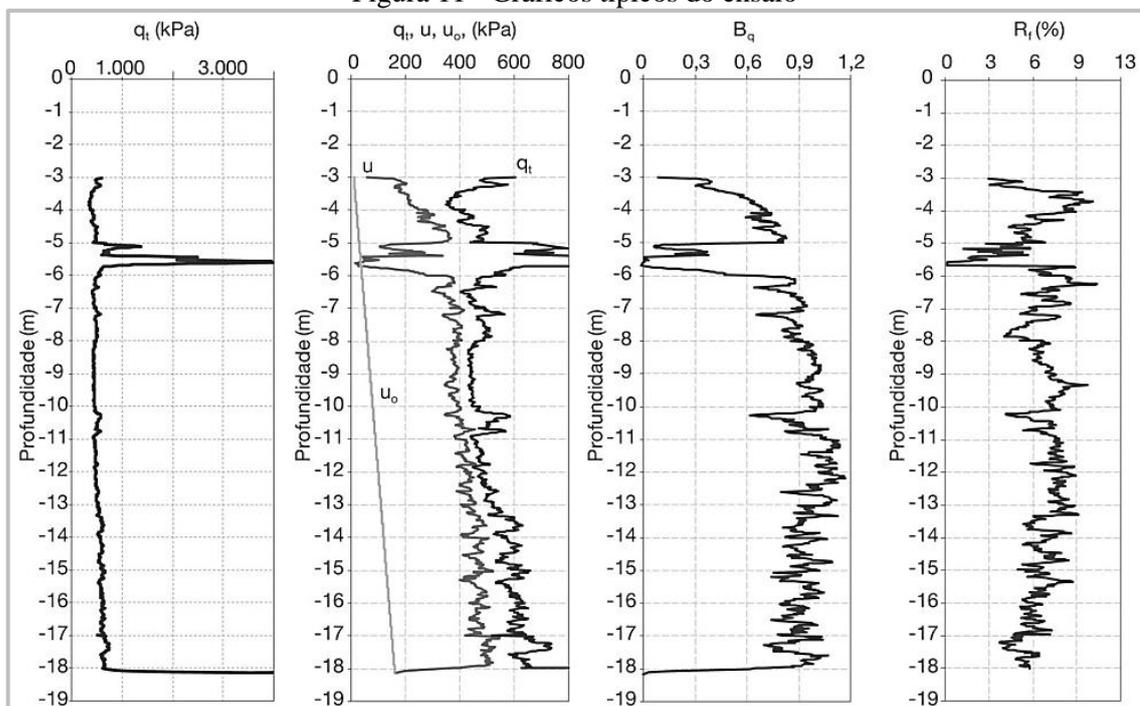
onde  $u_0$  é a poropressão de equilíbrio (pressão hidrostática) e  $\sigma_{v0}$  é tensão vertical total na profundidade.

### 2.3.3 Identificação de materiais presentes ao logo do perfil

As grandezas medidas e os principais parâmetros derivados do ensaio costumam ser plotados em gráficos ao longo da profundidade. A Figura 11 apresenta um exemplo dos perfis típicos de um resultado de ensaio piezocone.

Neste exemplo observa-se que o perfil apresentado é composto principalmente de argila mole, identificada pelos baixos valores de resistência de ponta  $q_t$ , elevada geração de excesso de poropressão  $u_2$  e valores de  $B_q$  superiores a 0,5. É possível observar a presença de uma camada fina de areia, caracterizada pelo aumento da resistência de ponta e valores de poropressão próximos à poropressão de equilíbrio hidrostático ( $u_0$ ).

Figura 11 - Gráficos típicos do ensaio



Fonte: Schnaid e Odebrecht (2012).

De acordo com Schnaid e Odebrecht (2012), baixos valores de  $q_t$ , altos valores de poropressão e valores de  $B_q$  próximos de 1, indicam um solo argiloso mole, enquanto que valores maiores de  $q_t$  e poropressão próxima da hidrostática ( $\Delta u = 0$ ,  $B_q=0$ ) indicam um solo arenoso.

### 2.3.4 Classificação dos solos

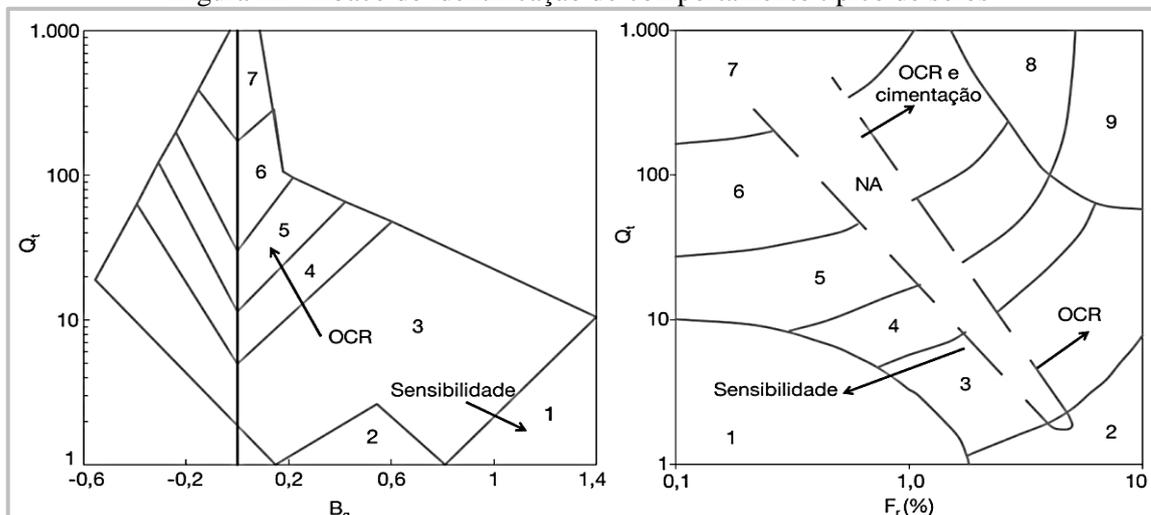
Devido à ausência de coletas de amostras para a identificação do solo, diversos autores apresentam gráficos e ábacos para classificação do tipo de solo através do ensaio de piezocone. Como a resistência de ponta e o atrito lateral aumentam com a profundidade, os gráficos expressos em função de parâmetros normalizados são indicados para corrigir estes efeitos. Em geral, os gráficos normalizados apresentam uma identificação mais segura do tipo de solo do que os gráficos não normalizados (ROBERTSON, 2009).

A Figura 12 apresenta a proposta de Robertson (1990), na qual dois ábacos ( $Q_t - F_r$  e  $Q_t - B_q$ ) apresentam zonas que indicam diferentes tipos de comportamento, conforme citados no Quadro 1. A classificação é baseada nos parâmetros  $Q_t$ ,  $B_t$  e  $F_r$  - normalização das três grandezas medidas no ensaio.  $Q_t$  e  $F_r$  são obtidos conforme as Equações (4) e (5).

$$Q_t = \frac{(q_t - \sigma_{v0})}{(\sigma_{v0} - u_0)} \quad (4)$$

$$F_r = \frac{f_s}{(q_t - \sigma_{v0})} 100\% \quad (5)$$

Figura 12 - Ábaco de identificação do comportamento típico de solos



Fonte: Robertson (1990) *apud* Schnaid e Odebrecht (2012).

Quadro 1 – Classificação de solos por tipo de comportamento

Zona	Tipos de solos
1	solo fino sensível
2	solo orgânico e turfas
3	argilas – argilas siltosas
4	argila siltosa – silte arenoso
5	siltos arenosos – areias siltosas
6	areias limpas - areias siltosas
7	areias com pedregulhos – areias
8	areias – areias limpas
9	areias finas rígidas

Fonte: Robertson (1990) *apud* Schnaid e Odebrecht (2012).

Jefferies e Davies (1993) adaptaram essa classificação introduzindo um índice de classificação do material  $I_c$  (Equação 6) que permite a implementação em planilhas de cálculo e facilita o tratamento de dados (SCHNAID E ODEBRECHT, 2012).

$$I_c = \sqrt{\{3 - \log(Q_t) \cdot [1 - B_q]\}^2 + \{1,5 + 1,3 \cdot \log(F_r)\}^2} \quad (6)$$

A Tabela 3 apresenta as diferentes zonas de classificação do solo de acordo com o índice  $I_c$ :

Tabela 3 - Classificação de solos em função do índice de classificação do material  $I_c$

Índice $I_c$	Classificação do solo
$I_c > 3,22$	Argilas orgânicas
$3,22 > I_c > 2,82$	Argilas
$2,82 > I_c > 2,54$	Misturas de siltes
$2,82 > I_c > 1,90$	Misturas de areais
$1,90 > I_c > 1,25$	Areias
$I_c < 1,25$	Areias com pedregulhos
$I_c < 1,25$	Areias com pedregulhos

Fonte: Jefferies e Been (2006) *apud* Schnaid e Odebrecht (2012).

### 2.3.5 Estimativa de parâmetros geotécnicos

Hipóteses simplificadoras e métodos semi-empíricos são adotados na previsão de parâmetros geotécnicos. A estimativa dos parâmetros é feita de acordo com o estado de drenagem a que está submetido o solo: quando a cravação do cone acontece de maneira não

drenada, a análise é feita em termos de tensões totais; em condições totalmente drenadas, a análise é em termos de tensões efetivas.

Os principais parâmetros geotécnicos derivados do ensaio são apresentados na sequência.

### 2.3.5.1 Argilas

Em argilas (análise em condição não drenada), os principais parâmetros que podem ser calculados a partir do ensaio são a resistência ao cisalhamento não drenada ( $S_u$ ), a história de tensões ( $OCR$ ), o módulo de deformabilidade ( $E$ ) e os coeficientes de adensamento ( $c_h$  e  $c_v$ ).

#### Resistência ao cisalhamento não drenada ( $S_u$ )

O  $q_c$  medido pelo ensaio de CPTU trata-se da resistência oferecida pelo terreno à penetração do cone. A partir dos resultados, uma previsão da resistência ao cisalhamento dos solos pode ser feita. O cálculo da resistência não-drenada ( $S_u$ ) pode ser realizado pela aplicação de um fator de capacidade de carga  $N_{kt}$ , segundo a Equação (7) citada por Schnaid (2009):

$$S_u = \frac{(q_c - \sigma_{vo})}{N_{kt}} \quad (7)$$

em que o valor de  $q_t$  é a resistência de ponta corrigida,  $\sigma_{vo}$  é a tensão total na profundidade considerada e  $N_{kt}$  o fator de capacidade de carga.

Os valores de  $N_{kt}$  podem ser adotados com base na literatura. Segundo Schnaid e Odebrecht (2012) para as argilas da região de Porto Alegre  $N_{kt}$  varia de 8 a 16, podendo ser adotado um valor médio de 12. Entretanto, os autores aconselham determinar localmente o valor de  $S_u$ , por meio de um ensaio de palheta e, a partir deste, determinar o  $N_{kt}$ . Ensaio de laboratório triaxiais do tipo UU (não consolidado, cisalhado não drenado) podem ser outra possibilidade para calibração do fator de capacidade de carga  $N_{kt}$ .

#### Razão de sobreadensamento (OCR)

Conhecida pela sigla OCR (*over consolidation ratio*), a razão de sobreadensamento é determinada pela razão entre a tensão de pré-adensamento  $\sigma'_{vm}$  e a tensão efetiva  $\sigma'_{vo}$ , sendo expressa pela Equação (8).

$$OCR = \frac{\sigma'_{vm}}{\sigma'_{v0}} \quad (8)$$

A razão de sobreadensamento é utilizada para entender a história de tensões do solo. Valores de  $OCR$  próximos de 1 indicam que o material é normalmente adensado (NA). Para valores de  $OCR > 1$  indicam pré-adensamento do solo, enquanto que valores de  $OCR < 1$  indicam solos em processo de adensamento, ou amostras amolgadas.

Para a determinação do  $OCR$ , Schnaid e Odebrecht (2012) citam algumas relações. Entre elas, a proposta de Jamiolkowski et al. (1985), que apresenta uma relação entre o  $OCR$  e o  $S_u$ , conforme a Equação (9); e a proposta de Chen e Mayne (1996), que resulta na Equação (10).

$$OCR = \left( \frac{S_u}{0,23 \cdot \sigma'_{v0}} \right)^{1,25} \quad (9)$$

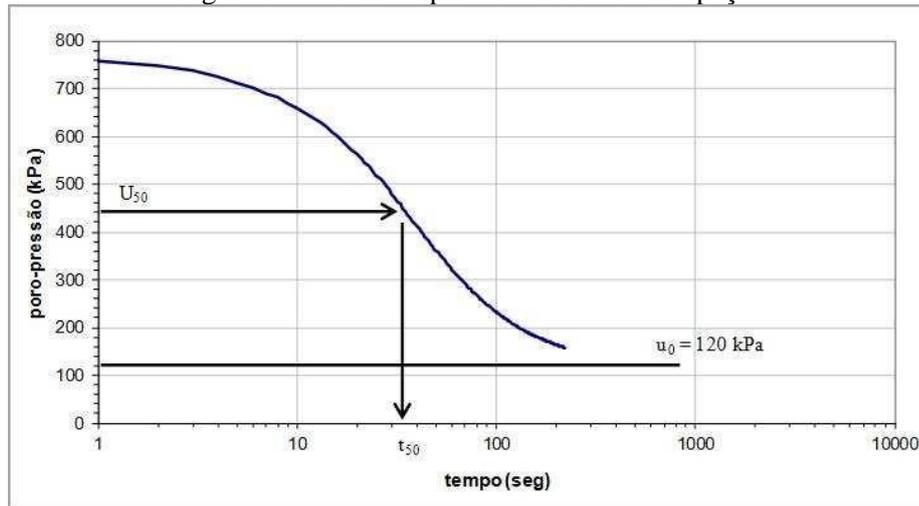
$$OCR = 0,53 \frac{q_t - u_2}{\sigma'_{v0}} \quad (10)$$

#### Coefficientes de adensamento ( $c_v$ , $c_h$ )

O coeficiente de adensamento, ou coeficiente de dissipação, é uma medida da velocidade de dissipação dos excessos de poropressão muito útil para avaliar as condições de drenagem. Seu cálculo é feito a partir do ensaio no qual a cravação do piezocone é interrompida até a dissipação atingir o equilíbrio ou 50% de dissipação do excesso de poropressão (Bedin, 2006, 2010).

A Figura 13 ilustra a construção da curva de dissipação ao longo do tempo, que pode ser obtida com os resultados do ensaio de dissipação. Através dela é possível calcular o coeficiente de adensamento horizontal do solo com a metodologia proposta por Houlsby e Teh (1988), conforme a Equação (11).

Figura 13 - Gráfico típico do ensaio de dissipação



Fonte: Klahold (2013).

$$c_h = \frac{T_{50\%} \cdot R^2 \sqrt{I_r}}{t_{50\%}} \quad (11)$$

onde  $T_{50\%}$  é um coeficiente adimensional do tempo que depende da posição do elemento poroso (para posição  $u_2$  e dissipação de 50% da poropressão excedente:  $T=0,245$ );  $R$  é o raio do piezocone;  $I_r$  é o índice de rigidez do solo ( $G/S_u - G$  módulo de cisalhamento elástico) e  $t_{50\%}$  corresponde ao tempo medido no ensaio quando ocorreu 50% de dissipação do excesso de poropressão para medida em  $u_2$ .

### 2.3.5.2 Areias

No caso de solos granulares, os principais parâmetros geotécnicos que podem ser estimados são a densidade relativa ( $D_r$ ) e ângulo de atrito efetivo ( $\phi'$ ).

#### Densidade relativa ( $D_r$ )

A determinação de  $D_r$ , também chamada de compactidade relativa, pode ser obtida pela Equação (12). No seu cálculo, os valores de  $q_c$  e  $\sigma'_{v0}$  são expressos em  $t/m^2$ . O método, contudo, fornece apenas uma estimativa com grande faixa de incerteza: a precisão é de aproximadamente 20% (SCHNAID e ODEBRECHT, 2012).

$$D_r = -98 + 66 \cdot \log_{10} \left[ \frac{q_c}{(\sigma'_{v0})^{0,5}} \right] \quad (12)$$

### Ângulo de atrito ( $\phi'$ )

Conforme relatam Schnaid e Odebrecht (2012), existem correlações para estimar o ângulo de atrito ( $\phi'$ ) diretamente de  $q_c$ . Com base em experiências realizadas em câmaras de calibração, Robertson e Campanella (1983) propuseram uma correlação empírica entre  $\phi'$  e  $q_c$ . Kulhawy e Mayne (1990) apresentaram a Equação (13) para determinação do ângulo de atrito:

$$\phi' = \arctg \left[ 0,1 + 0,38 \cdot \log \left( \frac{q_t}{\sigma'_{v0}} \right) \right] \quad (13)$$

#### 2.3.5.3 Solos intermediários

Na velocidade de carregamento padrão do ensaio (2 cm/s), a penetração do piezocone em solos intermediários pode não ser drenada, nem não-drenada. Logo, a determinação de parâmetros em materiais que apresentam permeabilidade entre as de areia e argila carece de métodos que possam ser aplicados de forma confiável (JAEGER et al., 2010).

A tentativa de estimar parâmetros para esses materiais muitas vezes não é confiável, pois, conforme a padronização dos métodos, a caracterização só pode ser feita utilizando-se parâmetros de tensão efetiva (caso das areias, em que a resposta é drenada) ou parâmetros de tensões totais (caso das argilas, em que a resposta é não drenada).

Materiais com características siltosas, misturas argilo-arenosas podem apresentar um comportamento de drenagem parcial durante a cravação do cone. Conforme o conteúdo de finos no material aumenta, ocorre a transição de comportamento drenado, para parcialmente drenado, e de parcialmente drenado para não drenado (KRAGE, 2014). Visto que as condições de drenagem podem influenciar tanto na caracterização do material, como na determinação do comportamento geomecânico, o estudo e compreensão das condições de drenagem é de extrema importância quando o ensaio é realizado em solos intermediários.

## 2.4 CONDIÇÕES DE DRENAGEM NO ENSAIO DE PIEZOCONE

Em razão do ensaio de piezocone não poder ser bem interpretado na ocorrência de drenagem parcial, diversos estudos têm sido realizados para avaliar o comportamento da drenagem em solos com permeabilidade intermediária. Segundo Schnaid et al. (2010), a avaliação das condições de drenagem nesses materiais é necessária para evitar que os

parâmetros geotécnicos sejam superestimados, principalmente a resistência ao cisalhamento não drenada ( $S_u$ ).

De acordo com Dienstmann (2015), a definição das condições de drenagem durante a execução de ensaios de campo pode conferir confiabilidade na obtenção dos parâmetros de projeto, porém em materiais não convencionais ainda não existem definições precisas e métodos de abordagem consagrados para avaliação das condições de drenagem.

A avaliação dos parâmetros que controlam o fluxo em materiais de comportamento transitório vem sendo estudada por meio de ensaios executados em diferentes velocidades. Os resultados costumam ser apresentados num espaço que relaciona a velocidade normalizada ( $V$ ) à poropressão normalizada, reproduzindo a chamada curva de drenagem característica do material. O objetivo da curva de drenagem é estabelecer os limites para que os ensaios sejam realizados de maneira totalmente drenada ou não drenada, possibilitando a interpretação dos resultados (KLAHOLD, 2013).

O parâmetro adimensional  $V$ , apresentado na Equação (14), leva em consideração a velocidade de penetração  $v$ , o diâmetro da sonda  $d$  e o coeficiente de adensamento vertical do solo.

$$V = \frac{v \cdot d}{c_v} \quad (14)$$

O parâmetro  $U$  que representa o excesso de poropressão gerado pode ser obtido, segundo Dienstmann (2015), pelas seguintes relações:

- Randolph e Hope 2004, Silva et al 2005, entre outros:  $U = \frac{\Delta u}{\Delta u_{\max}}$ , onde  $\Delta u$  - variação de poropressão em um determinado instante e  $\Delta u_{\max}$  - máxima variação de poropressão, geralmente medidas na face do equipamento;
- Schnaid et al 2004:  $U = \frac{q_t - q_{tund}}{q_{tdr} - q_{tund}}$ , onde  $q_t$  - resistência real mobilizada do piezocone em um dado instante,  $q_{tund}$  - resistência real mobilizada do piezocone não drenada, e  $q_{tdr}$  - resistência real mobilizada do piezocone drenada.

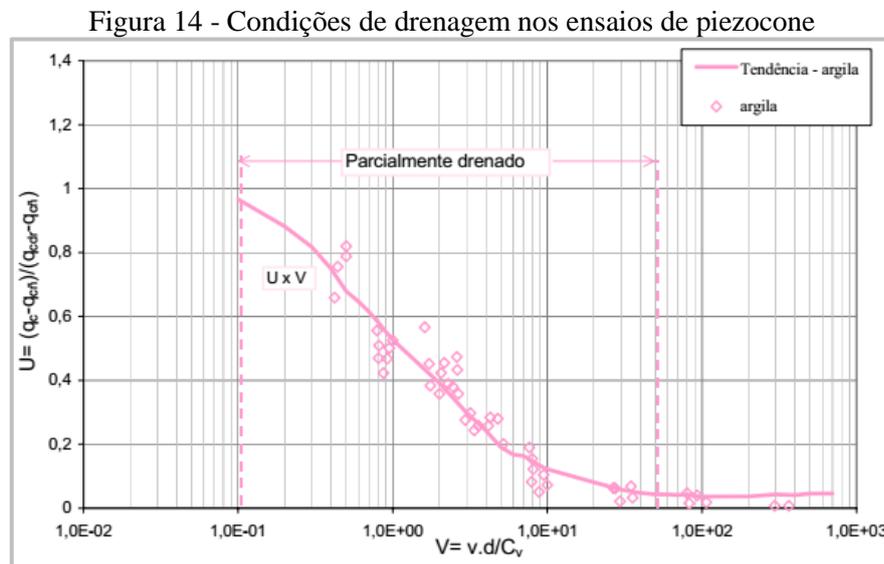
Nas representações acima, o parâmetro  $U$  varia de 0 a 1, sendo 0 a condição não drenada e 1 a condição drenada. A poropressão também pode ser representada normalizada pela tensão efetiva ( $\Delta u / \sigma'_{v0}$ ). Neste caso, a condição drenada é igual a 0 e o valor máximo para a condição de comportamento não drenado depende das características do material.

Schnaid (2005), através de dados experimentais propôs uma equação cossenoide hiperbólica (Equação 15) para traçar a tendência da curva de drenagem.

$$U = a + (1 - a) \frac{1}{\cosh(bV^c)} \quad (15)$$

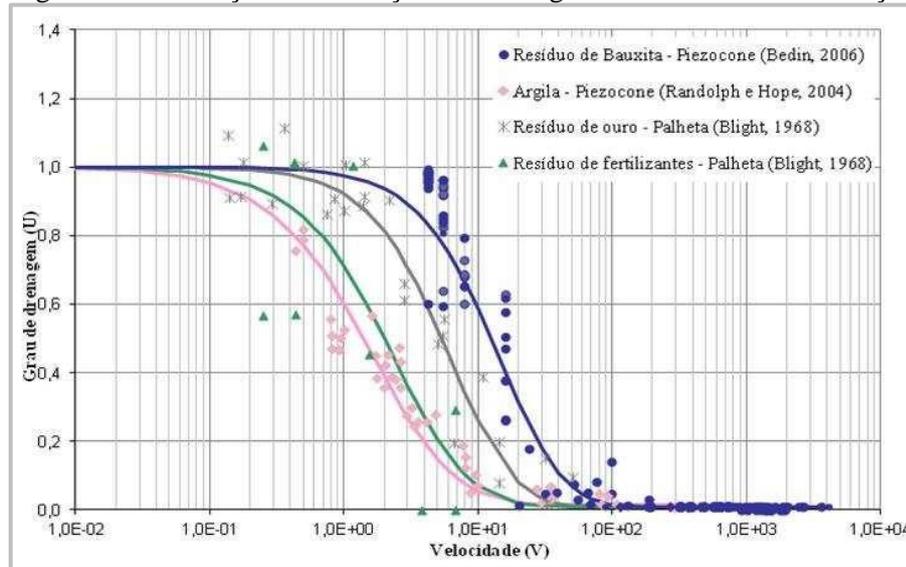
onde  $U$  indica o grau de drenagem e  $a$ ,  $b$  e  $c$  são coeficientes de adequação da curva. O parâmetro  $a$  representa a relação entre a resistência ao cisalhamento não drenada e drenada, enquanto que  $b$  e  $c$  controlam a taxa de mudança de condições drenadas para não drenadas (SCHNAID et al., 2010).

Aplicando a equação cossenóide proposta por Schnaid (2005), Bedin (2006) reinterpretou um estudo de caso de Randolph e Hope (2004), no qual uma argila havia sido ensaiada a diferentes taxas de penetração do piezocone. Os resultados podem ser visualizados na Figura 14. De acordo com a autora, a faixa intermediária entre as condições drenadas e não drenadas corresponde a ensaios nos quais há ocorrência de drenagem parcial. Para um comportamento não-drenado os ensaios devem ser executados reproduzindo velocidades normalizadas maiores que 30.



Um exemplo de curvas de drenagem em resíduos de mineração é apresentado na Figura 15, resultado da pesquisa de Bedin (2006), onde os resultados da autora são comparados diretamente com os de outros autores (Randolph e Hope, 2004 e Blight 1968).

Figura 15 - Avaliação das condições de drenagem em resíduos de mineração



Fonte: Bedin, 2006.

Resultados em resíduo de ouro descritos em Bedin (2010) e Klahold (2013) foram reinterpretados por Dienstmann et al. (2016) e a Equação (15) foi adaptada para representar a tendência de  $\Delta u / \sigma'_{v0} \times V$  e  $Q_t \times V$ , conforme as Equações (16) e (17). O resultado obtido é apresentado na Figura 16 e os coeficientes de ajuste adotados são apresentados na Tabela 4. Devido à dispersão dos pontos, os autores apresentam duas curvas para caracterizar o comportamento de drenagem e de resistência: um limite inferior e um limite superior.

$$Q = Q_{\min} + \left( a + (1-a) \frac{1}{\cosh(bV^c)} \right) \times (Q_{\max} - Q_{\min}) \quad (16)$$

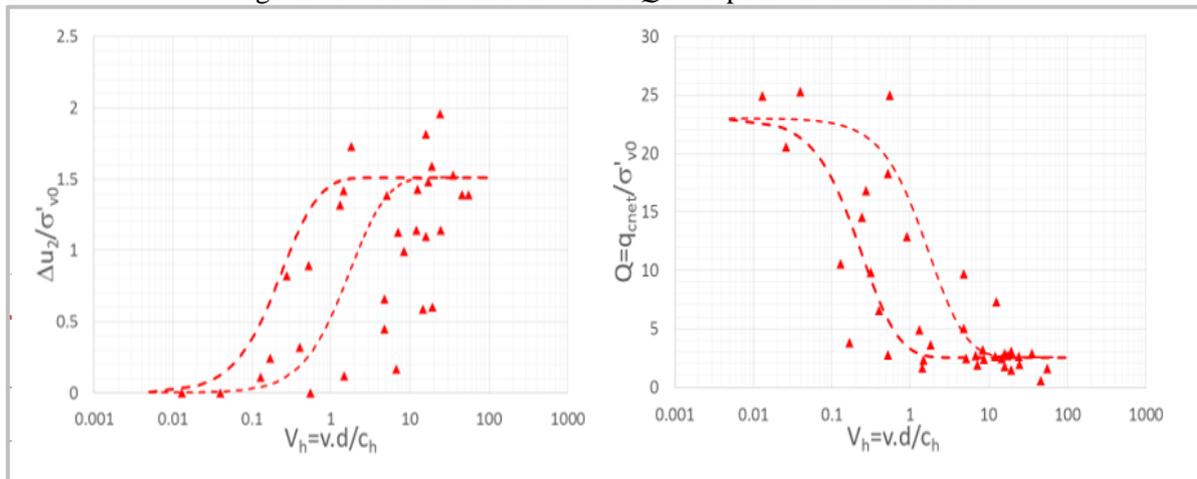
$$\frac{\Delta u}{\sigma'_{v0}} = \frac{\Delta u_{\max}}{\sigma'_{v0}} - \left( a + (1-a) \frac{1}{\cosh(bV^c)} \right) \times \left( \frac{\Delta u_{\max}}{\sigma'_{v0}} - \frac{\Delta u_{\min}}{\sigma'_{v0}} \right) \quad (17)$$

Tabela 4 - Coeficientes de ajuste para resíduos de ouro

Coeficientes de ajuste			
	a	b	c
Limite inferior	0,025	4	0,7
Limite superior	0,025	1	0,7

Fonte: Dienstmann et al (2016).

Figura 16 - Curvas  $\Delta u/\sigma'_{v0}$  x  $V$  e  $Q_t$  x  $U$  para resíduos de ouro



Fonte: Dienstmann et al (2016).

Conforme apresentado nos exemplos, a curva possibilita a identificação das condições de drenagem, podendo ser observado um intervalo no qual há ocorrência de drenagem parcial. Através da curva, os limites de comportamento drenado e comportamento não drenado podem ser definidos, possibilitando assim a obtenção de parâmetros geotécnicos e evitando que ensaios futuros sejam executados em velocidades nas quais ocorra drenagem parcial.

## 2.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Quando se estuda uma variável, a estatística pode ser útil para ajudar a organizar os dados, transformá-los em informações e tirar conclusões. A estatística descritiva permite resumir e descrever as características de dados através da aplicação de diversas medidas-resumo, que podem ser numéricas ou gráficas, como medidas de posição (ou localização) e medidas de dispersão (ou de variabilidade) (Morettin e Bussab, 2010).

A seguir são apresentados alguns dos principais métodos que podem ser utilizados para representação da distribuição e da dispersão de um conjunto de dados.

### 2.5.1 Distribuição de frequência de dados

Através da representação gráfica da distribuição de frequência de dados, é possível identificar com mais facilidade maiores e menores valores, permitindo direcionar-se assim nas características mais importantes dos dados em análises.

De acordo com Morais (2005), define-se frequência absoluta de um valor como sendo o número de vezes que esse valor ocorre na amostra da variável. Já a frequência relativa, como o quociente entre a frequência absoluta desse valor e o número total de ocorrências de todos os valores da variável na amostra ou na população. A soma das frequências relativas deve resultar em 1, e multiplicação da frequência relativa por 100 fornece a porcentagem.

Para representar graficamente a distribuição de frequência de um conjunto de dados, podem ser utilizados histograma ou polígono de frequência acumulada (também chamado de ogiva).

### 2.5.1.1 Histograma

De acordo com Reis e Reis (2002), o histograma nada mais é do que um gráfico de barras verticais construído com as barras unidas, devido ao caráter contínuo dos valores da variável. Um exemplo de histograma é apresentado na Figura 17, onde as autoras utilizam a ferramenta gráfica para apresentar a distribuição de frequências de ursos segundo o peso. O histograma pode ser construído a partir da Tabela 5, observando-se os valores de frequência relativa.

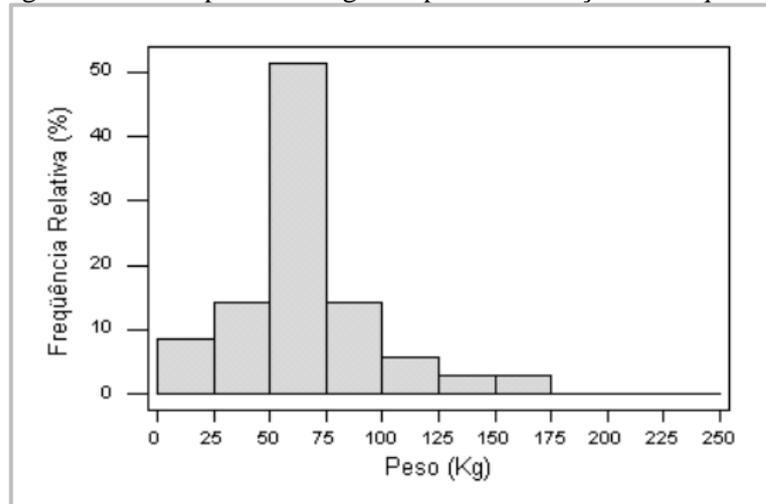
Para representar a distribuição, os dados devem ser divididos em intervalos, que são denominados intervalos de classe ou células. No histograma, o eixo horizontal representada a escala de medidas e os limites dos intervalos, enquanto que o eixo vertical representa a escala de frequência (MONTGOMERY et al., 2003).

Tabela 5 - Exemplo de distribuição de frequência

<b>Distribuição de freqüências dos ursos fêmeas segundo peso.</b>				
Peso (kg)	Freqüência Absoluta	Freqüência Relativa (%)	Freq. Abs. Acumulada	Freq. Rel. Acumulada
0   - 25	3	8,6	3	8,6
25   - 50	5	14,3	8	22,9
50   - 75	18	51,4	26	74,3
75   - 100	5	14,3	31	88,6
100   - 125	2	5,7	33	94,3
125   - 150	1	2,9	34	97,1
150   - 175	1	2,9	35	100,0
175   - 200	0	0	35	100,0
200   - 225	0	0	35	100,0
225   - 250	0	0	35	100,0
Total	35	100	-	-

Fonte: Reis e Reis (2002).

Figura 17 - Exemplo de histograma para distribuição de frequência



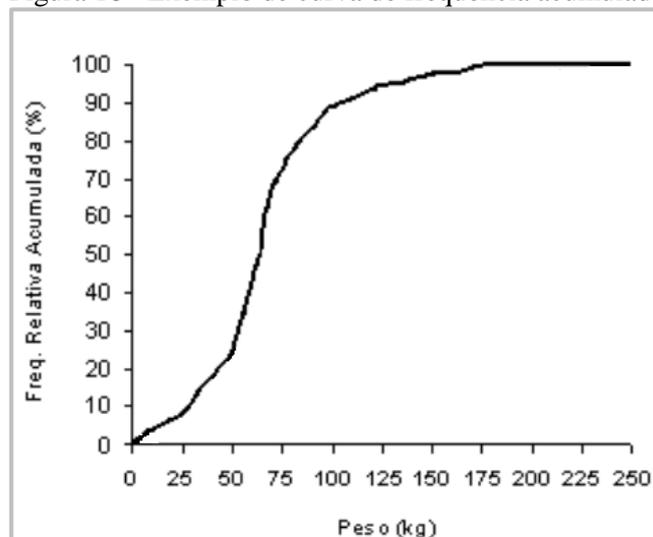
Fonte: Reis e Reis (2002).

#### 2.5.1.2 Polígono de frequência acumulada (ou ogiva)

O polígono de frequência, curva de frequência acumulada ou ogiva é um gráfico em linha, em que as frequências são marcadas sobre perpendiculares ao eixo horizontal, levantadas pelos pontos médios dos intervalos de classe.

A Figura 18 exibe a curva de frequência acumulada referente à distribuição de frequências apresentada na Tabela 5. A curva de frequência acumulada é uma ferramenta eficaz para identificar rapidamente os valores mínimo, médio e máximo do intervalo, bem como para localizar a mediana e os intervalos em que há maior concentração de dados.

Figura 18 - Exemplo de curva de frequência acumulada



Fonte: Adaptado de Reis e Reis (2002).

## 2.5.2 Dispersão de dados

De acordo com Morettin e Bussab (2010), resumir um conjunto de dados apenas através de uma medida de posição central pode acabar escondendo informações sobre a variabilidade do conjunto. Alguns critérios podem ser utilizados para quantificar o grau de dispersão de um conjunto de dados. Na sequência são apresentadas as principais medidas de dispersão: amplitude, variância, desvio padrão e coeficiente de variação.

### 2.5.2.1 Amplitude

O critério mais simples para medir a dispersão de uma amostra é a amplitude, que nada mais é do que a diferença entre o maior e o menor valores do conjunto. Entretanto, um defeito dessa medida de dispersão é que ela depende apenas das duas medidas mais extremas e não considera as posições dos valores restantes (Devore, 2006).

### 2.5.2.2 Variância

De acordo com Devore (2006), a principal medida de dispersão é aquela que envolve os desvios em relação à média,  $x_1 - \bar{x}$ ,  $x_2 - \bar{x}$ , ...,  $x_n - \bar{x}$ .

A variância, representada por  $s^2$ , é medida que se obtém ao somar os quadrados dos desvios das observações da amostra, relativamente à sua média, e dividindo por  $n-1$ , conforme a Equação (18).

$$s^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1} \quad (18)$$

### 2.5.2.3 Desvio padrão

O desvio padrão, representado por  $s$ , é a raiz quadrada da variância:  $s = \sqrt{s^2}$ .

Ele pode ser utilizado para comparação de diferentes conjuntos de dados, desde que esses dados estejam na mesma unidade de medida. Um ponto negativo desta medida, é que o desvio padrão é bastante afetado ela pelos valores extremos do conjunto de dados, ou seja, ele não é uma medida resistente (Morettin e Bussab, 2010).

#### 2.5.2.4 Coeficiente de variação

De acordo com Romano et al (2005), o coeficiente de variação ( $cv$ ) é uma medida de dispersão independente de unidades de medidas, podendo assim ser utilizado na comparação de conjuntos que possuem diferentes variáveis. O cálculo de  $cv$  é definido como a razão entre o desvio padrão,  $s$ , e a média amostral e costuma ser apresentado em porcentagem, conforme apresentado na Equação (19). Quanto menor for o valor do coeficiente de variação, menor será a dispersão dos valores em torno da média.

$$cv = \frac{s}{x} 100\% \quad (19)$$

### 3 MÉTODO DE ANÁLISE

O conhecimento das condições de drenagem em solos com permeabilidade intermediária é fundamental para uma análise mais precisa dos parâmetros geotécnicos do solo. As pesquisas que têm sido desenvolvidas utilizando ensaios executados em diferentes velocidades buscam estabelecer a velocidade de penetração limite para que os ensaios sejam executados em condições não drenadas - onde não há a dissipação de qualquer excesso de poropressão gerada - ou para que ocorra a total drenagem durante a execução do ensaio - caso onde todo o excesso de poropressão gerado é dissipado durante a penetração.

O objetivo deste trabalho é introduzir uma metodologia que forneça maior confiabilidade para análise da estratigrafia do terreno. A ideia consiste em: definir perfis homogêneos de mesmo material, isolando heterogeneidades do perfil para que o processo de identificação das condições de drenagem em material com características intermediárias (entre areia e argila) possa ser melhor observado.

Conforme sugere Schnaid (2009), quando investigações iniciais indicam que o solo apresenta drenagem parcial, a “curva de drenagem” deve ser estabelecida para orientar a definição e realização dos ensaios. Visto que os resíduos de mineração de ouro são materiais sujeitos a drenagem parcial, o presente trabalho pretende melhorar a análise do efeito da velocidade de penetração em ensaios realizados nestes materiais.

Idealmente, para se obter uma curva de drenagem com boa representatividade do material, dever-se-ia escolher materiais não muito heterogêneos para a análise. Sabe-se que quanto mais homogêneo é o solo que está em análise, mais clara é a relação entre a velocidade de penetração e as poropressões geradas, e mais representativa é a curva de drenagem do material. O depósito de resíduos estudado, entretanto, trata-se de um terreno de material muito heterogêneo e com estratigrafia altamente variável. Tal característica é comum em rejeitos de mineração e, devido a isto, uma análise quantitativa dos ensaios se faz necessária.

A curva de drenagem pode ser estabelecida para todo o intervalo de profundidade no qual o ensaio foi realizado. Porém, devido a variabilidade da estratigrafia, acaba apresentando uma elevada dispersão de dados, possuindo pouca qualidade. Logo, se camadas menores - porém mais homogêneas - do material forem analisadas, entende-se que o efeito da velocidade pode ser determinado com maior precisão.

Portanto, foram estudados critérios para identificar camadas de solo mais homogêneas, nas quais o efeito da velocidade de penetração aparece com maior clareza. Este capítulo apresenta o método de processamento de dados proposto.

### 3.1 ANÁLISE QUALITATIVA

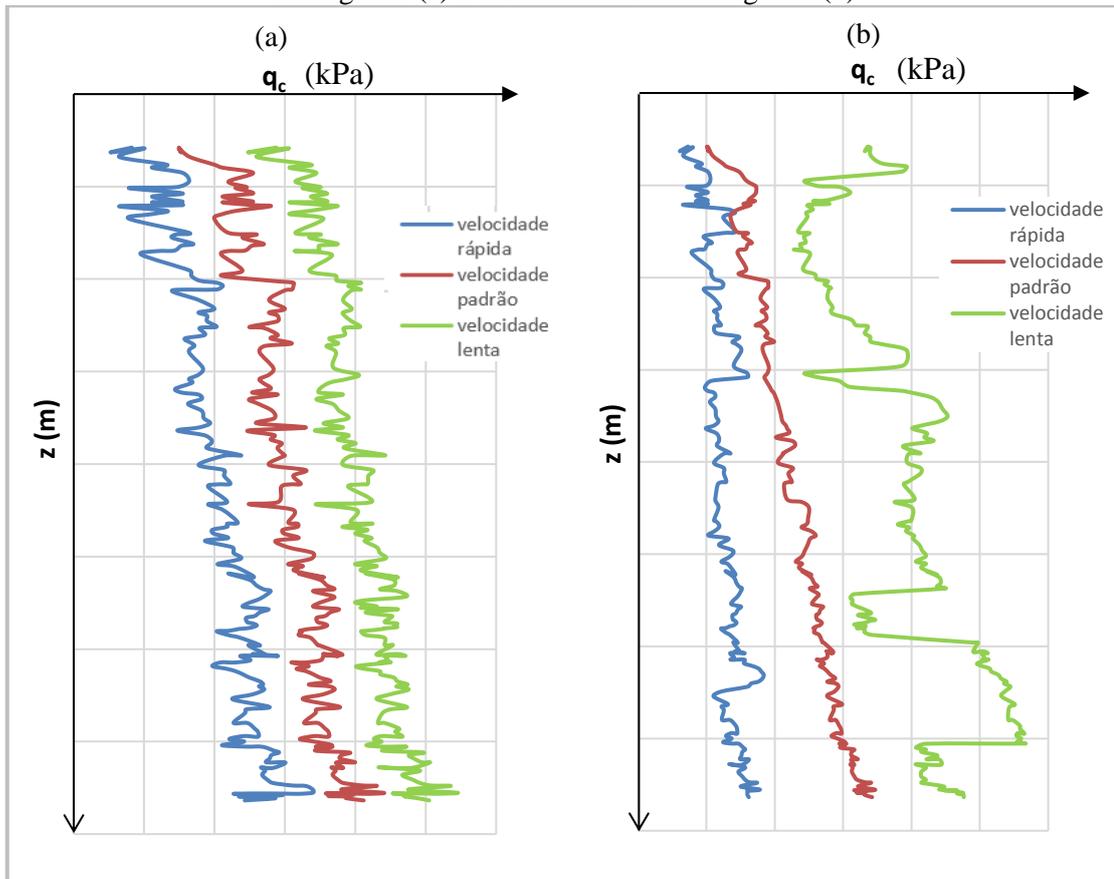
Através de perfis típicos dos ensaios é possível avaliar a variabilidade estratigráfica em uma sondagem e identificar semelhanças entre os perfis de pontos adjacentes. Trata-se de uma análise qualitativa, pois as conclusões são feitas por meio de observação visual.

Na interpretação de ensaios de piezocone em materiais que apresentam perfis complexos, a presente metodologia sugere, como primeiro critério para seleção de dados representativos, que sejam analisados os perfis de  $q_c$ ,  $f_s$  e  $u_2$ , fazendo-se comparações entre os perfis das sondagens adjacentes executadas sob diferentes velocidades de cravação.

Sabe-se que a velocidade de penetração do cone tem influência sob os valores medidos de  $q_c$ ,  $f_s$  e  $u_2$ . Em velocidades mais lentas, o atrito lateral e a resistência de ponta se apresentam maiores, enquanto que o excesso de poropressão aparece menor. Portanto, se o material das diferentes sondagens for homogêneo, os perfis de  $q_c$ ,  $f_s$  e  $u_2$  para cada uma das velocidades apresentarão curvas semelhantes, apenas deslocadas no eixo horizontal.

Um exemplo ilustrativo da diferença entre um material homogêneo e outro não homogêneo é apresentado na Figura 19 (a) e (b). O caso hipotético exhibe o perfil de  $q_c$  para 3 ensaios com diferentes velocidades: um ensaio drenado, um não drenado e um parcialmente drenado. Figura 19 (a) o material é homogêneo, apresentando perfis de  $q_c$  muito semelhantes, diferindo-se apenas por estarem deslocados no eixo das abcissas. Já na Figura 19 (b), cada ensaio mostra o perfil de  $q_c$  com alguma característica que o difere dos demais, indicando que o material não é homogêneo com a profundidade. Em casos como este, os efeitos da heterogeneidade vertical e horizontal dificultam a interpretação dos efeitos da velocidade.

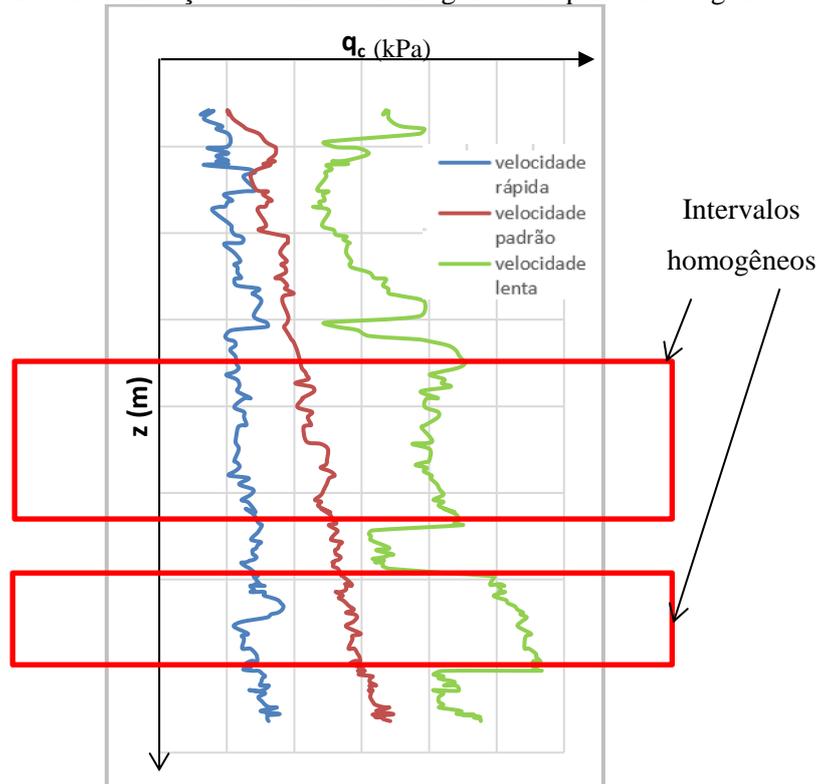
Figura 19 - Exemplo do perfil de  $q_c$  para 3 velocidades de cravação diferentes em um material homogêneo (a) e um material não homogêneo (b)



Fonte: elaborada pela autora.

Em um caso real, podem haver intervalos de profundidade nos quais as características do solo sejam semelhantes às sondagens adjacentes e outros intervalos que apresentarão pouca semelhança, não podendo a camada ser considerada como homogênea. Para um material como o da Figura 19 (b), a percepção é de que o depósito só poderá ser compreendido se diferentes camadas de materiais, com diferentes espessuras forem definidas. Sugere-se então, eliminar as camadas que visualmente indicam maior heterogeneidade, para obter-se um conjunto de dados mais representativo que o inicial. A Figura 20 indica uma subdivisão qualitativa do perfil apresentado na Figura 19 (b). O perfil por si só é bastante heterogêneo, porém, os dois intervalos destacados apresentam características mais homogêneas, podendo então serem separados para análise do efeito da velocidade.

Figura 20 - Identificação de camadas homogêneas no perfil heterogêneo



Fonte: elaborada pela autora.

### 3.2 ÍNDICE DE CLASSIFICAÇÃO $I_c$

Após a avaliação visual dos perfis, uma medida de classificação do material pode ser utilizada para confirmar ou corrigir a seleção inicial.

O índice  $I_c$  de classificação do material pode ajudar no tratamento de dados, visto que proporciona a identificação de solos com diferentes granulometrias. Nesse sentido, utilizando a classificação proposta por Jefferies e Been (2006), a presente metodologia considera uma camada como homogênea apenas se todos os pontos do intervalo apresentarem  $I_c$  dentro da mesma faixa de classificação de acordo com a Tabela 6.

Tabela 6 - Classificação de solos pelo  $I_c$

<b>Índice <math>I_c</math></b>	<b>Classificação do solo</b>
$I_c > 2,82$	Argilas
$2,82 > I_c > 1,90$	Misturas de areias
$1,90 > I_c > 1,25$	Areias
$I_c < 1,25$	Areias com pedregulhos

Fonte: Adaptado de Schnaid e Odebrecht (2012).

Sendo assim, o segundo critério para seleção de camadas homogêneas é a divisão do perfil em intervalos definidos pela classificação do material de acordo com o  $I_c$ . Visto que as características geotécnicas do solo variam muito de acordo com a classificação do solo, acredita-se que, trabalhando com um grupo no qual todos dados se enquadram numa única classificação de  $I_c$ , é possível obter resultados com menos dispersão em comparação à análise de toda a profundidade.

### 3.3 AVALIAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO E DISPERSÃO DOS DADOS: CURVAS DE FREQUÊNCIA ACUMULADA E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO

Medidas estatísticas podem ser utilizadas para resumir certas características dos dados dos ensaios. Visando uma seleção mais criteriosa, a representação gráfica da distribuição de frequência e o coeficiente de variação são utilizados como ferramenta para aplicação do terceiro critério de avaliação da variabilidade do material.

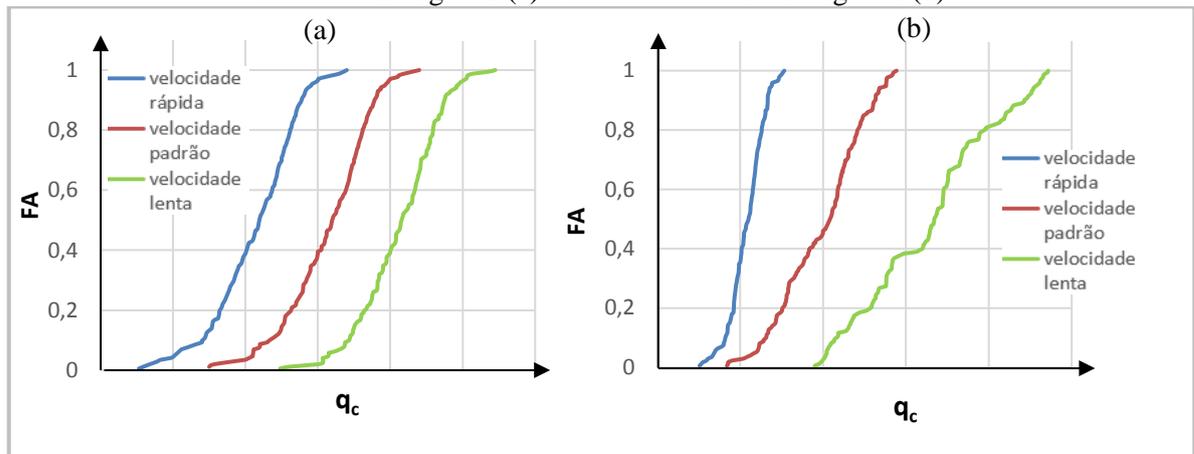
O coeficiente de variação de  $q_c$ ,  $f_s$  e  $u_2$  é usado para medir a dispersão dos dados. Quanto menor o coeficiente, menor a dispersão em torno da média. Ele é útil, pois trata-se de uma medida relativa de dispersão, já que é adimensional. Diferentemente do desvio padrão, o coeficiente de variação expressa a variabilidade dos dados excluindo a influência da ordem de grandeza dos parâmetros, possibilitando fazer comparações entre conjuntos de dados que possuem médias muito diferentes. Dessa maneira, é possível comparar a variabilidade de  $q_c$  com a variabilidade de  $f_s$ , por exemplo.

Tendo em vista a alta variabilidade que costumam apresentar os resíduos de ouro, foi definido um coeficiente de variação máximo de 30% para limitar a dispersão de dados da camada de interesse. Sugere-se que o coeficiente de variação de  $q_c$ ,  $f_s$  e  $u_2$  seja observado em todas as velocidades em que o ensaio foi executado e que sejam selecionados apenas os intervalos amostrais nos quais nenhum coeficiente de variação ultrapasse 30%. Respeitando este critério, o intervalo pode então passar pela análise das curvas de frequência acumulada, etapa final do processo da seleção de camadas.

A curva de frequência acumulada de  $q_c$ ,  $f_s$  e  $u_2$ , é a representação indicada pela metodologia para análise da distribuição dos dados. Ela serve para localizar a distribuição de frequências sobre o eixo de variação do parâmetro geotécnico. Fazendo-se comparações entre as curvas de sondagens adjacentes executadas sob diferentes velocidades de cravação, podem ser identificados os materiais mais homogêneos através das semelhanças entre as curvas.

Para ilustrar a diferença entre um material homogêneo e outro não homogêneo, vista através da distribuição de frequência acumulada, são plotadas na Figura 21 (a) e (b), as curvas de frequência acumulada referentes aos materiais anteriormente vistos na Figura 19 (a) e (b). A homogeneidade do material é vista na Figura 21 (a), onde as curvas de frequência acumulada de  $q_c$  são semelhantes e paralelas. Já na Figura 21 (b), as curvas mostram que a distribuição de dados diferentes, indicando que o material não é homogêneo.

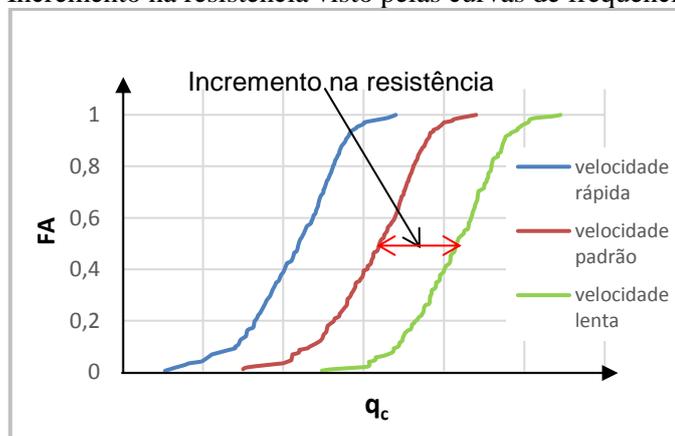
Figura 21 - Curvas de frequência acumulada de  $q_c$  para 3 velocidades de cravação diferentes em um material homogêneo (a) e um material não homogêneo (b)



Fonte: elaborada pela autora.

As curvas de frequência acumulada representam graficamente os valores máximos e mínimos dos parâmetros de interesse. Se aplicada, por exemplo, para uma análise dos efeitos de velocidade, o incremento efetivo na resistência quando o ensaio é executado nas velocidades mais baixas, pode ser obtido pela distância relativa entre as curvas. Recomenda-se que esta avaliação seja feita preferencialmente no ponto médio das curvas, conforme Figura 22.

Figura 22 - Incremento na resistência visto pelas curvas de frequência acumulada



Fonte: elaborada pela autora.

Após aplicação de todos os critérios mencionados, as camadas encontradas devem apresentar diminuição de dispersão de dados em relação ao perfil completo do ensaio. Desta maneira, poderão ser utilizadas para as análises do efeito da velocidade de penetração nas leituras do ensaio e possivelmente proporcionarão maior qualidade à definição da curva de drenagem.

## **4 LOCAL DE ESTUDO**

Este trabalho busca interpretar ensaios de campo de piezocone em resíduos de ouro. Para tornar possível esta análise, foram utilizados dados de um programa experimental de investigação realizado por Klahold em 2012, sendo o local estudado um depósito de rejeitos de mineração de ouro no Município de Barrocas, BA.

O material também foi objeto de estudos de Bedin (2006) e mais recentemente Sosnoski (2016). De posse dos dados das três campanhas de investigação, apenas uma das ilhas de investigação foi escolhida para aplicação da metodologia desenvolvida por este trabalho, com o objetivo de focar a análise na ilha mais representativa.

As sondagens realizadas por Klahold (2013) foram efetuadas com um espaçamento menor entre as ilhas de investigação que as sondagens realizadas por Bedin (2006), fator positivo e determinante para a escolha do material. Os 3 autores utilizaram velocidades diferentes da velocidade padrão para cravação do piezocone. Porém, Sosnoski utilizou valores variáveis para a velocidade lenta, o que dificulta a interpretação.

Devido aos motivos citados, optou-se por estudar os ensaios realizados por Klahold (2013). A campanha de investigação abrangeu duas ilhas de investigação, ambas localizadas em um lago de deposição que possui aproximadamente 20 metros de profundidade. O presente trabalho irá estudar os ensaios realizados no que foi chamada de ilha 01, por ser a que apresentou resultados mais homogêneos. Porém, destaca-se que para trabalhos futuros há a possibilidade para expandir a região de análise para a ilha 02 e até mesmo os ensaios dos demais autores.

Klahold (2013) realizou primeiramente o ensaio com velocidade de penetração padrão para identificação da estratigrafia do local. Após definir uma camada de solo mais homogênea para análise, ensaios com velocidade de cravação diferente da padrão foram efetuados com o objetivo de avaliar a ocorrência de drenagem parcial durante a penetração do cone e estudar os efeitos da velocidade nos ensaios.

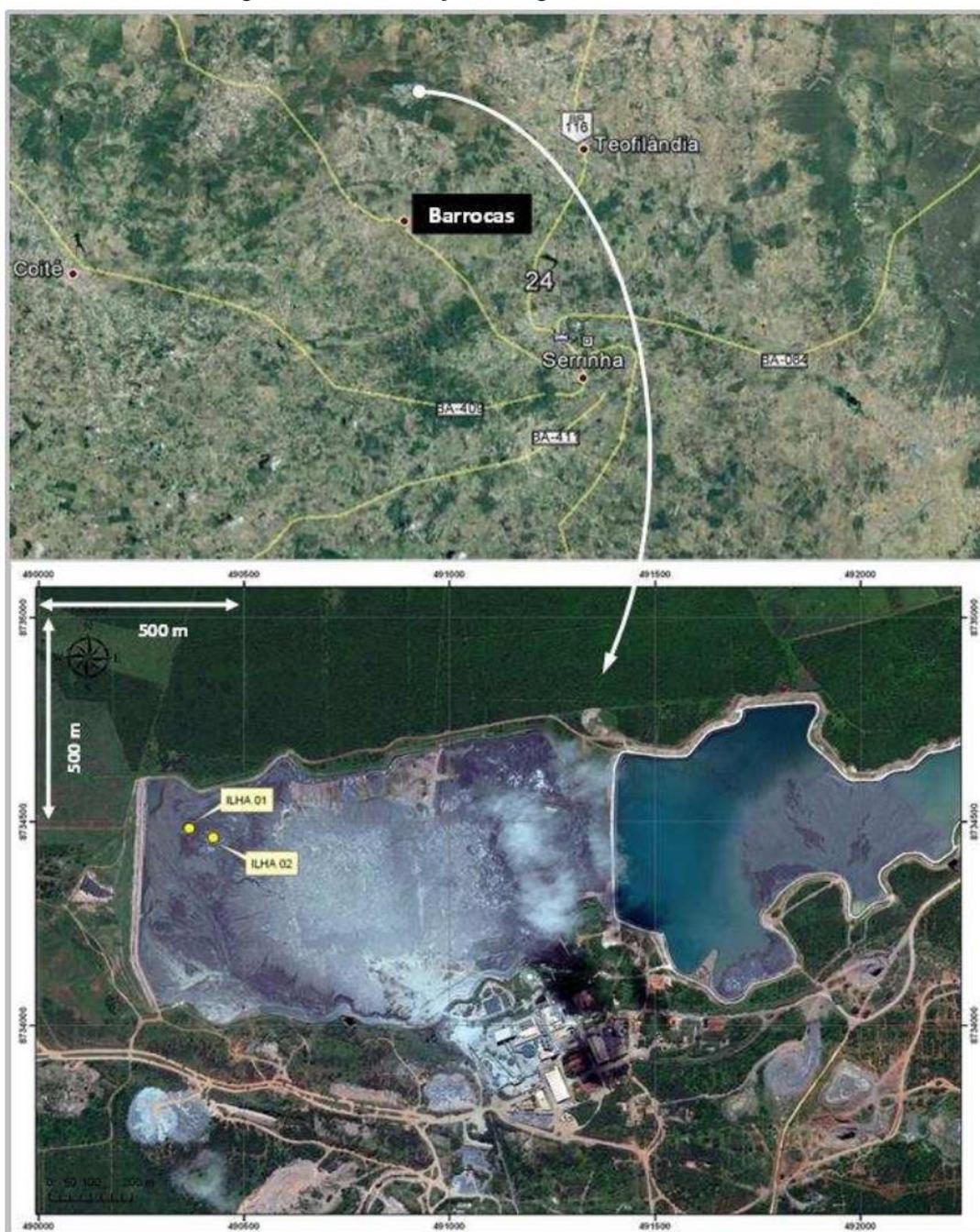
Neste capítulo será apresentada a localização das sondagens, os equipamentos e procedimentos utilizados na realização do ensaio, e resultados característicos da investigação.

### **4.1 LOCALIZAÇÃO E CARACTERÍSTICAS DO TERRENO ESTUDADO**

O lago onde são depositados os resíduos de mineração de ouro pertence a indústria Mineração Fazenda Brasileiro (MFB) está situado no município de Barrocas, BA. O local tem

vido utilizado para pesquisas desenvolvidas na Universidade Federal do Rio Grande do Sul desde 2005. A Figura 23 mostra a localização da MFB no município de Barrocas/BA, com identificação das ilhas 01 e 02 estudadas por Klahold. A Figura 24 apresenta uma foto do lago de deposição da MFB.

Figura 23 - Localização do lago de estudos da MFB



Fonte: Klahold (2013).

Figura 24 - Lago de estudos de MFB



Fonte: Sosnoski (2016).

A campanha de investigação foi realizada por Klahold (2013) num lago de deposição que possui aproximadamente 20 metros de profundidade. O presente trabalho irá estudar os ensaios realizados no que foi chamada de ilha 01. O material presente neste lago é originado da moagem dos fragmentos de rocha e é classificado como *underflow*, que, de acordo com Bedin (2010), possui granulometria siltosa.

#### 4.2 CAMPANHA DE INVESTIGAÇÃO DE KLAHOLD (2012)

Os ensaios de piezocone foram realizados no mês de agosto de 2012. Primeiramente, um ensaio em velocidade padrão foi efetuado até a profundidade de 12 metros para compreender a estratigrafia do terreno. A partir deste, Klahold identificou uma camada de material mais homogêneo para prosseguir a investigação. Nesta camada, compreendida dos 3 aos 5 metros de profundidade, foram realizados ensaios variando a velocidade entre 0,3 mm/s e 57 mm/s. Além destes, também foram realizados ensaios de dissipação a fim de determinar os coeficientes de adensamento do solo.

Para a metodologia do ensaio, foram seguidas as orientações da ABNT MB 3401 (1991), exceto pelas velocidades de penetração do ensaio rápido e lento. O equipamento utilizado possuía ponteira com ângulo de inclinação de 60° C, seção transversal de 10cm<sup>2</sup>, pedra porosa localizada na posição  $u_2$  (base da luva), área lateral da luva de atrito de 150 cm<sup>2</sup> e capacidade de carga de 10kN. Adicionalmente aos ensaios de piezocone, coletas de amostras e

ensaios de laboratório foram realizados para caracterizar teor de umidade, massa específica e peso específico dos grãos.

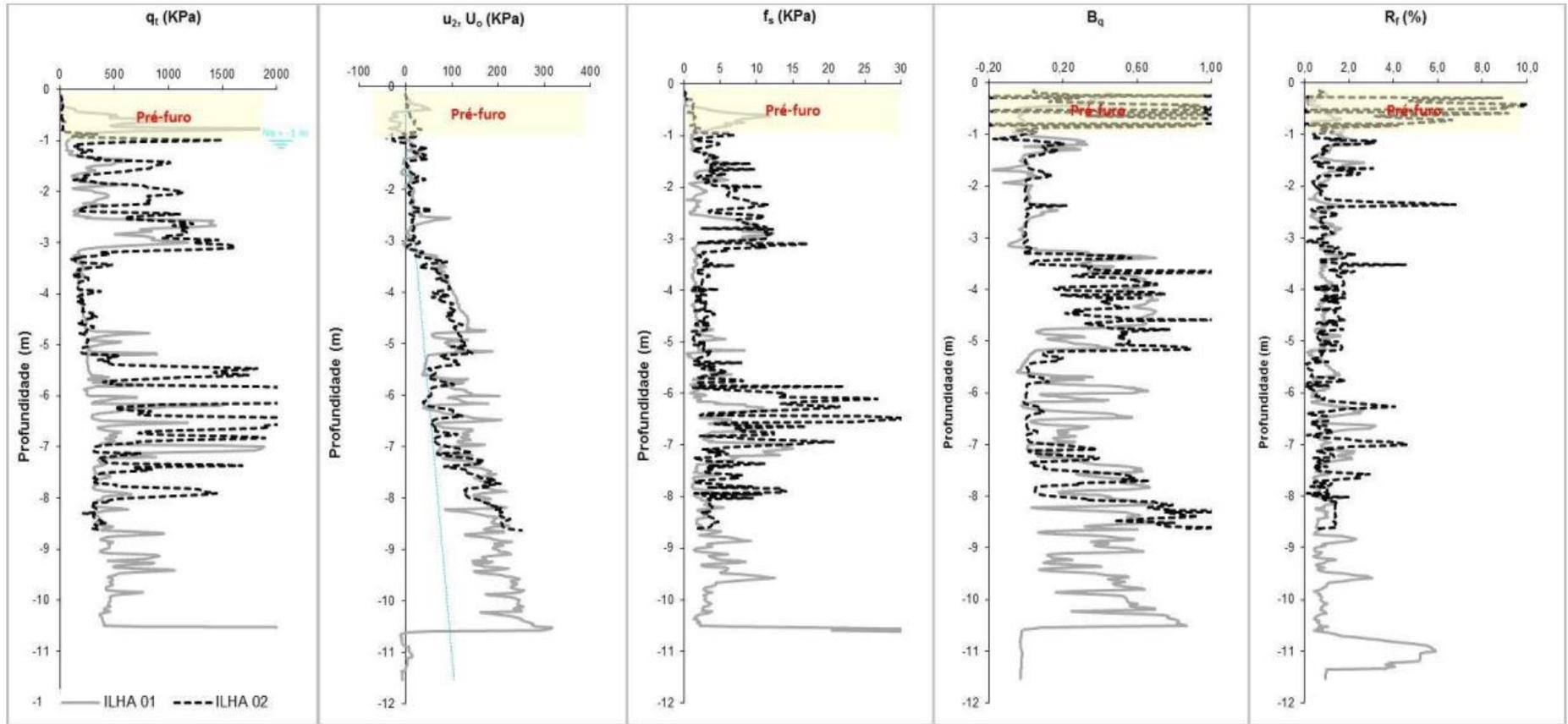
### 4.3 RESULTADOS CARACTERÍSTICOS

A seguir, apresenta-se um resumo dos principais resultados obtidos por Klahold (2013) para caracterizar o material: perfis típicos do ensaio com a profundidade, caracterização de laboratório e efeitos da velocidade observados nos ensaios.

#### 4.3.1 Perfil com a profundidade

O perfil com a profundidade obtido a partir do ensaio padrão para a ilha 01 e ilha 02 é apresentado na Figura 25. Conforme caracterização realizada pela autora, ambas as ilhas têm características semelhantes e apresentam uma camada de material (de 3 a 5 metros) que se destaca no perfil por ser mais homogênea. Em geral, o material apresenta características de argila, que se observam devido à baixa resistência, considerável geração de excesso de poropressão e valores de  $B_q$  acima de 0,5. A ilha 02 apresenta geração de poropressão relativamente menor e maiores valores de  $q_t$ , indicando ser um material mais arenoso em relação à ilha 01.

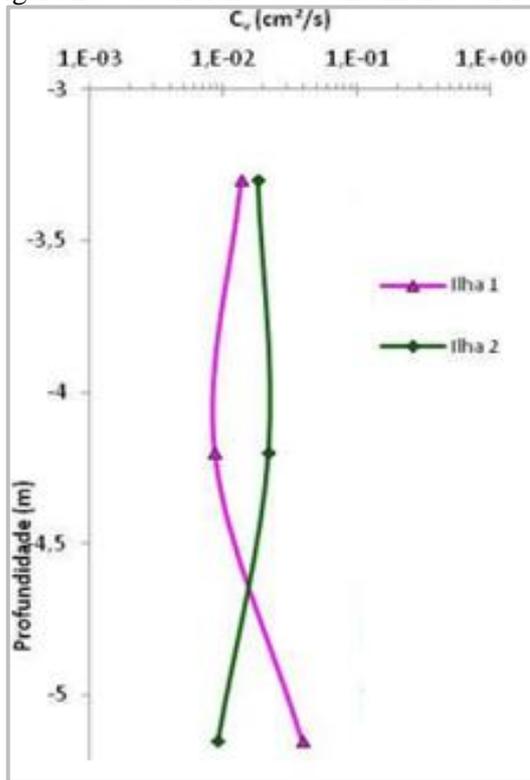
Figura 25 - Perfis característicos para Ilha 01 e Ilha 02



Fonte: Klahold (2013).

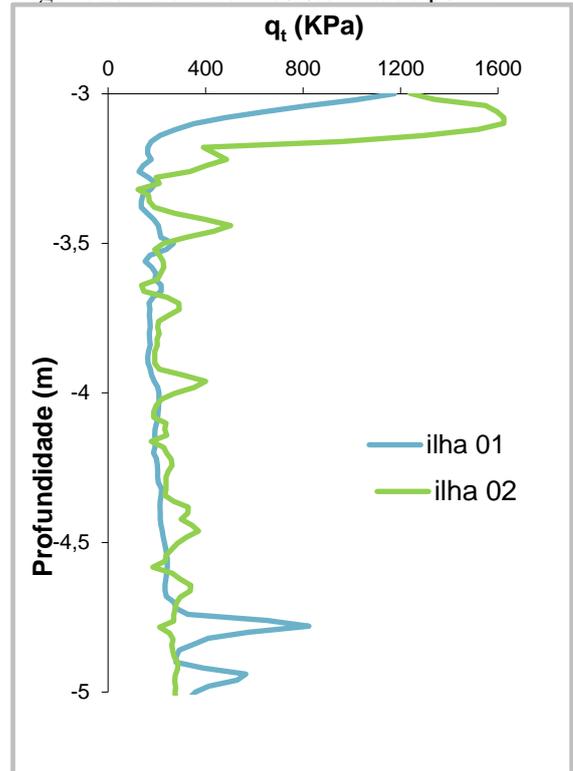
Também foram realizados ensaios de dissipação, para conhecer os coeficientes de adensamento do material. O coeficiente de adensamento vertical ( $c_v$ ) variou de  $2,19 \times 10^{-2}$  a  $9,11 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$ . A Figura 26 apresenta a variação dos valores de  $c_v$  do depósito na camada mais homogênea (de 3 a 5 metros de profundidade). O perfil da resistência de ponta para o mesmo intervalo é apresentado na Figura 27.

Figura 26 - Coeficiente de adensamento vertical



Fonte: adaptado de Klahold (2013).

Figura 27 - Perfil da resistência de ponta



Fonte: elaborada pela autora.

### 4.3.2 Caracterização de laboratório

Ensaio de laboratório foram realizados para caracterização do material, com coleta de amostras a 2 e 4 m de profundidade. Um resumo dos ensaios de caracterização e a análise granulométrica elaborados são exibidos no Quadro 2 e na Figura 28, respectivamente. Foi possível constatar que a granulometria é predominantemente silto arenosa e que a ilha 02 apresentaram um percentual maior de areia, concordando com o que já havia sido observado através dos perfis típicos de piezocone.

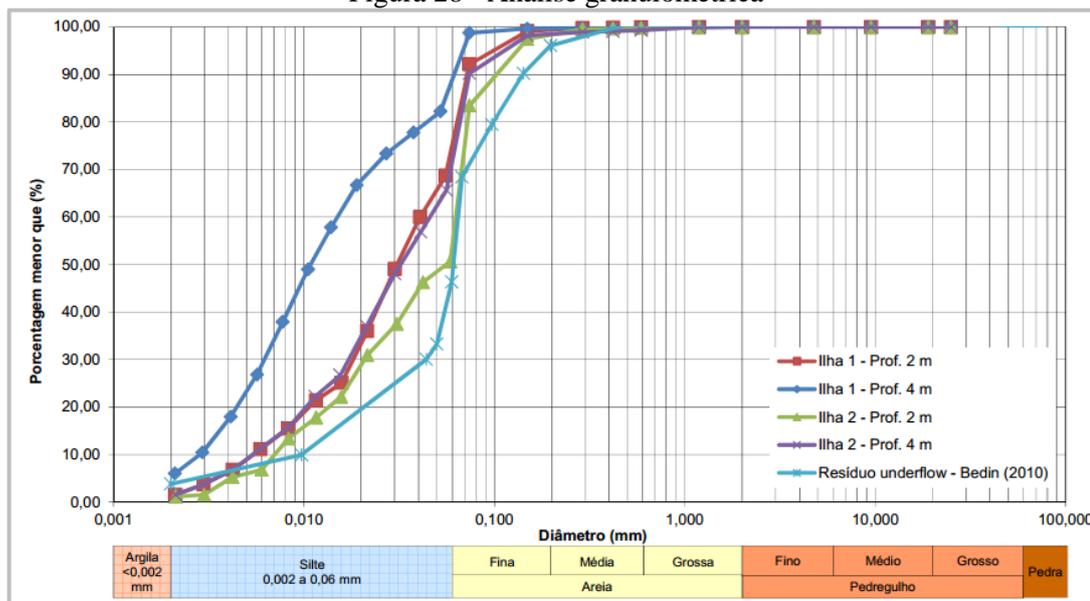
Klahold observou: que o material não apresenta coesão e é caracterizado como não plástico de acordo com os limites de Atterberg; que a umidade diminui com a profundidade e; que peso específico varia entre 18 e 19 kN/m<sup>3</sup>, sendo adotado nas análises um peso específico de 18 kN/m<sup>3</sup>.

Quadro 2 - Resumo dos ensaios de caracterização

Ensaio	Material	Prof. (m)	w (%)	$\gamma_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	e	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	LL	LP
Ilha 01	resíduo underflow	2	37,8	2,86	1,08	18,94	1,53	72,47	26,00	NL	NP
Ilha 02							1,10	51,90	47,00	NL	NP
Ilha 01		4	32,3	2,85	0,92	19,63	5,98	82,52	11,50	NL	NP
Ilha 02							1,54	69,96	28,50	NL	NP

Fonte: Klahold (2013).

Figura 28 - Análise granulométrica

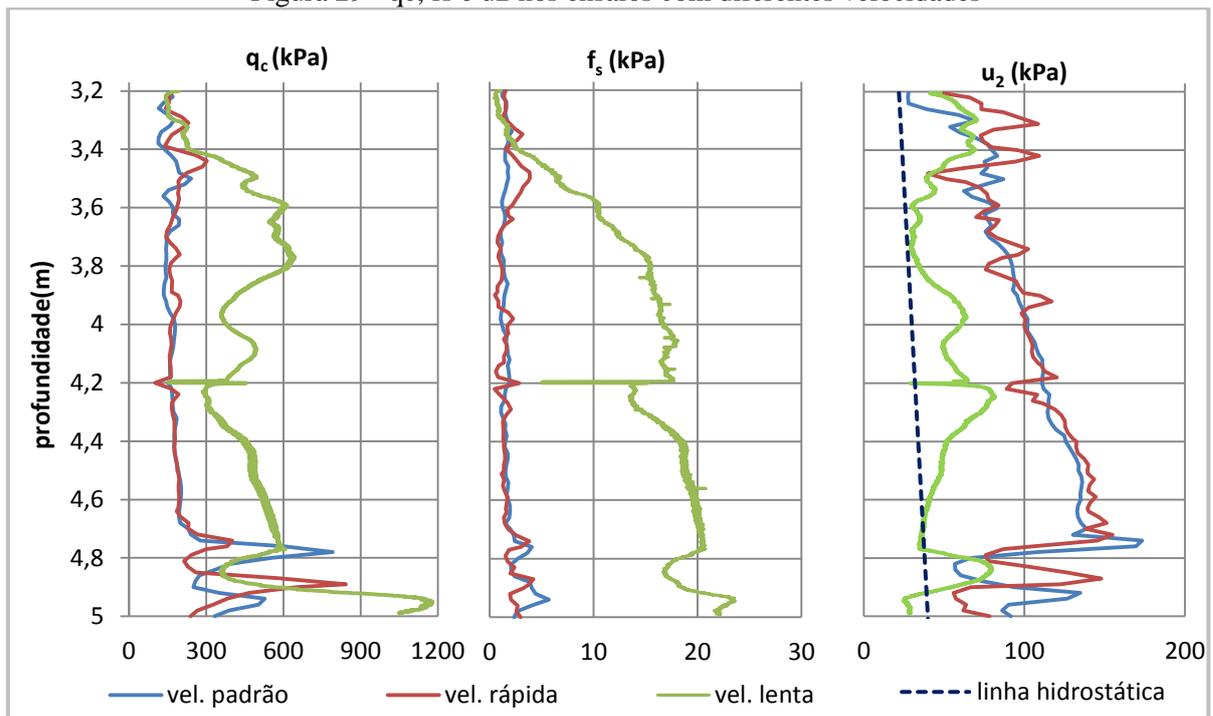


Fonte: Klahold (2013).

### 4.3.3 Efeitos da velocidade

Os perfis de  $q_c$ ,  $f_s$  e  $u_2$  referentes à ilha 01 e à profundidade de 3,2 a 5,0 metros obtidos nos ensaios executados com diferentes velocidades são plotados na Figura 29. De maneira geral é possível observar a influência da velocidade de penetração nos resultados. Para o ensaio executado na velocidade rápida (57mm/s), os valores medidos de  $q_c$ ,  $f_s$  e  $u_2$  ficaram próximos aos do ensaio executado com velocidade padrão (20mm/s), o que indica que ambos os ensaios têm comportamento em relação a drenagem semelhante (possivelmente não-drenado). Já as leituras do ensaio mais lento, mostraram valores de  $q_c$  e  $f_s$  mais elevados e valores de poropressão  $u_2$  menores, o que evidencia que o processo de dissipação é permitido quando a cravação do cone é mais lenta.

Figura 29 -  $q_c$ ,  $f_s$  e  $u_2$  nos ensaios com diferentes velocidades



Fonte: elaborada pela autora.

## 5 APLICAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO

Para aplicação da metodologia desenvolvida foram analisados os dados dos ensaios de piezocone, Ilha de Investigação 01 (Ilha 01), descritos em Klahold (2012). No presente trabalho, os resultados apresentados pela autora, referentes à profundidade de 3,20 a 5,00 metros foram definidos como referência. Neste intervalo foram executados ensaios em 3 velocidades distintas (20mm/s, 0,5 mm/s e 57 mm/s.) visando caracterizar a influência da drenagem durante a execução do ensaio. Este capítulo dedica-se à análise de variabilidade estratigráfica desta camada através da aplicação dos critérios apresentados no capítulo 3.

### 5.1 ANÁLISE QUALITATIVA VISUAL

A análise qualitativa, através da observação visual refere-se à identificação comparativa simples de semelhanças e diferenças ao longo do perfil. Neste contexto, foram analisadas distribuições ao longo da profundidade de  $q_c$  (resistência de ponta),  $f_s$  (atrito lateral) e  $u_2$  (poropressão), conforme a Figura 29 apresentada anteriormente.

Conforme descrito no capítulo 3, ao comparar o comportamento de  $q_c$ ,  $f_s$  e  $u_2$  ao longo da profundidade, em materiais homogêneos, espera-se que as curvas de diferentes velocidades sejam semelhantes entre si, estando apenas deslocadas no eixo das abscissas. Porém, nas camadas de 3,20 à 3,80 metros e 4,74 à 5,00 metros o ensaio lento apresentou um comportamento diferente dos ensaios padrão e rápido. Isso pode ser observado nos primeiros centímetros do gráfico de  $f_s$ , que se apresentou crescente no ensaio lento e relativamente constante nos demais. Além disso, a partir de 4,74m de profundidade, percebe-se que há um aumento na variabilidade dos resultados de  $q_c$  e  $u_2$ . A partir desta profundidade a curva do ensaio lento chega a interceptar as curvas do ensaio padrão e ensaio rápido. Tais diferenças sugerem que nestas profundidades os materiais encontrados em cada ensaio não são os mesmos, logo estas camadas não podem ser consideradas como homogêneas.

Assim, como primeiro passo para definição de um intervalo de dados para análise eliminou-se a parte definida como não homogênea e se prosseguiu a avaliação da estratigrafia nos ensaios entre 3,80 e 4,74 metros de profundidade.

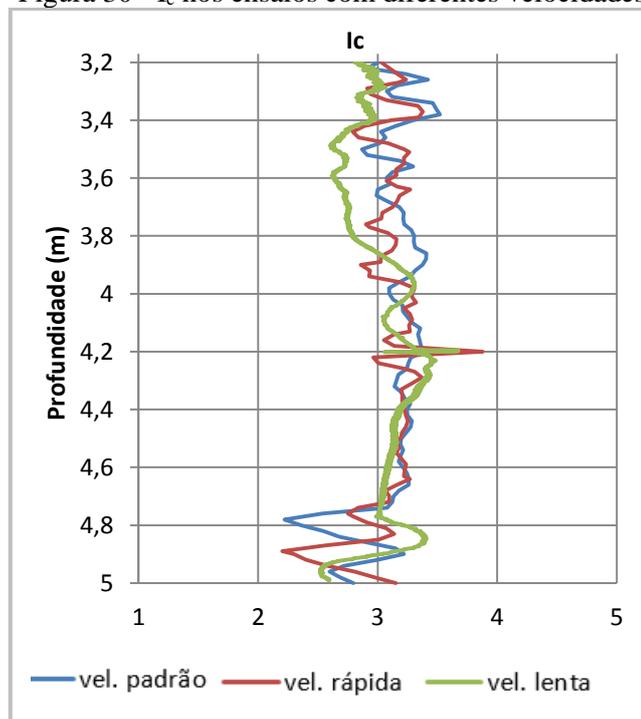
## 5.2 ÍNDICE DE CLASSIFICAÇÃO

O índice de classificação do material  $I_c$  foi analisado para identificar materiais com diferentes granulometrias, visando:

- Confirmar a homogeneidade da camada escolhida – quando todos os pontos apresentam  $I_c$  que se enquadram no mesmo tipo de material; Ou
- Verificar a necessidade de retirar do intervalo determinados pontos de leitura, podendo-se subdividir o intervalo –casos em que o intervalo apresentar valores de  $I_c$  de mais de um tipo de solo.

O perfil de  $I_c$  nos ensaios com diferentes velocidades para a camada de 3,20 m à 5,00 m é apresentado na Figura 30. A análise do índice de classificação  $I_c$ , de acordo com a classificação proposta por Jefferies e Been (2006), mostrou que o solo apresenta camadas de material fino, do tipo argilas –  $I_c > 2,82$  – e camadas com granulometria mais grossa, do tipo misturas de areias –  $2,82 > I_c > 1,90$ – que se alternam ao longo de todo o perfil estratigráfico. Para o intervalo escolhido no item 5.1 – de 3,80 à 4,74 m – todos os pontos apresentaram  $I_c$  dentro da faixa de classificação de argilas, reforçando assim a homogeneidade da camada escolhida.

Figura 30 -  $I_c$  nos ensaios com diferentes velocidades



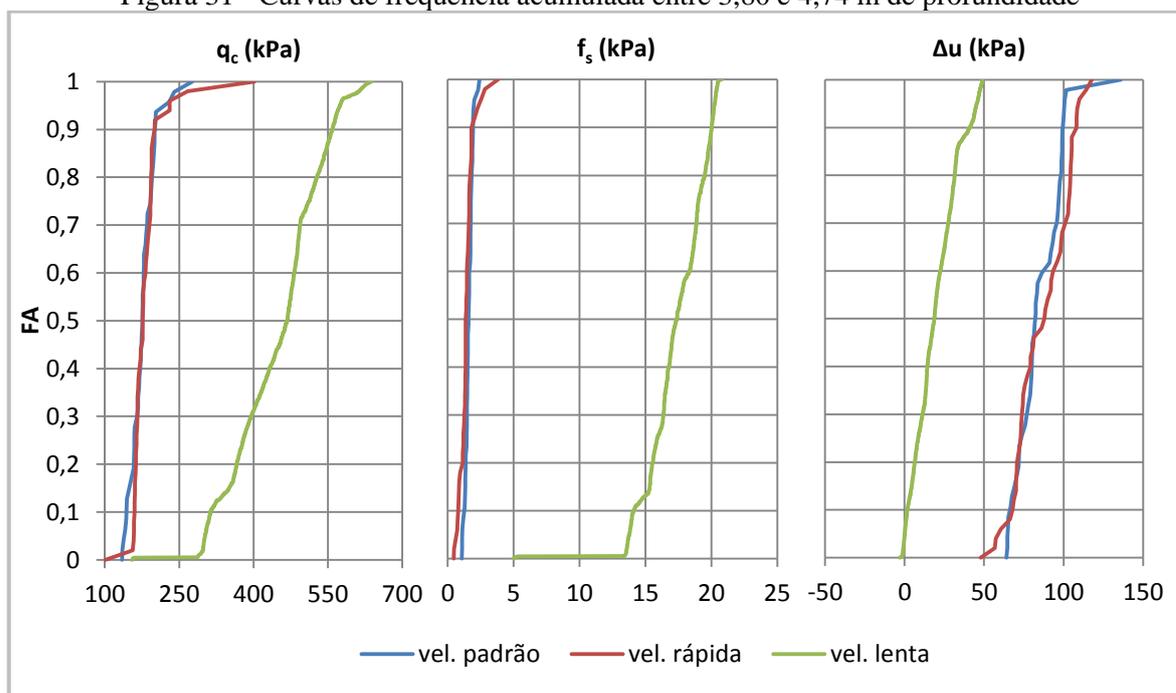
Fonte: elaborada pela autora.

### 5.3 AVALIAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO E DISPERSÃO DOS DADOS: CURVAS DE FREQUÊNCIA ACUMULADA E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO

Neste item são descritas as medidas estatísticas utilizadas para avaliar a homogeneidade dos dados: análise de distribuição de frequência e a dispersão dos resultados, conforme proposto no capítulo 3.

As curvas de frequência acumulada do intervalo de 3,80 à 4,74 m, exibidas na Figura 31, apontaram distribuição dos dados relativamente semelhantes no caso de  $f_s$  e de  $\Delta u$  ( $u_2-u_0$ ). As curvas de frequência acumulada de  $q_c$ , apresentaram maior disparidade, sendo a curva do ensaio lento mais suave que as demais, revelando que a diferença entre as medidas mínimas e máximas desta velocidade é maior que nos ensaios padrão e rápido.

Figura 31 - Curvas de frequência acumulada entre 3,80 e 4,74 m de profundidade



Fonte: elaborada pela autora.

Sequencialmente, a dispersão dos dados foi avaliada quantitativamente através do coeficiente de variação, o qual demonstrou alta heterogeneidade de dados para o intervalo de 3,80 a 4,74 m. Conforme observado na Tabela 7, o ensaio rápido apresentou valores de  $f_s$  com coeficiente de variação de 40%, e o ensaio lento, valores de  $\Delta u$  com coeficiente de variação de 68%, muito acima do limite para a camada ser aprovada no critério de coeficiente de variação (coeficiente máximo adotado 30%, segundo critério descrito no capítulo 3).

Tabela 7 - Coeficientes de variação entre 3,80 e 4,74m de profundidade

<b>Coeficientes de variação</b>			
	<b>vel. padrão</b>	<b>vel. rápida</b>	<b>vel. lenta</b>
<b>q<sub>c</sub> (kPa)</b>	15%	21%	19%
<b>f<sub>s</sub> (kPa)</b>	18%	40%	13%
<b>u<sub>2</sub> (kPa)</b>	17%	20%	68%

Fonte: elaborada pela autora.

A solução foi analisar as curvas de frequência acumulada e os coeficientes de variação para intervalos menores dentro deste espaço, até encontrar camadas que satisfizessem os critérios de homogeneidade de dados definidos pela metodologia.

A dificuldade em encontrar intervalos com coeficiente de variação máximo de 30%, levou à análise de pequenas camadas. Uma espessura mínima para as mesmas foi fixada em 14 cm para garantir um bom tamanho amostral e evitar que a análise se tornasse pontual. Uma profundidade mínima de 14 cm representa uma espessura de camada de aproximadamente quatro (4) vezes o diâmetro do cone, considerando um cone de 10cm<sup>2</sup>. Ainda, para 14 cm de espessura o número de pontos de leitura dos ensaios padrão e rápidos é de 8 (1 leitura a cada 2 cm). Para o ensaio lento o intervalo de leituras é menor (24 leituras por centímetro), o que resulta em 336 leituras para a espessura de 14cm.

Dentro das exigências descritas foram encontradas duas camadas que apresentaram boa homogeneidade: a primeira entre 3,94 e 4,10 m e outra entre 4,36 e 4,50 m de profundidade.

No intervalo de 3,94 a 4,10 m, o coeficiente de variação máximo encontrado foi de 23%, relativo aos valores de  $f_s$  com o ensaio rápido. Para o intervalo de 4,36 a 4,50 m, as poropressões do ensaio lento apresentaram o maior coeficiente de variação: 27%. Em geral, as camadas apresentaram coeficientes de variação pequenos, indicando baixa dispersão de dados, conforme pode ser observado na Tabela 8 e na Tabela 9.

Tabela 8 - Coeficientes de variação entre 3,94 e 4,10m de profundidade

<b>Coeficientes de variação</b>			
	<b>vel. padrão</b>	<b>vel. rápida</b>	<b>vel. lenta</b>
<b>q<sub>c</sub> (kPa)</b>	6%	7%	12%
<b>f<sub>s</sub> (kPa)</b>	19%	23%	3%
<b>u<sub>2</sub> (kPa)</b>	4%	3%	20%

Fonte: elaborada pela autora.

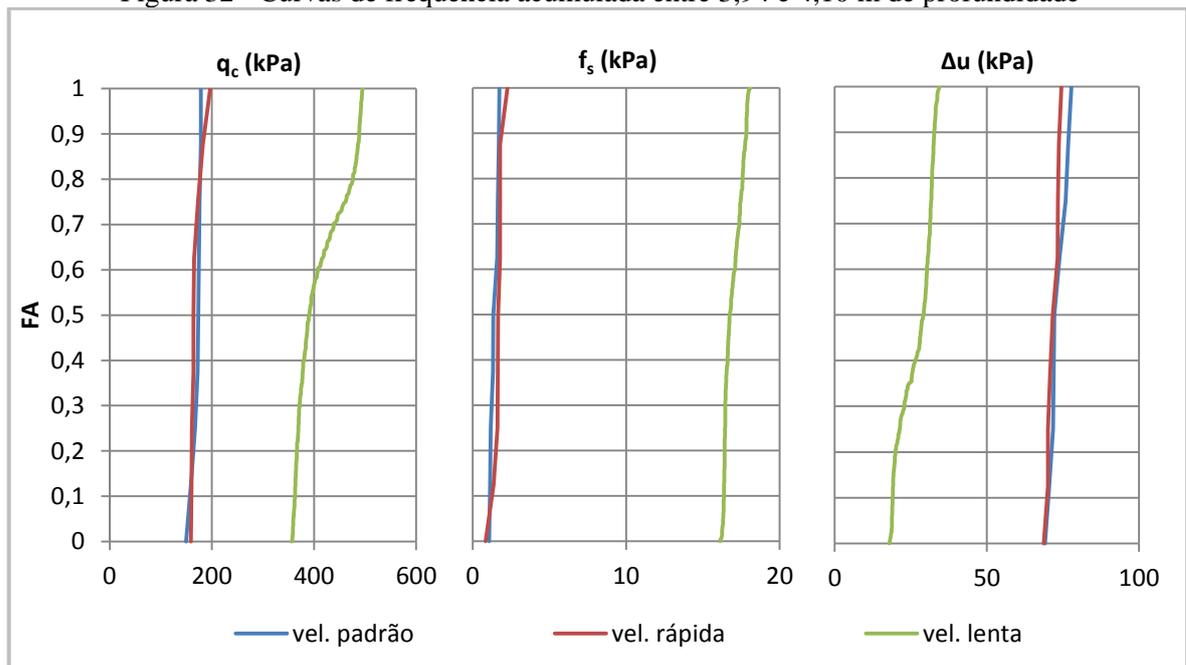
Tabela 9 - Coeficientes de variação entre 4,36 e 4,50m de profundidade

<b>Coeficientes de variação</b>			
	<b>vel. padrão</b>	<b>vel. rápida</b>	<b>vel. lenta</b>
<b>q<sub>c</sub> (kPa)</b>	3%	3%	9%
<b>f<sub>s</sub> (kPa)</b>	7%	4%	4%
<b>u<sub>2</sub> (kPa)</b>	5%	4%	27%

Fonte: elaborada pela autora.

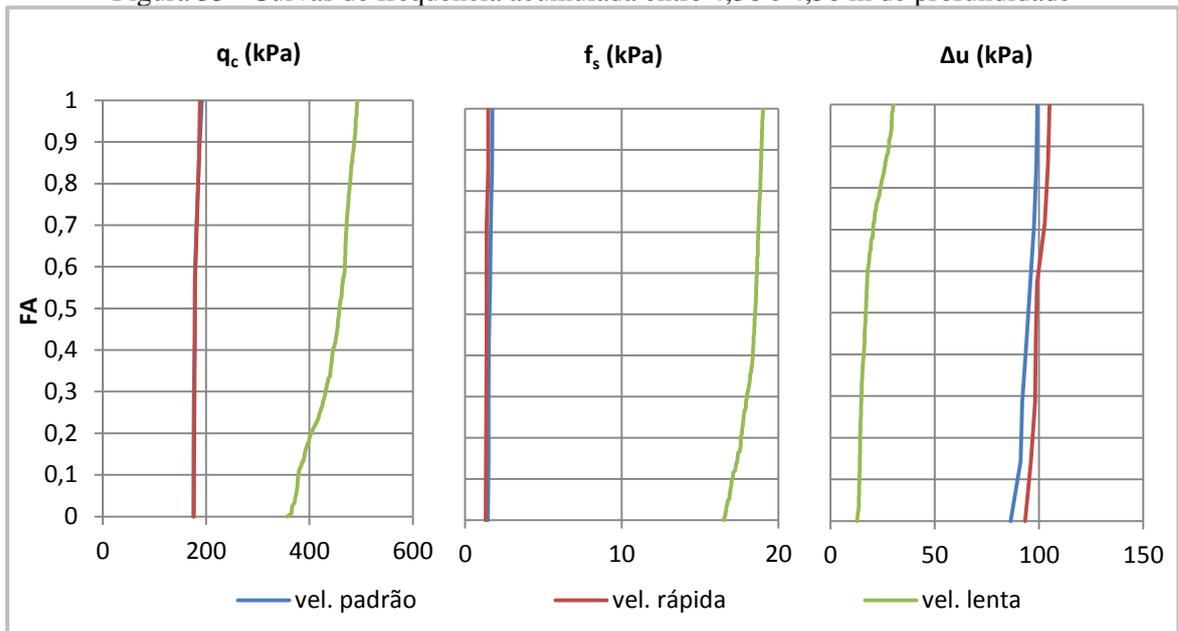
A adequada representatividade dos intervalos também pode ser visualizada através da análise das curvas de frequência acumulada apresentadas nas Figura 32 e Figura 33. A inclinação das curvas é parecida, mostrando que a distribuição de frequência nos diferentes ensaios é semelhante, validando assim a escolha das camadas sob os critérios de homogeneidade definidos pela metodologia.

Figura 32 - Curvas de frequência acumulada entre 3,94 e 4,10 m de profundidade



Fonte: elaborada pela autora.

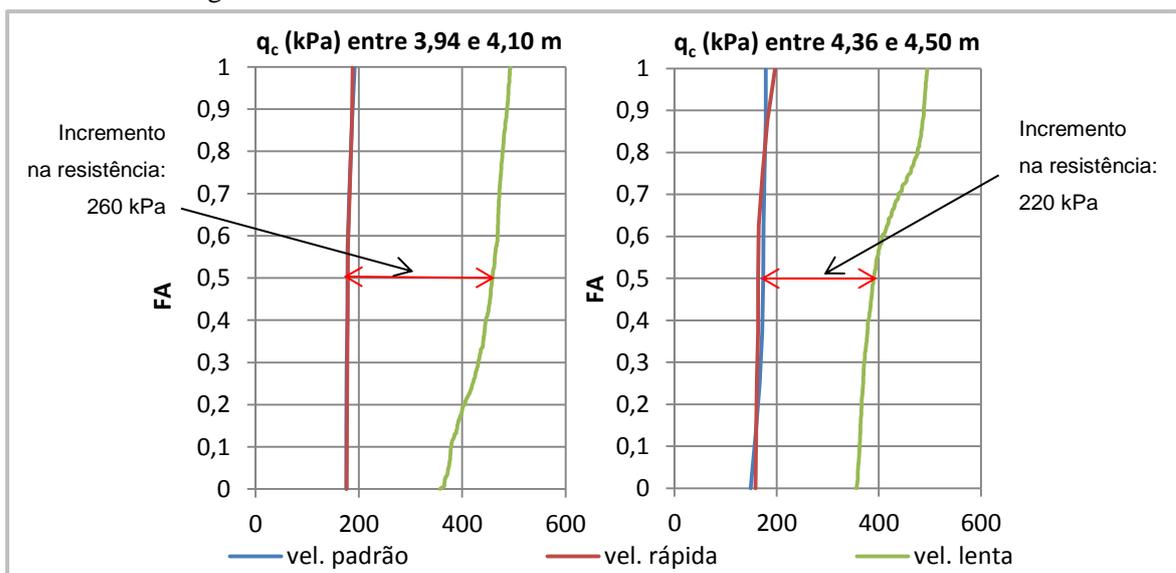
Figura 33 - Curvas de frequência acumulada entre 4,36 e 4,50 m de profundidade



Fonte: elaborada pela autora.

O incremento efetivo na resistência quando o ensaio é executado na velocidade mais baixa pode ser obtido pela distância relativa entre as curvas, no ponto médio das mesmas, conforme apresentado na Figura 34. Entre 3,94 e 4,10 m de profundidade, as curvas de frequência acumuladas indicam que a resistência aumentou de 190 kPa para 450 kPa e no intervalo de 4,36 a 4,50 m, o aumento foi de 160 kPa para 380 kPa. Esses valores representam um incremento de 2,4 vezes no valor de resistência de  $q_c$  do ensaio padrão para o ensaio lento.

Figura 34 - Incremento efetivo da resistência na velocidade mais baixa



Fonte: elaborada pela autora.

## 6 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS COM A APLICAÇÃO DO MÉTODO

O capítulo anterior dedicou-se a demonstrar como um conjunto de dados com baixa variabilidade foi identificado. O produto desta análise foi um conjunto de dados mais representativos para ser utilizado em análises do comportamento de drenagem do material. O presente capítulo irá apresentar a avaliação da curva de drenagem obtida com esses dados. Além disso, a curva de drenagem sem a aplicação da metodologia também é apresentada para comparação dos resultados e verificação da utilidade do método.

Para a análise da influência das diferentes velocidades de cravação na resistência de ponta, e nas condições de drenagem ao redor do piezocone, foram plotadas a resistência de ponta normalizada ( $Q_t$ ) e a poropressão gerada normalizada ( $\Delta u/\sigma'_v$ ) em função do fator de velocidade adimensional  $V$ .

Na obtenção de  $V$ , optou-se por utilizar os coeficientes de adensamento horizontal  $c_h$  medidos no piezocone, por se tratar de uma medida direta. O  $c_h$  normalmente adensado e o  $c_v$  foram evitados por levarem em conta correções de efeitos de pré-adensamento e de diferença de permeabilidade vertical e horizontal, que podem levar a erros na obtenção dos parâmetros. Os valores de  $c_v$  obtidos por Klahold (2013) e apresentados no item 4.3.1 foram revisados por Dienstmann et al. (2016) para obtenção de  $c_h$  do piezocone. Os referidos autores seguiram a metodologia proposta por Teh e Holsby (1991) com um Índice de Rigidez ( $Ir$ ) de 874.

Os resultados para o intervalo completo, de 3,20 a 5,00 metros de profundidade, podem ser observados na Figura 35 (a) e (b) e Figura 36 (a) e (b). A escala logarítmica é mais utilizada pela literatura e apresenta a transição entre os comportamentos de drenagem de maneira mais suave. Já na escala linear, é possível identificar que a transição aparece mais pronunciada.

As equações (16):  $Q = Q_{\min} + \left( a + (1-a) \frac{1}{\cosh(bV^c)} \right) \times (Q_{\max} - Q_{\min})$  e (17):

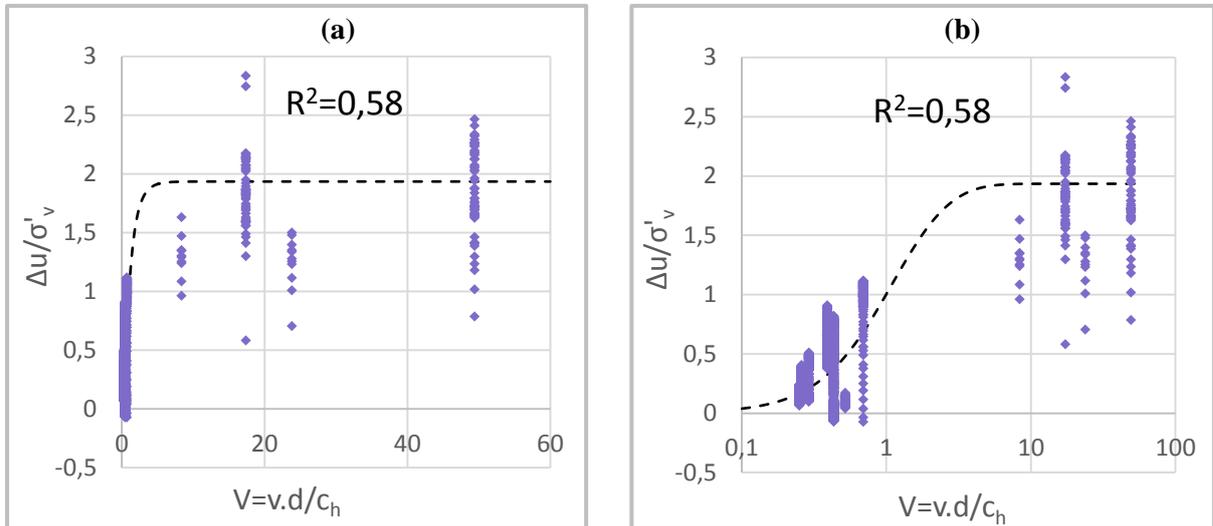
$$\frac{\Delta u}{\sigma'_{v0}} = \frac{\Delta u_{\max}}{\sigma'_{v0}} - \left( a + (1-a) \frac{1}{\cosh(bV^c)} \right) \times \left( \frac{\Delta u_{\max}}{\sigma'_{v0}} - \frac{\Delta u_{\min}}{\sigma'_{v0}} \right)$$

utilizadas por Dienstmann et al. (2016) com base na função cossenóide hiperbólica apresentada por Schnaid (2005) foram utilizadas para representar o comportamento dos pontos no espaço. Os coeficientes de ajuste adotados foram:  $a = 0,01$ ,  $b = 1,36$  e  $c = 0,83$ . Os coeficientes de ajuste adotados foram definidos visando diminuir o coeficiente de determinação  $R^2$ .

A curva de drenagem mostra o aumento da resistência e redução do excesso de poropressão com a diminuição da velocidade normalizada, porém a dispersão de dados é grande. O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) foi calculado para verificar o quão explicativa a

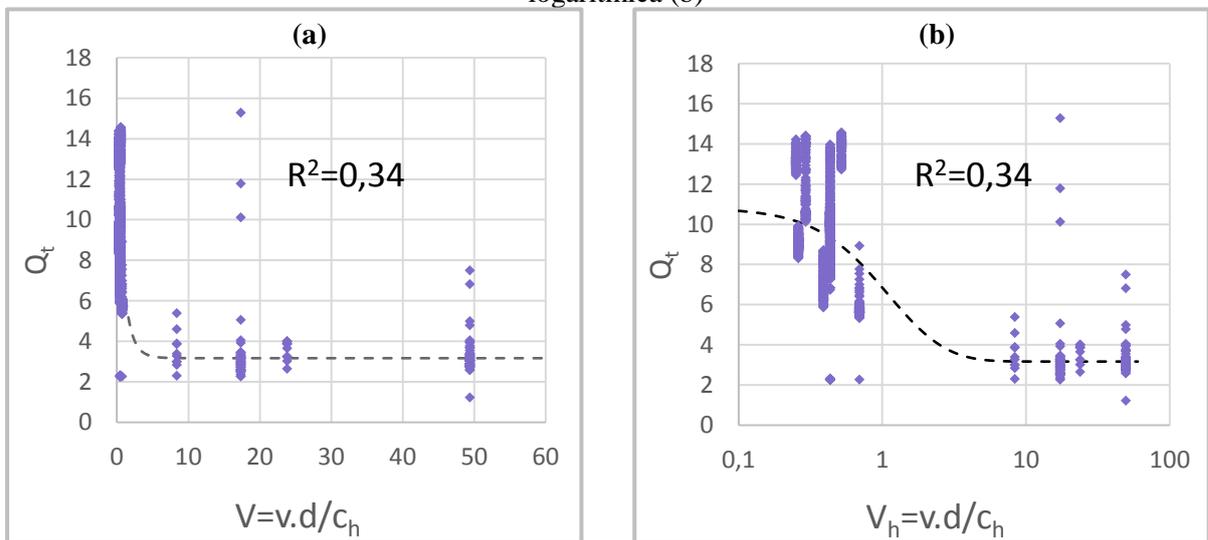
curva é em relação a amostra, obtendo-se o valor de  $R^2 = 0,58$  para a curva do excesso de poropressão normalizada e  $R^2 = 0,34$  para a curva da resistência normalizada.

Figura 35 - Efeito do fator de velocidade sobre o excesso de poropressão normalizada em escala linear (a) e logarítmica (b)



Fonte: elaborada pela autora.

Figura 36 - Efeito do fator de velocidade sobre a resistência normalizada em escala linear (a) e logarítmica (b)



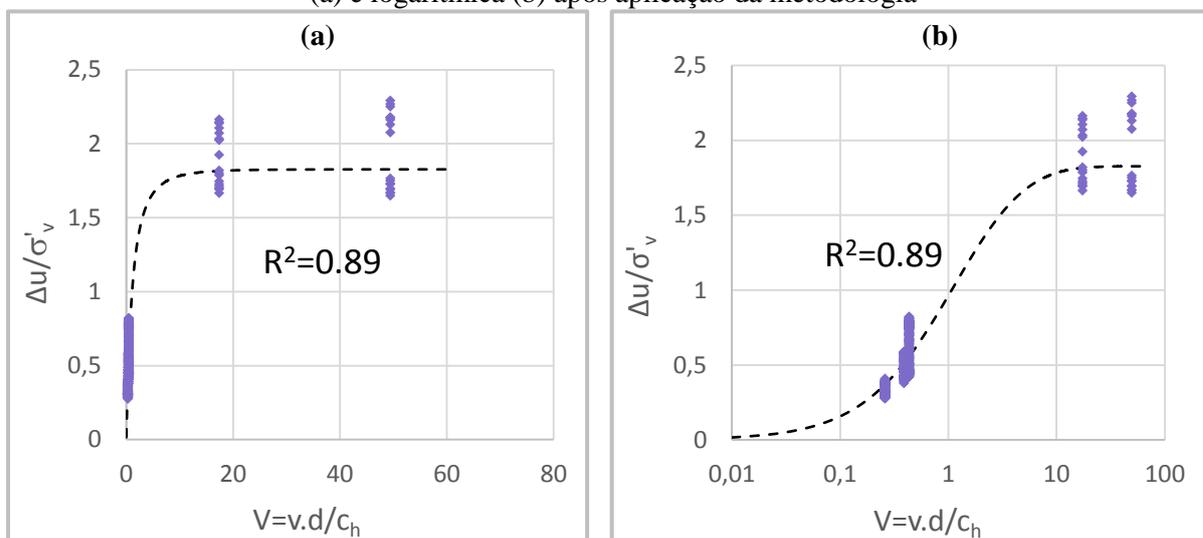
Fonte: elaborada pela autora

Por fim, nas Figura 37 (a) e (b) e Figura 38 (a) e (b), as mesmas curvas foram plotadas agora utilizando a amostra obtida com aplicação da metodologia, definida pelos dados do ensaio no intervalo de 3,94 a 4,10 metros de profundidade e 4,36 a 4,50 metros de profundidade, conforme exposto no capítulo 5. Os coeficientes de ajuste da equação cossenóide utilizados

foram:  $a = 0,01$ ,  $b = 1,38$  e  $c = 0,50$ . Os coeficientes foram determinados através de iteração para atingir um valor de  $R^2$  (coeficiente de determinação) das curvas o mais próximo possível de 1.

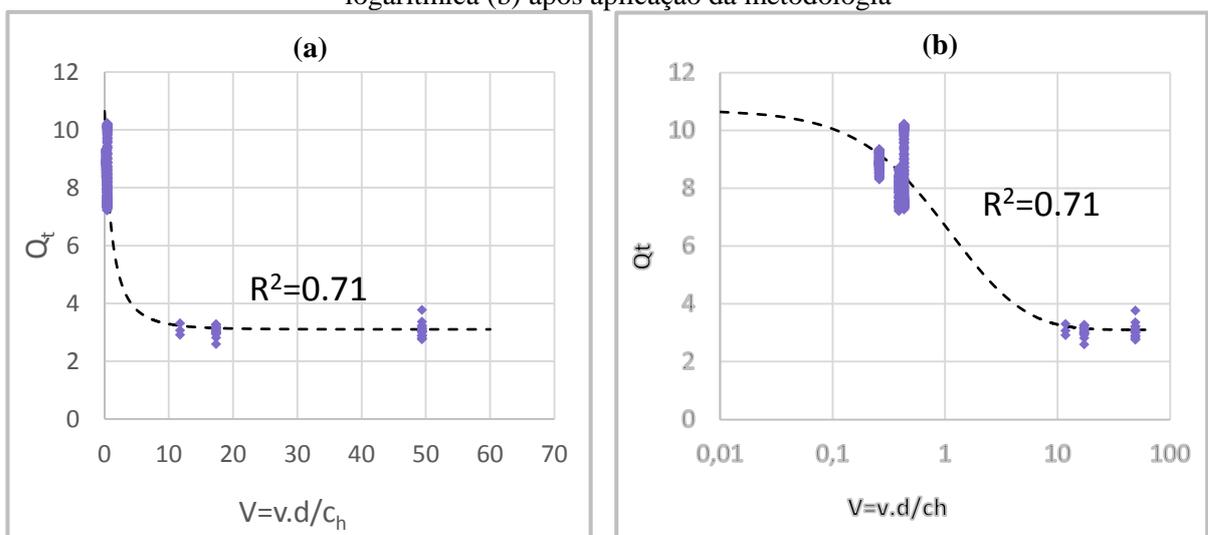
As curvas de drenagem da nova amostra apresentaram dispersão de dados visivelmente menor que as curvas anteriores. A diferença entre a qualidade das curvas fica nítida ao se observar o coeficiente de determinação das mesmas,  $R^2 = 0,89$  para a curva do excesso de poropressão normalizada e  $R^2 = 0,71$  para a curva da resistência normalizada.

Figura 37 - Efeito do fator de velocidade sobre o excesso de poropressão normalizada em escala linear (a) e logarítmica (b) após aplicação da metodologia



Fonte: elaborada pela autora.

Figura 38 - Efeito do fator de velocidade sobre a resistência normalizada em escala linear (a) e logarítmica (b) após aplicação da metodologia



Fonte: elaborada pela autora.

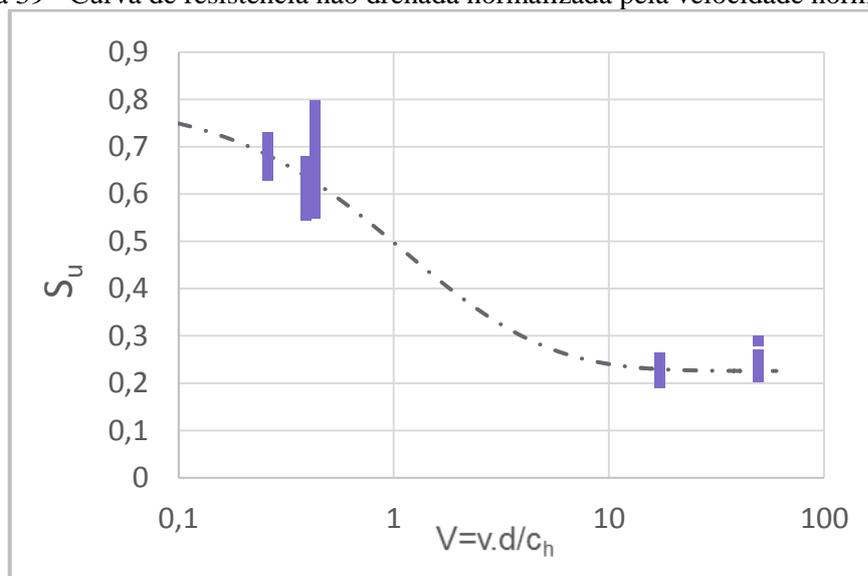
Em ambos os casos – com e sem a aplicação da metodologia - os resultados indicam que a transição de não drenado para parcialmente drenado ocorre em torno de  $V$  (velocidade normalizada) igual a 20, para o qual o excesso de poropressão normalizada está em torno de 1,8 e a resistência normalizada, 3,2. Logo, as curvas de drenagem construídas após aplicação da metodologia se mostraram úteis para confirmar a interpretação do ensaio, aumentando consideravelmente a confiabilidade graças a diminuição da dispersão de dados.

Sendo assim, a aplicação da metodologia torna a curva de drenagem para o resíduo de ouro mais representativa, conferindo maior qualidade na avaliação das condições de drenagem. Neste contexto, as curvas das Figuras 37 e 38 podem ser utilizadas como guias práticos na realização de ensaios em campo, garantindo que os ensaios sejam executados em condições não-drenadas quando  $V$  normalizado  $> 20$ . Somente nesta condição é que parâmetros geotécnicos não-drenados podem ser utilizados em projeto.

Na Figura 39 apresentam-se os valores de resistência não-drenada normalizada ( $S_u/\sigma'_v$ ) plotados em função da velocidade normalizada ( $V$ ). Os valores de  $S_u$  foram obtidos dos perfis considerando um  $N_{kt}=13$  (Klahold, 2013). Da figura 39 observa-se que quando  $V$  normalizado  $> 20$ , tem-se os valores de resistência representativos de projeto:  $S_u/\sigma'_v = 0,23$ , se aproximando do valor característico de materiais normalmente adensadas. De acordo com a literatura, valores de  $S_u/\sigma'_v$  da ordem de 0,25 são característicos de argilas normalmente adensadas (Schnaid e Odebreccht, 2012).

Ainda da Figura 39 pode-se avaliar um ganho de resistência da ordem de 2,8 vezes quando o ensaio é realizado na menor velocidade. Se parâmetros não-drenados fossem obtidos nesta velocidade e adotados em projeto com condições não-drenadas estaríamos contra a segurança.

Figura 39 - Curva de resistência não drenada normalizada pela velocidade normalizada



Fonte: elaborada pela autora.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 7.1 CONCLUSÕES

No presente trabalho foram analisados resultados de ensaios de piezocone executados em rejeitos de mineração de ouro dos depósitos da Usina Fazenda Brasileiro, localizada em Barrocas, BA. A necessidade de estudos adequados para a caracterização geotécnica deste material advém dos desafios ambientais e geotécnicos inerentes ao processo de disposição e armazenamento de rejeitos, posto que acidentes em barragens de rejeitos podem envolver grandes desastres industriais e ambientais.

As investigações geotécnicas escolhidas para análise consistiram de 3 sondagens de piezocone, realizadas em velocidades de 2cm/s, 0,05 cm/s e 5,7 cm/s. Na velocidade de penetração mais lenta, o atrito lateral e a resistência de ponta medidos são maiores, enquanto que o excesso de poropressão, menor. Entretanto, percebeu-se que a realização de uma análise segura do efeito da velocidade é dificultada pela heterogeneidade do material e alta variabilidade estratigráfica, evidenciando-se assim a necessidade de uma avaliação quantitativa. Deste modo, o objetivo principal desse trabalho foi estudar os resultados destes ensaios buscando eliminar as heterogeneidades do material para uma melhor visualização dos efeitos da velocidade de cravação do piezocone.

Realizou-se um estudo de critérios estatísticos que podem ser úteis na identificação de camadas de solo mais homogêneas e, por conseguinte, uma metodologia para análise quantitativa foi elaborada. O método consiste em realizar inicialmente uma análise qualitativa visual, seguida da separação de camadas de acordo com o índice de classificação. Na sequência, faz-se a delimitação do intervalo amostral utilizando um coeficiente de variação limite e uma avaliação das curvas de frequências acumulada.

A metodologia foi aplicada ao material escolhido para análise (ensaios realizados sob diferentes velocidades de cravação) e intervalos homogêneos foram identificados dentro de perfis heterogêneos. Em seguida, foram plotadas as curvas para observar o comportamento de drenagem do material. Os resultados obtidos seguiram a tendência esperada, indicando que a transição de não drenado para parcialmente drenado ocorre em torno de  $V$  (velocidade normalizada) igual a 20.

Tendo conhecimento do limite entre os comportamentos drenado e não drenado, fica evidente que os valores de  $S_u$  seriam superestimados caso fossem calculados a partir do ensaio de piezocone executado na velocidade padrão (que neste ensaio apresentou  $V$  normalizada de

17,32). Sendo assim, em caso de realização de novas sondagens, indica-se que ensaios futuros sejam executados com velocidade normalizada  $V > 20$  para garantir as condições não-drenadas do ensaio.

Efetuada-se a comparação entre as curvas de drenagem construídas com e sem a aplicação da metodologia, verificou-se uma diferença considerável na dispersão de dados. Tal diferença foi constatada através do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) das curvas, que após aplicação da metodologia passou de  $R^2 = 0,58$  para  $R^2 = 0,89$  na curva do excesso de poropressão normalizada pela velocidade normalizada. De tal maneira, pode-se concluir que a aplicação da metodologia torna a curva de drenagem para o resíduo de ouro mais representativa, conferindo maior qualidade na avaliação das condições de drenagem. Além disso, o tratamento estatístico também diminuiu o nível de incerteza na identificação do valor de  $V$  (velocidade normalizada) que marca a transição de não drenado para parcialmente drenado.

Embora diversas pesquisas têm sido desenvolvidas para o estudo do efeito da velocidade no ensaio de piezocone, a definição de comportamento drenado e não drenado nos ensaios em materiais com permeabilidade intermediária (solos siltosos) ainda representa um desafio para a mecânica dos solos. Nesse sentido, a aplicação da metodologia desenvolvida neste trabalho demonstrou eficiência para análise da variabilidade estratigráfica nos resíduos de mineração de ouro, aumentando a representatividade da curva de drenagem e conferindo maior qualidade na avaliação das condições de drenagem.

## 7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para futuras pesquisas, sugere-se:

- Expandir a análise aplicando a metodologia às demais ilhas de investigação executadas nos resíduos de mineração de ouro da Usina Fazenda Brasileiro (estudos de Bedin, 2010, Klahold, 2013 e Sosnoski 2016).
- Analisar ensaios de piezocone em diferentes materiais com permeabilidade intermediária, como rejeitos de outros minérios ou solos naturais siltosos. Aplicar a metodologia proposta para análise da variabilidade estratigráfica e identificar a velocidade crítica do comportamento de drenagem destes materiais;

- Realizar análises aplicando correção de profundidade entre diferentes sondagens adjacentes para que o estudo possa ser aplicado à sondagens que foram executadas com maior distanciamento entre pontos estudo.
- Aprofundar a pesquisa de ferramentas estatísticas, buscando encontrar critérios complementares para aprimorar o tratamento de dados que é sugerido neste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, C. B. “**Contribuição ao Estudo do Comportamento de Barragens de Rejeito de Mineração de Ferro**”. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2006
- BEDIN, J. **Interpretação de ensaios de piezocone em resíduos de bauxita**. 150 p. Dissertação - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2006.
- BEDIN, J. **Estudo do comportamento geomecânico de resíduos de mineração**. Tese de doutorado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2010.
- BRAGA, G. P. **Apostila de Beneficiamento I**. Centro de Ensino Técnico São Carlos. Itabirito, 2010.
- BRITO, N. A. de; CELLA, P. R. C.; FIGUEIREDO, R. P. de. **Importância da geologia de engenharia e geomecânica na mineração**. Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, v. 1, p. 123-139, 2011.
- DIENSTMANN, G. **Análise de Ensaios de Campo em Fluxo Transitório**. 2015. Tese de doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2015.
- DIENSTMANN, G; SCHNAID, F. ; MAGHOUS, S. **Cylindrical cavity expansion analysis applied to the interpretation of variable rate cone penetration in tailings**. In: 5th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization, Queensland, 2016.
- DEVORE, J. L. **Probabilidade e estatística: para engenharia e ciências**. 6ª edição: Tradução Joaquim Pinheiro Nunes da Silva. São Paulo: Cengage Learning, 2006.
- FILHO, L. H. A. **Avaliação do comportamento geotécnico de barragens de rejeitos de minério de ferro através de ensaios de piezocone** - Dissertação - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Minas, UFOP, Ouro Preto, 2004.
- GAUER, E.A. **Influência da velocidade de rotação da mini-palhetas na resistência de um solo siltoso**. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2010.
- HLENKA, L. **Estudo dos efeitos da velocidade de carregamento na estimativa de parâmetros geotécnicos em resíduos de mineração de zinco**. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2012.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração**. 1.ed. – Brasília, 2016.
- JAEGER, R.A.; DEJONG, J. T.; BOULANGER, R.W.; LOW, H.E.; RANDOLPH, M.F. **Variable penetration rate CPT in an intermediate soil**. Proc., 2<sup>nd</sup> Int. Symp. On Cone Penetration Testing, Omnipress, Madison, WI, 2010.

JEFFERIES, M.; BEEN, K. **Soil liquefaction: A critical state approach** . 1ª ed, 580 p. Oxon: Taylor & Francis, 2006.

KLAHOLD, P.A. **Interpretação de Ensaios de Campo em Solos com Permeabilidade Intermediária**. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2013.

KRAGE, K. P. **Variable Penetration Rate Cone Testing for Liquefaction Evaluation of Sands with Fines**. Master of Science in Civil and Environmental Engineering – University of California, Davis, 2012.

LUZ, A. B. da; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de minérios**. 5.ed. 932 p. Rio de Janeiro: CETEM-MCT, 2010.

LUNNE, T.; ROBERTSON, P.K. & POWELL, J.J.M. **Cone penetration testing in geotechnical practice**, Blackie Academic & Professional, 312 p, 1997.

MPF. **RECOMENDAÇÃO Nº 60/ 2016-MPF-GAB/FT**. Procuradoria da República do estado de Minas Gerais. Força Tarefa Rio Doce, 2016. Disponível em: <http://www.mpf.mp.br/mg/sala-de-imprensa/docs/recomendacao-dnpm-barragens-a-jusante>, Acesso 08 nov. 2017.

MORAIS, C. 2005 **Escalas de medida, estatística descritiva e inferência estatística**. Bragança: Escola Superior de Educação. 2005. Disponível em: <https://bibliotecadigital.ipb.pt/bitstream/10198/7325/1/estdescr.pdf>, Acesso: 10. nov. 17.

MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 2ª edição. 493 p. Rio de Janeiro: LTC Editora. 2003.

MORETTIN, P. A.; BUSSAB, W. O. – **Estatística Básica**. 6. ed. 557 p. São Paulo : Saraiva, 2010.

NIERWINSKI, H.P. **Potencial de Liquefação de Rejeitos de Mineração Estimado através de Ensaios de Campo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2013

PERES, C. A. E.; CHAVES, A.P.; LINS, F. A. F.; TOREM, M. L. **Beneficiamento de minérios de ouro**. Rio de Janeiro, 2002.

REIS, E.A.; REIS I.A. **Análise Descritiva de Dados**. Relatório Técnico do Departamento de Estatística da UFMG. Disponível em: <http://www.est.ufmg.br/portal/arquivos/rts/rte0202.pdf> . Acesso em 10 nov. 2017.

ROBERTSON, P.K. **Interpretation of cone penetration tests—a unified approach**. Canadian Geotechnical Journal, 46, p. 1337–1355, 2009.

ROMANO, F.L.; AMBROSANO, G. M. B.; MAGNANI, M. B. B. A.; NOUER, D. F. **Analysis of the coefficient of variation in shear and tensile bond strength tests**. Journal of Applied Oral Science, v. 13, n. 3, p. 243-246, Bauru , 2005.

SCHNAID, F. **In situ testing in geomechanics**. 1ª ed, v. 1. 329 p. Oxon: Taylor & Francis, 2009.

SCHNAID, F.; BEDIN, J.; COSTA FILHO, L. M. **Drainage characterization of tailings from in situ test**. Proc., 2<sup>nd</sup> Int. Symp. On Cone Penetration Testing, Omnipress, Madison, WI, 2010.

SCHNAID, F.; ODEBRECHT, E. **Ensaio de Campo e suas aplicações à Engenharia de Fundações**. 2ª edição. 224 p. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

SOSNOSKI, J. **Interpretação de Ensaio de CPTU e DMT em Solos com Permeabilidade Intermediária**. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2016.