

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**ESTUDO DOS EFEITOS DA VELOCIDADE DE
CARREGAMENTO NA ESTIMATIVA DE PARÂMETROS
GEOTÉCNICOS EM RESÍDUOS DE MINERAÇÃO DE ZINCO**

Lucas Hlenka

Porto Alegre
2012

Lucas Hlenka

**ESTUDO DOS EFEITOS DA VELOCIDADE DE
CARREGAMENTO NA ESTIMATIVA DE PARÂMETROS
GEOTÉCNICOS EM RESÍDUOS DE MINERAÇÃO DE ZINCO**

DISSERTAÇÃO APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA.

Porto Alegre

2012

CIP - Catalogação na Publicação

Hlenka, Lucas

Estudo da velocidade de carregamento na
estimativa de parâmetros geotécnicos em resíduos de
mineração de zinco / Lucas Hlenka. -- 2012.
139 f.

Orientador: Fernando Schnaid.

Coorientador: Edgar Odebrecht.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, BR-
RS, 2012.

1. Drenagem parcial. 2. Resíduo de mineração. 3.
Ensaio de campo. I. Schnaid, Fernando, orient. II.
Odebrecht, Edgar, coorient. III. Título.

LUCAS HLENKA

**ESTUDO DOS EFEITOS DA VELOCIDADE DE
CARREGAMENTO NA ESTIMATIVA DE PARÂMETROS
GEOTÉCNICOS EM RESÍDUOS DE MINERAÇÃO DE ZINCO**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, Geotecnia, e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre 2012

Fernando Schnaid

Ph.D. pela University of Oxford, UK
Orientador

Edgar Odebrecht

Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil
Co-Orientador

Luiz Carlos Pinto da Silva Filho

Ph.D. pela University of Leeds, UK
Coordenador do PPGEC

BANCA EXAMINADORA

Karla Salvagni Heineck

Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Leandro de Moura Costa Filho

Ph. D. pela Imperial College, Londres

Nilo César Consoli

Dr. pela Concordia University, Canadá

Dedico este trabalho à Camila M. Rabassa, minha
companhia nestes anos de mestrado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que tornou possível esta jornada.

À minha família e a todos aqueles que indiretamente tornaram possível a realização desta dissertação.

À Geoforma Engenharia Ltda. pela oportunidade de participar de diversas obras, entre elas, a que forneceu os dados para a presente pesquisa, pela disponibilidade de sua equipe, estrutura e equipamentos.

À Votorantim Metais Zinco – Juiz de Fora por permitir a utilização e divulgação dos resultados.

Ao amigo Fernando Maria Mántaras que incentivou e despertou o interesse pela Geotecnia, demonstrando grande conhecimento técnico e facilidade na solução de problemas. Sinto profunda admiração pela simplicidade em todos os momentos e pela generosidade em dividir o conhecimento.

Ao Dr. Fernando Schnaid pelos ensinamentos e principalmente pela paciência durante a orientação da presente pesquisa.

Ao Dr. Edgar Odebrecht pelos ensinamentos e inúmeras contribuições a esta pesquisa, pelas oportunidades, pela amizade e principalmente pelo exemplo de profissional e como pessoa.

Aos colegas e amigos de mestrado que fizeram parte desta etapa presentes nos momentos de estudos, trabalhos em equipe e também de descontração, principalmente Jorge Hernán Flores, Marcelo Júlio Langone, André Bock e Jonatan Jung.

Aos membros da banca Nilo César Consoli, Karla Savagni Heineck e Leandro de Moura Costa Filho que aceitaram gentilmente o convite.

À Emanuele Gauer e ao Leandro de Moura Costa Filho pelo envio de suas pesquisas e materiais importantes para esta dissertação.

À Capes pelo suporte financeiro, sem o qual este trabalho não poderia ter sido realizado.

À incansável e paciente corretora de português, Camila.

“Aprender é a única coisa de que a mente nunca se cansa,
nunca tem medo e nunca se arrepende.”

Leonardo da Vinci

RESUMO

HLENKA, L. Estudo dos Efeitos da Velocidade de Carregamento na Estimativa de Parâmetros Geotécnicos em Resíduos de Mineração de Zinco. 2012. 139 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Elemento estratégico na inserção de um país no contexto do desenvolvimento tecnológico e no cenário econômico internacional a indústria de mineração, que envolve a extração e o processamento de minério, resulta na geração de elevadas quantidades de resíduos, cuja disposição gera impacto e risco ambiental. Neste sentido, a presente pesquisa é um estudo de investigação geotécnica em uma área de disposição de resíduos de mineração de zinco, com o objetivo de caracterizar adequadamente o rejeito evitando os riscos de acidentes e impactos ambientais. A área de disposição em estudo resulta do processo de mineração do zinco da Votorantim Metais e Zinco, localizada em Juiz de Fora – MG, na qual os resíduos foram lançados em uma barragem por via úmida, em forma de lama. Os ensaios foram realizados em três ilhas de investigação (PZC01, PZC02 e PZC03), nas quais foram realizados ensaios de palheta (*vane test*), piezocone (CPTU), cone sísmico (SCPTU) e coleta de amostras para ensaios de laboratório. A campanha teve como objetivo avaliar principalmente a influência da velocidade de carregamento na estimativa dos parâmetros geotécnicos a partir dos ensaios de campo, e para isso foram empregadas distintas velocidades de rotação no ensaio de palheta e de cravação do piezocone. Complementarmente foi analisada a influência da velocidade em argilas, ensaios nos quais os efeitos viscosos são predominantes. Com isto é possível buscar uma análise integrada para avaliar a ocorrência de drenagem parcial durante os ensaios combinada, se necessário, aos efeitos viscosos. Nestas análises são usados resultados de trabalhos anteriores (i. e. BLIGHT, 1968 e BISCONTIN & PESTANA, 1999), estabelecendo-se uma metodologia para interpretação de ensaios de campo em resíduos de mineração de zinco.

Palavras-chave: *Resíduos de mineração; Drenagem parcial; Efeitos viscosos; Ensaios de campo.*

ABSTRACT

HLENKA, L. A Study of Rate Effects on the Prediction of Geotechnical Parameters of Zinc Tailings. 2012. 139 p. MSc Thesis – Graduation Program in Civil Engineering, UFRGS, Porto Alegre.

Strategic to a nation's development and essential to its recognition as an economical international player, the mining industry comprises the extraction and processing of minerals and produces, as a consequence, large amounts of tailings that represent important environmental risks and impacts. The present research focus on the study of zinc tailings and attempts to contribute in a general understanding of tailings behavior to allow reliable engineering design of tailing deposits to reduce the risk of failure and contamination. This goal has been achieved throughout a study of a large zinc tailing deposit from Votorantim Metais e Zinco, at Juiz de Fora, in the state of MG, Brazil. In this area, tailings are deposited as slurry. The study of this material has been made by carrying out vane tests, piezocone tests (CPTU) and seismic cone tests (SCPTU), as well as by collecting disturbed samples for laboratory investigation. The site investigation comprises three investigation positions (PZC01, PZC02 e PZC03), selected to give a representative evaluation of the area and its variations. Tests were performed to investigate rate effects and its implications on the prediction of soil properties assessed from testing data. Different penetration and rotation rates have been selected to allow data to be gathered over a range of testing rates, which allows both partial drainage and viscous effects to be evaluated. These effects have been analyzed in an integrated framework given raise to an interpretation method that allows in situ testing results to be interpreted and soil parameters to be estimated. Other published information has been used for comparison (i. e. BLIGHT, 1968 e BISCONTIN & PESTANA, 1999). The work offers a solid base for guidance the interpretation of in situ tests in zinc tailings.

Key-words: *Mineral Tailings; Partial drainage; Viscous effect; In situ tests.*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	20
1.1 MINERAÇÃO DE ZINCO.....	20
1.2 OBJETIVOS	21
1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	22
2 RESÍDUO DE MINERAÇÃO DE ZINCO.....	24
2.1 SISTEMAS DE DISPOSIÇÃO	26
2.2 CARACTERIZAÇÃO BÁSICA DO RESÍDUO DE ZINCO.....	30
2.2.1 Análise Granulométrica	30
2.2.2 Ensaio de Adensamento	33
2.2.3 Microanálise Química Elementar.....	33
3 ENSAIOS DE CAMPO.....	35
3.1 ENSAIO DE PALHETA	35
3.1.1 Cálculo da Resistência ao Cisalhamento não Drenada.....	39
3.1.2 Influência da Velocidade nos Ensaios de Palheta.....	41
3.2 ENSAIO DE PIEZOCONE	48
3.2.1 Classificação do Solo a partir do Ensaio de Cone	51
3.2.2 Estimativa dos Parâmetros Geotécnicos com base nos Ensaios de Cone.....	53
3.2.3 Cone Sísmico (SCPT)	55
3.2.4 Influência da Velocidade nos Ensaios de Piezocone.....	57
3.3 EFEITOS VISCOSOS DURANTE A REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS... ..	61
4 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DE ESTUDOS	64
4.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO	68
4.1.1 Peso Específico Natural	68
4.1.2 Teor de Umidade.....	72
4.1.3 Análise Granulométrica	73
4.1.4 Densidade dos grãos.....	78
4.1.5 Limites de Consistência	78

4.2	ENSAIO DE ADENSAMENTO	80
4.2.1	Parâmetros de adensamento do resíduo de zinco.....	81
4.3	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)	83
4.3.1	Preparação das Amostras	83
4.3.2	Difratograma	86
5	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CAMPO	88
5.1	ADAPTAÇÕES AO EQUIPAMENTO DE <i>VANE TEST</i>	88
5.2	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE PALHETA	89
5.2.1	Ensaio de palheta BR 448.....	101
5.3	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE PIEZOCONE	106
6	ANÁLISE DOS RESULTADOS (INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE)124	
6.1	ARGILA BR 448	124
6.2	RESÍDUO DE MINERAÇÃO DE ZINCO (SILTE)	126
6.3	ARGILA E SILTE: ANÁLISE INTEGRADA.....	130
7	CONCLUSÕES	132
	REFERÊNCIAS	135

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma geral das etapas do processo de produção de zinco eletrolítico da Votorantim.	25
Figura 2: Esquema de geração de resíduos de zinco (ABREU, 2009).	27
Figura 3: Métodos construtivos de barragens de resíduos (a) Alçamento para jusante; (b) Alçamento pela linha de centro; (c) Alçamento para montante (PEREIRA, 2005).	28
Figura 4: Sistemas de disposição de resíduos por via úmida (MENDES, 2007).	29
Figura 5: Ciclo total de lançamento de resíduos em superfície (VILLAR, 2002).	31
Figura 6: Curvas granulométricas de resíduos (lama vermelha) (CAMPOS, 1986).	32
Figura 7: Curvas granulométricas de resíduos (ABRÃO, 1987 <i>apud</i> BEDIN, 2006).	32
Figura 8: Equipamento para ensaio de palheta <i>in situ</i> - Tipo A (ORTIGÃO & COLLET, 1988).	38
Figura 9: Etapas do ensaio de palheta.	39
Figura 10: Curva de drenagem dos ensaios de Vane em resíduo de ouro e fertilizantes (BLIGHT, 1968).	44
Figura 11: Geometria típica CPT e CPTU e posições de leitura de poropressões.	49
Figura 12: Correções aplicadas às medidas de ensaios de piezocone. (SCHNAID, 2000).....	50
Figura 13: Classificação do solo (ROBERTSON, 1990).	52
Figura 14: Exemplo de geração de onda cisalhante.	56
Figura 15: Resultados do ensaio de cone sísmico.	56
Figura 16: Condições de drenagem nos ensaios de piezocone (BEDIN, 2006).	60
Figura 17: Curvas de drenagem de diferentes materiais (GAUER, 2010).	61
Figura 18: Tipos de contatos no solo (MARTINS, 1992).	62
Figura 19: Localização da campanha de ensaios (Barragem dos Peixes).	64
Figura 20: Localização dos ensaios, Barragem dos Peixes.	65
Figura 21: Barragem no início de operação, Votorantim Metais e Zinco - Juiz de Fora - MG, 2009.	66
Figura 22: Barragem dos Peixes Votorantim Metais e Zinco - Juiz de Fora - MG.....	67
Figura 23: Caminho executado para acesso a Estação PZC01.	67

Figura 24: Esquema de locação dos ensaios.....	68
Figura 25: Coleta de amostras de Resíduo de Zinco (Amostrador <i>Shelby</i>).....	70
Figura 26: Peso específico do material ao longo da profundidade.....	72
Figura 27: Resultados dos ensaios de determinação do teor de umidade.....	73
Figura 28: Curvas granulométricas Estação PZC01.....	74
Figura 29: Curvas granulométricas Estação PZC02.....	74
Figura 30: Curvas granulométricas Estação PZC03.....	75
Figura 31: Resultados do ensaio de granulometria a laser.	77
Figura 32: Densidade dos grãos (G).	78
Figura 33: Resultados dos ensaios de adensamento.	80
Figura 34: Coeficientes de adensamento ensaio convencional.	81
Figura 35: Parâmetros de adensamento Estação PZC 03.	82
Figura 36: Parâmetros de adensamento Estação PZC 02.	82
Figura 37: Parâmetros de adensamento Estação PZC 01.	82
Figura 38: Porta amostras “ <i>stubs</i> ” utilizados nos ensaios.....	84
Figura 39: Imagens ampliadas das formas e agrupações do resíduo de zinco.	85
Figura 40: Resultado dos ensaios difratométricos.....	86
Figura 41: Amostra de resíduo após a secagem em estufa.....	87
Figura 42: Sistema de Cravação Leve – Geofoma SCL 50 kN.....	88
Figura 43: Detalhes das adaptações ao equipamento de ensaio.	89
Figura 44: Correção inicial dos ensaios de palheta.	90
Figura 45: Ensaio de palheta Estação PZC01 profundidade 2 m.....	91
Figura 46: Ensaio de palheta Estação PZC01 profundidade 4 m.....	92
Figura 47: Ensaio de palheta Estação PZC01 profundidade 6 m.....	92
Figura 48: Ensaio de palheta Estação PZC01 profundidade 8 m.	93
Figura 49: Ensaio de palheta Estação PZC01 profundidade 10 m.	93
Figura 50: Ensaio de palheta Estação PZC01 profundidade 11 m.	94

Figura 51: Ensaio de palheta Estação PZC02 profundidade 2 m.....	94
Figura 52: Ensaio de palheta Estação PZC02 profundidade 4 m.....	95
Figura 53: Ensaio de palheta Estação PZC02 profundidade 6 m.....	95
Figura 54: Ensaio de palheta Estação PZC02 profundidade 8 m.	96
Figura 55: Ensaio de palheta Estação PZC02 profundidade 10 m.	96
Figura 56: Ensaio de palheta Estação PZC03 profundidade 2 m.....	97
Figura 57: Ensaio de palheta Estação PZC03 profundidade 4 m.....	97
Figura 58: Ensaio de palheta Estação PZC03 profundidade 6 m.....	98
Figura 59: Ensaio de palheta Estação PZC03 profundidade 8 m.	98
Figura 60: Ensaio de palheta Estação PZC03 profundidade 10 m.	99
Figura 61: Ensaio de palheta Estação PZC03 profundidade 11 m.	99
Figura 62: Resultados dos ensaios de palheta.	100
Figura 63: Valores de rotação na ruptura com as diferentes velocidades do ensaio de palheta.	101
Figura 64: Esquema dos ensaios de palheta BR 448, Est. 11+900.....	102
Figura 65: Localização dos ensaios.	102
Figura 66: Resultados dos ensaios de palheta argila BR-448 prof. 5 m.....	103
Figura 67: Resultados dos ensaios de palheta argila BR-448 prof. 6 m.....	103
Figura 68: Resultados dos ensaios de palheta argila BR-448 prof. 7 m.....	104
Figura 69: Valores de rotação na ruptura com as diferentes velocidades do ensaio de palheta na argila BR-448.....	105
Figura 70: Comparação dos coeficientes de adensamento determinados em laboratório e campo (CPTU).....	108
Figura 71: Variação de Nkt com a variação da taxa de rotação do vane.....	109
Figura 72: Valores de condutividade hidráulica de resíduos de mineração (BEDIN, 2006).	110
Figura 73: Resultados dos ensaios de piezocone velocidade padrão estação PZC01.	111
Figura 74: Resultados dos ensaios de piezocone velocidade padrão PZC02.	112
Figura 75: Resultados dos ensaios de piezocone velocidade padrão estação PZC03.	113

Figura 76: Superposição dos ensaios de piezocone Estação PZC 01.....	114
Figura 77: Superposição dos resultados de piezocone Estação PZC02.	115
Figura 78: Superposição dos resultados de piezocone Estação PZC03.	116
Figura 79: Superposição dos resultados todas as Estações.	117
Figura 80: Resultados ensaios de cone sísmico, cálculo de S_u , e sistema de classificação SBT da estação PZC01.....	118
Figura 81: Resultados ensaios de cone sísmico, cálculo de S_u , e sistema de classificação SBT da estação PZC02.....	119
Figura 82: Resultados ensaios de cone sísmico, cálculo de S_u , e sistema de classificação SBT da estação PZC03.....	120
Figura 83: Resultados das argilas em função da velocidade periférica.....	125
Figura 84: Resultados das argilas em função da velocidade adimensional.....	125
Figura 85: Resultados do resíduo em função da velocidade periférica.	128
Figura 86: Resultados do resíduo em função da velocidade normalizada.....	128
Figura 87: Resultados do resíduo de zinco ensaio de palheta e piezocone.	129
Figura 88: Resultados do resíduo conforme Blight, 1968.....	130
Figura 89: Resultados da argila e silte em função da velocidade normalizada.....	131

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tipo de comportamento do solo normalizado (SBTn) (ROBERTSON, 1990).....	52
Tabela 2: Pesos Específicos na Estação PZC01.	70
Tabela 3: Pesos Específicos na Estação PZC02.	71
Tabela 4: Pesos Específicos na Estação PZC03.	71
Tabela 5: Comparação percentual dos ensaios de granulometria.	75
Tabela 6: Percentual de material nos ensaios de granulometria a laser.	77
Tabela 7: Limites de Consistência.	79
Tabela 8: Índices de Compressibilidade.	81
Tabela 9: Composição química do resíduo de zinco.	86
Tabela 10: Valores de S_u , S_u residual e sensibilidade.	106
Tabela 11: Sensibilidade de argila (SKEMPTON & NORTHEY, 1952 <i>apud</i> SCHNAID, 2000).	107
Tabela 12: Comparação dos resultados Estação PZC01.	121
Tabela 13: Resultados do ensaio de cone Estação PZC02.	122
Tabela 14: Comparação dos resultados de piezocone Estação PZC03.	123
Tabela 15: Faixa de valores dos parâmetros do solo (BISCONTIN & PESTANA, 2001).	127

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CPT	<i>Cone Penetration Test</i> (Ensaio de cone)
CPTU	Ensaio de Piezocone
CRD	<i>Constant Rate of Displacement</i>
EDS ou EDX	<i>Energy Dispersive x-ray Spectrometer</i>
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
IHM	Integração Homem Máquina
LEGG	Laboratório de Engenharia Geotécnica e Geo-ambiental
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
NA	Nível d'água
NBR	Norma Brasileira
OCR	<i>Over Consolidation Ratio</i> (Razão de pré-adensamento)
prof.	Professor
prof ^a .	Professora
PUC/Rio	Pontifca Universidade Católica do Rio de Janeiro
RLE	<i>Roasting-Leaching-Electrolysis</i>
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
WDS	<i>Wave Dispersive x-ray Spectrometer</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

ϕ'	Ângulo de atrito efetivo
σ_i	Tensão confinante
σ'_{vo}	Tensão efetiva vertical
σ'_h	Tensão horizontal
σ'_v	Tensão vertical
γ_w	Peso específico da água
γ_n	Peso específico natural
γ_d	Peso específico seco
μ	Coefficiente de Poisson
a_v	Coefficiente de compressibilidade
As	Arsênio
B_q	Coefficiente de poropressão
Cd	Cádmio
Cu	Cobre
Co	Cobalto
c'	Coesão efetiva
C_c	Índice de compressão
C_d	Índice de descarga
c_h	Coefficiente de adensamento horizontal
c_v	Coefficiente de adensamento vertical
d	Diâmetro da sonda piezométrica
D	Diâmetro da palheta
Dr	Densidade relativa
E	Módulo de deformabilidade ou de Young
e	Índice de vazios natural

f_s	Atrito lateral
G	Densidade dos grãos
Ge	Germânio
I_r	Índice de rigidez
IP	Índice de Plasticidade
k	Coefficiente de condutividade hidráulica
k_h	Coefficiente de condutividade hidráulica horizontal
k_v	Coefficiente de condutividade hidráulica vertical
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
M	Módulo de deformação confinado ou oedométrico
Ni	Níquel
p_a	Pressão atmosférica
Pb	Chumbo
Q_t	Parâmetro de classificação dos solos de ROBERTSON (1990)
q_c	Resistência de ponta
q_t	Resistência de ponta corrigida
r	Raio do piezocone
R_f	Razão de atrito
Sb	Antimônio
S_u	Resistência ao cisalhamento não drenada
S	Grau de saturação
t	Tempo de dissipação das poro pressões
T^*	Fator tempo (calculado de c_v)
T	Fator tempo
t_{50}	Tempo de dissipação correspondente a 50 % do adensamento
u	Porosidade

U	Grau de drenagem
u_0	Pressão hidrostática
u_1	Porosidade medida na ponta do cone
u_2	Porosidade medida na base do cone
u_3	Porosidade medida na parte superior da luva
v	Velocidade de cravação
V	Velocidade adimensional
w	Teor de umidade
Zn	Zinco
ZnS	Sulfeto de Zinco

1 INTRODUÇÃO

1.1 MINERAÇÃO DE ZINCO

A indústria de mineração, que compreende o conjunto de processos relacionados à exploração de recursos minerais do solo e do subsolo, constitui elemento estratégico na inserção de um país no contexto do desenvolvimento tecnológico e no cenário econômico internacional. O objetivo final da mineração é extrair, produzir e vender um bem mineral, de viés econômico e potencialmente interessante ao mercado consumidor, em condições técnicas e econômicas adequadas e sem impactos sócio-ambientais incompatíveis. Nesta temática sócio-ambiental, estão hoje os maiores desafios de implantação e desenvolvimento criterioso da indústria de mineração.

Segundo o IBRAM (Instituto Brasileiro de Mineração) o Brasil é o décimo segundo maior produtor de Minério de Zinco, em 2010 representando 2,4% da produção mundial que foi de 12,0 milhões de toneladas, com a maioria de suas reservas, cerca de 90%, localizadas no estado de Minas Gerais.

A utilização do Zinco é relevante no processo de galvanização, na proteção de peças metálicas contra a corrosão, principalmente o aço, utilizado também como matéria-prima para ligas metálicas, em pigmentos, pilhas secas entre outros, tornando-o um dos metais não ferrosos mais consumidos no mundo. A variação de utilização do Zinco gera uma grande demanda de produção e, associadas a esta, estão os subprodutos dos processos de beneficiamento e de concentração de minérios em instalações industriais, denominados de resíduos ou rejeitos.

Os resíduos de mineração apresentam características específicas, variáveis em função da natureza do minério bruto e dos processos de tratamento aplicados. Os rejeitos são comumente lançados diretamente em reservatórios contidos por diques para disposição dos resíduos em superfície. O lançamento também é realizado através da construção de áreas de resíduos por alteamentos sucessivos.

O processo de lançamento e disposição dos resíduos influencia diretamente nas características físicas do material, como por exemplo, o processo de segregação hidráulica, selecionando partículas por tamanho e por densidade que induz um efeito direto na distribuição granulométrica dos resíduos. É necessário, que a determinação das características físicas e geomecânicas do material estejam associadas diretamente a estas especificidades dos sistemas de disposição de resíduos, pois definem as propriedades dos materiais e, por consequência, os parâmetros geotécnicos dos rejeitos de mineração.

A caracterização dos resíduos pode ser estabelecida por meio de ensaios de laboratório, a partir de amostras representativas coletadas nas fases de geração ou disposição final destes materiais, e/ou por meio de ensaios “*in situ*”, com medidas diretas do parâmetro de referência ou através de correlações.

As características e propriedades dos rejeitos (condutividade hidráulica, compressibilidade e resistência), assim como suas modificações com o tempo, são fatores determinantes no projeto e ampliação de estruturas de contenção. Incertezas associadas à determinação dos parâmetros de comportamento geotécnico dos materiais podem ocasionar a ruptura de barragens de contenção de resíduos que, na maioria dos casos, em virtude da descarga descontrolada de substâncias, representa um perigo iminente para o meio ambiente e à vida humana.

1.2 OBJETIVOS

O conhecimento do comportamento geotécnico dos resíduos de mineração constitui um elemento fundamental para evitar riscos associados à eventual ruptura das estruturas de contenção de rejeitos. Neste contexto esta pesquisa tem como principal objetivo determinar, a partir do conjunto de ensaios realizados em campo e laboratório, as características físicas e geomecânicas de um resíduo de zinco. Ênfase é dada a avaliação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento determinados pelos ensaios de campo, empregando distintas velocidades, para possibilitar a identificação das condições de drenagem e, por consequência, a correta representação do comportamento dos resíduos. Estes fundamentos são necessários na definição de modelos geomecânicos utilizados no projeto de áreas de disposição do rejeito, barragens ou diques de contenção e reabilitação de áreas de deposição.

A pesquisa envolve caracterizar o material e avaliar o comportamento geotécnico, expresso principalmente através da resistência ao cisalhamento não-drenada (S_u), que geralmente é determinada “*in situ*” a partir de ensaios de piezocone (CPTU) e ensaios de palheta (*Vane test*) empregando a velocidade normatizada para todos os tipos de solo. Porém, devido às características de condutividade hidráulica dos resíduos de mineração de zinco, material predominantemente siltoso, a pesquisa teve os seguintes objetivos específicos:

- a) Analisar a influência da velocidade dos ensaios de palheta na determinação resistência ao cisalhamento não drenada (S_u);
- b) Analisar a influência da velocidade dos ensaios de CPTU nos parâmetros de resistência;
- c) Interpretar os resultados considerando a influência do grau de drenagem imposto ao material durante a realização dos ensaios;
- d) Apresentar recomendações de projeto no que se refere à interpretação de ensaios de campo em resíduos de mineração, visando dar maior precisão e confiabilidade aos parâmetros geotécnicos estimados a partir destes ensaios.

A área de estudos corresponde a uma barragem de rejeitos do processo de mineração de Zinco, do complexo industrial da Votorantim Metais e Zinco - Unidade Juiz de Fora – MG, onde foram realizados ensaios de piezocone com diferentes velocidades de cravação e ensaios de dissipação, ensaios de palheta com velocidades distintas de rotação, cone sísmico e coleta de amostras para ensaios de laboratório.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação está organizada em 7 capítulos, iniciando com uma breve exposição sobre a mineração de zinco, os objetivos e etapas da pesquisa, com a justificativa para seu desenvolvimento.

No Capítulo 2 é abordado o processo de produção do zinco, os métodos de disposição de resíduos de mineração, e sua caracterização básica.

No Capítulo 3 é apresentada uma revisão bibliográfica dos ensaios de campo realizados na presente pesquisa, os fatores que interferem nos resultados e os principais trabalhos a respeito da influência da velocidade de carregamento na determinação dos parâmetros geotécnicos.

O Capítulo 4 tem por objetivo a caracterização do local das investigações geotécnicas e as características básicas do resíduo de mineração de zinco, tais como a granulometria, o peso específico e microanálise química elementar.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados dos ensaios de campo, e as principais observações nos resultados a diferentes velocidades.

O Capítulo 6 tem o objetivo de interpretar os resultados e apresentar recomendações gerais necessárias à interpretação de ensaios de campo em solos siltsos, de permeabilidade intermediária. Por fim, são apresentadas as conclusões no Capítulo 7.

2 RESÍDUO DE MINERAÇÃO DE ZINCO

O primeiro processo desenvolvido para a produção de zinco metálico consistia em aquecer o minério ou concentrado em atmosfera inerte, a uma temperatura suficiente para promover a volatilização do zinco, que em seguida era condensado e posteriormente fundido (“retortagem”). Este processo foi empregado até meados de 1915 quando surgiu o processo “Eletrolítico” (hidrometalúrgico), empregado atualmente em praticamente todas as refinarias no mundo (PEREIRA, 2006). O processo “Eletrolítico” consiste na obtenção do zinco metálico pela imposição de uma corrente elétrica através de eletrodos mergulhados em uma solução rica em zinco, o qual é empregado no processo da empresa Votorantim Metais Zinco, de onde provêm os resíduos analisados. Neste processo são utilizados dois tipos de concentrados como fonte de matéria prima, esquematicamente representado na Figura 1.

A rota típica de processamento hidrometalúrgico de zinco, denominado RLE (*Roasting-Leaching-Electrolysis*) envolve a ustulação¹ do concentrado, seguida de lixiviação neutra, lixiviação ácida (ocasionalmente super ácida quente), purificação do licor de lixiviação (precipitação do ferro (Fe) que arrastam as impurezas arsênio (As), germânio (Ge) e antimônio (Sb) e purificação/cementação² de cádmio (Cd), cobre (Cu), chumbo (Pb), níquel (Ni), cobalto (Co)) e recuperação eletrolítica de zinco (FEIJÓ, 2007).

Os concentrados de zinco, silicatado e sulfetado, são tratados separadamente adequando-os para as etapas seguintes, que são as mesmas para ambos a partir da lixiviação. O zinco, cujo principal mineral é a esfarelita (sulfeto de zinco), extraído pelo circuito sulfetado, baseia-se na transformação do mineral portador de zinco em óxido, solubilizado em uma solução de ácido sulfúrico. Esta etapa é implementada devido à baixa solubilidade do sulfeto de zinco nesta solução. Na sequência, como o licor obtido contém outros elementos solubilizados, se faz necessária uma segunda etapa, sendo esta de purificação/cementação, realizada através de sucessivas precipitações seletivas de compostos contendo as espécies impurificadoras. Após

¹ Ustulação: processo utilizado para expelir uma substância de outra por aquecimento.

² Cementação: Redução de íons aquosos do metal de valor pela oxidação de um metal redutor por meio de uma reação química. Utilizado tanto na produção quanto na separação do material.

as respectivas filtragens, obtém-se a solução rica em zinco, a qual é submetida à eletrólise em que o metal é obtido no cátodo (BROCCHI, 2010).

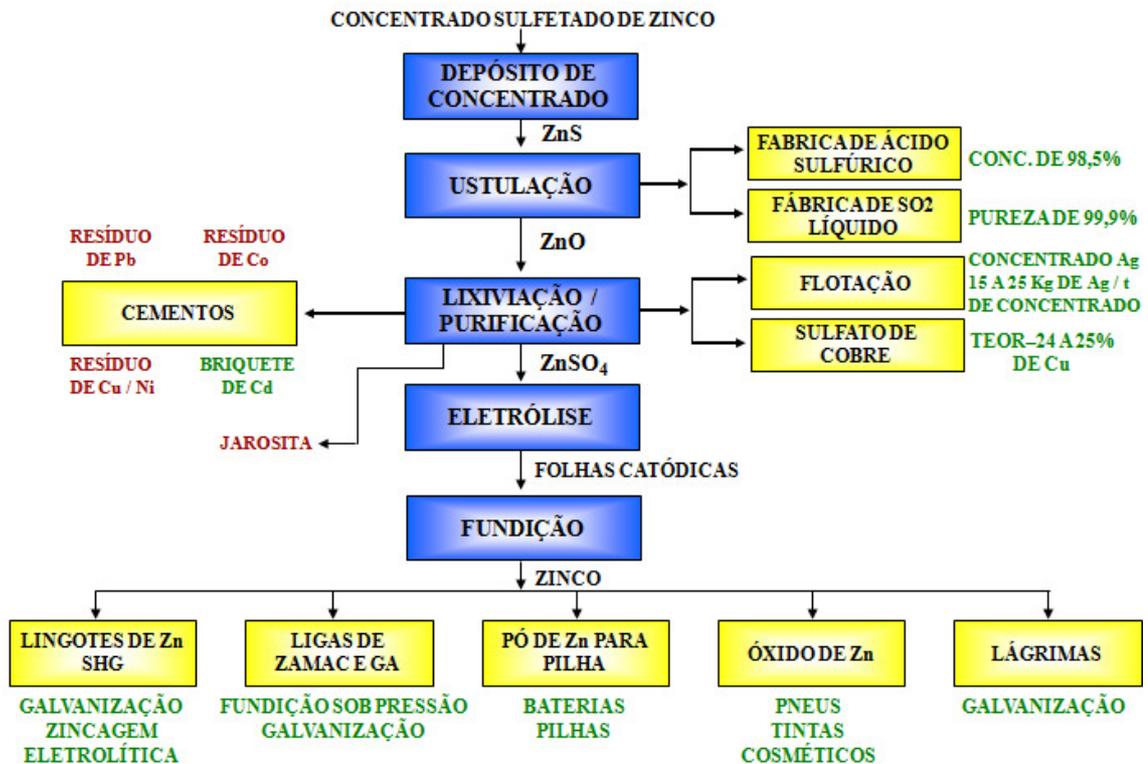


Figura 1: Fluxograma geral das etapas do processo de produção de zinco eletrolítico da Votorantim.

O tratamento do mineral sulfetado inicia com a ustulação do concentrado a fim de eliminar o enxofre contido na matéria prima. O processo é realizado a temperaturas entre 900 e 950° C o qual converte o sulfeto de zinco (ZnS) em um óxido de zinco impuro (ZnO). O dióxido de enxofre que é gerado neste estágio é recuperado e convertido em ácido sulfúrico, que será utilizado na etapa de lixiviação, o qual é convertido para a forma gasosa em uma torre de conversão. O gás reagirá com a água de diluição do ácido para formar o ácido concentrado. O ustulado é resfriado, moído e encaminhado para a lixiviação (SOUZA, 2005).

No circuito silicatado o minério é concentrado via flotação, passando pelo primeiro estágio de processamento, a moagem. O concentrado é moído com solução pobre em zinco (30-50 g/l) produzida no setor de filtração, após lavagem dos resíduos de lixiviação. A polpa resultante é bombeada para a etapa de Tratamento de Magnésio, no qual o magnésio presente na forma de carbonato é solubilizado. Este tratamento é realizado via autoclave e, além de solubilizar o magnésio, tem a função de recuperar o zinco contido na solução. Nesta etapa, parte do zinco

juntamente com o zinco presente na solução, precipita sob a forma de sulfato, mantendo o magnésio em solução e encerra quando a concentração de zinco atingir valores menores ou iguais a 10 g/l. A polpa com teor de magnésio em torno de 1,5 % é filtrada e a pasta retida pelo processo é enviada para a lixiviação (ABREU, 2009).

Ao término da etapa de tratamento de magnésio a polpa e a solução resultantes são filtradas e enviadas para o tratamento de efluentes juntamente com a solução sobrenadante da barragem de rejeitos, na qual se adiciona cal para neutralizar o pH e propiciar a precipitação do zinco na forma de sulfato básico. Os sólidos ricos em zinco são decantados adicionando-se floculante recuperando mais de 97% do zinco que retorna ao circuito principal de produção. Nesta etapa parte do efluente segue para o setor de tratamento residual adicionando-se mais cal para elevar o pH para 9, e sulfeto de sódio para garantir a remoção de zinco e outros metais remanescentes, como cádmio, chumbo, níquel, etc. por decantação, adequando os teores às normas ambientais para posterior descarte. Outra parte da polpa resultante (rejeito) é bombeada e lançada em diques ou barragens de contenção (ABREU, 2009). A Figura 2 representa esta etapa do processamento.

Como decorrência deste processo, o rejeito de mineração de zinco consiste de um resíduo sólido de aspecto terroso, granulometria fina e coloração ocre, resultante de uma mistura de rejeitos industriais com predominância de Jarosita (rejeito composto de sulfato hidratado de ferro e potássio) e da presença de outros resíduos sólidos não especificados.

As características descritas são específicas de resíduos de zinco. Outros resíduos de mineração, subprodutos dos processos de beneficiamento de minérios, apresentam características que dependem do tipo de minério bruto (ferro, bauxita, ouro, etc.) e dos processos de beneficiamento. Essas características implicam na necessidade da concepção de sistemas adequados de disposição destes materiais, e torna-se fundamental a realização de estudos e análises específicas sobre o comportamento geotécnico destes rejeitos.

2.1 SISTEMAS DE DISPOSIÇÃO

De acordo com Vick (1983), inicialmente a disposição de resíduos da mineração era realizada considerando apenas o custo do processo, não havia controle e, desta forma, o lançamento direto dos rejeitos em cursos d'água ou calhas de drenagem naturais próximas às instalações de beneficiamento constituía a forma mais frequente de disposição destes resíduos. As

crecentes preocupações ambientais e a necessidade de reaproveitamento da água no processo de tratamento úmido do minério resultaram no aprimoramento dos sistemas de disposição de rejeitos. Essas questões levaram à adoção de novos sistemas de disposição dos rejeitos, que passaram a ser confinados por diques e barragens de terra, o que representou um importante avanço no processo de disposição final dos resíduos de beneficiamento mineral (GOMES, 2009).

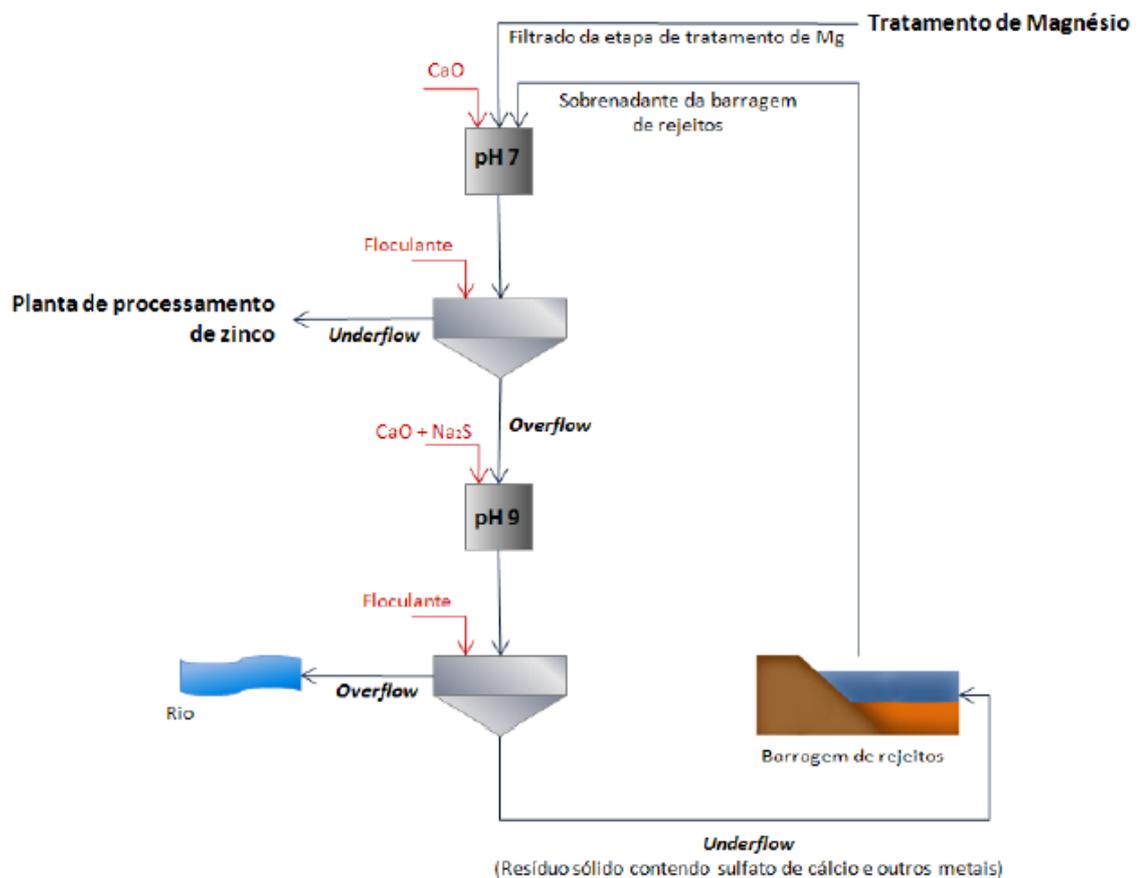


Figura 2: Esquema de geração de resíduos de zinco (ABREU, 2009).

Os métodos apropriados de disposição de resíduos estão relacionados ao tipo de depósito, aos processos de beneficiamento, que dependem do tipo de material explorado e, às características do material produzido (VICK, 1983; D'AGOSTINO, 2008).

Os rejeitos são descartados em superfície (e.g. barragens ou diques), cavidades subterrâneas, ou em ambientes subaquáticos, por via úmida em forma de lama ou via seca em forma sólida. O descarte por via úmida é realizado através de tubulações, por gravidade ou com o auxílio de bombeamento e o descarte dos resíduos em forma sólida é realizado com o auxílio de correias

transportadoras ou por meio de caminhões (SILVA, 2008). Devido à praticidade e os menores custos envolvidos no transporte de resíduos por via hidráulica, tem-se buscado favorecer o descarte por via úmida (PEREIRA, 2005). Os reservatórios que recebem os resíduos, depositados por via úmida em forma de lama, são geralmente compostos por barragens ou diques construídos em etapas. Os diques ou as barragens são executados com alteamentos sucessivos empregando-se comumente uma das três metodologias de barramento: método de jusante, linha de centro ou método de montante (Figura 3).

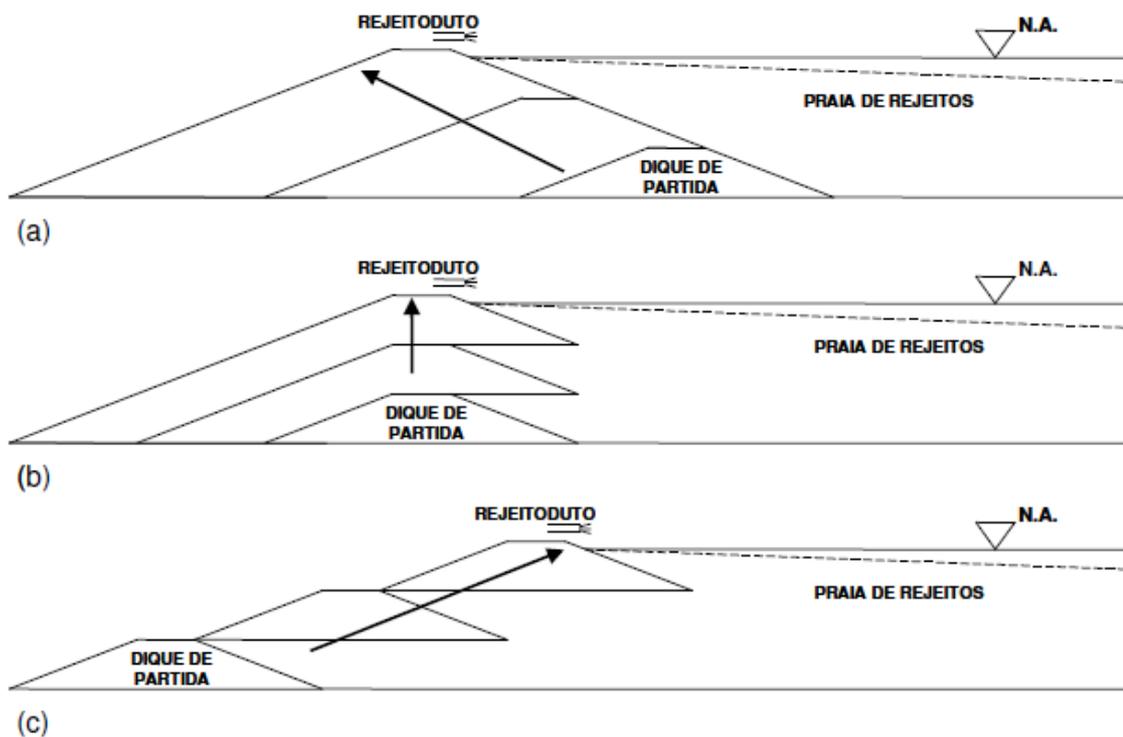


Figura 3: Métodos construtivos de barragens de resíduos (a) Alteamento para jusante; (b) Alteamento pela linha de centro; (c) Alteamento para montante (PEREIRA, 2005).

Todos os métodos iniciam com a construção do dique de partida, seguidos do lançamento dos rejeitos até atingir a vida útil desta etapa. O que difere os métodos é a sequência de execução. No método de jusante o alteamento sucessivo ocorre de tal maneira que a crista se move para jusante (Figura 3a). Este é um dos métodos mais seguros no qual é possível controlar a qualidade dos diques e a posição da linha freática a partir da construção de um sistema contínuo de drenagem interna, no entanto, devido ao grande volume de solo compactado necessário para sua construção o custo para sua execução é elevado. O método de montante consiste no alteamento sucessivo da barragem de tal maneira que a crista se desloca para montante (Figura 3c), sobre o resíduo depositado na primeira etapa. É um dos métodos mais

econômicos, porém, menos seguro com suscetibilidade à liquefação³. O método de linha de centro consiste em manter os eixos do dique de partida e da barragem após o alteamento. Nos alteamentos sucessivos lança-se o aterro no limite da praia e no talude de jusante do dique de partida (Figura 3b) (SILVA, 2008).

O lançamento por via úmida, geralmente empregado nos processos industriais, pode ser realizado por três maneiras distintas: com hidrociclones, *spray bars*, ou espigotes (Figura 4).

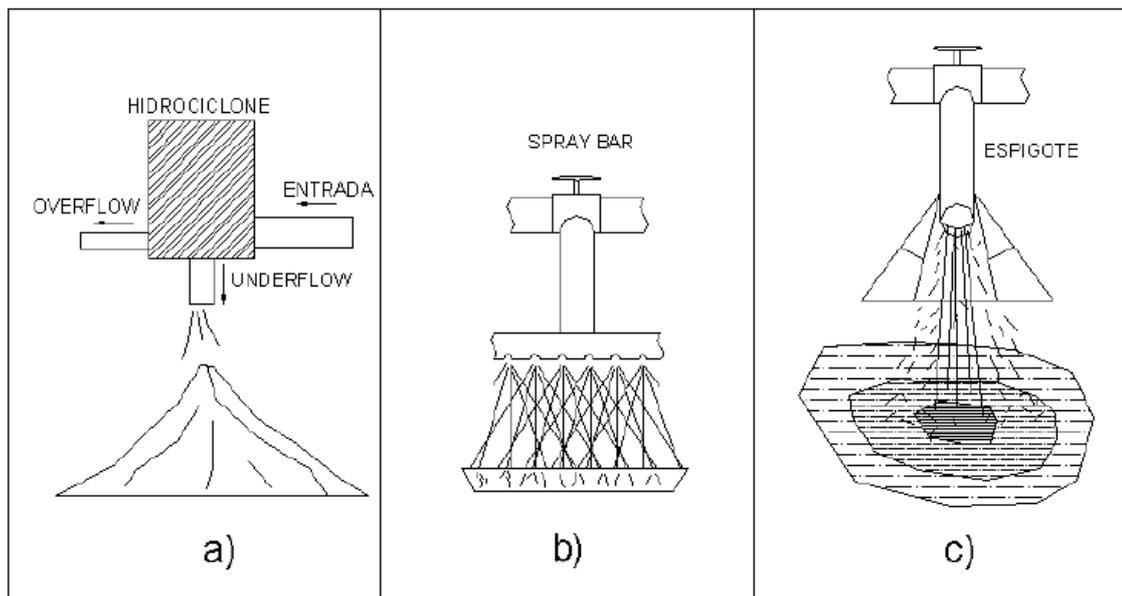


Figura 4: Sistemas de disposição de resíduos por via úmida (MENDES, 2007).

Os hidrociclones conseguem separar o material granulometricamente em duas frações denominadas *underflow* (partículas de maior massa) e *overflow* (partículas de menor massa), com o princípio da força centrífuga faz com que as partículas de maior massa tenham movimento descendente e as de menor massa movimento ascendente. Em resíduos com concentrações de ferro, por exemplo, o hidrociclone é pouco eficiente devido às partículas menores terem massa equivalente a partículas de solo com diâmetro consideravelmente maiores (GOMES, 2009). O hidrociclone é geralmente empregado quando o rejeito será utilizado como material para construção dos diques (*underflow*), sendo a outra parcela lançada no reservatório (MENDES, 2007).

³ Liquefação: Condição que pode ocorrer em solos granulares, principalmente areias e siltes finos e fofos, quando as poropressões anulam as pressões efetivas, neste caso o material se comportará como líquido (ORTIGÃO, 2007).

Os *spray bars* são tubos com pequenos furos posicionados longitudinalmente (Figura 4b), resultando numa maior uniformidade em relação aos espigotes, que lança em apenas um único furo, conforme mostra a Figura 4c. A utilização dos espigotes pode causar uma menor uniformidade do material e variabilidade dos parâmetros de resistência (MENDES, 2007).

De acordo com Chammas (1989, *apud* MENDES, 2007), os resíduos lançados em forma de lama passam por três estágios de comportamento: (1) líquido sobrenadante, com floculação das partículas de menor tamanho; (2) em processo de sedimentação, com comportamento semi-líquido e semi-viscoso; (3) em processo de adensamento, comportando-se como um solo.

Villar (2002) com o intuito de representar os processos que ocorrem com o lançamento do resíduo em forma de lama admitiu a ocorrência de 8 estágios além das condições de contorno impostas pelo reservatório, tais como o efeito do vento no processo de evaporação, a chuva e a conseqüente infiltração. Estes estágios são apresentados na Figura 5 e representam o ciclo total do lançamento com as mesmas características de disposição de resíduos do local onde foram realizados os ensaios do presente trabalho.

Estas configurações devem ser corretamente modeladas nos cálculos de estabilidade dos reservatórios e, para esta finalidade, são necessários parâmetros constitutivos do solo/resíduo representativos das variações entre áreas de disposição. A estimativa destes parâmetros é objeto desta dissertação.

2.2 CARACTERIZAÇÃO BÁSICA DO RESÍDUO DE ZINCO

Este capítulo apresenta uma breve revisão dos principais índices de caracterização dos materiais geotécnicos, e suas influências na caracterização de materiais siltsosos e resíduos de mineração.

2.2.1 Análise Granulométrica

A maioria dos resíduos de mineração encontra-se na faixa granulométrica representativa de materiais siltsosos, com a possibilidade de ocorrer grandes parcelas de areia (mais de 30%). A variação granulométrica é em geral significativa, encontrando-se resíduos com granulometria muito fina ou extremamente grossos (VICK, 1983).

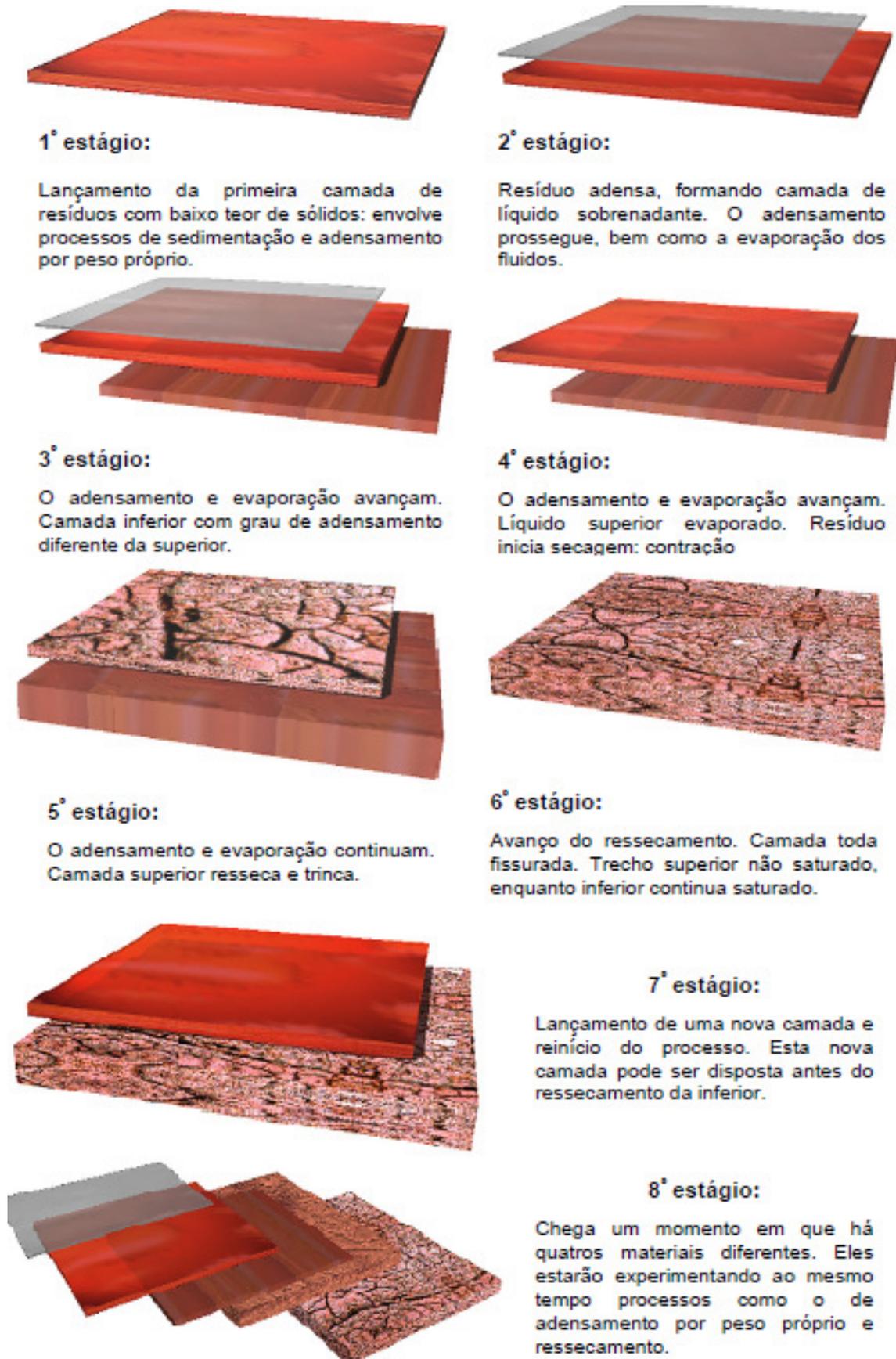


Figura 5: Ciclo total de lançamento de resíduos em superfície (VILLAR, 2002).

De acordo com Villar (2002), os rejeitos cuja forma de disposição inicial é na forma de lama, necessariamente terão uma granulometria mais fina e, no caso dos resíduos de final de processamento industrial, o uso de flocculantes durante a fase de decantação provoca alteração de granulometria. As Figuras 6 e 7 mostram algumas curvas granulométricas típicas de resíduos.

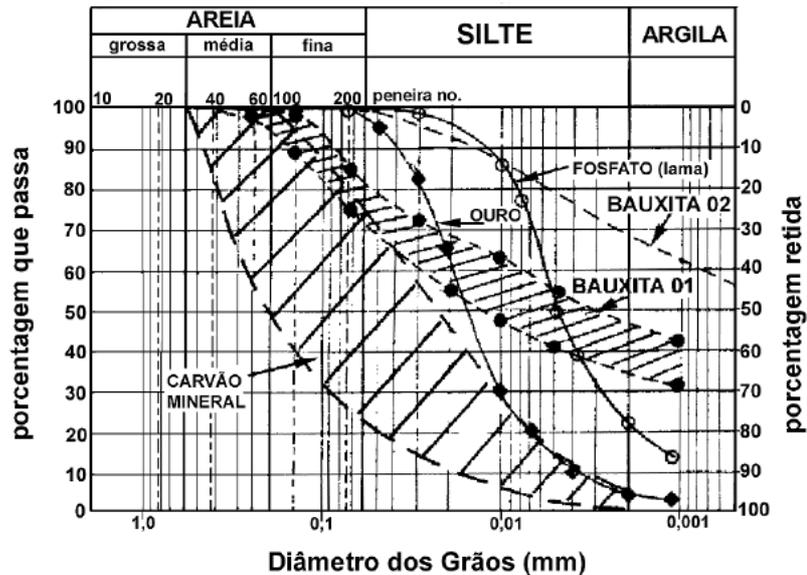


Figura 6: Curvas granulométricas de resíduos (lama vermelha) (CAMPOS, 1986).

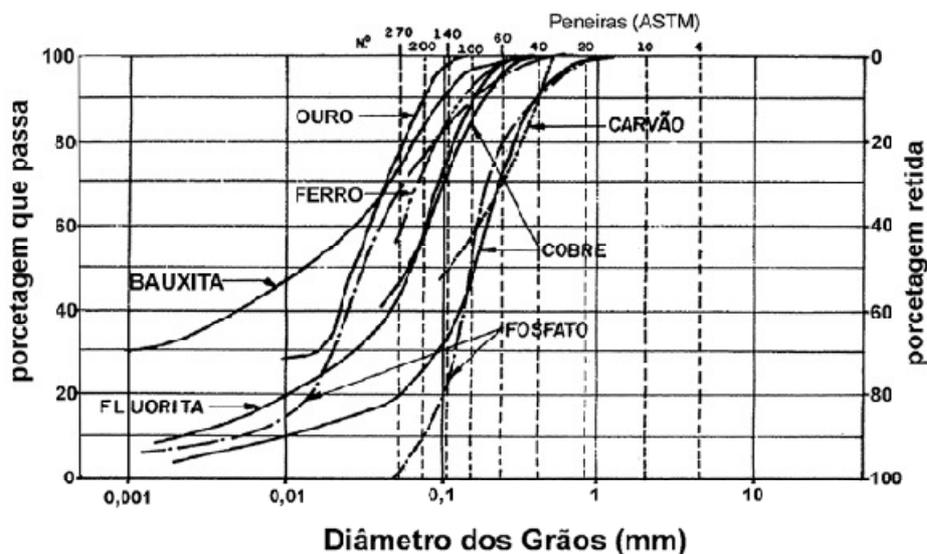


Figura 7: Curvas granulométricas de resíduos (ABRÃO, 1987 *apud* BEDIN, 2006).

A granulometria dos resíduos de mineração dentro dos reservatórios é influenciada pelas formas de lançamento nos diques ou barragens de armazenamento, que podem favorecer a

segregação entre as partículas criando zonas com comportamentos diferenciados no lago. A tendência é que as partículas maiores sejam depositadas próximas aos locais de descarga e as mais finas se depositem em locais mais afastados. Com o tempo, podem ser criadas barreiras formando zonas de deposição de material variado (VILLAR, 2002). Desta forma, para este tipo de material são necessárias caracterizações geotécnicas por metodologias para obtenção de curvas granulométricas e limites de consistência diferentes daqueles usados para solos convencionais.

2.2.2 Ensaio de Adensamento

Conforme citado por Vick (1983), normalmente, os rejeitos são mais compressíveis do que solos naturais que apresentam consistência similar. Alguns autores observaram características incomuns de deformação em rejeitos e, de acordo com Somogyi & Gray (1977), estas deformações podem ser causadas por "*creep*" individual dos grãos e/ou ligações inter-partículas.

Diversos ensaios podem ser utilizados para determinar os parâmetros de compressibilidade dos rejeitos, em campo ou laboratório, cada qual com suas características e particularidades. Independente do método adotado, os valores de coeficiente de adensamento (c_v) apresentados na literatura para os resíduos de mineração variam de 10^{-4} a 10^{-2} cm^2/s , maiores detalhes referente aos ensaios empregados e o tipo de resíduo são apresentados por Gauer (2010).

2.2.3 Microanálise Química Elementar

Importante instrumento para a análise química de materiais orgânicos e inorgânicos, a microanálise é realizada através da identificação dos raios-x emitidos pela amostra, com os quais é possível determinar a composição de regiões com até 1 μm de diâmetro e determinar quantidades de até 1 – 2 % dos elementos presentes na amostra (MALISCA, 2011).

A versatilidade da microscopia eletrônica de varredura e da microanálise se encontra na possibilidade de captar e medir as diversas radiações provenientes das interações elétron-amostra que podem revelar informações quanto à natureza do material, incluindo sua composição (MALISCA, 2011). As radiações emitidas pela amostra podem ser captadas por dois tipos de detectores: por dispersão de energia (EDS ou EDX – *Energy Dispersive x-ray Spectrometer*) ou por dispersão em comprimento de onda (WDS – *Wave Dispersive x-ray Spectrometer*). Os detectores baseados na medida de energia são mais utilizados, e

apresentam rapidez nas análises, pois a partir da amostra inserida no equipamento, necessita de apenas alguns segundos para avaliar os elementos constituintes desta (DEDAVID; GOMES; MACHADO, 2007).

O aparelho emite feixes de elétrons que são bombardeados sobre a amostra, que incide sobre um mineral excitando os elétrons mais externos dos átomos e os íons constituintes, alterando seus níveis de energia. A energia assim adquirida é então liberada quando os átomos retornam para sua posição inicial. O detector mede a energia associada ao elétron, emitida em comprimento de onda no espectro de raios-x, e determina quais os elementos químicos estão presentes no ponto de incidência do feixe, devido às diferentes energias dos elétrons de um determinado átomo (UFOP). Os espectros de raios-x podem ser obtidos para todos os elementos da tabela periódica, com exceção do hidrogênio. Além disso, na emissão de elementos de baixo número atômico, ocorrem grandes perdas por absorção na amostra, pois consistem de bandas na região de baixa energia, frequentemente determinados por estequiometria⁴ (DEDAVID; GOMES; MACHADO, 2007).

A análise é realizada na região percorrida pelo feixe, sendo possível parar a varredura e analisar em um ponto (*spot*), área ou linha selecionada. A interpretação é realizada através de uma base de dados contendo para cada elemento as energias e a intensidade das raias que as produziu. Elementos em quantidade inferior a 0,2 % em massa não poderão ser detectados.

⁴ Estequiometria: Relaciona a quantidade de reagente a ser colocar numa reação química para determinar uma quantidade de produtos a ser obtido.

3 ENSAIOS DE CAMPO

Apenas quando as condições de drenagem, durante a realização dos ensaios são completamente compreendidas é que os dados podem ser correlacionados com as propriedades físicas e mecânicas dos solos, tais como a permeabilidade, a resistência ao cisalhamento e os parâmetros de compressibilidade. Sem esta compreensão, os dados podem ser utilizados apenas para identificar a estratigrafia e para classificação do solo quanto ao tamanho das partículas. Portanto, a compreensão do grau de drenagem em torno da taxa de rotação do ensaio de palheta e da velocidade de avanço do piezocone é de importância fundamental na análise dos parâmetros em qualquer tipo de solo (SILVA, 2005).

Desta forma, o presente capítulo tem como objetivos: (1) apresentar uma revisão das pesquisas já realizadas sobre as condições de drenagem impostas durante a realização dos ensaios (campo e laboratório); (2) mostrar as principais características dos ensaios de campo empregados na presente pesquisa; (3) fazer uma revisão dos principais fatores que influenciam nos parâmetros geotécnicos determinados a partir destes ensaios. Este capítulo será a base para análise dos resultados do presente trabalho.

3.1 ENSAIO DE PALHETA

O ensaio de Palheta (*vane test*) é normalizado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) desde 1989; MB 3.122 – Ensaio de Palheta *in situ*, e registrada no INMETRO como NBR 10905.

O objetivo do ensaio consiste na determinação da resistência não drenada (S_u) do solo *in situ*, através de uma palheta de seção cruciforme, cravada no solo e submetida a um torque, transferindo ao material um esforço cisalhante por rotação. É tradicionalmente aplicado a solos argilosos moles a rijos, saturados, cujo comportamento pode ser caracterizado pelas condições não-drenadas (NBR 10.905 – Ensaio de palheta *in situ*).

A NBR 10905/89 cita o uso do ensaio de palheta apenas em solos argilosos moles a rijos, no entanto, este método tem sido utilizado também em solos de granulometria fina, como siltes, resíduos de mineração (material do presente trabalho) e outros geomateriais em que é necessário estimar a resistência não-drenada (SCHNAID, 2009). Contudo, para avaliar sua aplicabilidade é necessário o conhecimento prévio do material, com os devidos cuidados na aplicação do ensaio e, interpretação adequada dos resultados.

Em muitos projetos geotécnicos a resistência ao cisalhamento não-drenada constitui-se no parâmetro fundamental, embora facilmente obtido experimentalmente, necessita de julgamento geotécnico para sua fixação como parâmetro de projeto, dependendo da adoção ou não de fatores de correção (e.g. BJERRUM, 1973 ou AZZOUZ et al. 1983) e considerações específicas que se apresentam em cada caso (PINTO, 1992 *apud* SCHNAID, 2000).

A resistência não drenada a partir do ensaio de palheta é obtida através da interpretação analítica do ensaio, assumindo a hipótese de superfície de ruptura cilíndrica e, por este motivo, se torna mais atrativo servindo de referência a outras metodologias cuja interpretação requer a adoção de correlações semi-empíricas. Complementarmente, busca-se obter informações quanto à história de tensões do solo indicada pelo perfil da razão de sobre adensamento (OCR) (SCHNAID, 2000).

Em função da vasta experiência brasileira e internacional acumulada ao longo dos anos e principalmente pelo fato de ter sua interpretação fundamentada em uma solução fechada, o ensaio de palheta se torna extremamente atrativo, indicado para solos moles. Este ensaio apresenta além destas vantagens, as citadas por Ortigão e Collet (1988):

- a) O solo é ensaiado *in situ*, o que elimina perturbações na amostragem, manuseio, etc.;
- b) O equipamento necessário é simples, robusto, relativamente barato e, conseqüentemente, apropriado para uso no campo;
- c) Somente duas pessoas são necessárias para operá-lo, além do que, a depender do equipamento, pode-se executar um furo de 20 m de profundidade com ensaios a cada metro em um dia de trabalho;

- d) O custo final na obtenção de um perfil de resistência não drenada para uso em projeto é certamente menor em relação a outros tipos de ensaio, tanto de campo quanto de laboratório.

Na normalização brasileira, citada anteriormente, são apresentados dois tipos de equipamentos, o equipamento Tipo A (Figura 8), sem perfuração prévia, e o Tipo B, com perfuração prévia. A seguir será apresentada a descrição do equipamento Tipo A, utilizado na realização dos ensaios para este trabalho, e seu procedimento de execução. A concepção original deste equipamento é devida à Cadling e Odenstad (1950) e de acordo com Schnaid (2000) apresenta resultados de melhor qualidade.

O equipamento possui uma unidade de medição e aplicação de torque que permite a imposição de uma velocidade de rotação do conjunto haste e palheta de 6° ($\pm 0,6^\circ$) por minuto. A medida do torque pode ser efetuada, a depender do sistema, através do uso de uma célula de carga elétrica que trabalha a compressão ou a tração, especificamente desenhada para a medida de torque.

O mecanismo do equipamento é dotado de coroa e pinhão com a unidade de medição apoiada diretamente no tubo de revestimento, ao qual é fixada através de uma haste de seção quadrada com 25 mm de lado. Dispõe ainda de caixa de redução de 7200:1, que permite imprimir à palheta com facilidade a rotação padrão de 6° por minuto. De acordo com a norma brasileira (NBR 10905) a palheta de formato cruciforme, apresenta uma altura (H) de 130 mm e diâmetro (D) de 65 mm, o que confere a mesma uma relação H/D de 2.

A parte inferior do equipamento que contém a palheta dispõe de uma sapata de proteção que permite acomodá-la durante a cravação. A haste fina que é conectada à palheta tem 13 (± 1) mm de diâmetro, sendo o espaço livre entre estas peças (sapata/conjunto de hastes finas e palheta) preenchido com graxa para evitar o ingresso de solo. No topo da haste fina está a trava do conjunto que, uma vez desconectada, permite à palheta avançar 0,50 m no solo. A parte inferior desta peça dispõe de um rolamento sobre o qual se apóia o peso total das hastes, que é transmitido ao revestimento durante a realização do ensaio.

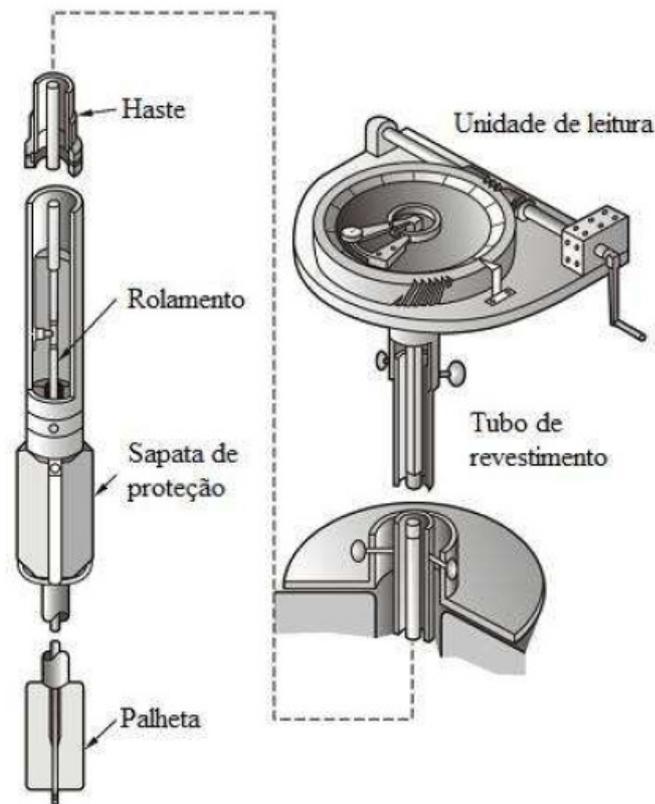


Figura 8: Equipamento para ensaio de palheta *in situ* - Tipo A (ORTIGÃO & COLLET, 1988).

A fim de minimizar o atrito das hastes que transmite o torque à palheta, com diâmetro de 20 (+/- 1) mm e seções de 1 m de comprimento, as hastes são protegidas por um tubo externo com 38 mm de diâmetro, também em segmentos de 1 m em toda sua extensão.

O procedimento de execução do ensaio (Figura 9) consiste em: (1) introduzir o conjunto no terreno, com a palheta recolhida na sapata de proteção, por cravação estática a partir do nível do terreno, com auxílio de um macaco hidráulico; (2) uma vez atingida a profundidade desejada, crava-se a palheta no solo avançando-a 0,50 m à frente do equipamento; (3) em seguida realiza-se o ensaio, aplicando-se a rotação e medindo-se o torque com o auxílio da unidade de leitura. Durante a execução do ensaio são realizadas leituras de no mínimo a cada 2° de rotação para construção da curva torque x rotação.

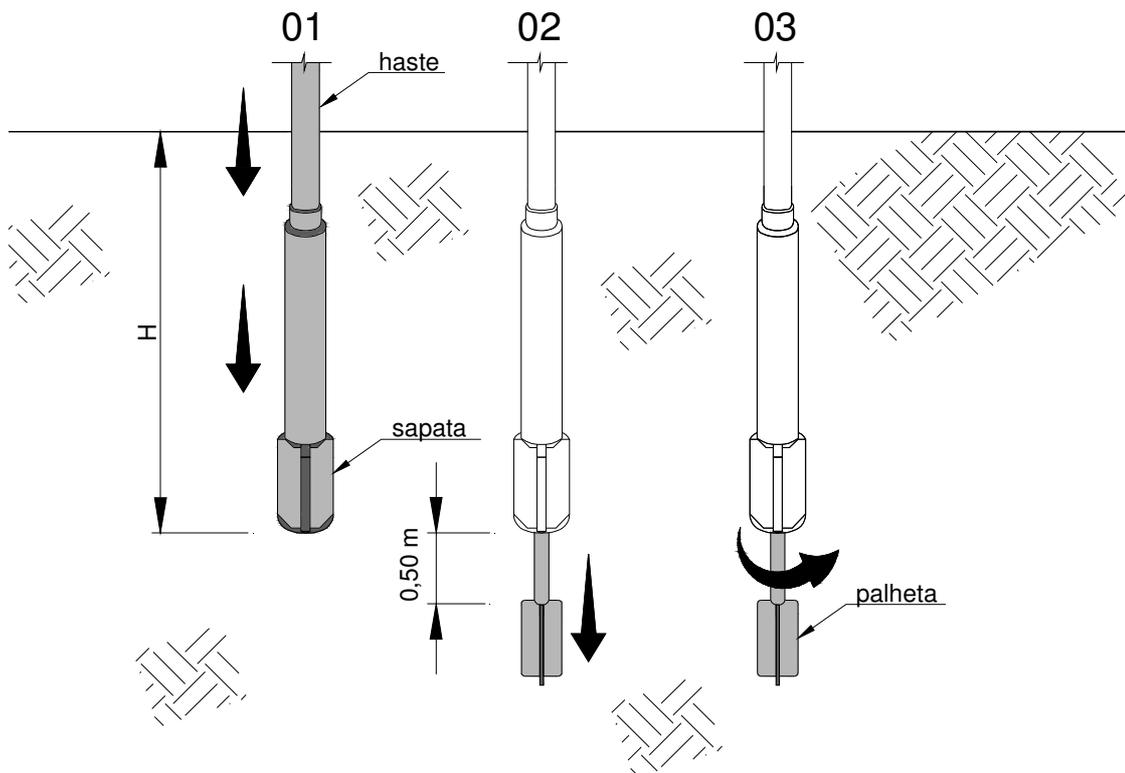


Figura 9: Etapas do ensaio de palheta.

3.1.1 Cálculo da Resistência ao Cisalhamento não Drenada

Considera-se, como hipótese fundamental para o cálculo da resistência ao cisalhamento não drenada (S_u) que não ocorre drenagem do material durante a realização do ensaio, o estado de tensões efetivas no solo permanece inalterado com a cravação da palheta. A interpretação e cálculo de S_u também se baseiam nas seguintes considerações citadas por Collet (1978):

- As operações de cravação do conjunto e inserção da palheta não causam perturbação, permanecendo as propriedades do solo ensaiado inalteradas durante este procedimento;
- São consideradas como superfícies de ruptura a superfície cilíndrica vertical e as superfícies horizontais (superior e inferior) deste cilindro, formadas pela palheta durante sua rotação. As dimensões destas superfícies de ruptura são função direta das dimensões da palheta utilizada;
- Considera-se o material com comportamento isotrópico;

- d) A resistência ao cisalhamento é inteiramente mobilizada, em todas as superfícies, quando ocorre a resistência de “pico”, ou seja, não se considera ruptura progressiva;
- e) A altura da palheta é o dobro do diâmetro, relação $H/D = 2$;
- f) Consideram-se as tensões de cisalhamento uniformemente distribuídas em ambas as superfícies, horizontal e vertical, supondo que a resistência mobilizada é função do deslocamento angular da palheta em cada ponto das superfícies cisalhadas.

A partir destas considerações a resistência ao cisalhamento não drenada (S_u) medida nos ensaios é definida através da Equação 1:

$$S_u = \frac{0,86 \cdot \tau}{\pi \cdot D^3} \quad (\text{kPa}) \quad \text{Equação 1}$$

onde:

τ = torque máximo medido no ensaio em kN.m;

D = Diâmetro da palheta em m.

A hipótese “f” citada anteriormente não ocorre na prática segundo Menzies & Merrifield (1980, *apud* Schnaid, 2000), pois a distribuição das tensões cisalhantes não é uniforme, sendo esta consideração aplicável na prática para a superfície vertical, conforme validação numérica das hipóteses. No entanto, considerando a hipótese simplificada de distribuição uniforme nas superfícies horizontais, o cálculo da resistência ao cisalhamento para uma palheta com relação $H/D = 2$ apresenta um resultado 3,6 % maior do que se considerarmos a distribuição linear com o valor máximo na extremidade e zero no centro (OSTERBERG, 1957).

Diversos estudos foram realizados para avaliar os fatores que influenciam nos resultados do ensaio, tais como a velocidade de rotação da palheta, o tempo transcorrido entre a inserção da palheta e o início do ensaio, dimensões da palheta (espessura e relação H/D), condições de drenagem, efeitos de amolgamento e não-uniformidade na distribuição de tensões (conduzindo à ruptura progressiva) e anisotropia de resistência.

Autores como Vey e Schlesinger (1949) e Cadling e Odenstad (1950) (*apud* COLLET, 1978) avaliaram a influência das dimensões da palheta nos resultados da resistência não-drenada, não encontrando diferenças significativas no valor de S_u , no entanto, as dimensões adotadas como consenso geral e padronizadas no Brasil pela ABNT é a palheta com relação $H/D = 2$.

Reconhecida a influência de alguns destes fatores para determinados tipos de solos, as normas em geral padronizam a velocidade do ensaio de 6° por minuto e as dimensões da palheta $H = 130$ mm e $D = 65$ mm (relação $H/D = 2$).

As dimensões padronizadas asseguram que as interferências se encontram dentro de limites aceitáveis para a determinação de S_u e elimina a influência da anisotropia gerada por diferentes relações H/D , enquanto a velocidade adotada de 6° por minuto garante a condição não drenada de ensaio na maioria dos solos argilosos. Contudo, a velocidade de deformação, em qualquer ensaio de cisalhamento, tem considerável influência nos resultados (SCHNAID, 2000) e será discutida neste trabalho.

3.1.2 Influência da Velocidade nos Ensaio de Palheta

Ensaio de palheta são normalmente utilizados para determinar a resistência ao cisalhamento não drenada de solos argilosos. Podem também ser empregados em solos siltosos e, devido à permeabilidade relativamente alta deste tipo de material (muito maior do que a de argilas), as condições de drenagem impostas são difíceis de determinar, com a possibilidade de ocorrência de drenagem parcial durante os ensaios. Portanto, a influência da drenagem na estimativa dos parâmetros constitutivos, pode ser considerada um aspecto importante ao se trabalhar com materiais siltosos, ou seja, com resíduos de zinco.

O desafio para quem concebe um programa de investigação em solos siltosos, com base em ensaios de campo, reside em antecipar as condições de drenagem do ensaio, evitando drenagem parcial durante a penetração (e.g. SCHNAID et al, 2004). Com este propósito Blight (1968) propôs um método com o qual é possível selecionar a duração adequada do ensaio de tal forma que a resistência medida corresponde ao solo completamente drenado. O procedimento foi desenvolvido por métodos empíricos e teóricos, a partir de diversos ensaios de palheta em resíduos de ouro e resíduos de fertilizante, com condutividade hidráulica de $9,66 \times 10^{-9}$ e $1,93 \times 10^{-7}$ m/s, e coeficiente de adensamento de 0,1178 e 0,1910 cm^2/s , respectivamente.

A pesquisa de Blight (1968) teve como base duas suposições que podem ocorrer quando os ensaios de palheta são realizados em condições completamente não drenadas:

- a) O deslocamento do solo provocado pela inserção da palheta irá gerar poro pressão;
- b) Poro pressão adicional será gerada quando o torque for aplicado às palhetas. A superfície na qual a poro pressão será afetada é desconhecido, mas certamente é maior que a superfície cilíndrica compreendida pela palheta.

Primeiramente, Blight (1968) avaliou o lapso entre a inserção da palheta e a aplicação do torque a partir de uma série de ensaios, aumentando o tempo de início do ensaio após a inserção, com tempo arbitrário de ruptura de 1 min. Os resultados mostraram que entre 1 e 60 min. não ocorrem efeitos significativos no torque de ruptura medido. Após 24 h, no entanto, os resultados apresentaram um acréscimo de 20 % atribuído pelo autor à oxidação da pirita contida no resíduo de ouro pelo ar introduzido pela inserção da palheta. Blight (1968) considera que o lapso entre a inserção e o início do cisalhamento, tem pouca influência nos resultados de ensaios de palheta em siltes.

Em estudo semelhante Flaate (1966) realizou ensaios de palheta na argila marinha da Noruega e demonstrou que ocorre um acréscimo significativo na resistência ao cisalhamento com lapso de 15 min., efeito que reduz gradativamente até o valor dos ensaios normalizados com 1 h de intervalo entre a inserção e início do cisalhamento. Acima de uma hora a influência torna a aumentar atingindo em torno 1,85 vezes o valor da resistência não drenada, determinada a partir de ensaios com apenas 3 min. de atraso. Não houve explanação satisfatória a respeito deste fenômeno, que pode não ocorrer em todas as argilas e pode ser provocado por uma combinação de efeitos de consolidação e fluxo de água na região onde a palheta está inserida. A possibilidade de ocorrer drenagem através da sapata de proteção torna a análise teórica difícil (FLAATE, 1966).

Blight (1968) ao comentar o trabalho de Flaate (1966), considera que a influência provocada pelo atraso do início dos ensaios realizados na argila marinha da Noruega, não ocorre com os resíduos por ele analisados devido à alta permeabilidade deste tipo de material, muito maior que o das argilas, e considera que as poro pressões geradas pela inserção da palheta em siltes são praticamente dissipadas com um lapso de 1 min.

Na sequência de sua pesquisa, Blight (1968) avaliou a dissipação das poro pressões geradas durante a realização dos ensaios, com a aplicação de diferentes taxas de rotação e também verificou a influência das dimensões da palheta. Foram utilizados três tamanhos distintos, palheta de 30 x 60 mm, 45 x 90 mm e 60 x 120 mm, todos com relação $H/D = 2$. Os resultados mostraram que o torque aumenta com o aumento do tempo de ruptura, ou seja, com a redução da velocidade do ensaio. Nestas análises alguns resultados foram desprezados pelo autor (ensaios com tempo de ruptura de 1 s) que considerou a ocorrência de efeitos viscoplásticos devido à alta taxa de rotação empregada. O autor observou ainda que a drenagem seja mais lenta quanto maior as palhetas, pois quanto maior a palheta maior o volume de solo que será afetado no cisalhamento e maior o tempo necessário para atingir um determinado grau de drenagem.

Para eliminar a influência do tamanho das palhetas no tempo de drenagem, Blight (1968) apresentou o conceito de fator tempo (T), que relaciona o tempo de ruptura (t_f) com as características de drenagem do material (c_v) e o volume de solo afetado (D), relação representada pela Equação 2:

$$T = \frac{c_v \cdot t_f}{D^2} \quad \text{Equação 2}$$

onde:

c_v = coeficiente de adensamento do solo em cm^2/s ;

t_f = tempo para atingir o torque máximo em s;

D = Diâmetro da palheta em cm.

Para a escolha de um tempo de duração do ensaio suficiente para garantir a drenagem completa do solo afetado pela palheta e a dissipação das poro pressões geradas durante a inserção e durante o cisalhamento, ou seja, para definir a velocidade empregada nos ensaios que garante a completa drenagem do material, Blight (1968) apresentou os resultados graficamente, definindo a curva do grau de drenagem (U) versus fator tempo (T). O grau de drenagem determinado a partir do torque, medido nos ensaios a diferentes velocidades, é definido pela Equação 3:

$$U = \frac{V - V_0}{V_1 - V_0} \quad \text{Equação 3}$$

onde:

V_0 = torque medido nos ensaios em que não ocorre drenagem. No trabalho de Blight (1968) foram considerados os valores de torque dos ensaios com tempo de ruptura de 6 s;

V_1 = torque medido nos ensaios em que ocorre a drenagem e, conseqüentemente, a dissipação das poro pressões, ensaios mais lentos;

V = torque medido nos ensaios com velocidade intermediária.

A Figura 10 apresenta a curva de drenagem obtida por Blight (1968), com os resultados dos ensaios realizados no resíduo de ouro e de fertilizantes. O autor considerou os resultados dos ensaios em resíduos de fertilizantes menos satisfatórios, porém apresentando a mesma tendência.

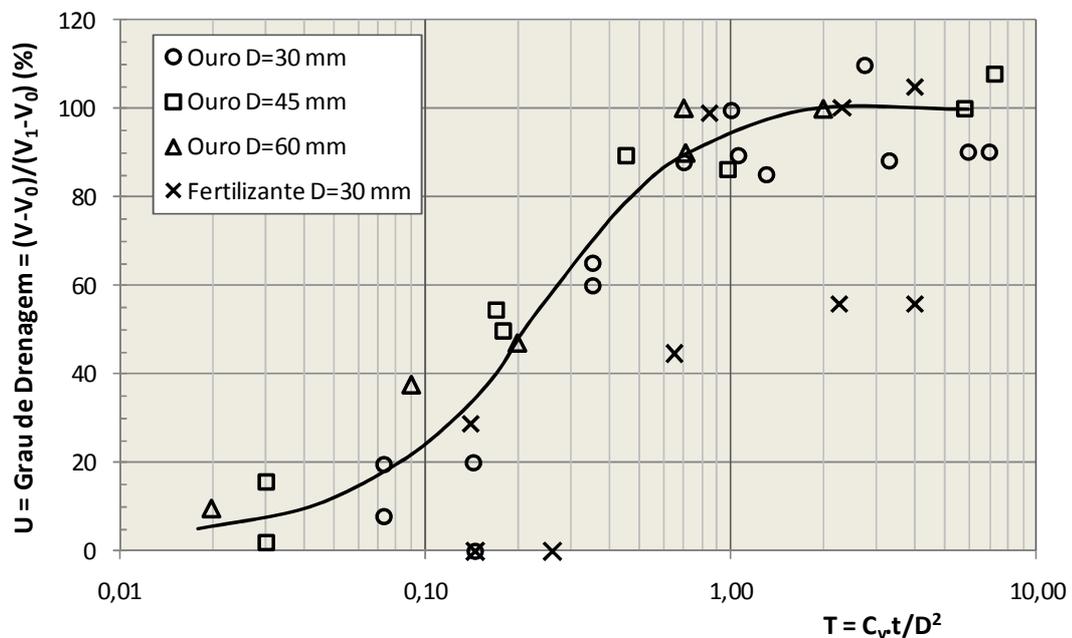


Figura 10: Curva de drenagem dos ensaios de Vane em resíduo de ouro e fertilizantes (BLIGHT, 1968).

Blight (1968) também apresentou algumas considerações teóricas do problema de drenagem durante os ensaios de palheta, segundo o autor, a abordagem teórica do problema é possível apenas a partir de uma série de simplificações. A solução das equações diferenciais de drenagem do excesso de poro pressão gerada durante o cisalhamento do solo não é trivial, e as condições de contorno adotadas por Blight foram severamente criticadas posteriormente por Morris e Williams (2000). O escopo do presente trabalho não considera adotar as soluções teóricas do problema apresentadas pelos autores, apenas representar as curvas de drenagem, determinadas a partir dos ensaios de campo. A análise das soluções teóricas do problema seria uma sugestão para trabalhos futuros.

Matsui e Abe (1981) realizaram ensaios de palheta em laboratório, em argilas, medindo as poro pressões durante a rotação da palheta e constataram que a distribuição do excesso de poro pressões ao redor do plano vertical de cisalhamento depende tanto da permeabilidade dos solos quanto da velocidade angular do Vane. Para o caulim utilizado, a condição não drenada é satisfeita com velocidade de rotação maior ou igual a 1,0 °/seg. ($T \sim 0,025$). Na condição não drenada, na parte frontal das palhetas na direção da rotação, o excesso de poro pressão e as tensões normais totais no plano vertical de cisalhamento aumentam, enquanto atrás das pás ambas diminuem. No entanto, as tensões normais efetivas não variam significativamente.

Segundo Biscontin e Pestana (2000), a taxa de rotação é um dos fatores mais importantes que afeta a medida da resistência ao cisalhamento não drenada e, durante carregamentos rápidos e sísmicos a taxa de cisalhamento do solo é muito maior que a empregada em muitos ensaios. Em sua pesquisa, os autores avaliaram o efeito da velocidade periférica na resistência não drenada e nas características de deformabilidade a partir de ensaios de palheta em laboratório ($D = 5,5$ cm e $H/D = 2$), variando a velocidade de 2 a 3000 °/min. em uma mistura de bentonita e caolinita (c_v médio de $3,0 \times 10^{-2}$ cm²/s). A partir de seus resultados observaram um acréscimo de S_u com o aumento da velocidade periférica (v_p) nos ensaios realizados na mistura de solo, além disso, mostraram que o material pode ser representado simplesmente através de relações exponenciais e logaritmas em função dos parâmetros constitutivos do solo, conforme apresentado a seguir:

$$\frac{S_u}{S_{uo}} = \left(\frac{v_p}{v_{po}} \right)^\beta \quad \text{equação de potenciação} \quad \text{Equação 4}$$

$$\frac{S_u}{S_{uo}} = 1 + \alpha \cdot \log\left(\frac{v_p}{v_{po}}\right) \quad \text{relação semi - log} \quad \text{Equação 5}$$

onde:

v_p = velocidade periférica (ou velocidade angular);

v_{po} = velocidade periférica de referência (ou velocidade angular de referência);

α e β = parâmetros dependentes do material.

Gauer (2010) também avaliou as condições de drenagem durante os ensaios de palheta em laboratório ($D = 2,55$ cm e $H/D = 2$). O material utilizado nos ensaios foi preparado em laboratório (material inerte com características de siltes) com c_v que varia de $6,65 \times 10^{-2}$ a $7,10 \times 10^{-1}$. De uma maneira geral, os resultados demonstraram uma redução da resistência com o aumento da velocidade e uma tendência de aumento da deformação na ruptura, possivelmente devido ao efeito de drenagem parcial durante os ensaios. Com velocidades baixas, a deformação na ruptura ficou em torno de 10 %, e, para velocidades maiores, em torno de 40 % de uma volta completa. A velocidade adimensional acima de 100 indicou comportamento não drenado para o material utilizado na pesquisas e, velocidade adimensional menor que 1,0, indicaram ensaios completamente drenados, de acordo com as curvas de drenagem apresentadas em sua pesquisa. Observa-se que muitos dos ensaios apresentaram tempo de ruptura inferior a 1 s, além de uma rotação na ruptura em torno de 144 °.

Outros trabalhos semelhantes aos apresentados anteriormente também avaliaram a influência da velocidade nos ensaios para determinar a resistência ao cisalhamento, talvez menos representativos para a presente pesquisa, tanto pelas diferentes características do material ensaiado, quanto pelo equipamento utilizado, no entanto, há considerações que podem ser relevantes para a compreensão dos fenômenos que podem ocorrer neste tipo de análise, descritas a seguir.

Torstensson (1977) estudou: (1) a influência do lapso entre a inserção do equipamento e (2) a influência da velocidade, dos ensaios de palheta em argilas normalmente adensadas a levemente pré-adensadas em dois locais, Bäckebol e Askim na Suécia. No equipamento utilizado, fabricado na Suíça, o torque das hastes e da palheta era medido separadamente,

evitando a necessidade de revestimento. O torque era aplicado por um motor elétrico com dispositivo de controle de velocidade. Foram realizados mais de 300 ensaios para avaliar a influência destes dois fatores, com tempo utilizado para mobilização do torque máximo variando de 1 segundo a 7 dias. Como resultado do primeiro item avaliado, o autor obteve que a resistência ao cisalhamento é maior quanto maior o intervalo de tempo entre a inserção e o início do ensaio e, na opinião do autor, o aumento da resistência é devido principalmente ao aumento da adesão entre a palheta e o solo, da mesma forma que os estudos de AAS (1965 e 1966) para as argilas sensíveis da Noruega “*quick clays*”. AAS (1965) concluiu que a adesão entre a palheta e o solo é praticamente igual a zero imediatamente após a inserção, e após um dia da instalação registrou um aumento no torque máximo de 50 a 70%, comparando com o ensaio normalizado, com lapso de no máximo 5 minutos entre a inserção e início do ensaio. Todos os testes realizados para avaliar a influência da velocidade de rotação da palheta foram iniciados um dia após a instalação do equipamento com o intuito de eliminar o efeito provocado pelo intervalo de tempo entre a instalação e a realização do ensaio.

Os resultados de Torstensson (1977) a respeito da influência da velocidade no comportamento tensão-deformação das argilas estudadas mostraram que para as menores velocidades de rotação, as argilas tinham comportamento de um material elasto-plástico e a resistência ao cisalhamento residual era maior quanto menor a velocidade. Além disso, os resultados mostraram que a máxima tensão cisalhante mobilizada ocorre com a mesma rotação angular para todos os ensaios, independe da velocidade, ou seja, a influência parece ter relação com o tempo utilizado para atingir a deformação cisalhante crítica.

Em três ensaios a baixas velocidades com o mesmo tempo de mobilização do torque máximo, Torstensson (1977) elevou abruptamente a velocidade dos ensaios para a padronizada em diferentes ângulos de rotação, o que correspondeu a um aumento de 10.000 vezes a velocidade que estava sendo empregada. Além disso, observou um aumento imediato nas tensões cisalhantes, sendo este maior quanto menor a deformação angular. Segundo o autor, isso ocorre provavelmente devido a reorientação das partículas em uma estreita zona de ruptura circunscrita à palheta. Para as grandes deformações, de 5 a 10 vezes a deformação do torque máximo, pode-se assumir que as partículas se reorientam numa superfície de ruptura cilíndrica. Neste estágio em que a resistência ao cisalhamento do solo é quase totalmente governada pela parcela friccional, que é em grande parte independente da velocidade de rotação, mas é uma função da tensão efetiva. No entanto, antes da completa reorientação das

partículas na zona de falha, uma componente coesiva está disponível, cuja magnitude depende da velocidade de rotação e da deformação angular.

As observações do parágrafo anterior explicam as menores tensões residuais devido a maiores velocidades de rotação. Estes ensaios geram elevado excesso de poro pressão na zona de ruptura se comparados com os excessos gerados nos ensaios com baixas velocidades. No entanto, na opinião do autor, as poro pressões são da mesma magnitude em ambos os ensaios, para deformações menores ou iguais a deformação crítica (TORSTENSSON, 1977).

3.2 ENSAIO DE PIEZOCONE

O ensaio de Cone ou Piezocone, conhecidos pelas siglas CPT (*Cone Penetration Test*) e CPTU (*Piezocone Penetration Test*), respectivamente, são normalizados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) desde 1991; MB 3.406 – Ensaio de Penetração de Cone *in situ*, NBR 12069/91.

O objetivo do ensaio consiste na determinação dos parâmetros de resistência do solo a partir da leitura contínua da resistência à cravação de uma ponteira cônica no terreno a uma velocidade constante. Desta forma, os resultados fornecem uma descrição detalhada da estratigrafia do solo, essencial para estimar as propriedades do material que serão utilizadas em projetos e construção de obras de terra e na estimativa da capacidade de carga de fundações. Este ensaio é uma das ferramentas mais importantes utilizadas na prospecção geotécnica dos solos, principalmente em depósitos de solos moles (SCHNAID, 2000).

O ensaio também é padronizado em outros países (ASTM e ISSMFE) e as dimensões, procedimentos, precisão de medidas, e apresentação dos resultados são encontradas nas normas. Segundo a norma brasileira, a ponteira com $60^\circ (+/- 5)^\circ$ de ápice deve ser cravada a uma velocidade de cravação constante de $20 (+/- 5)$ mm/s, o cone com dimensões entre 34,8 e 36,0 mm de diâmetro, que resultam em uma seção transversal entre 9,50 e 10,2 cm², deve ter rugosidade menor que 1 µm.

O procedimento de execução do ensaio é bastante simples e consiste em inserir a ponteira no solo de forma contínua com o auxílio de um equipamento de cravação, utilizando hastes de 1 m de comprimento. A ponteira possui células de carga e transdutores de pressão que permitem a leitura da resistência de ponta (q_c) do atrito lateral (f_s) e das poro pressões (u) no caso do

CPTU. A leitura das poro pressões pode ser realizada em três posições: na ponta (u_1), na base (u_2) ou na luva (u_3) do cone. As leituras são realizadas por sistemas automáticos de aquisição e armazenamento de dados, sem interferência do operador. A Figura 11 mostra a geometria típica de um cone e as posições de leitura das poro pressões.

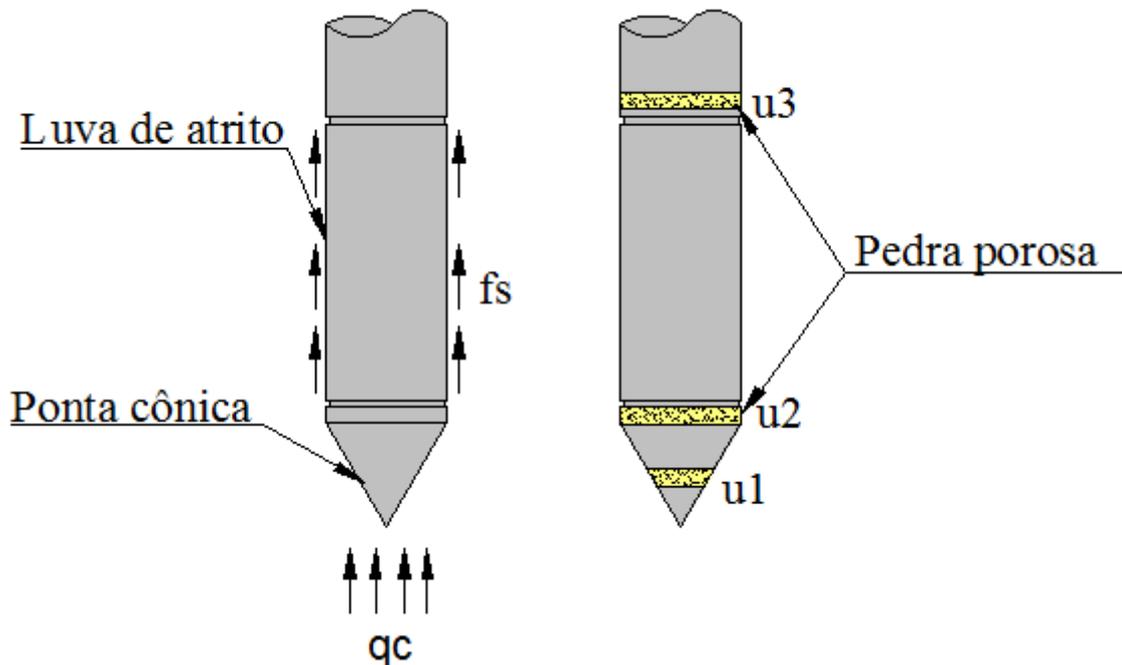


Figura 11: Geometria típica CPT e CPTU e posições de leitura de poropressões.

As células de medição enviam sinais analógicos através de um cabo que passa no interior das hastes de cravação, até um conversor analógico/digital ligado ao microcomputador. Um software monitora todo o ensaio registrando as leituras das células de carga e armazenando as informações em arquivos para processamento posterior.

No ensaio de cone elétrico, as medidas de resistência q_c são realizadas continuamente com a penetração do cone no terreno. Nos ensaios de piezocone as medidas de resistência são corrigidas devido as poro pressões atuantes no espaço compreendido entre a ponta cônica e a luva de atrito (Figura 12), principalmente para determinação das propriedades de argilas moles (SCHNAID, 2000).

As medidas registradas da resistência de ponta (q_c) são corrigidas para obtenção de valores de resistência de ponta corrigida (q_t), segundo a expressão (JAMIOLKOWSKI et al, 1985):

$$q_t = q_c + (1-a) \cdot u_2 \quad (\text{kPa}) \quad \text{Equação 6}$$

onde:

a = coeficiente de correção em função das áreas $a = A_n/A_t$.

O coeficiente a é facilmente determinado a partir de calibração conforme indicado na Figura 12.

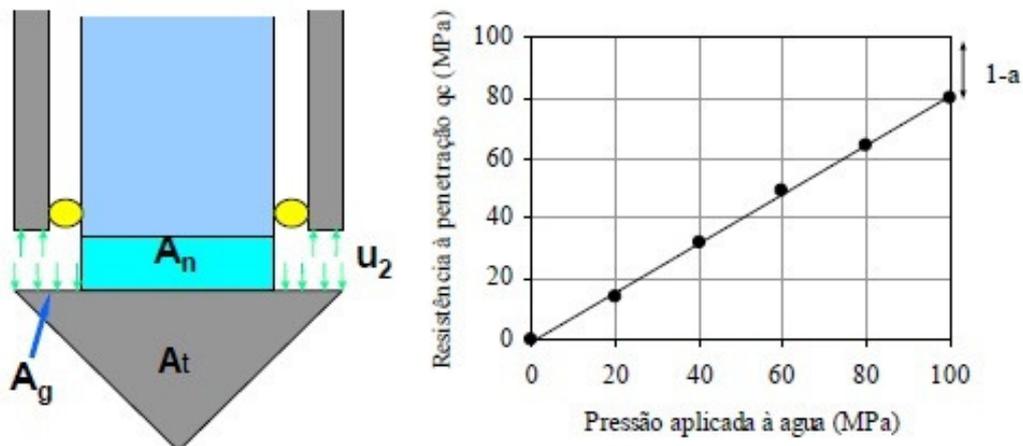


Figura 12: Correções aplicadas às medidas de ensaios de piezocone. (SCHNAID, 2000)

As medidas do atrito lateral também são registradas de maneira contínua durante a cravação. Os valores de atrito lateral medidos, juntamente com a resistência de ponta, permitem calcular a razão de atrito R_f , parâmetro derivado do ensaio utilizado para classificação do solo (Equação 7).

$$R_f = \frac{f_s}{q_c} \cdot 100 \quad (\%) \quad \text{Equação 7}$$

As camadas de areia são identificadas por valores de q_c relativamente elevados (10 a 20 MPa) combinados a valores de R_f da ordem de 1 %, e as camadas de argila são identificadas por baixos valores de q_c e razões de atrito acima de 5 % (SCHNAID, 2000).

Adicionalmente, a identificação do perfil de subsolo pode ser complementada nos ensaios de piezocone através do parâmetro de poro pressão B_q (ROBERTSON *et al.*, 1986):

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

onde:

u_0 = poro pressão hidrostática inicial;

σ_{v0} = tensão vertical total inicial *in situ*.

Valores de B_q entre 0,5 e 1,0 correspondem a argilas moles e sua magnitude tende a reduzir para argilas pré-adensadas e solos arenosos.

3.2.1 Classificação do Solo a partir do Ensaio de Cone

Além de ser utilizado para determinar a estratigrafia do solo, um dos métodos mais comuns para estimar o tipo de solo é baseado no CPT, proposto por Robertson *et. al.* (1986), com base na resistência de ponta (q_t) e a razão de atrito (R_f). Apesar de outras formas mais recentes terem sido desenvolvidas, o gráfico simples baseado em q_t e R_f pode ser facilmente utilizado em tempo real durante a realização do ensaio. A classificação proposta por Robertson (1990) é considerada mais confiável por utilizar os parâmetros normalizados em termos de tensões efetivas e será o método empregado na presente pesquisa, no entanto, pode apenas ser utilizado após a realização dos ensaios, pois depende das informações sobre o peso específico do solo e das poro pressões.

A classificação proposta por Robertson (1986 e 1990) com base nos ensaios de penetração de cone representa o mecanismo de comportamento do solo em campo (*Soil Behavior Type*) (Figura 13), diferente do sistema único de classificação (SUCS) que é baseado em ensaios de laboratório, utilizando amostras com alguma perturbação. Embora ambos os métodos tenham boa concordância, os resultados do sistema tradicional de classificação nem sempre estarão de acordo com o SBT (*Soil Behavior Type*), e a diferença será maior onde houver mistura de solos (p. ex. mistura de areia e silte) (ROBERTSON, 2010).

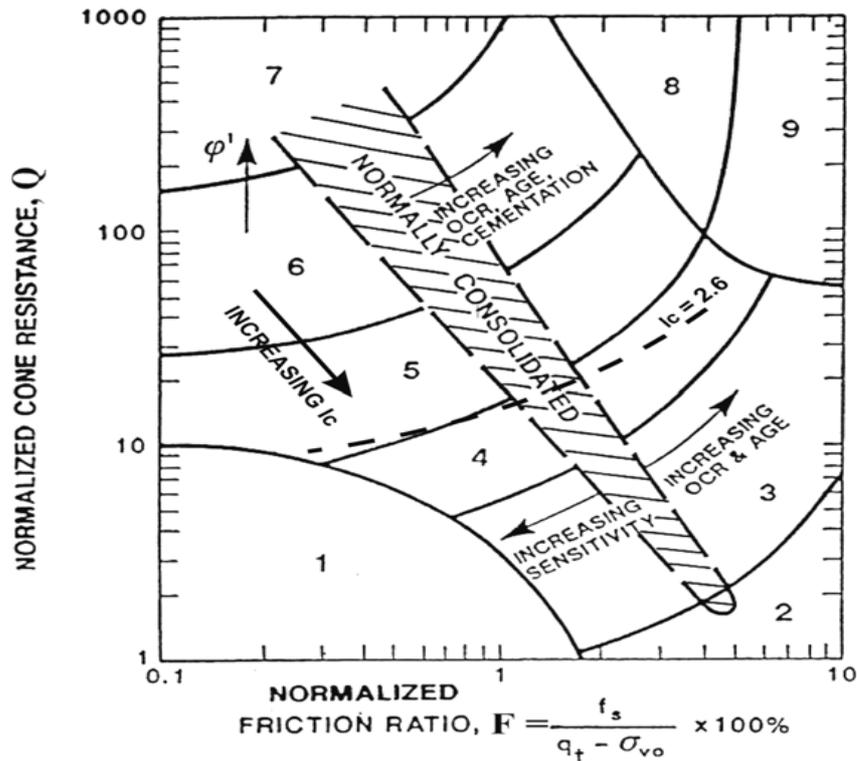


Figura 13: Classificação do solo (ROBERTSON, 1990).

Tabela 1: Tipo de comportamento do solo normalizado (SBTn) (ROBERTSON, 1990).

Zone	Soil Behavior Type	I_c
1	Sensitive, fine grained	N/A
2	Organic soils – peats	> 3.6
3	Clays – silty clay to clay	2.95 – 3.6
4	Silt mixtures – clayey silt to silty clay	2.60 – 2.95
5	Sand mixtures – silty sand to sandy silt	2.05 – 2.6
6	Sands – clean sand to silty sand	1.31 – 2.05
7	Gravelly sand to dense sand	< 1.31
8	Very stiff sand to clayey sand*	N/A
9	Very stiff, fine grained*	N/A

* Heavily overconsolidated or cemented

O índice do tipo de comportamento de solo (I_c) é essencialmente o raio dos círculos concêntricos que definem os limites do tipo de solo e que representa as zonas SBTn no gráfico normalizado. O I_c é calculado através da Equação 9:

$$I_c = \left[(3,47 - \log Q_t)^2 + (\log R_f + 1,22)^2 \right]^{0,5} \quad \text{Equação 9}$$

onde:

Q_t = Resistência de ponta normalizada = $(q_t - \sigma_{vo})/\sigma'_{vo} = (q_t - \sigma_{vo})/(\sigma_{vo} - u_o)$;

R_f = razão de atrito = (f_s/q_c) 100%;

f_s = atrito lateral CPT.

De maneira geral, esta classificação é uma boa referência a respeito do comportamento do solo em campo, informação fundamental para projetos geotécnicos.

3.2.2 Estimativa dos Parâmetros Geotécnicos com base nos Ensaio de Cone

No caso de solos argilosos, o ensaio de piezocone possibilita a estimativa de parâmetros de resistência, deformabilidade e condutividade hidráulica, expressa em termos de resistência ao cisalhamento não drenada (S_u), sensibilidade (S_t), razão de pré-adensamento (OCR), coeficiente de empuxo no repouso (k_o), coeficientes de adensamento (c_h e c_v), coeficientes de condutividade hidráulica (k) e módulo de deformabilidade (E), confinado ou oedométrico (M). A resistência ao cisalhamento não drenada pode ser calculada a partir da Equação 10:

$$S_u = \frac{(q_t - \sigma_{v0})}{N_{kt}} \quad \text{Equação 10}$$

onde:

N_{kt} = fator de capacidade de carga obtido teoricamente ou a partir da relação dos ensaios de cone com os de palheta.

Ensaio de dissipação do excesso de pressões geradas durante a cravação do piezocone no solo podem ser utilizados para obtenção de estimativas do coeficiente de adensamento e permeabilidade do material. O ensaio consiste basicamente em interromper a cravação do piezocone por um período de tempo até atingir-se 50 % de dissipação do excesso de poro

pressões (t_{50}). O valor de c_h é estimado utilizando o modelo proposto por Teh e Houlsby (1991), de modo que:

$$C_h = \frac{T_{50}}{t_{50}} \cdot r^2 \cdot \sqrt{I_r} \quad \text{Equação 11}$$

onde:

T_{50} = fator tempo relacionado com a posição da pedra porosa = 0,245 (u_2);

t_{50} = tempo medido nos ensaios para 50 % de dissipação do excesso de poro pressão;

I_r = índice de rigidez que pode variar de 50 a 500, sendo $I_r = 100$ adotado nesta pesquisa;

r = raio do piezocone = 1,785 cm.

Os valores de c_h obtidos por esse procedimento correspondem a propriedades de solo na faixa pré-adensada, uma vez que, durante a penetração, o material ao redor do cone é submetido a elevados níveis de deformação, comportando-se como solo em recompressão. Com o intuito de corrigir este efeito, Jamiolkowski et. al. (1985) propuseram uma abordagem semi-ímpirica para estimativa do c_h , conforme apresentada a seguir:

$$C_{h(n.a.)} = \frac{RR}{CR} \cdot C_{h(\text{piezocone})} \quad \text{Equação 12}$$

onde:

RR/CR = relação entre recompressão e compressão virgem.

Os valores experimentais da relação RR/CR variam na faixa entre 0,08 e 0,10. O valor adotado nesta pesquisa para esta relação foi de 0,09. A partir do c_h obtiveram-se por correlação o coeficiente de adensamento vertical (c_v) em função da anisotropia entre condutividade hidráulica horizontal (k_h) e vertical (k_v). O c_v foi estimado considerando a relação $k_h/k_v = 3,0$ aplicado na equação a seguir:

$$c_v = \frac{k_v}{k_h} \cdot c_h \quad \text{Equação 13}$$

A dissipação de poro pressões é controlada pelo coeficiente de adensamento horizontal (c_h), que é influenciada por uma combinação da condutividade hidráulica do solo (k_h) e compressibilidade (M), conforme definido pela Equação 14 (ROBERTSON, 2010):

$$c_h = \frac{k_h}{m_v \cdot \gamma_w} = \frac{k_h \cdot M}{\gamma_w} \rightarrow k_h = \frac{(c_h \cdot \gamma_w)}{M} \quad (\text{m/s}) \quad \text{Equação 14}$$

onde:

$$c_h = \text{coeficiente de adensamento horizontal} = c_h = 1,67 \times 10^{-6} \cdot 10^{(1 - \log t_{50})} \quad (\text{m}^2/\text{s});$$

$$M = \text{módulo de deformação oedométrico} = \alpha_M (q_t - \sigma_{vo}) \quad (\text{para } I_c > 2,2: \alpha_M = Q_t \\ (Q_t \leq 14); \alpha_M = 14 (Q_t > 14));$$

$$\gamma_w = \text{peso específico da água} = 9,81 \text{ kN/m}^3.$$

3.2.3 Cone Sísmico (SCPT)

O ensaio de cone sísmico consiste em registrar a chegada de uma onda cisalhante gerada na superfície pela ação de um golpe de martelo (Figura 14), a diferentes profundidades no solo. A onda de natureza cisalhante é gerada através de impactos em direções opostas (direta e reversa) que percorre o solo e é registrada através de dois sensores (geofones) na ponteira, afastados de 0,5 ou 1,0 m de distância. O sinal é registrado pelos geofones e amplificado através de um circuito elétrico instalado imediatamente acima da ponteira, e conduzido através do cabo elétrico passando pelo conversor analógico/digital para registro dos dados no computador. Os sinais são tratados posteriormente filtrando-se numericamente o sinal através de transformada de Fourier, obtendo-se o tempo necessário para a onda percorrer a distancia de 1,0 m. A Figura 15 mostra os resultados típicos de um ensaio de cone sísmico.



Figura 14: Exemplo de geração de onda cisalhante.

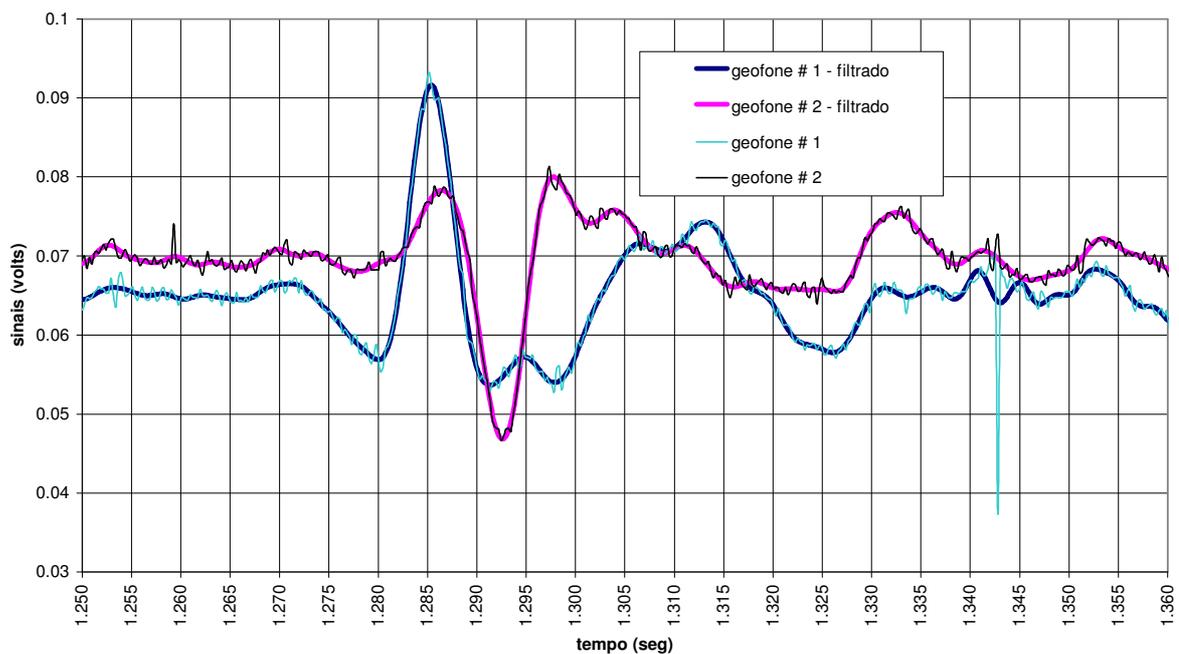


Figura 15: Resultados do ensaio de cone sísmico.

A partir dos resultados é possível então calcular o módulo cisalhante máximo ou a pequenas deformações do material (G_0), utilizando as equações a seguir:

$$V_s = \frac{\Delta z}{\Delta t} \quad (\text{m/s}) \quad \text{Equação 15}$$

$$G_o = \rho V_s^2 \quad (\text{MPa}) \quad \text{Equação 16}$$

onde:

Δz = distância entre os geofones (m);

Δt = tempo necessário para a onda cisalhante percorrer a distância entre os geofones (s);

V_s = velocidade da onda cisalhante;

ρ = massa específica do material = 1,4 (g/cm³).

3.2.4 Influência da Velocidade nos Ensaios de Piezocone

Segundo Silva (2005), o grau de drenagem durante um ensaio de cone pode ser inferida pela alteração da taxa de penetração, ou medindo a poro pressão tanto no interior do solo quanto no piezocone. Ensaios de piezocone são considerados como drenados em solos de granulometria grossa, e por esta razão, a variação da taxa de penetração não tem nenhum efeito significativo sobre os dados de piezocone, que pode então ser interpretado em termos de resistência em tensões efetivas e dos parâmetros de estado. Por outro lado, geralmente considera-se que os ensaios são realizados em condições não drenadas em argilas, quando a sonda é inserida na velocidade padronizada 20 (+/- 5) mm/s. Em solos siltosos, no entanto, os dados de piezocone são afetados pela taxa de penetração.

O grau de drenagem está associado com as características de permeabilidade e compressibilidade dos solos e, portanto, com o conteúdo de partículas finas do material. Certos solos intermediários tais como siltes e areias argilosas, podem ser suficientemente permeáveis para as condições de penetração variar a partir da condição não drenada para parcialmente drenada. Essas condições de drenagem parcial são atualmente complicadas para se considerar, eles produzem uma incerteza fundamental na interpretação. Na prática, a interpretação dos dados de piezocone para derivar parâmetros geotécnicos depende do pressuposto que a penetração pode ser considerada como completamente drenado ou totalmente não drenado (SILVA, 2005).

Ao inserir o cone no solo, ocorre um lapso cada vez que uma nova haste é necessária e, durante este intervalo, o excesso de poro pressões começa a dissipar. Nas argilas e areias, este lapso não tem efeito nos parâmetros, no entanto, nos solos siltsos a dissipação provoca um aumento da resistência na cravação subsequente. Durante a interpretação dos resultados de CPT's em solo siltsoso, a resistência pode variar e ser interpretada como solo em camadas e não homogêneo, mas esta variação pode estar associada também a alteração da taxa de penetração ou do intervalo para adicionar uma nova haste (POULSEN, NIOELSEN & IBSEN, 2011).

Randolph & Hope (2004) avaliaram a influência da velocidade nos ensaios de piezocone a partir de diferentes velocidades de cravação em uma argila normalmente adensada com c_v de $8,24 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$. Foram empregadas velocidades distintas que variaram entre 0,005 e 3,0 mm/s, com uma ponteira de 10 mm de diâmetro. Os autores apresentaram a velocidade adimensional (V), semelhante ao proposto por Blight (1968) para os ensaios de Vane, indicada na Equação 17. Estes resultados eram representados graficamente *versus* a resistência normalizada do piezocone (Equação 18), com o intuito de determinar as faixas de ocorrência onde haveria a influência da velocidade nos ensaios, ou seja, representar as curvas de drenagem do material.

$$V = \frac{v \cdot d}{C_v} \quad \text{Equação 17}$$

onde:

d = diâmetro do piezocone;

c_v = coeficiente de adensamento do solo.

$$q_{c \text{ normalizad } a} = \frac{q_c}{q_{c\tilde{n}}} \quad \text{Equação 18}$$

onde:

q_c = resistência de ponta;

$q_{c\tilde{n}}$ = resistência de ponta determinados nos ensaios rápidos, nos quais não ocorre a dissipação das poro pressões, condição não drenada.

Posteriormente Schnaid (2004 e 2005) e Bedin (2006) utilizaram os resultados obtidos por Randolph & Hope (2004) com algumas modificações de forma a adaptar o método para compará-lo aos estudos de Blight (1968). Os resultados dos ensaios de piezocone foram então representados graficamente pela velocidade adimensional (V) *versus* grau de drenagem (U), conforme Equação 19 proposta por Schnaid (2005).

$$U = \frac{(q_c - q_{c\tilde{n}})}{(q_{cdr} - q_{c\tilde{n}})} \quad \text{Equação 19}$$

onde:

q_{cdr} = resistência de ponta obtida nos ensaios lentos, de forma que as poro pressões sejam dissipadas, ou seja, condição drenada.

Os resultados de Randolph & Hope (2004) representados desta forma podem ser visualizados na Figura 16. Os ensaios de piezocone realizados na argila normalmente adensada indicaram que as condições drenadas ocorrem para valores de $V < 0,1$ ($c_v > 71,4 \text{ cm}^2/\text{s}$), enquanto condições não-drenadas ocorrem para valores de $V > 50$ ($c_v < 1,43 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{s}$). A faixa intermediária entre as condições drenadas e não drenadas corresponde a ensaios nos quais há ocorrência de drenagem parcial (BEDIN, 2006).

Devido às dificuldades de se determinar os valores de $q_{c\tilde{n}}$ e q_{cdr} , o cálculo do grau de drenagem pode ser realizado utilizando a Equação 20 proposta por Randolph & Hope (2004). Os autores determinaram o valor de 3,77 para n (razão entre as condições drenadas e não drenadas), que deve ser estimada para materiais distintos do trabalho dos mesmos.

$$U = \frac{\left(\frac{q_c}{q_{c\tilde{n}}} - 1 \right)}{(n - 1)} \quad \text{Equação 20}$$

Uma vez que as características da curva normalizada estejam definidas, a curva de drenagem do material pode ser definida pela Equação 21 proposta por Schnaid (2005), equação que considera uma função cosseno hiperbólica que varia de 0 a 1. Para o valor de $V = 0$ temos

grau de drenagem $U = 1$, ou seja, condição drenada do ensaio. Esta equação deriva de dados numéricos dos trabalhos do referido autor.

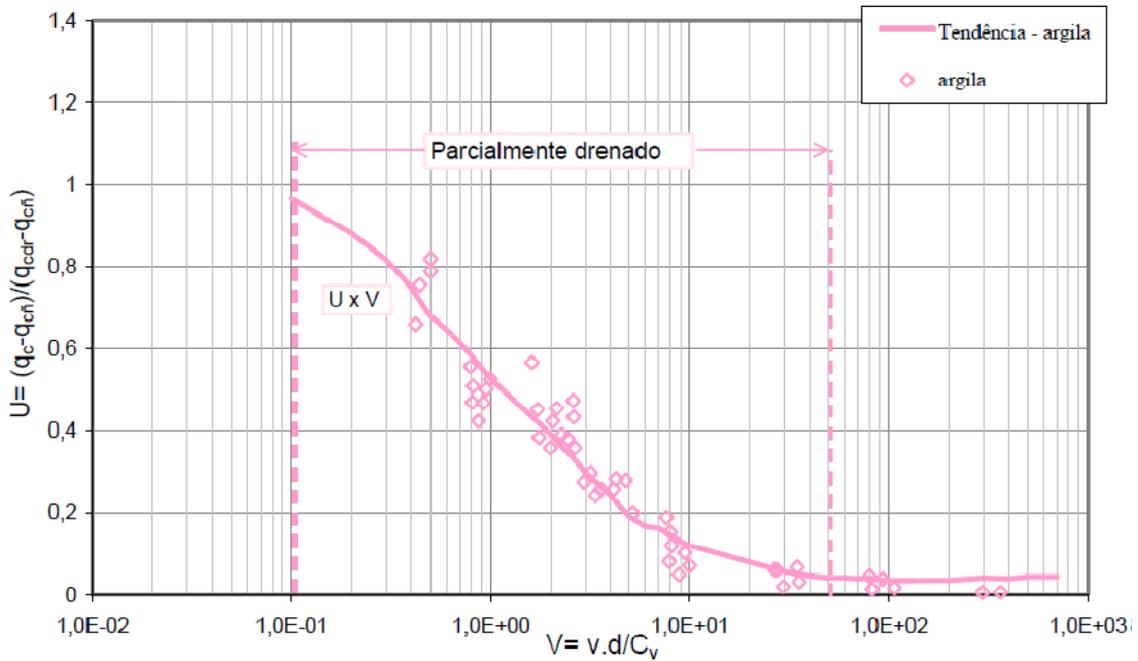


Figura 16: Condições de drenagem nos ensaios de piezocone (BEDIN, 2006).

$$U = a + (1 - a) \frac{1}{\cosh(b \cdot V^c)} \quad \text{Equação 21}$$

Gauer (2010) avaliou as condições de drenagem de um material siltoso (inerte) de granulometria semelhante a do resíduo de mineração de ouro, a partir de ensaios de palheta de laboratório (palheta com 2,55 cm de diâmetro, c_v do material de $6,65 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$), e apresentou os resultados juntamente com os de trabalhos anteriores de ensaios de piezocone e palheta, comparando os diversos materiais estudados (Figura 17).

Além das pesquisas realizadas a partir de ensaios de piezocone e palheta, podem-se citar ainda os trabalhos de Bjerrum (1973), que definiu um fator de correção na determinação dos parâmetros de resistência dos materiais, para aproximar os valores de S_u dos ensaios (significativamente maiores) com S_u de casos reais. O autor considera que a interferência nos resultados deve-se parcialmente à taxa de rotação e parcialmente à anisotropia

(TORSTENSSON, 1977; SCHNAID, 2000). Esta correção em função do limite de liquidez é comumente utilizada.

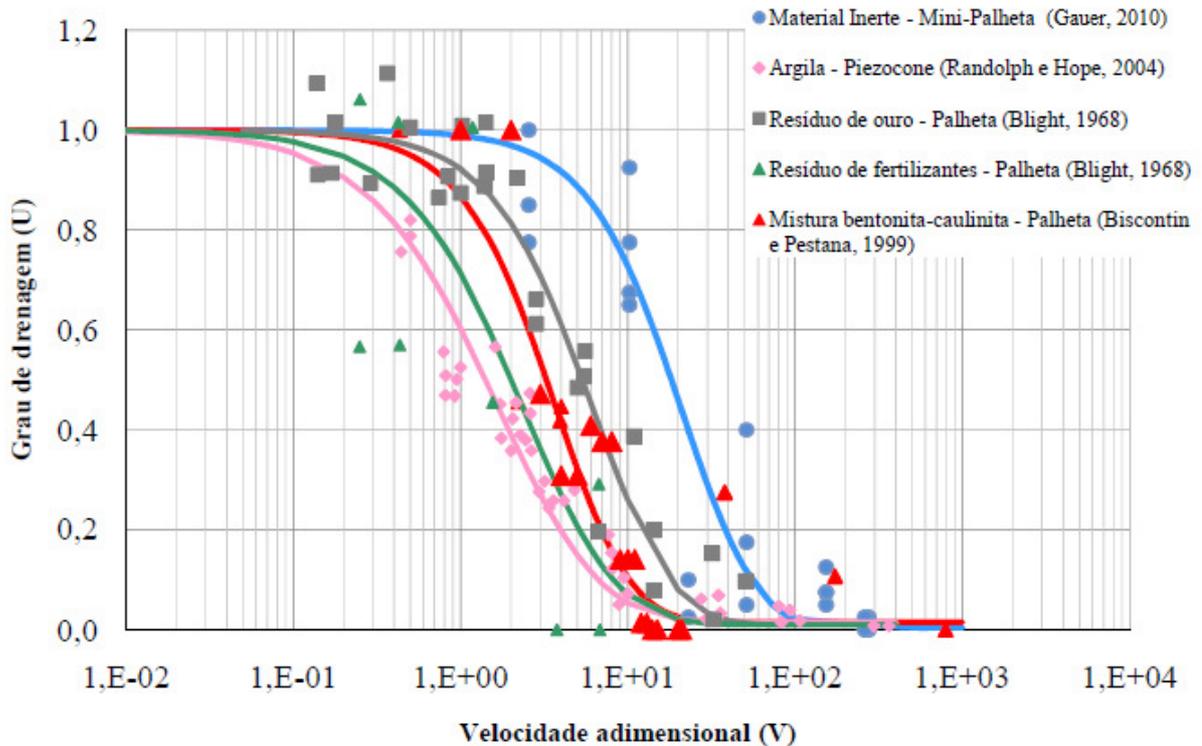


Figura 17: Curvas de drenagem de diferentes materiais (GAUER, 2010).

3.3 EFEITOS VISCOSOS DURANTE A REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

No que se refere ao cisalhamento do solo há assuntos já esclarecidos, tais como a influência da tensão normal sobre a resistência ao cisalhamento e do ângulo de atrito interno do material, e outros reconhecidamente que necessitam de esclarecimento como, por exemplo, os efeitos viscoplásticos (e. g. TAYLOR, 1942; ATKINSON & BRANSBY, 1978; MARTINS, 1992). Este item busca trazer informações a respeito das considerações dos efeitos viscosos nos ensaios de cisalhamento, e as possíveis influências nos ensaios de campo.

A relação entre a resistência viscosa e a velocidade de fluxo uniforme foi estabelecida por Newton no Século XVII, que determina que a tensão tangencial entre camadas de um fluido é proporcional à variação da velocidade transversal à direção do fluxo (Equação 22).

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy}$$

Equação 22

onde:

τ = tensão tangencial;

μ = coeficiente de viscosidade;

dv/dy = variação da velocidade transversalmente à direção do fluxo.

De acordo com Terzaghi (1941), em solos argilosos saturados, os grãos são envoltos por uma camada de água adsorvida. Na vizinhança da superfície dos grãos, a água adsorvida se encontra no estado sólido e fortemente aderida. A viscosidade da água diminui à medida que se afasta da superfície dos grãos, até que suas propriedades sejam de água “comum”, esta é a água livre que é expulsa durante os ensaios (Figura 18). Por este motivo, Taylor (1948) sugere que o efeito da velocidade de deformação sobre a resistência ao cisalhamento é provocado pela natureza viscosa do material, nas zonas de adsorção junto aos pontos de contato das partículas.

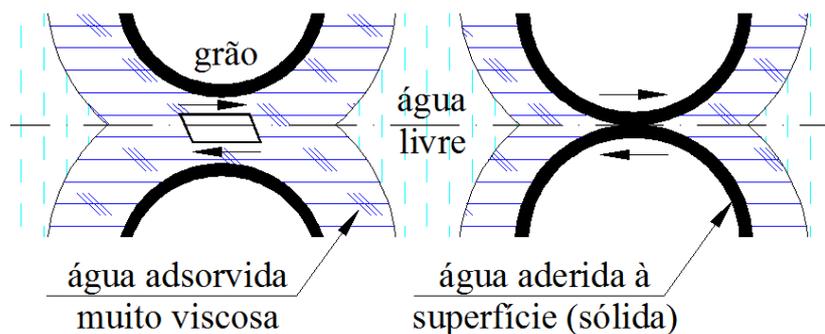


Figura 18: Tipos de contatos no solo (MARTINS, 1992).

Taylor (1948) sugere que na ruptura a resistência ao cisalhamento é composta por uma parcela que depende do ângulo de atrito mobilizado do material e outra parcela devido à viscosidade do fluido adsorvido. Esta segunda parcela é influenciada diretamente pela velocidade de deformação cisalhante, conforme apresentado a seguir:

$$\tau = \sigma' \left[\tan \phi + f \left(\frac{\delta \varepsilon_s}{\delta t} \right) \right] \quad \text{Equação 23}$$

onde:

σ' = tensão normal efetiva no plano de ruptura, no momento da ruptura;

ϕ = ângulo de atrito do material;

$\delta \varepsilon_s / \delta t$ = velocidade de deformação cisalhante.

Na equação apresentada, pode-se observar que quanto maior a velocidade, maior será a parcela viscosa na resistência ao cisalhamento, ou seja, maior a resistência cisalhante mobilizada. Desta forma, pode-se considerar que um aumento na velocidade dos ensaios em solos argilosos saturados resulta em um aumento da resistência ao cisalhamento não drenada. Uma revisão detalhada destes conceitos é apresentada por Leroueil and Hight (2002), Martins (1992), entre outros.

4 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DE ESTUDOS

A campanha de ensaios foi realizada na Barragem dos Peixes situada nas dependências do complexo industrial da Votorantim Metais Zinco, em Juiz de Fora – MG (Figura 19). A campanha completa compreendeu a realização de ensaios em três pontos distintos da barragem (PZC01, PZC02 e PZC03), indicados na Figura 20, sendo ensaios de piezocone sísmico (SCPTU), palheta com distintas velocidades e coleta de amostras. As investigações de campo e laboratório têm como objetivo avaliar as condições do resíduo ao longo da profundidade, principalmente as características geotécnicas como densidade e umidade, e as características geomecânicas: compressibilidade, permeabilidade e resistência ao cisalhamento. Estas características permitirão maior confiabilidade nas premissas e parâmetros a serem considerados nos projetos de reabilitação de barragens de rejeito.

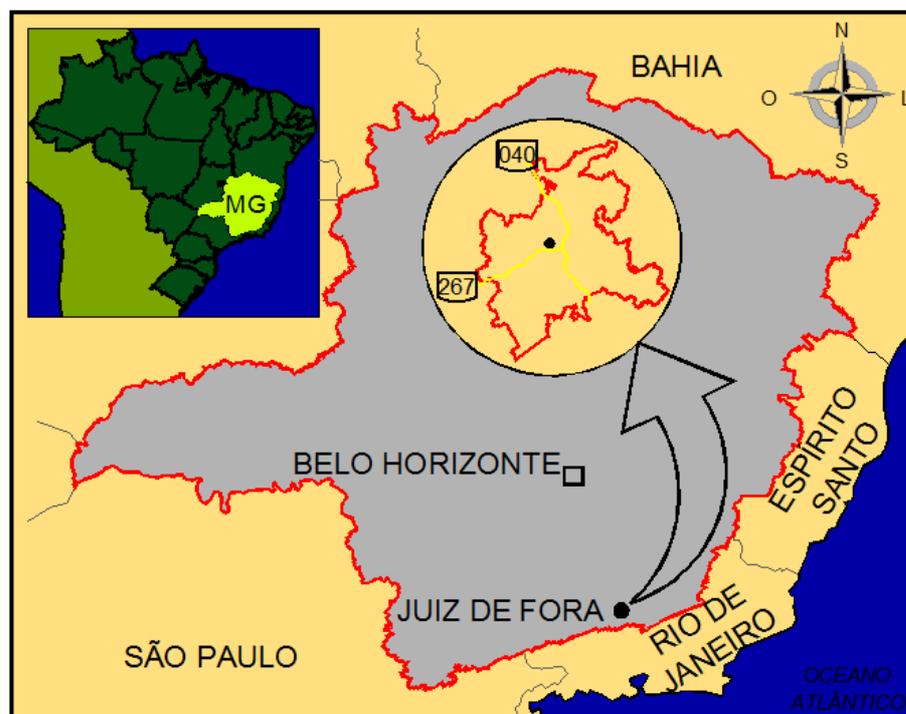


Figura 19: Localização da campanha de ensaios (Barragem dos Peixes).

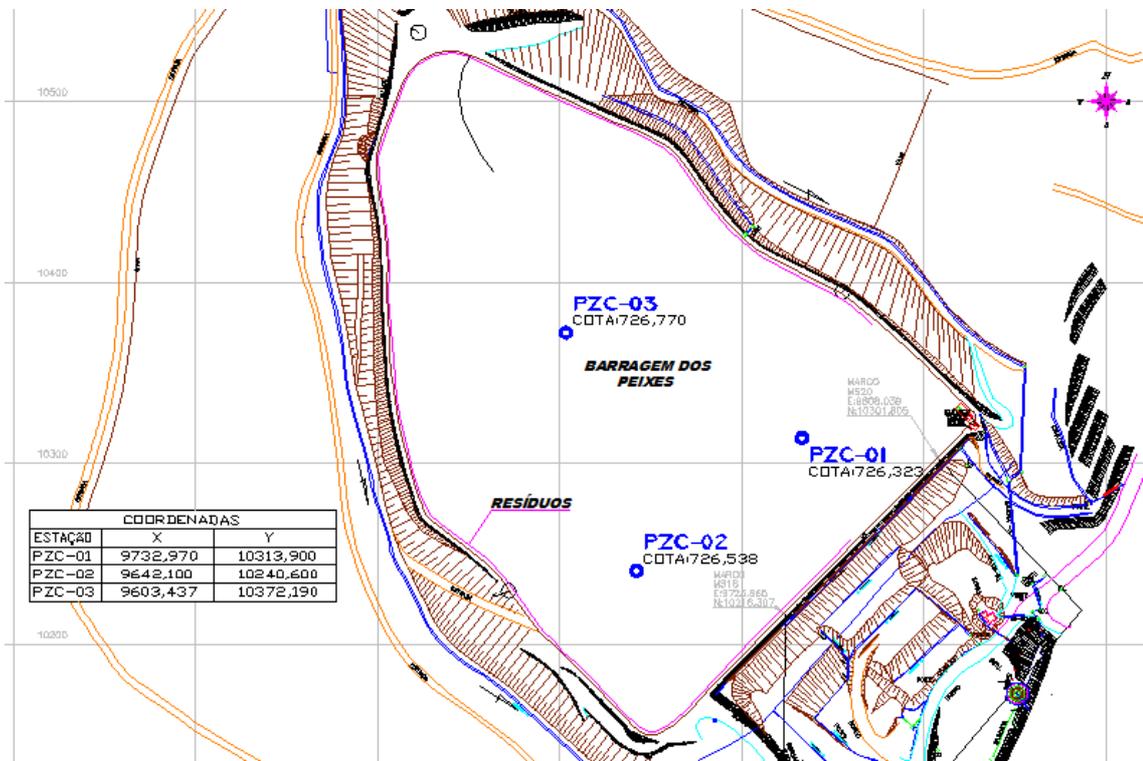


Figura 20: Localização dos ensaios, Barragem dos Peixes.

As áreas de deposição dos resíduos de zinco, gerados pelo processo de mineração, apresentam grande potencial de contaminação e, devido a isso, o resíduo é disposto em áreas impermeabilizadas e dotadas de drenagem de fundo para atender as legislações ambientais, evitando danos ao meio ambiente. Estas áreas são formadas por diques de solo compactado e recebem o resíduo pela técnica convencional, sendo o transporte do resíduo de zinco realizado por via úmida com baixa concentração de sólidos, desde a refinaria até as áreas de disposição.

O enchimento da barragem de rejeito é monitorado periodicamente através de levantamentos batimétricos que indicam o volume de resíduos sedimentados e a quantidade de água sobrenadante, influenciada pela precipitação pluviométrica. A Figura 21 mostra uma barragem no início de operação, na qual é possível observar os sistemas de transporte e disposição dos resíduos e de impermeabilização.



Figura 21: Barragem no início de operação, Votorantim Metais e Zinco - Juiz de Fora - MG, 2009.

O conteúdo da água presente nos resíduos lançados nas barragens, que resulta do tipo de beneficiamento adotado, pode conferir ao material diferentes graus de saturação, elevando a linha piezométrica e resultando num aumento das pressões neutras atuantes. A elevação das poro pressões pode resultar na liquefação do material e instabilidade geral da estrutura (D'AGOSTINO, 2008). Devido a isso, as barragens possuem um sistema de bombas que são acionadas em períodos muito chuvosos quando os níveis de água estão elevados, para evitar o aumento excessivo das poro pressões e reduzir os riscos de ocorrência destes problemas, além de evitar que a água da barragem transborde provocando a contaminação do solo, de águas subterrâneas ou superficiais. A água bombeada das barragens passa por tratamento, que retira substâncias tóxicas e/ou contaminantes, que poderá ser reutilizada nos processos de mineração ou lançados no meio ambiente sem causar danos. A Figura 22 mostra as condições da Barragem dos Peixes no início da campanha de ensaios em 2009.

O acesso às estações de ensaio, ou também denominado de ilhas de investigação, só foi possível com a execução de caminhos com *pallets* de madeira e estruturas de eucalipto, conforme indicado na Figura 23, devido à baixa consistência do material. O local de maior dificuldade para execução do acesso foi à Estação PZC01, com uma camada superficial de baixa consistência e nível d'água cerca de 0,50 m acima do resíduo. Em cada Estação foram executadas 6 verticais de ensaios com espaçamento entre elas de 2 m, de modo a evitar interferências. A Figura 24 mostra um esquema dos ensaios realizados. Estes resultados serão analisados individualmente nos capítulos posteriores, buscando identificar a validade dos

métodos usuais de interpretação de ensaios *in situ* e, havendo necessidade, adaptar os métodos às condições apresentadas pelos resíduos de zinco.



Figura 22: Barragem dos Peixes Votorantim Metais e Zinco - Juiz de Fora - MG.



Figura 23: Caminho executado para acesso a Estação PZC01.

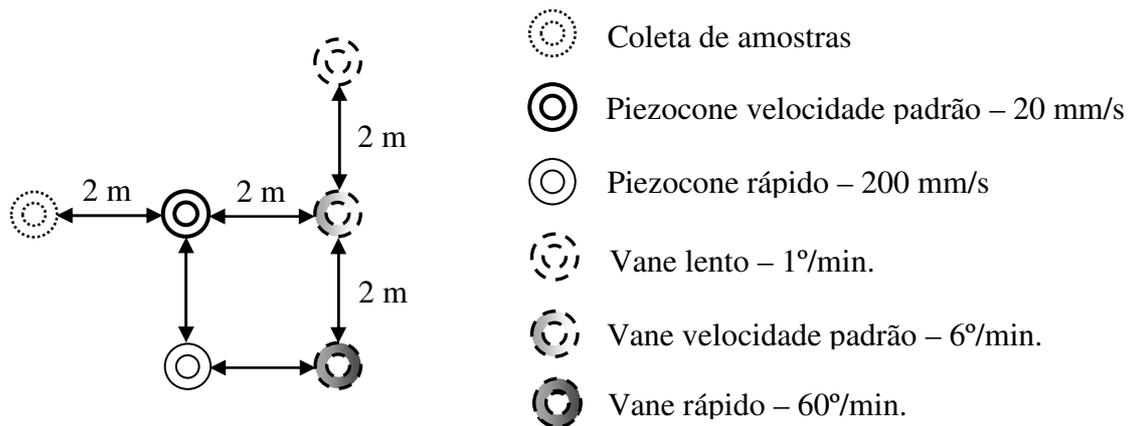


Figura 24: Esquema de localização dos ensaios.

4.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

O programa de caracterização geotécnica dos resíduos de mineração de zinco compreendeu a realização de análises granulométricas, determinação da densidade dos grãos (G), determinação dos limites de liquidez (LL) e plasticidade (LP), teor de umidade (w) e peso específico natural.

Os ensaios de laboratório foram realizados nas dependências da Geoforma Engenharia Ltda., em conformidade com os procedimentos padronizados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

4.1.1 Peso Específico Natural

Com o objetivo de avaliar as condições do resíduo depositado na barragem, foi determinado o Peso Específico Natural do material (γ_n) com amostras coletadas a cada metro até a profundidade de 12,0 m. A determinação do Peso Específico Natural foi realizada em campo com o auxílio de um amostrador tipo pistão estacionário (*Shelby*) com diâmetro de 4,8 cm, seguindo-se o procedimento de coleta de amostras padronizado pela ABNT, norma NBR 9820/93.

O procedimento adotado consistiu nas seguintes etapas:

- Descida do amostrador até a profundidade de amostragem desejada com o pistão posicionado na boca do amostrador (tubo amostrador fechado);
- Com a posição do pistão mantida estacionária, realiza-se a descida do amostrador até atingir todo o curso;

- c) Retirada do amostrador à superfície e limpeza do mesmo na parte externa;
- d) Retirada da amostra, com a boca do amostrador voltada para cima e o pistão acionado lentamente, eliminando o terço superior e inferior, medindo-se o comprimento da amostra com auxílio de régua milimetrada e conservando-se o terço central;
- e) Identificação e armazenamento das amostras em sacos plásticos devidamente selados e mantidos em local adequado;
- f) Pesagem das amostras.

A pesagem das amostras foi realizada utilizando uma balança do laboratório de análises químicas da Votorantim Metais e Zinco logo após a coleta, com resolução de 0,1 g. A Figura 25 apresenta uma das amostras coletadas com o auxílio do amostrador tipo pistão estacionário.

Conhecidas as dimensões internas do amostrador e as medidas do comprimento das amostras e o peso específico natural do material é calculado pela Equação 24:

$$\gamma_n = \frac{P_w}{V} \quad (\text{kN/m}^3) \quad \text{Equação 24}$$

onde:

P_w = Peso do material úmido em kN;

V = Volume da amostra em m^3 .

Os resultados dos ensaios estão apresentados nas Tabelas 2 - 4 a seguir.



Figura 25: Coleta de amostras de Resíduo de Zinco (Amostrador *Shelby*).

Tabela 2: Pesos Específicos na Estação PZC01.

Estação	Prof. (m)	Comprimento (m)	Peso Úmido (g)	Peso específico natural (KN/m ³)
PZC01	1	0,400	893,36	12,11
	2	0,300	683,54	12,35
	3	0,430	966,64	12,19
	4	0,335	760,68	12,31
	5	0,315	756,91	13,03
	6	0,320	744,03	12,60
	7	0,300	704,22	12,73
	8	0,280	680,45	13,17
	9	0,370	867,66	12,71
	10	0,300	722,80	13,06

	11	0,300	786,77	14,22
	12	0,390	979,54	13,62

Tabela 3: Pesos Específicos na Estação PZC02.

Estação	Prof. (m)	Comprimento (m)	Peso Úmido (g)	Peso específico natural (KN/m ³)
PZC02	1	0,340	798,38	12,73
	2	0,350	825,83	12,79
	3	0,270	676,55	13,58
	4	0,385	910,77	12,82
	5	0,305	745,34	13,25
	6	0,360	864,96	13,03
	7	0,335	833,39	13,49
	8	0,340	860,42	13,72
	9	0,325	856,05	14,28
	10	0,330	832,46	13,68
	11	0,325	830,59	13,85
	12	0,380	1045,64	14,92

Tabela 4: Pesos Específicos na Estação PZC03.

Estação	Prof. (m)	Comprimento (m)	Peso Úmido (g)	Peso específico natural (KN/m ³)
PZC03	1	0,200	415,92	11,27
	2	0,200	457,81	12,41
	3	0,355	838,70	12,81
	4	0,365	831,75	12,35
	5	0,355	801,18	12,23
	6	0,345	889,93	13,98
	7	0,335	868,58	14,06
	8	0,300	771,47	13,94
	9	0,330	852,04	14,00
	10	0,315	826,89	14,23
	11	0,335	879,43	14,23
	12	0,330	870,25	14,30

Os resultados mostram que o material apresenta consistência de solos orgânicos moles ($\gamma_n < 15 \text{ kN/m}^3$), cujos valores variam de 11,27 a 14,92 kN/m^3 , com um valor médio de 13,22 kN/m^3 . Estes valores são apresentados na Figura 26, na qual é possível observar que variam ligeiramente entre as estações, demonstrando que não há variabilidade significativa devido ao processo de lançamento do resíduo na barragem (Figura 26). Observa-se ainda que exista uma ligeira tendência de aumento do peso específico com a profundidade.

As amostras coletadas no amostrador foram utilizadas também para a realização posterior dos ensaios de laboratório.

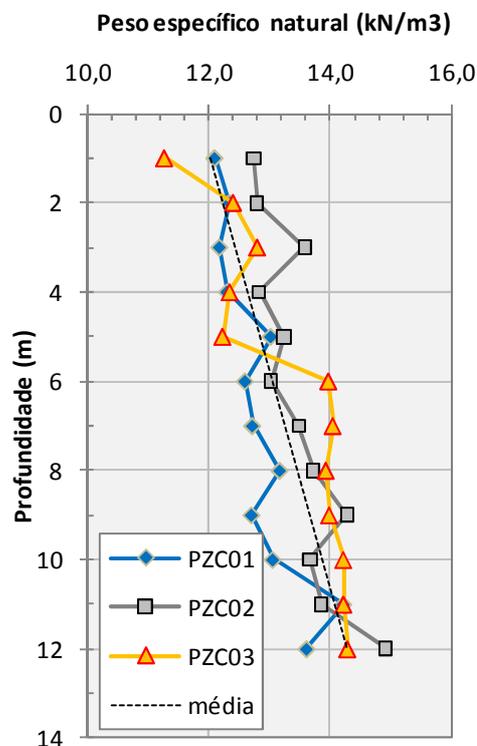


Figura 26: Peso específico do material ao longo da profundidade.

4.1.2 Teor de Umidade

Os ensaios para determinação do teor de umidade foram realizados com as amostras coletadas com o amostrador e de acordo com os procedimentos normalmente adotados em laboratório, com secagem do material em estufa, apenas utilizando cápsulas de material compatível com o resíduo de zinco.

Foram realizados 36 ensaios para determinação da umidade das amostras coletadas na Barragem dos Peixes nas três Estações PZC01, PZC02 e PZC03, totalizando 12 ensaios em cada ponto. Os resultados são apresentados na Figura 27, que mostram o teor de umidade (w) ao longo da profundidade em cada estação.

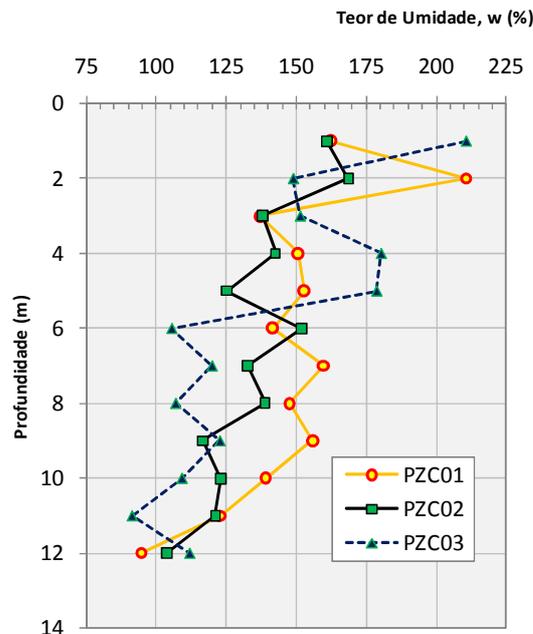


Figura 27: Resultados dos ensaios de determinação do teor de umidade.

Apesar dos valores apresentarem alguma variação entre as estações, verifica-se um padrão definido de redução do teor de umidade com a profundidade. Os resultados aproximados das Estações PZC01 e PZC02, localizadas a uma mesma distância dos diques, mas em lados opostos, mostram que pode haver influência devido à distância em relação aos pontos de lançamento, bombeamento da água pluvial e drenagem. Os resultados mostram teores de umidade variando entre 90 e 210 %, considerados altos até mesmo para o resíduo completamente submerso, representativos de materiais com alto índice de vazios.

4.1.3 Análise Granulométrica

Na presente pesquisa, as análises granulométricas foram realizadas de acordo com os procedimentos preconizados na norma NBR 7181/84. Adicionalmente, para verificação da influência do licor na caracterização, foram executados dois tipos de ensaios de sedimentação, o primeiro com o uso do licor da própria polpa de resíduos, coletado diretamente do ponto de lançamento do rejeito na barragem e, o outro, só com água destilada. Foram realizados

ensaios com amostras coletas nas profundidades entre 2 a 10 m em ambas as estações. Os resultados dos ensaios realizados com ambos os fluidos são apresentados a seguir.

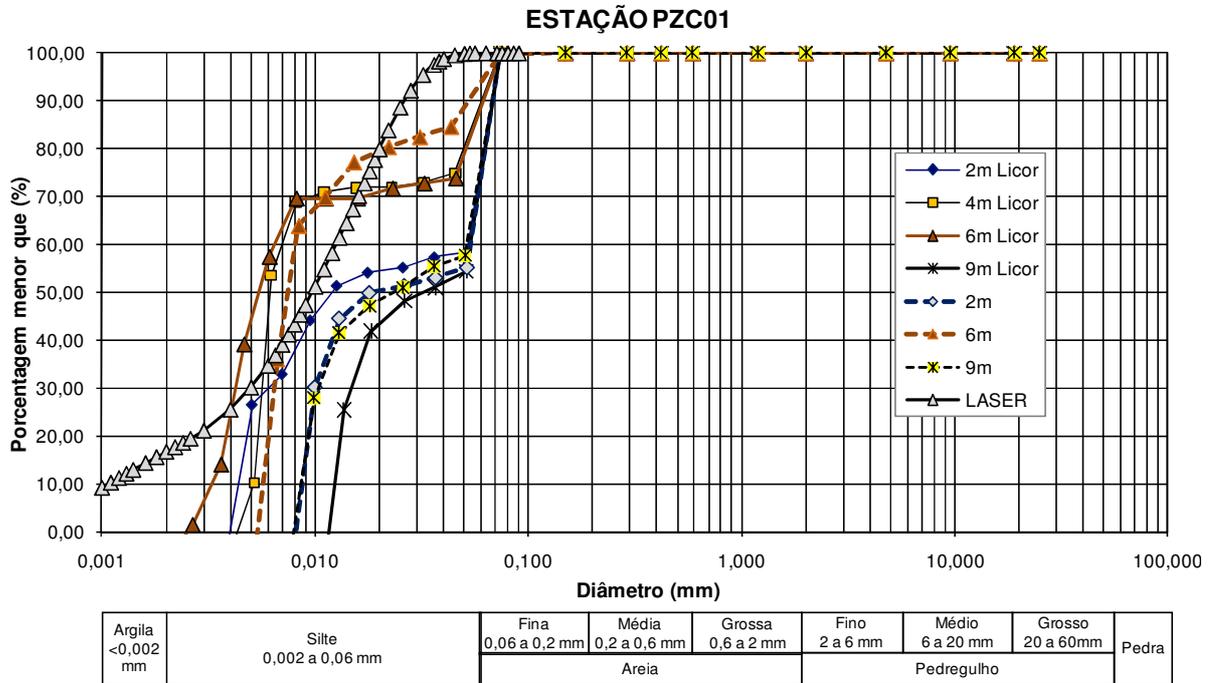


Figura 28: Curvas granulométricas Estação PZC01.

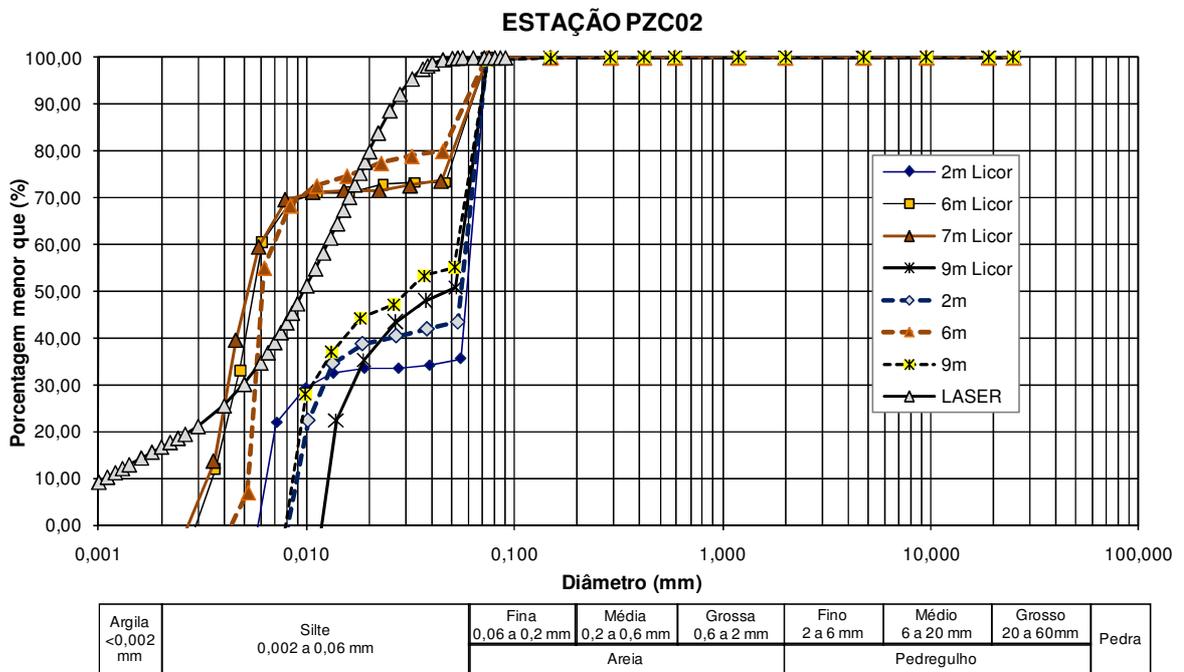


Figura 29: Curvas granulométricas Estação PZC02.

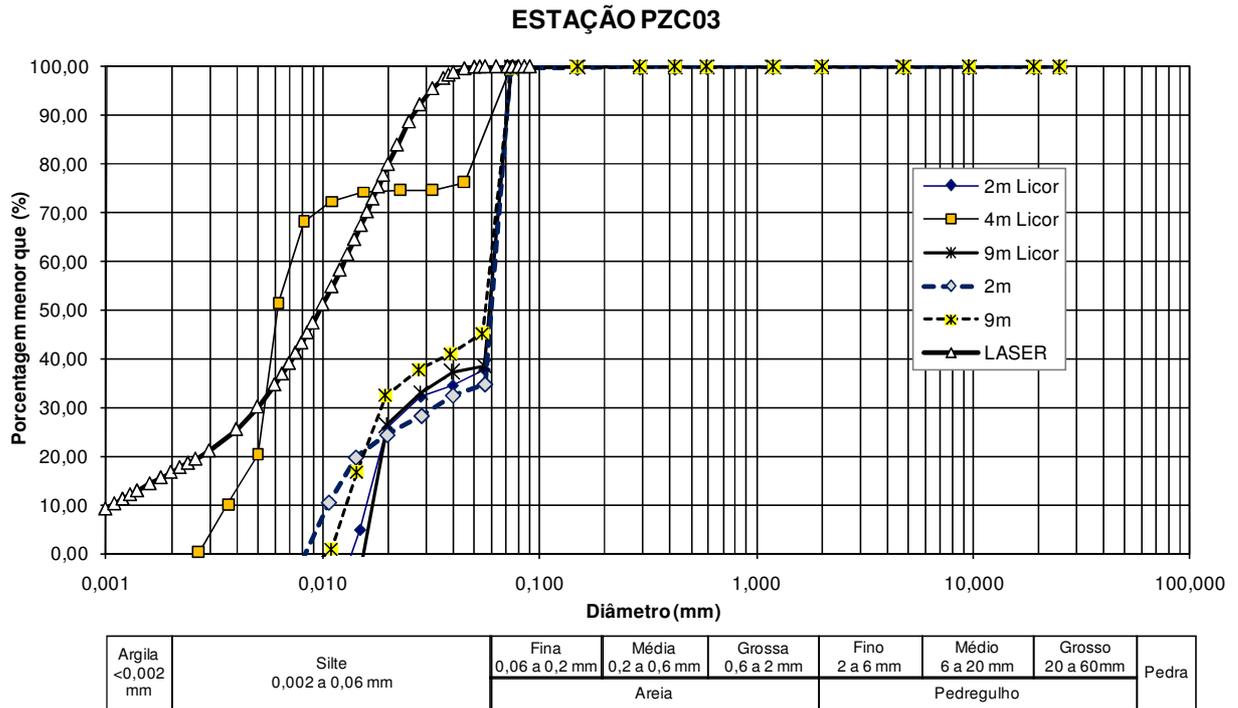


Figura 30: Curvas granulométricas Estação PZC03.

Tabela 5: Comparação percentual dos ensaios de granulometria.

ESTAÇÃO	Prof. (m)	Silte (%)		Areia fina (%)		Areia Média (%)	
		Licor	Água dest.	Licor	Água dest.	Licor	Água dest.
PZC01	2,0	99,88	99,88	0,10	0,10	0,01	0,01
	4,0	99,97	99,93	0,03	0,07	0,0	0,0
	6,0	98,94	-	0,06	-	0,0	-
	9,0	99,86	99,92	0,11	0,06	0,03	0,02
PZC02	2,0	99,90	99,90	0,10	0,10	0,0	0,0
	6,0	100,0	99,97	0,0	0,03	0,0	0,0
	7,0	99,92	-	0,08	-	0,0	0,0
	9,0	99,51	99,43	0,48	0,54	0,01	0,03
PZC03	2,0	99,79	99,71	0,18	0,26	0,03	0,03
	4,0	99,93	-	0,07	-	0,0	-
	9,0	99,83	99,75	0,15	0,22	0,02	0,03

Os resultados apresentados na Tabela 5 mostram que o material é composto por silte e areia com predominância de silte em quase toda sua totalidade. Não foram encontradas partículas com diâmetro menor que 0,002 nos ensaios de sedimentação, ou seja, o material nestas condições não apresenta granulometria argilosa. A diferença entre os ensaios com licor e com água destilada em relação ao tipo de material (areia, argila e silte) demonstra que embora haja influência do licor, esta é pouco significativa.

O processo de segregação hidráulica que pode ocorrer durante o lançamento do material não foi observado nos ensaios realizados e pode ter sido influenciada pelas diversas etapas de lançamento e ressecamento, conforme descrito no Capítulo 2. Outro fator que pode ter influenciado são as características do material, que é composto por partículas de grande densidade.

Nos gráficos apresentados também é possível identificar descontinuidades das curvas granulométricas, o que não é observado normalmente nos ensaios com materiais convencionais, possivelmente provocadas por perda de material, ou à secagem prévia que pode provocar alterações nos argilominerais e agregação de partículas finas. Segundo RIGO (2005), as descontinuidades evidenciadas em seus ensaios eram devidas ao processo de lavagem do material pelo operador. A energia utilizada para soltar as partículas aderidas aos grãos maiores resultava em pequenas frações retidas na peneira ao final do processo, apresentando as descontinuidades entre as porções correspondentes aos ensaios de peneiramento e sedimentação, desta forma, as descontinuidades evidenciaram a quebra de partículas e agregados no processo de lavagem. Esta quebra durante o ensaio de granulometria não ocorre com o material da presente pesquisa, pois o material passa por processo de britagem antes do lançamento na barragem onde foram coletadas as amostras.

Com o intuito de verificar a ocorrência das descontinuidades nas curvas granulométricas determinadas por peneiramento e sedimentação, a determinação da distribuição granulométrica foi realizada também pela técnica de difração de laser. Para tal foi utilizado o equipamento Cilas 1180, do Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER) da UFRGS com faixa de variação de 0,04 μm a 2500 μm (100 faixas). O ensaio consiste na passagem de uma pequena quantidade de material em uma câmara, na qual é diluído em água destilada e submetida a um feixe de raios laser que analisa através da obscuração da lente o diâmetro das partículas. O equipamento utiliza um programa de saída de dados que permite visualizar as curvas granulométricas obtidas nas diversas análises interativas, e apresenta uma curva média considerada como representativa do solo.

Os resultados apresentados na Figura 31 mostram uma curva granulométrica contínua, e neste caso observa-se uma fração argilosa do material (17,67 %), o que demonstra que houve alteração das características durante a realização dos ensaios por peneiramento e sedimentação. Para uma melhor comparação entre as curvas dos métodos empregados, uma

das curvas granulométricas dos ensaios a laser foi também apresentada nos gráficos anteriores, dos ensaios por peneiramento e sedimentação.

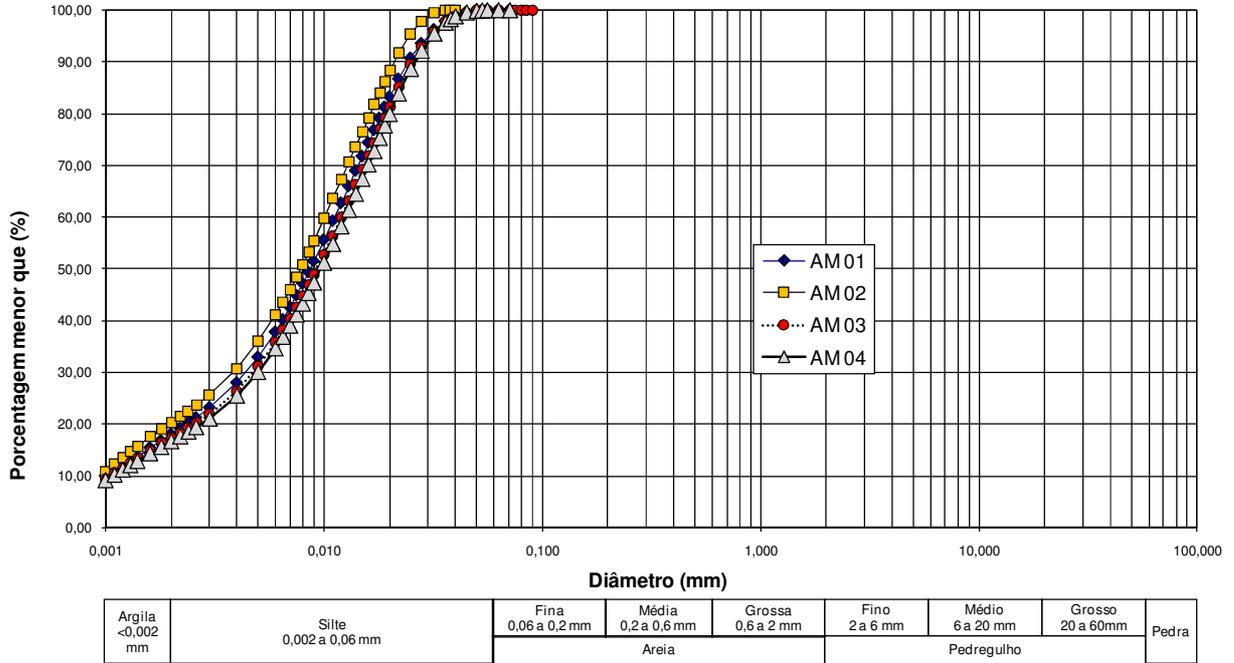


Figura 31: Resultados do ensaio de granulometria a laser.

Tabela 6: Percentual de material nos ensaios de granulometria a laser.

ENSAIO	Argila (%)				Silte (%)				Areia (%)			
	01	02	03	04	01	02	03	04	01	02	03	04
	18,1	20,4	17,4	16,7	81,9	79,6	82,5	83,3	0,0	0,0	0,0	0,0

Além dos fatores já citados anteriormente, a influência nos ensaios convencionais pode estar relacionada com a presença de sulfatos nas amostras de resíduo de zinco, principalmente sulfato de cálcio, os quais poderiam aglomerar partículas no meio dispersor durante a sedimentação. Podemos observar que os diâmetros das partículas, determinados pelo método convencional, apresenta faixa de valores maiores que os dos ensaios por difração de laser. Nestes ensaios encontramos uma parcela de material argiloso, não identificada anteriormente, além disso, não foi encontrada a parcela arenosa, identificada anteriormente.

4.1.4 Densidade dos grãos

Foram realizados 6 ensaios para determinação da densidade dos grãos com amostras coletadas nas profundidades de 2 e 9 m, duas por estação. A densidade foi obtida de acordo com os procedimentos descritos na norma NBR 6508/84.

Os resultados mostram valores variando de 3,285 a 3,371 g/cm³, sendo o valor médio igual a 3,323 g/cm³. Nas Estações PZC01 e PZC02, com a mesma distância em relação ao dique de contenção, os valores crescem com a profundidade, ou seja, as partículas mais densas se depositaram nas camadas inferiores e as partículas menos densas mais próximas à superfície. O mesmo não ocorre na Estação PZC03 e pode estar relacionada com a distância em relação ao ponto de lançamento do resíduo.

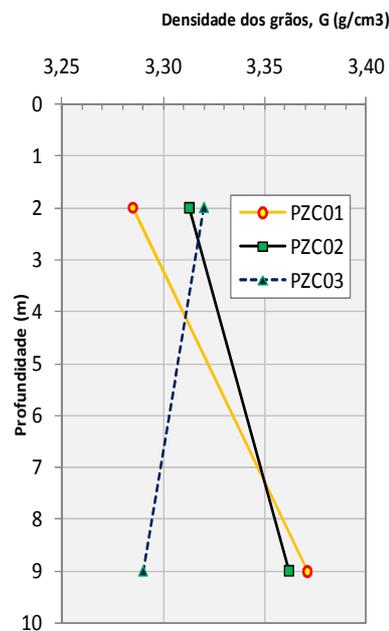


Figura 32: Densidade dos grãos (G).

4.1.5 Limites de Consistência

Os ensaios de limite de consistência foram realizados segundo as normas técnicas NBR 6459 – Determinação do Limite de Liquidez e NBR 7180 – Determinação do Limite de Plasticidade. Foram realizados ensaios sem adição de defloculante e com utilização de licor do reservatório, com amostras obtidas nas profundidades de 2 a 9 m, coletadas em todas as estações conforme indicado na Tabela 7. O objetivo principal destes ensaios é o de identificar

camadas mais plásticas presentes na Barragem de rejeitos, as quais poderiam levar a maiores deformações caracterizando pontos passíveis de ruptura não drenada.

Os limites de consistência são determinados a partir de amostras de solo seco à qual é adicionada água, no entanto, com o resíduo em análise na presente pesquisa, ao aumentarmos o teor de umidade, o material ganha consistência. Pode-se observar que em poucos minutos o material passa de uma consistência líquida para consistência pastosa, além de se tornar mais consistente, há redução do teor de umidade acrescentado, dependendo da quantidade de água já presente na amostra e da duração do ensaio. Devido ao comportamento não convencional apresentado pelo resíduo de zinco, os limites de consistência do material foram determinados a partir de ensaios realizados pelo procedimento inverso secando as amostras ao invés de adicionar água destilada ou licor (amostras coletadas diretamente na barragem sem preparação prévia). Este procedimento é mais demorado, mas que apresenta melhores resultados apresentados na Tabela 7.

Tabela 7: Limites de Consistência.

ESTAÇÃO	Prof. (m)	LL		LP		IP	
		Licor	Água dest.	Licor	Água dest.	Licor	Água dest.
PZC01	2,0	**	69	39	44	-	25
	5,0*	-	81	-	41	-	40
	7,0*	-	97	-	46	-	51
	9,0	75	62	43	39	32	22
PZC02	2,0	80	**	42	40	38	
	4,0*	-	75	-	35	-	40
	7,0	-	92	-	44	-	48
	9,0	57	61	31	33	26	28
PZC03	2,0	**	**	39	42		
	4,0*	-	100	-	46	-	54
	5,0*	-	101	-	49	-	52
	9,0	61	**	35	36	27	

*Ensaio realizado pelo procedimento inverso. ** Não foi possível a determinação devido ao comportamento não convencional do material.

Os resultados mostram que o IP do material varia de 22 a 54. Alguns autores utilizam este parâmetro como referência para indicar o potencial de liquefação do material, conforme citado por Neto (2009): neste caso o material é classificado como não suscetível à liquefação que consideram que solos com IP maior do que 7 % apresentam comportamento de argila e não suscetíveis à liquefação.

4.2 ENSAIO DE ADENSAMENTO

Na presente pesquisa optou-se por realizar o ensaio de adensamento convencional, com incremento de carga variando de 6,25 kPa a 400 kPa. Inicialmente seriam realizados 9 ensaios controlando o peso específico do rejeito, conforme resultados de campo, com a preparação das amostras reconstituídas a partir do material seco, simulando o resíduo com as características das profundidades de 2, 4 e 6 m (peso específico natural e teor de umidade). No entanto, devido ao comportamento não convencional do material, não foi possível a preparação das amostras conforme desejado, desta forma, o material foi ensaiado com as amostras reconstituídas com o material coletado na barragem, sem secagem prévia, sendo determinados posteriormente os parâmetros (γ e w). Para se obter a repetição dos ensaios, controlava-se o peso do anel preenchido com o rejeito.

A moldagem dos corpos de prova foi realizada a partir da homogeneização do material coletado diretamente na barragem, sem secagem prévia, e posterior lançamento no anel de adensamento com o auxílio de uma espátula. A quantidade de material a ser colocada no anel de adensamento foi controlada com o auxílio de uma balança com resolução de 0,1 g.

Foram realizados 3 ensaios de adensamento, os resultados são apresentados na Figura 33, na qual é possível observar a dificuldade de se obter o mesmo índice de vazios inicial nos ensaios. No entanto, as retas de compressão, recompressão e descarregamento apresentam boa concordância nos três ensaios, conforme pode ser visto na Tabela 8.

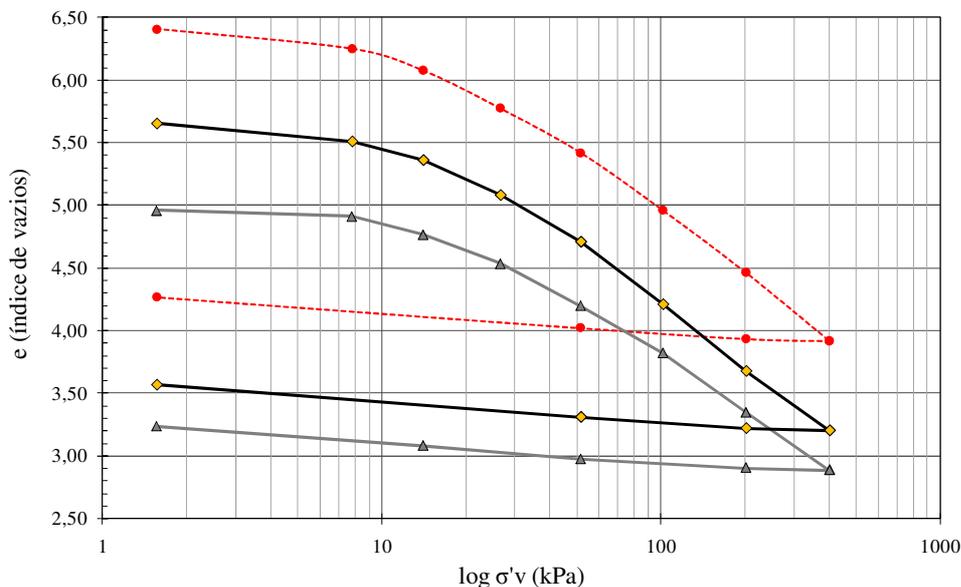


Figura 33: Resultados dos ensaios de adensamento.

Tabela 8: Índices de Compressibilidade

ENSAIO	Índice de comp. Cc			Índice de recomp. Cr			Ccr		
	01	02	03	01	02	03	01	02	03
	1,75	1,69	1,56	0,23	0,25	0,07	0,14	0,15	0,15

4.2.1 Parâmetros de adensamento do resíduo de zinco

Os resultados mostram que os valores de c_v para o resíduo de zinco variam de $2,0 \times 10^{-2}$ até $1,0 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{s}$ para os diferentes níveis de tensão empregados (Figura 34), com valor médio de $6,82 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$. Os ensaios também apresentaram uma tensão de pré-adensamento em torno de 20,5 kPa, que pode ter sido influenciado pela preparação das amostras, as quais eram moldadas no anel oedométrico com o auxílio de uma espátula.

Com os valores determinados em laboratório nos ensaios de adensamento e os dados dos ensaios de piezocone, foram traçados os perfis dos parâmetros de adensamento para as três estações conforme apresentado nas Figuras 34, 35 e 36. Para construção destes gráficos foram utilizados os valores de Cc e Ccr de laboratório e os valores de OCR, σ'_{vo} e e_0 dos ensaios de campo.

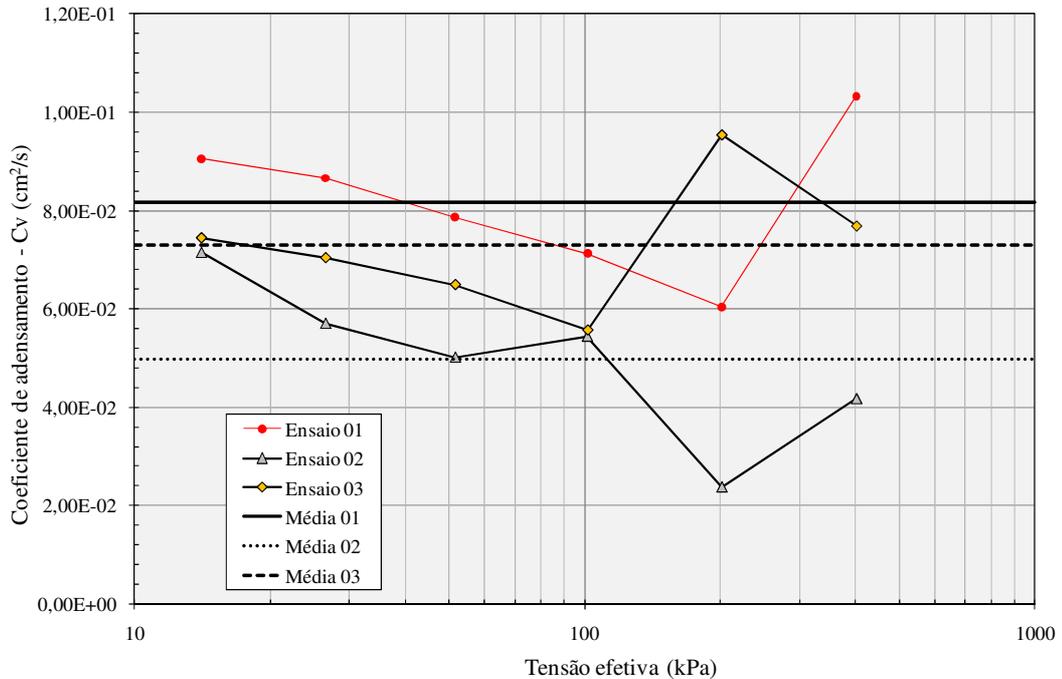


Figura 34: Coeficientes de adensamento ensaio convencional.

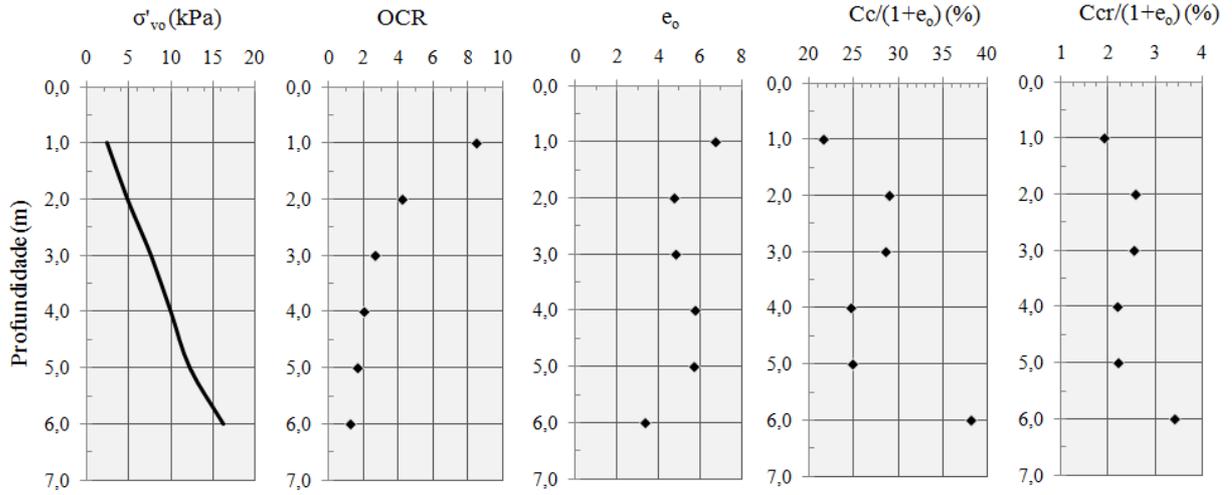


Figura 35: Parâmetros de adensamento Estação PZC 03.

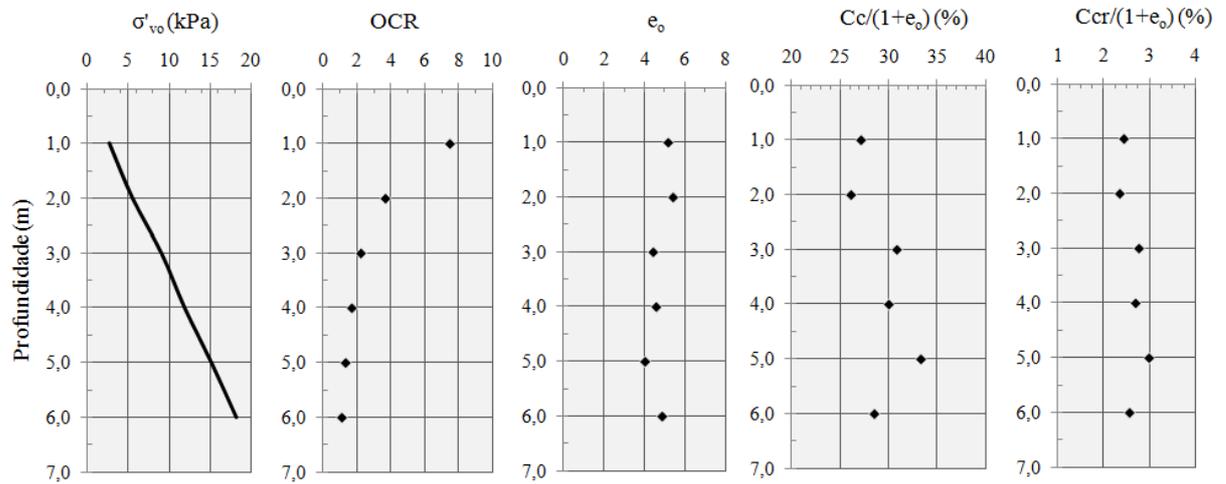


Figura 36: Parâmetros de adensamento Estação PZC 02.

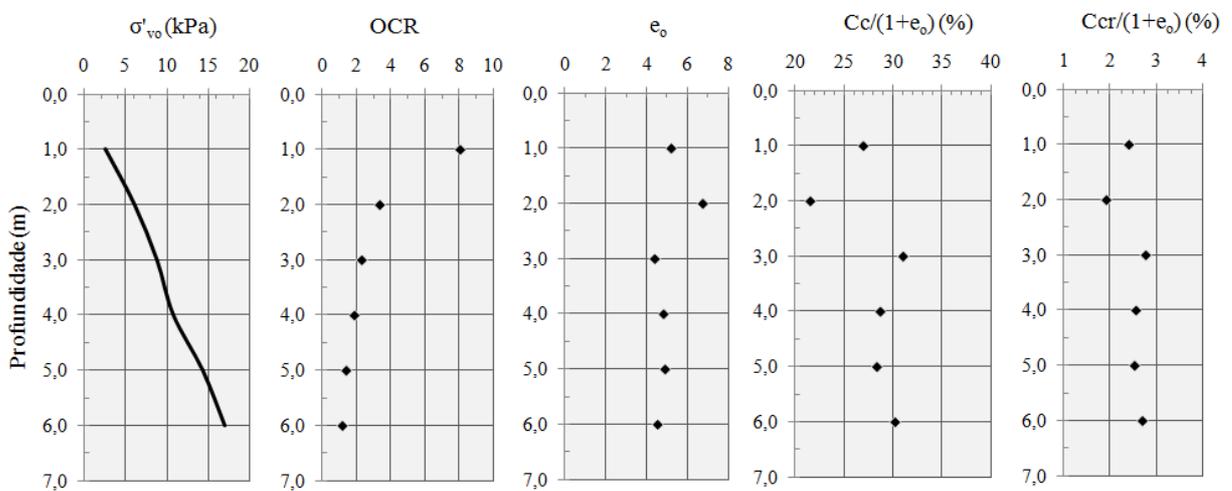


Figura 37: Parâmetros de adensamento Estação PZC 01.

4.3 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

Com o objetivo de obter informações quanto à composição do resíduo de zinco e analisar as características microestruturais, foram realizadas microanálises do material com a utilização de um microscópio eletrônico de varredura (MEV) modelo JSM 5800. O MEV se destina ao estudo de amostras inorgânicas e orgânicas/poliméricas, com algumas restrições. Este equipamento opera numa tensão de 0,1 a 30 kV com resolução máxima de 3 nm, e pode ser utilizado em observações de imagens e com microanálise química elementar.

4.3.1 Preparação das Amostras

Para se obter uma boa análise dos elementos que compõem o material, é necessário que a amostra seja representativa, sem modificações das suas características, que possam causar interferências nas micro-análises. As dimensões devem ser adequadas e sua manipulação realizada com objetos apropriados.

Para garantir que o material coletado para realização dos ensaios deste trabalho não tivessem sofrido alterações nas suas características ou contaminações, o material foi coletado diretamente em um dos pontos de lançamento na barragem de deposição do rejeito. Uma breve descrição dos demais procedimentos adotados na preparação das amostras para as micro-análises químicas é apresentada a seguir.

A preparação das amostras de resíduo de zinco para a micro-análise iniciou pelo processo de secagem ao ar, para em seguida levar o material à estufa com temperatura controlada a 60° C, por um período superior a 48 horas. Posteriormente, o material seco foi destorroado e peneirado. Na sequência, uma parcela do material seco foi fixada ao porta-amostra do microscópio (*stub*) com o auxílio de fita adesiva dupla face (Figura 38).

Em seguida, é realizado o processo de metalização da amostra, formando uma camada condutora, geralmente utilizando ouro ou carbono. Nas análises desta pesquisa para a metalização foram utilizados ambos os materiais, de forma a avaliar sua influência nos resultados. A metalização consiste na precipitação, a vácuo, de uma película micrométrica de material condutor sobre a superfície da amostra, possibilitando a condução da corrente elétrica.



Figura 38: Porta amostras “stubs” utilizados nos ensaios.

Nas imagens a seguir é possível observar o formato dos grãos, a angulosidade das arestas e algumas agrupações das partículas que compõem o material analisado no presente trabalho (Figura 39). As amostras de resíduo de zinco analisadas apresentam grande faixa de partículas com tamanhos diferentes, e o material é heterogêneo, apresentando diferentes formas de partículas. Nas duas primeiras imagens (a e b) são observados minerais maiores e estrutura em forma laminar. Na Figura 39c observa-se a presença de grãos pequenos e de formato esférico, agrupações de partículas e algumas partículas maiores e alongadas. A Figura 39f apresenta a imagem ampliada 2.500 vezes, com agrupações do material que formam estruturas porosas, partículas homogêneas com poucas distinções, arestas mais arredondadas e formato predominantemente esférico. Na Figura 39h, com ampliação de 10.000 vezes, é possível visualizar algumas partículas cristalinas com cristais relativamente grandes.

A partir das observações realizadas considera-se o material heterogêneo, com predominância de partículas pequenas arredondadas e com presença de cristais maiores alongados com formato tubular, que formam agrupações porosas de partículas, além da presença de minerais com estrutura laminar. Na Tabela 9, são apresentados os resultados da microanálise química elementar, indicando quais os elementos estão presentes nas amostras e quais as quantidades em porcentagem de cada material. Estes resultados foram obtidos de uma série de análises EDS realizados.

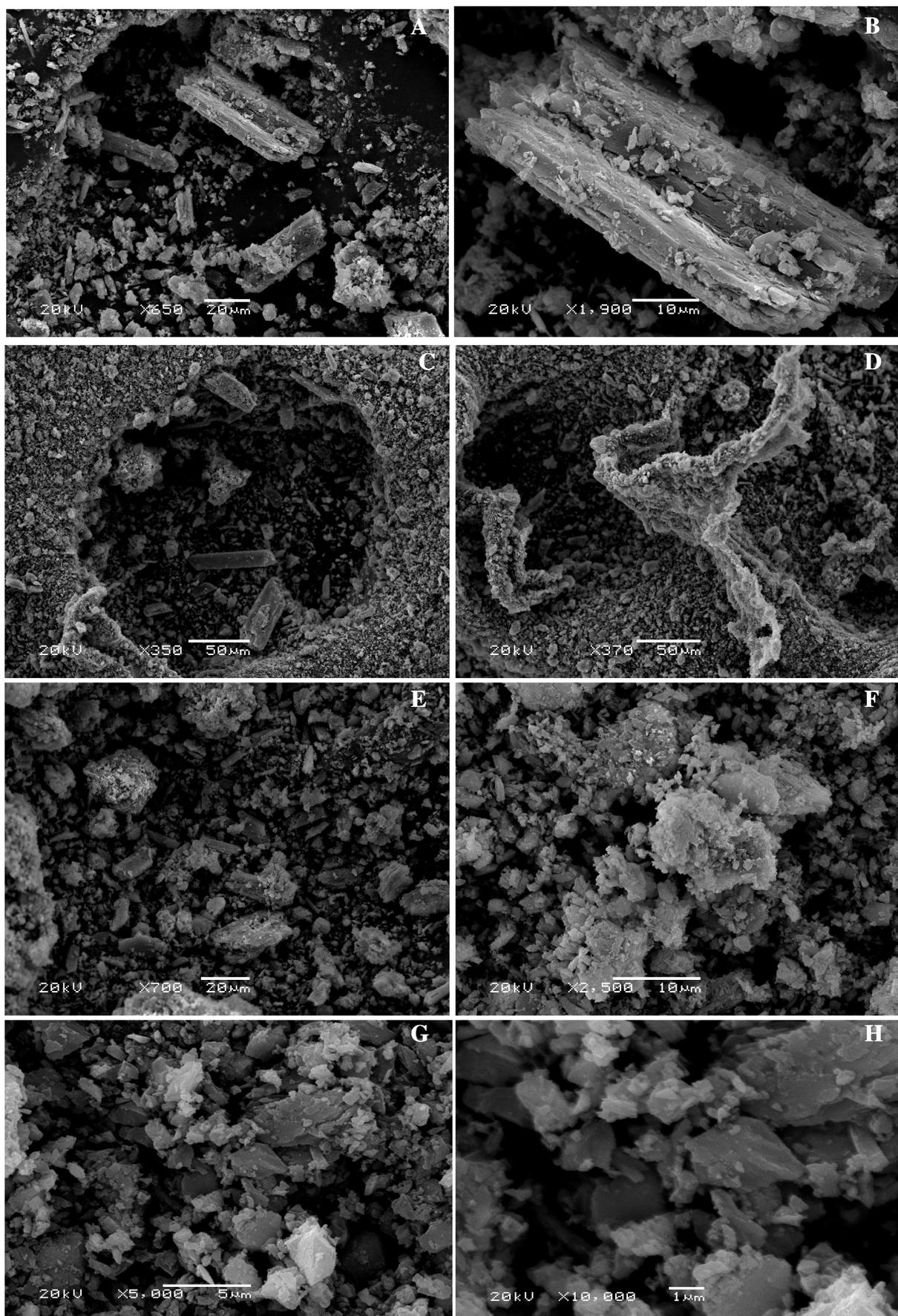


Figura 39: Imagens ampliadas das formas e agrupações do resíduo de zinco.

Tabela 9: Composição química do resíduo de zinco.

Elemento Químico	Quantidade (%)	Elemento Químico	Quantidade (%)
Mg	0,50	Zn	9,07
Al	0,13	W	1,46
Si	2,66	Co	0,15
S	25,80	Ni	0,13
Ca	24,75	Cd	0,45
Mn	5,06	Mo	0,50
Fe	29,34	TOTAL	100

4.3.2 Difratoograma

Os resultados dos difratogramas realizados indicaram a presença de sulfato de cálcio hidratado (*gipsita*), um mineral composto de silicato de cálcio, silicato de alumínio e carbonato de cálcio (*meionite*). Foram realizados três ensaios nas dependências do LACER (laboratório de materiais cerâmicos – UFRGS), todos indicaram a presença das mesmas fases cristalinas. A Figura 40 mostra o resultado dos ensaios.

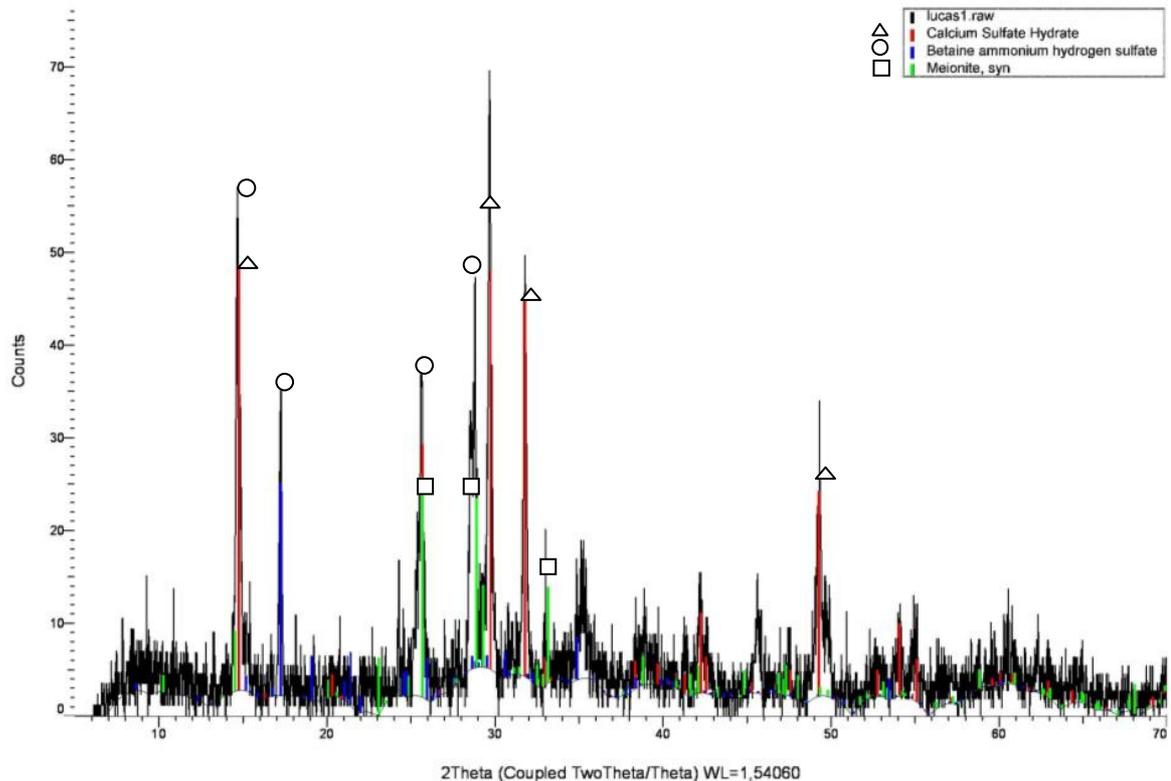


Figura 40: Resultado dos ensaios difratométricos.

A amostra de resíduo analisada por Abreu (2009) apresentou, além da fase cristalina gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), bassanita ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$). A presença de gipsita nas amostras pode estar diretamente relacionada com o comportamento não convencional do resíduo de mineração de zinco. De acordo com (DUTRIZAC, 2002), a solubilidade do sulfato de cálcio acima de 50°C é reduzida, o que provoca a cristalização do sulfato de cálcio.

Durante a preparação das amostras para os ensaios de granulometria, LL, LP e difratometria, o material era levado à estufa com a temperatura de 60°C por um período superior a 24 h. Este procedimento resultou na cristalização do sulfato de cálcio, posteriormente reagindo com a água adicionada ao material para realização dos ensaios de caracterização. A substância química sulfato de cálcio é um produto inorgânico, ocorrendo na forma de cristais brancos ou pó cristalino, solúveis em água. A Figura 41 mostra uma das amostras após o procedimento de secagem, na qual é possível visualizar a formação de pó branco nas bordas, possivelmente o sulfato de cálcio.

Quando presente no concreto, o sulfato de cálcio hemi-hidratado é responsável por um fenômeno conhecido como “falsa pega”, que ocasiona a perda súbita da plasticidade. Mediante vibração enérgica, geralmente a mistura readquire sua trabalhabilidade, pois são rompidas as fracas ligações ocorridas por ocasião da hidratação do hemidrato (MEHTA & MONTEIRO, 2008).



Figura 41: Amostra de resíduo após a secagem em estufa.

5 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CAMPO

O presente capítulo apresenta os resultados dos ensaios realizados na barragem de resíduos de mineração de zinco (Barragem dos peixes), além de algumas adaptações necessárias aos equipamentos e procedimentos de ensaio.

5.1 ADAPTAÇÕES AO EQUIPAMENTO DE *VANE TEST*

O equipamento utilizado foi construído em aço inoxidável, mantendo desta forma suas características inalteradas ao longo do tempo, assegurando a qualidade e possibilitando seu uso em resíduos de mineração e outros ambientes agressivos.

Para cravação do conjunto no resíduo de zinco, foi utilizado um sistema de cravação hidráulico (Geoforma SCL 50 kN) (Figura 42), sendo este um equipamento leve, necessário para atingir com segurança os pontos de realização do ensaio sobre um material de baixa consistência. O sistema é totalmente desmontável em partes cuja massa não excede 50 kg, permitindo a mobilização local por transporte manual. É composto de 2 cilindros hidráulicos com curso de 800 mm e capacidade de cravação de 50 kN, duas vigas metálicas e trados helicoidais que compõem a estrutura de reação, motor diesel de 10 HP e bomba de óleo.



Figura 42: Sistema de Cravação Leve – Geoforma SCL 50 kN.

Um dos requisitos da presente pesquisa consiste em realizar os ensaios a diferentes velocidades para identificar as condições de drenagem durante a rotação da palheta. Buscando aumentar a eficiência e controle das leituras, minimizando os erros devido à utilização de manivela controlada por operador, foi acoplado à mesa de torque um motor de passo (Kalatec - modelo KTC-HT23-400) para controle da velocidade, e ainda, um transdutor para as leituras de deformação (Gefran – modelo PY-2-F-010-S01M) necessárias à obtenção do torque aplicado. As velocidades de ensaio eram programadas em um controlador de motores de passo (IHM - Kalatec). As leituras foram efetuadas e armazenadas em um multímetro digital (Minipa - modelo ET-2615A) com registrador interno para até 87000 medidas e *data logger* com intervalos selecionáveis de 0,1 a 300 segundos (Figura 43). Estas leituras foram transferidas a um computador para interpretação das medidas. A energia necessária foi fornecida ao sistema com o uso de duas baterias de 60 A, com ligação para fornecer 24 V.

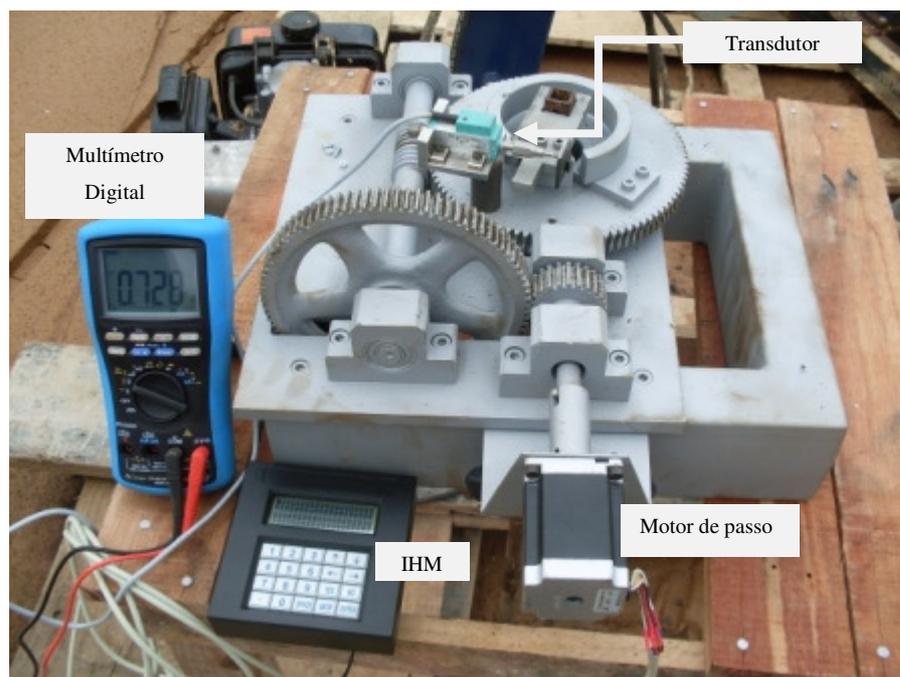


Figura 43: Detalhes das adaptações ao equipamento de ensaio.

5.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE PALHETA

Foram realizados ensaios de palheta *in situ* com três taxas distintas de rotação 1, 6 e 60 graus por minuto, a três profundidades correspondendo a 2, 4 e 6 m. Apenas não foram realizados os ensaios com a taxa de 1° por minuto na Estação PZC01 devido a problemas com o equipamento, totalizando 24 ensaios de palheta. As figuras a seguir apresentam as curvas de

rotação x S_u dos ensaios realizados. As curvas possuem um trecho inicial de registro, cujas medidas são condicionadas pela acomodação das partes componentes do aparelho (ajuste das luvas e das hastes), anteriormente ao torque efetivamente aplicado ao solo pela rotação da palheta. Estas curvas foram corrigidas efetuando-se uma translação do eixo das ordenadas, de forma que este se localizasse na interseção com o início dos valores crescentes de torque, mesmo procedimento adotado por Collet (1978). Essa correção foi adotada com o intuito de obter uma melhor comparação entre os resultados, a diferentes taxas de rotação, tanto das rotações para os valores máximos de torque quanto para o tempo de ruptura nas diferentes taxas empregadas (Figura 44).

Observa-se a mesma tendência que Blight (1968) obteve em sua pesquisa, maiores valores de resistência não drenada nos ensaios realizados com uma menor taxa de rotação. Nos pontos onde esta tendência não é observada, como no caso dos ensaios a 2 m na Estação PZC01 e a 6 m nas Estações PZC02 e PZC03, há possibilidade de interferências pela movimentação de pessoas adjacente ao local dos ensaios e pelo processo de lançamento e deposição do resíduo, com ensaios executados em pontos onde o material apresenta características distintas.

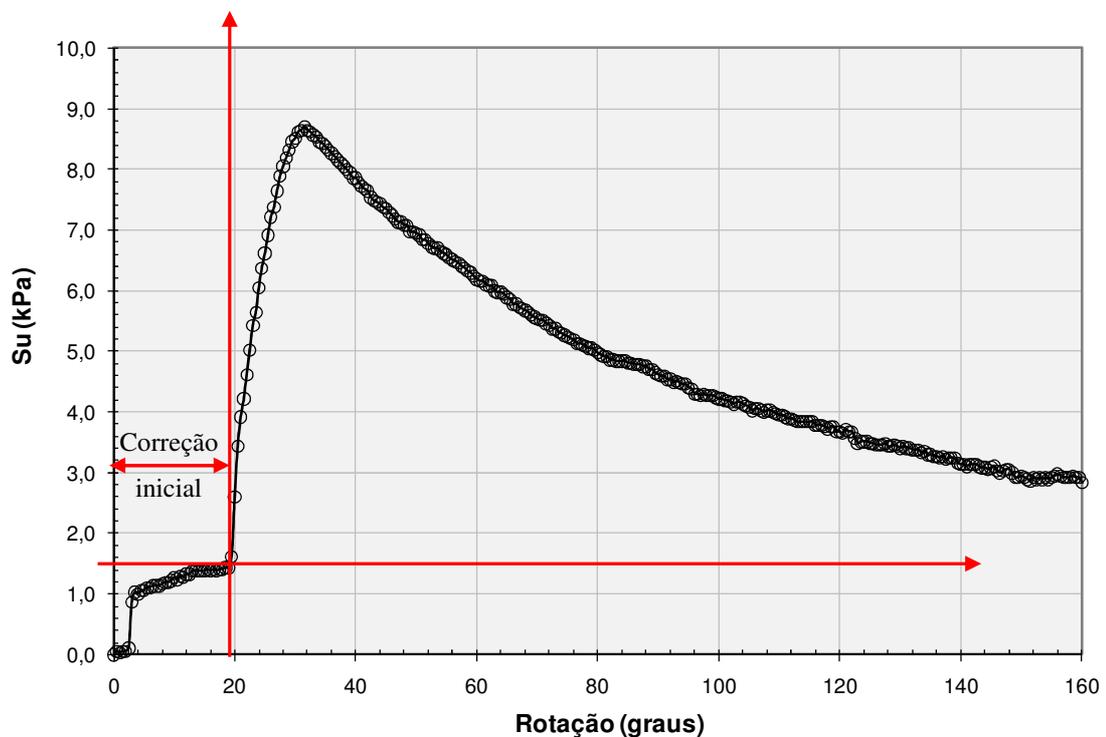


Figura 44: Correção inicial dos ensaios de palheta.

A seguir serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios de palheta realizados na Barragem dos Peixes. A análise da influência do grau de drenagem e dos fatores que

influenciam no valor da resistência ao cisalhamento não drenada, a partir destes ensaios, será abordada no Capítulo 6.

As Figuras 45, 46 e 47 mostram os resultados dos ensaios na Estação PZC01. Os valores de S_u são de 2,57 e 1,94 kPa para as velocidades de 6 e 60 graus por minuto, respectivamente. É possível observar grande fragilidade do material nesta estação.

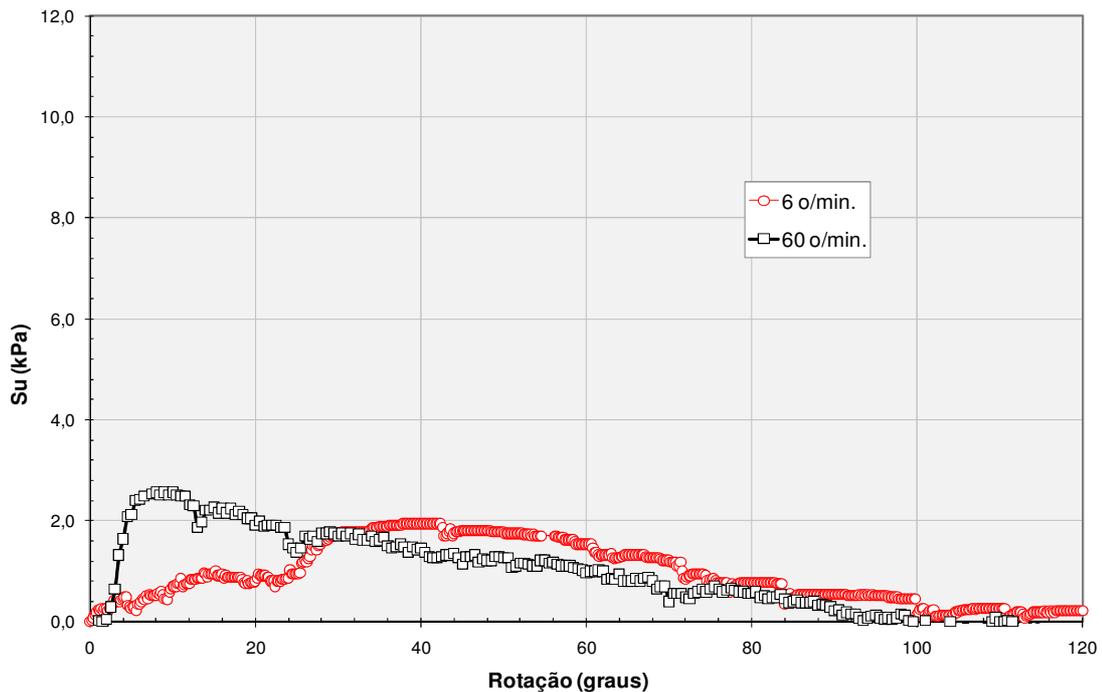


Figura 45: Ensaios de palheta Estação PZC01 profundidade 2 m.

Na profundidade de 4 m os valores de S_u são de 4,67 e 3,24 kPa e na profundidade de 6 m a resistência ao cisalhamento não drenada é de 11,45 e 7,54 kPa para as velocidades de 6 e 60 graus por minuto, respectivamente.

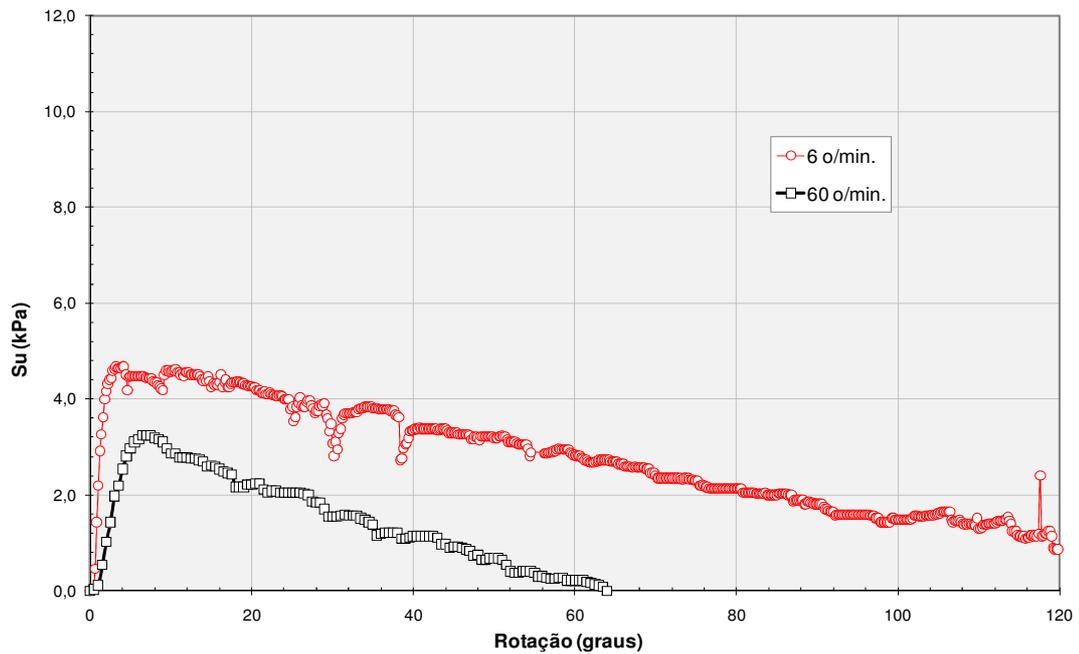


Figura 46: Ensaio de palheta Estação PZC01 profundidade 4 m.

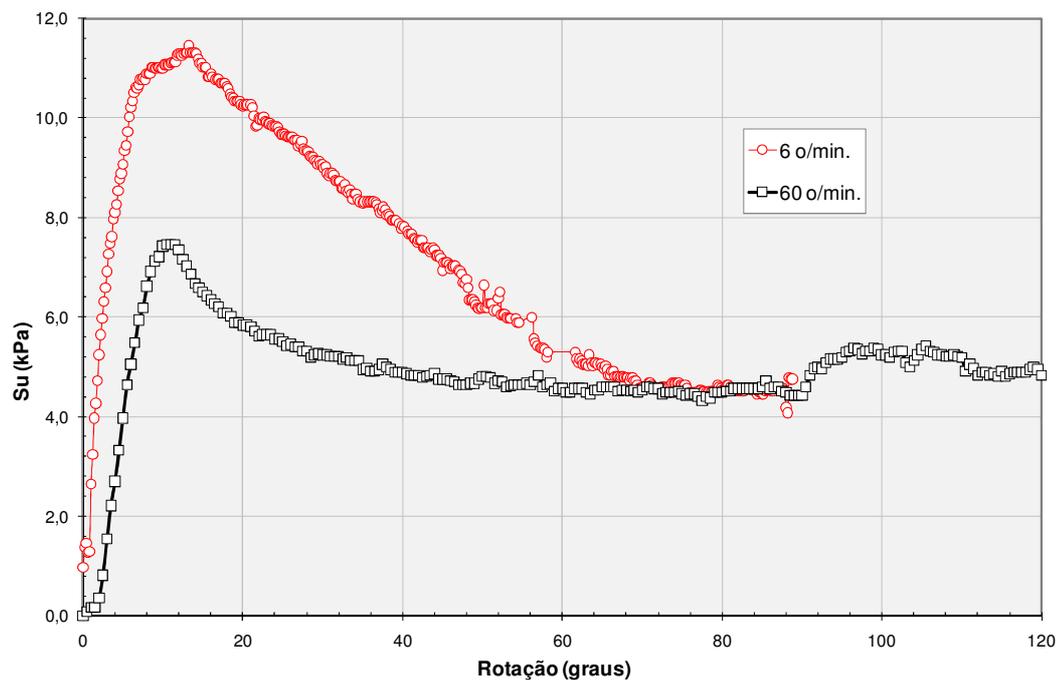


Figura 47: Ensaio de palheta Estação PZC01 profundidade 6 m.

Nas profundidades de 8, 10 e 11 m foram realizados apenas os ensaios à velocidade normal não sendo possível avaliar a influência da velocidade nestas profundidades. Os resultados dos ensaios realizados são apresentados nas Figuras 48, 49 e 50 e mostram o valor crescente de S_u com a profundidade, que varia de 11,83 a 33,70 kPa.

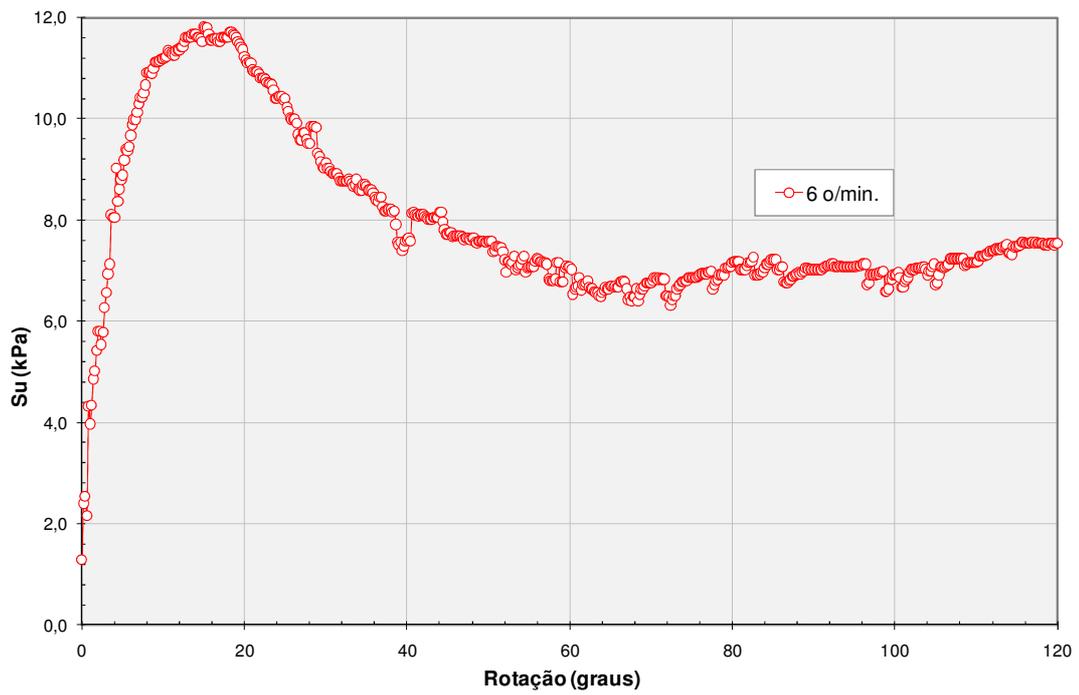


Figura 48: Ensaio de palheta Estação PZC01 profundidade 8 m.

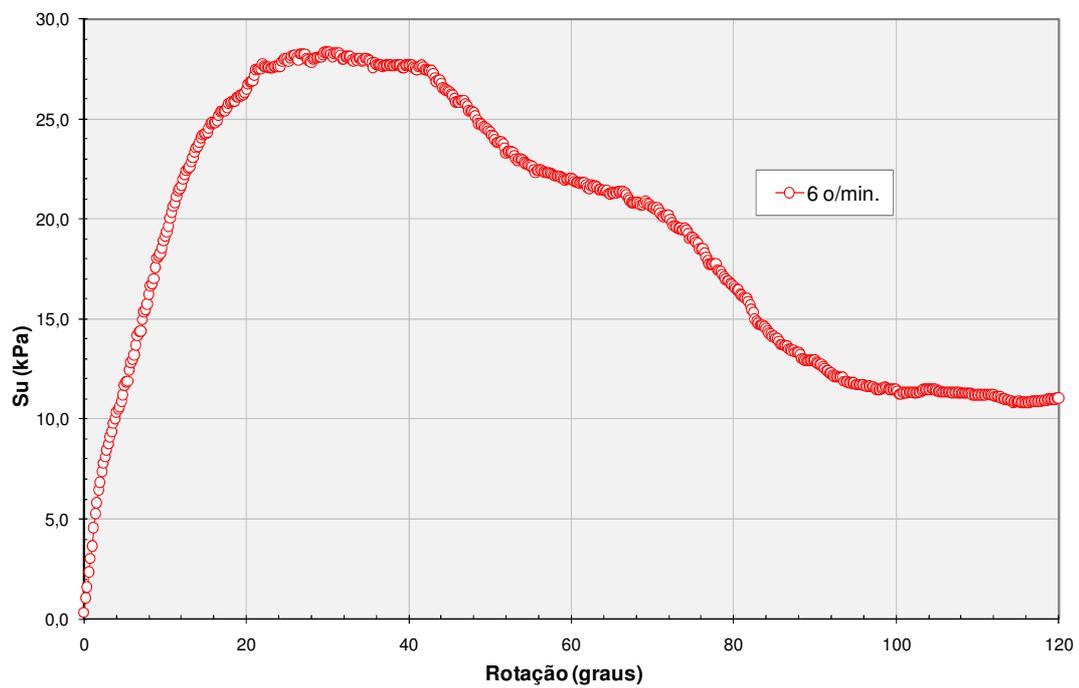


Figura 49: Ensaio de palheta Estação PZC01 profundidade 10 m.

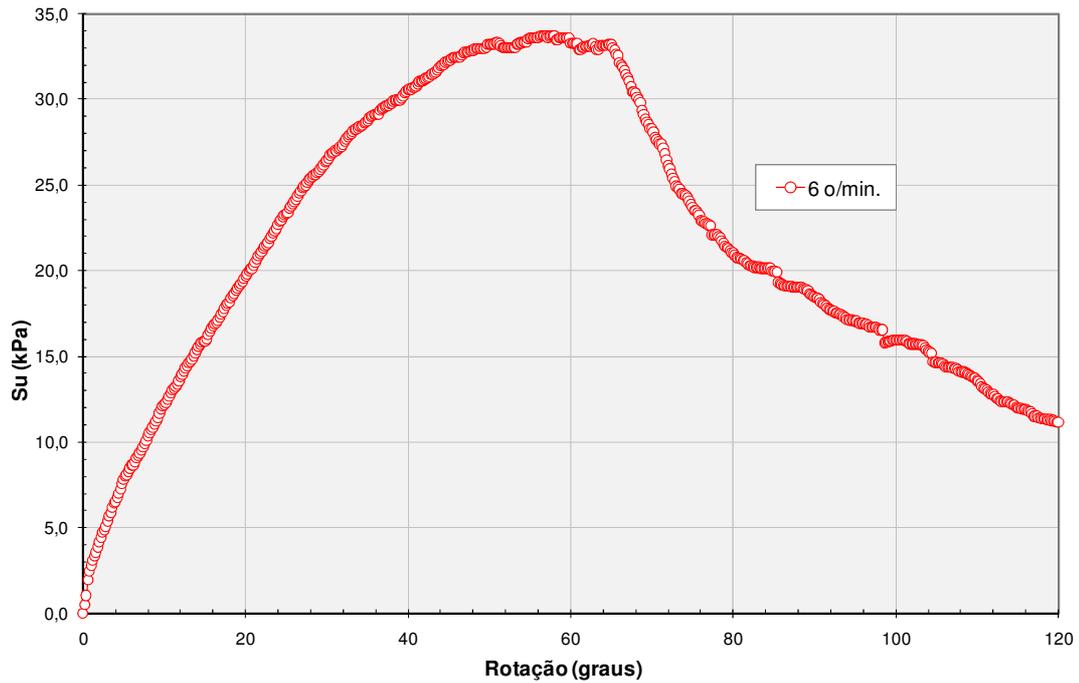


Figura 50: Ensaio de palheta Estação PZC01 profundidade 11 m.

As Figuras 51, 52 e 53 mostram os valores de S_u determinados na Estação PZC02, cujos resultados são de 5,35; 4,67 e 4,92 kPa na profundidade de 2 m, 15,58; 13,42 e 9,26 kPa na profundidade de 4 m e 18,42; 18,34 e 20,73 kPa na profundidade de 6 m, para as velocidades de 1, 6 e 60 graus por minuto, respectivamente.

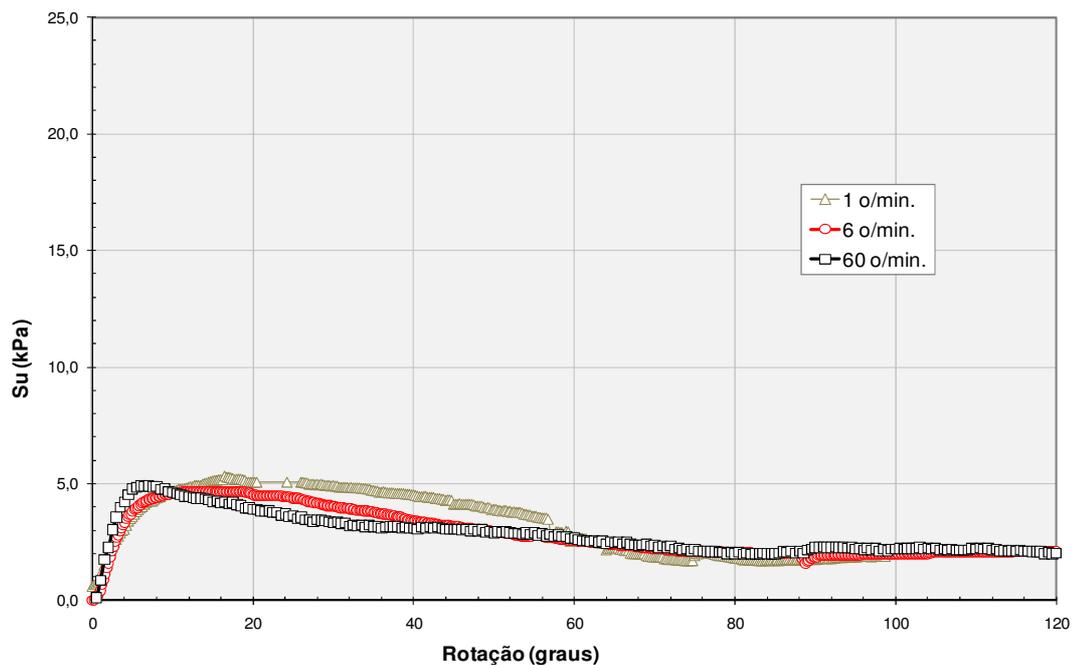


Figura 51: Ensaio de palheta Estação PZC02 profundidade 2 m.

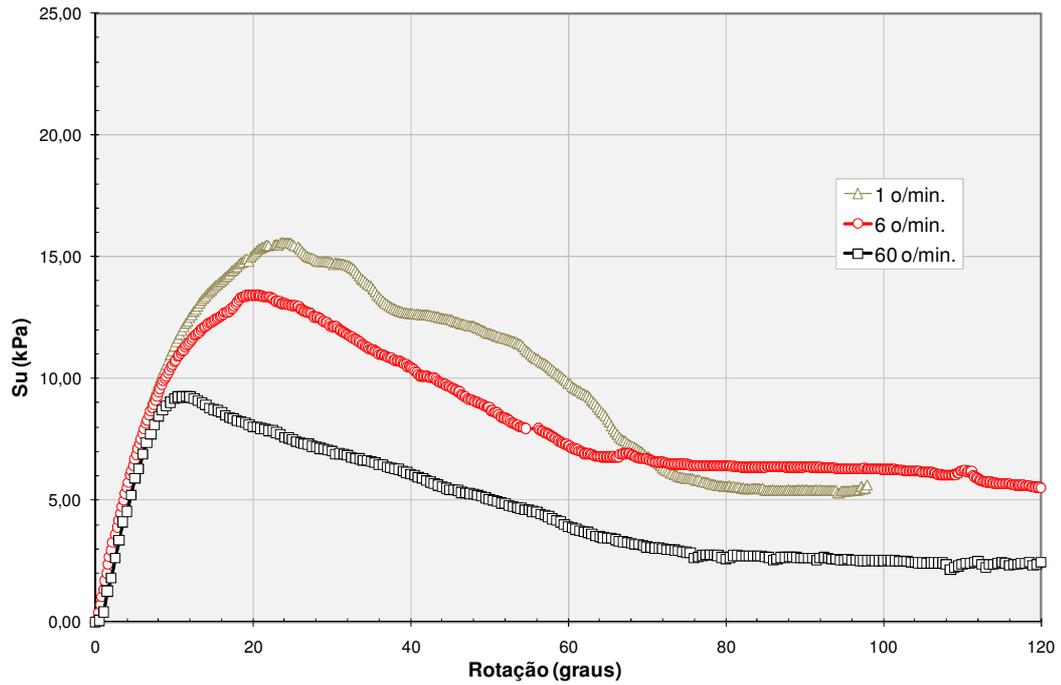


Figura 52: Ensaio de palheta Estação PZC02 profundidade 4 m.

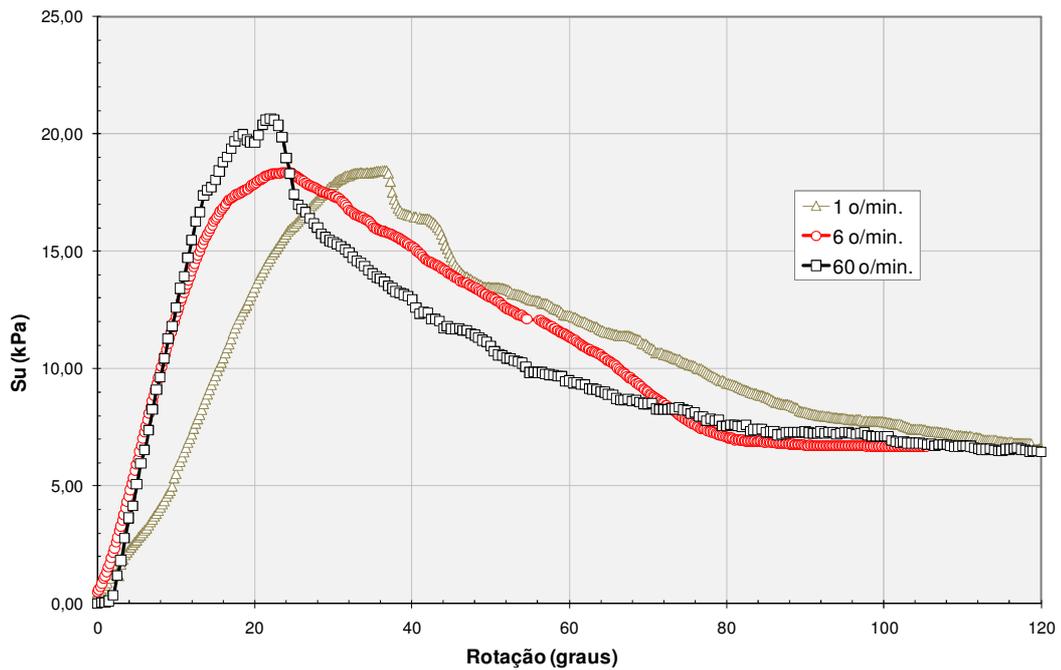


Figura 53: Ensaio de palheta Estação PZC02 profundidade 6 m.

Também foram realizados ensaios à velocidade normal para as profundidades de 8 e 10 m na Estação PZC02. Os resultados são apresentados nas Figuras 54 e 55.

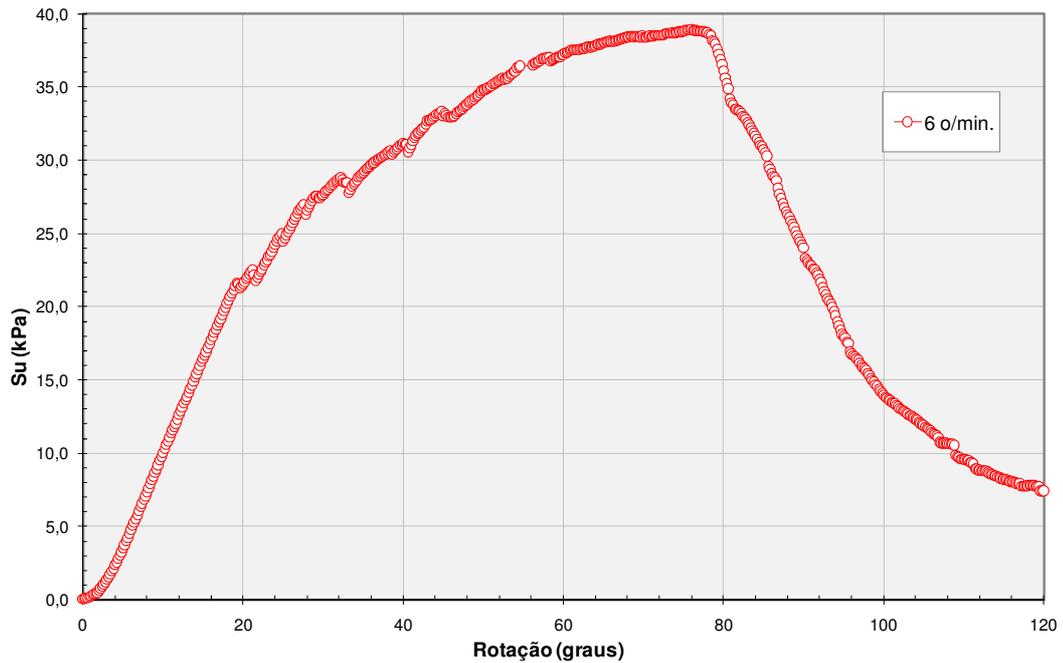


Figura 54: Ensaio de palheta Estação PZC02 profundidade 8 m.

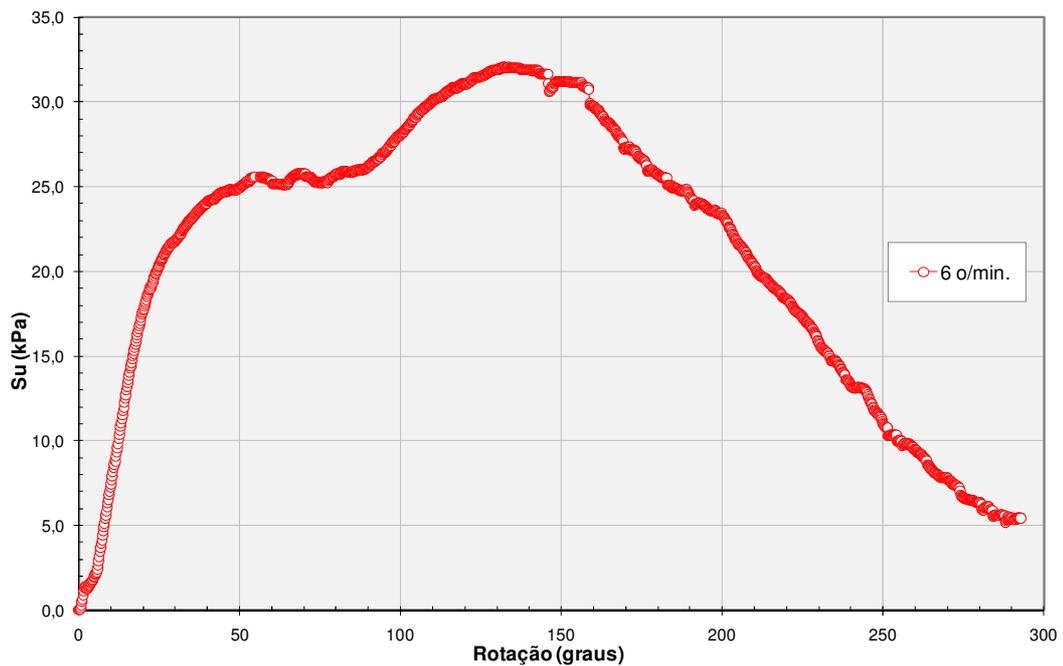


Figura 55: Ensaio de palheta Estação PZC02 profundidade 10 m.

Nas Figuras 56, 57 e 58 são apresentados os resultados de S_u da Estação PZC03. Os valores correspondentes à profundidade de 2 m são de 8,02; 8,75 e 7,27 kPa. Os valores de 12,34; 12,40 e 9,21 kPa correspondem à profundidade de 4 m. Os valores de 33,14; 19,82 e 23,12 kPa correspondem a profundidade de 6 m. Observam-se valores elevados de S_u na

profundidade de 6 m, para ensaios realizados com taxa de 1°/min., indicando que estes ensaios podem ter sido realizados em uma região do material com melhores características de resistência, resultantes do processo de disposição do resíduo na Barragem. Estas possíveis heterogeneidades são de difícil caracterização e não podem ser consideradas individualmente, ou seja, os resultados são analisados conjuntamente à despeito das possíveis variações de resistência existentes na massa de resíduos.

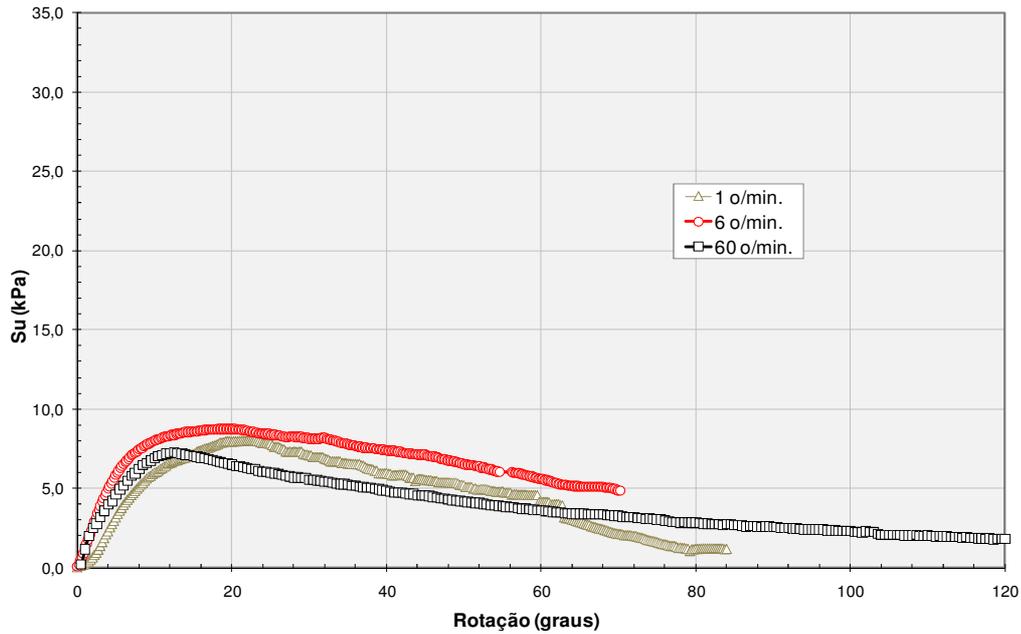


Figura 56: Ensaios de palheta Estação PZC03 profundidade 2 m.

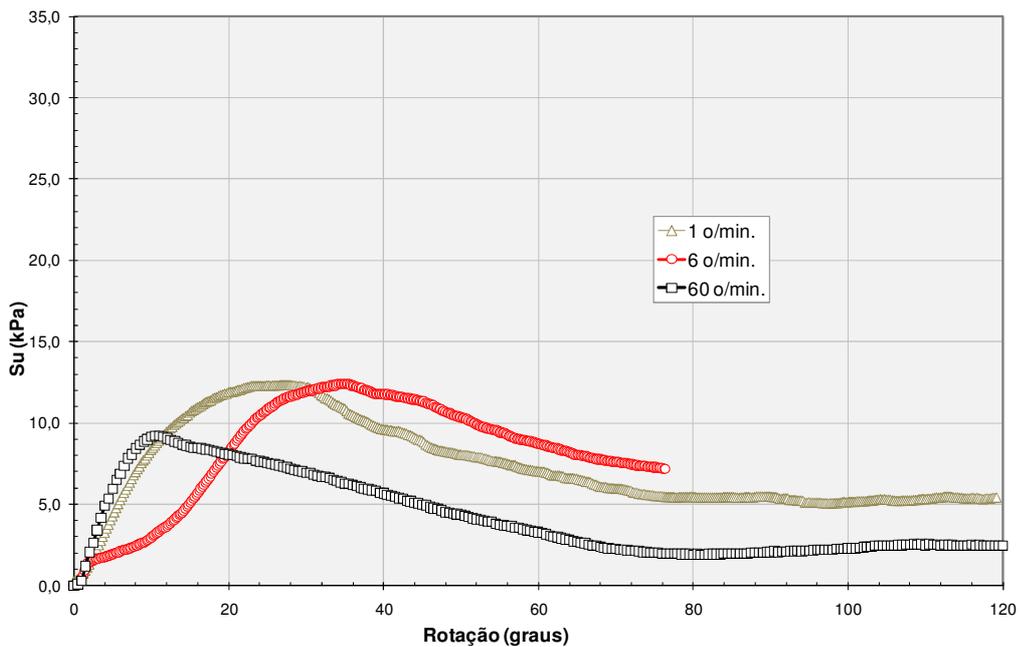


Figura 57: Ensaios de palheta Estação PZC03 profundidade 4 m.

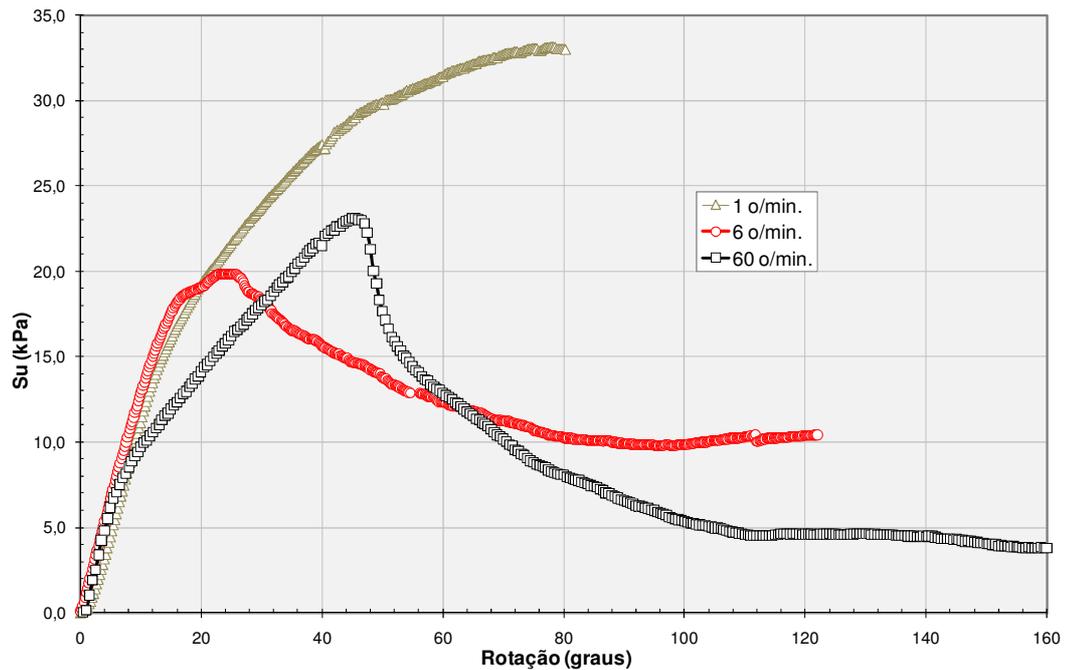


Figura 58: Ensaio de palheta Estação PZC03 profundidade 6 m.

Também foram realizados ensaios à velocidade normal para as profundidades de 8, 10 e 11 m na Estação PZC03. Os resultados são apresentados nas Figuras 59, 60 e 61.

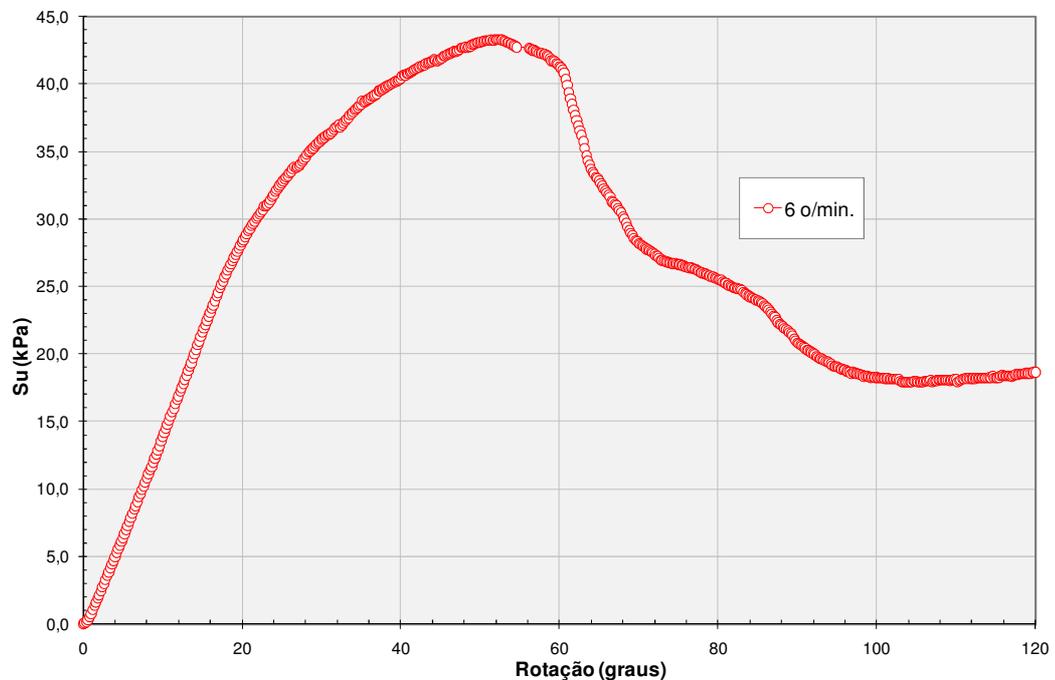


Figura 59: Ensaio de palheta Estação PZC03 profundidade 8 m.

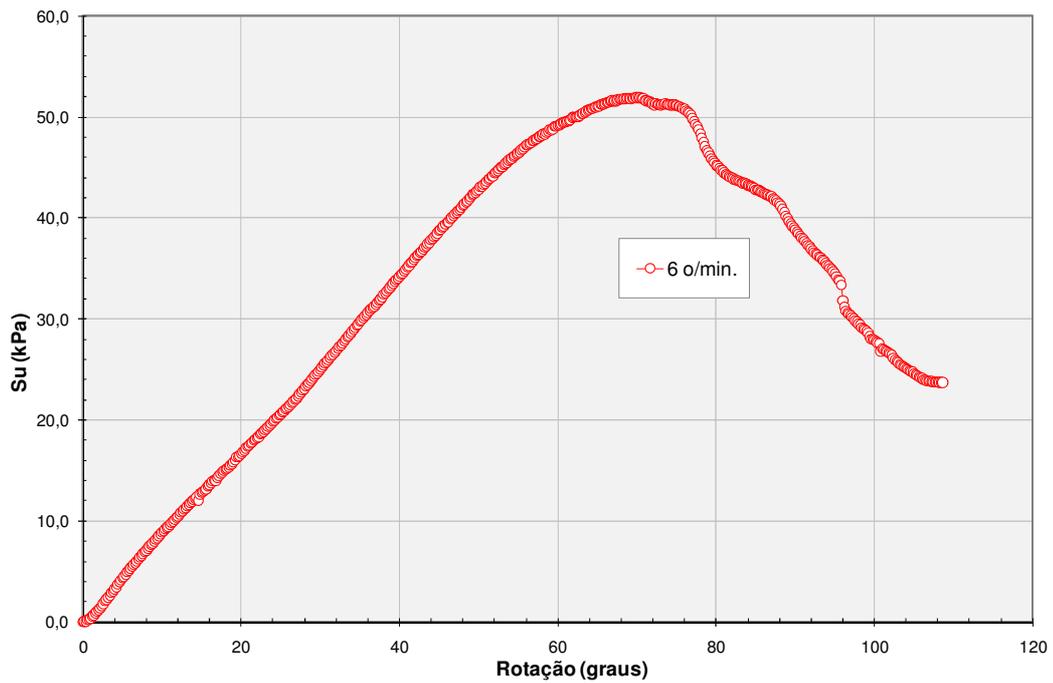


Figura 60: Ensaio de palheta Estação PZC03 profundidade 10 m.

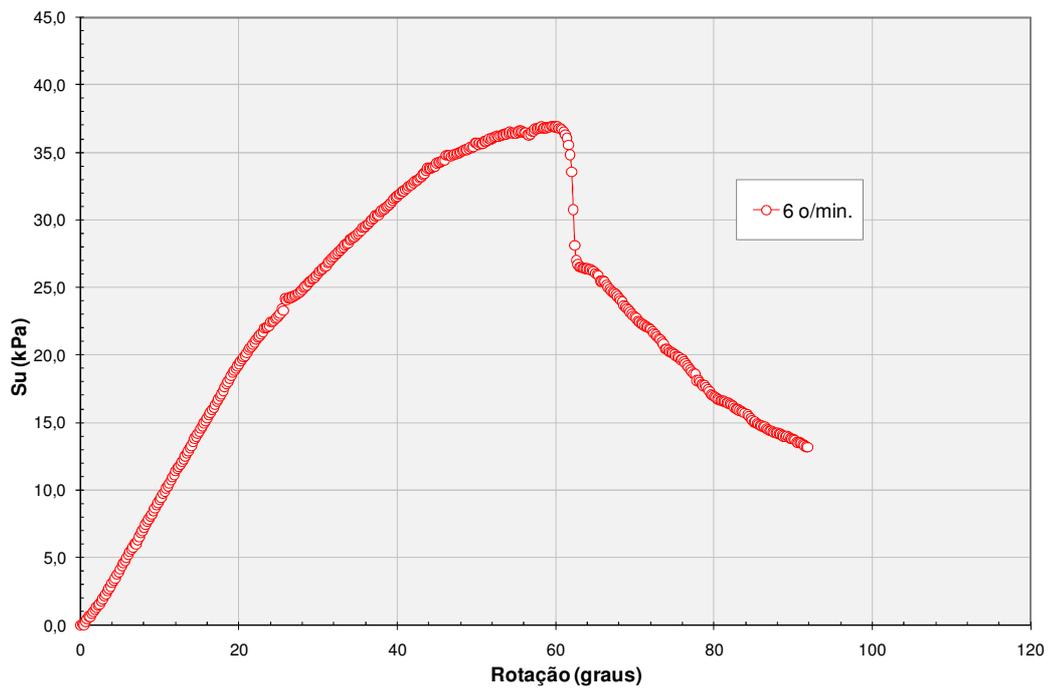


Figura 61: Ensaio de palheta Estação PZC03 profundidade 11 m.

De forma a facilitar a comparação entre as estações os resultados são novamente apresentados na Figura 62, na qual é apresentada a variação dos valores de S_u com a profundidade para cada uma das estações prospectadas.

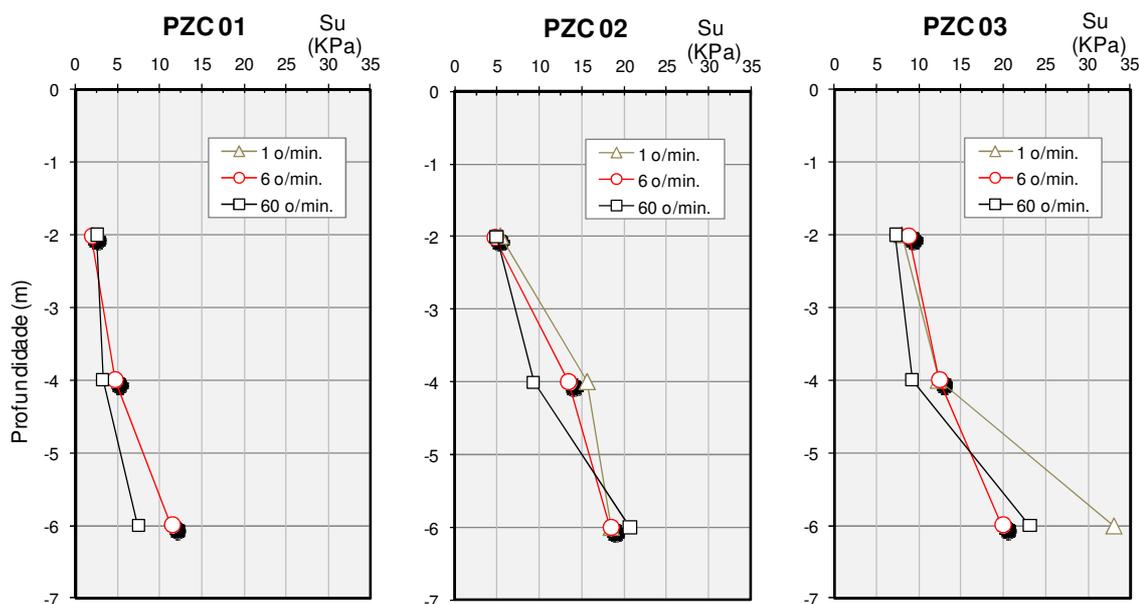


Figura 62: Resultados dos ensaios de palheta.

Os resultados apresentam alguma dispersão, porém possibilitam algumas generalizações com relação ao comportamento observado:

- A declividade da curva S_u x rotação (ou torque x rotação) não apresenta qualquer tendência, independe da velocidade de rotação adotada nos ensaios;
- O valor de S_u máximo reduz com o aumento da velocidade de rotação, fator atribuído à falta de dissipação de poropressões não compensado com efeitos viscosos;
- O valor de S_u residual é praticamente independente da velocidade do ensaio.

Com os valores da rotação da palheta na ruptura, obtidos a partir das curvas de rotação x S_u com correção do trecho inicial, e das taxas de rotação empregadas, pode-se observar que a rotação na ruptura é menor quanto maior a velocidade de rotação da palheta, conforme indicado na Figura 63. Alguns dos valores foram desprezados devido à possibilidade de interferência nos ensaios (Velocidade de 6 °/min. PZC01 4 m, velocidade de 1°/min. PZC03 2, 4 e 6 m e velocidade de 60 °/min. PZC01 2 m, PZC02 2 e 6 m e PZC03 6 m de profundidade).

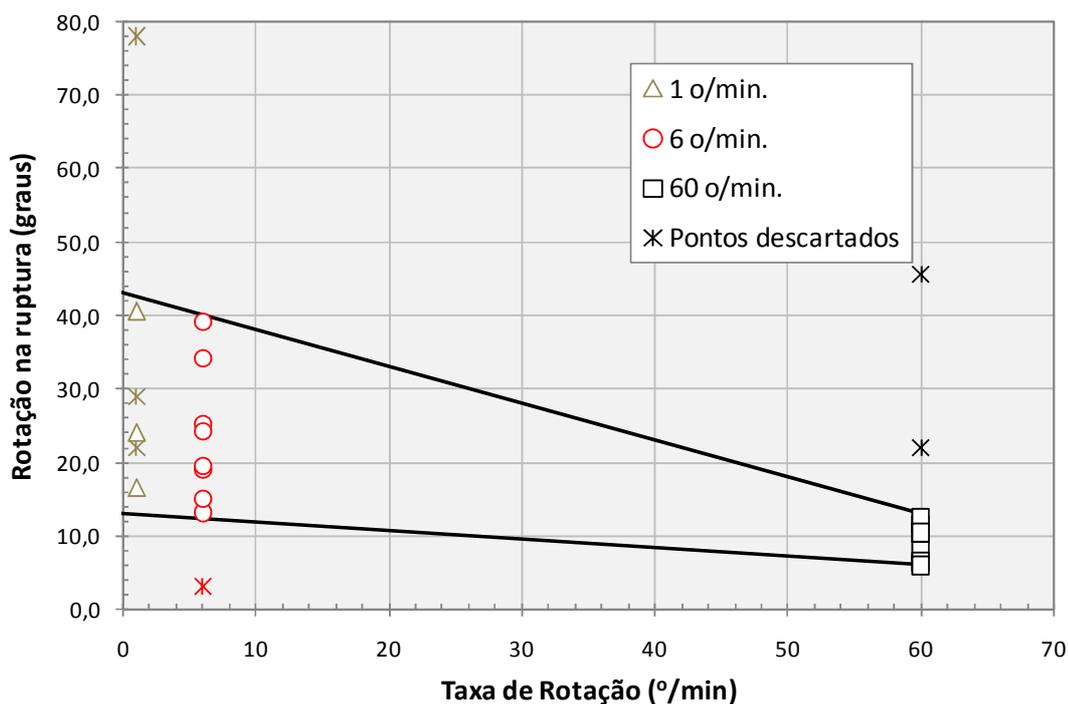


Figura 63: Valores de rotação na ruptura com as diferentes velocidades do ensaio de palheta.

No gráfico apresentado observa-se que para a velocidade de 60°/min. o valor máximo de S_u é obtido com uma rotação da palheta que varia entre 6 e 13 graus, para a velocidade de 1 °/min. a rotação varia de 16 a 40 graus, e para a velocidade de 6 °/min. a variação é de 13 a 39 graus, desprezando-se os valores considerados fora dos padrões observados nos demais. Importante observar que os valores de rotação incluem as deformações elásticas das hastes decorrentes dos esforços de torção medidos no ensaio.

5.2.1 Ensaio de palheta BR 448

De forma a comparar os ensaios realizados nos resíduos de zinco com materiais de características conhecidas (i. e. depósito argiloso de baixa permeabilidade), foram realizados ensaios a diferentes taxas de rotação em uma camada de argila, com espessura de aproximadamente 8,0 m, na obra da rodovia BR-448 em Canoas/RS. No total foram realizados 9 ensaios utilizando o equipamento com as adaptações discutidas anteriormente, empregando as velocidades de 1°, 6 ° e 60 °/min., controladas pelo motor de passo. A Figura 64 mostra um esquema dos ensaios realizados na base do talude, sobre o solo natural (Estaca 11 + 900).

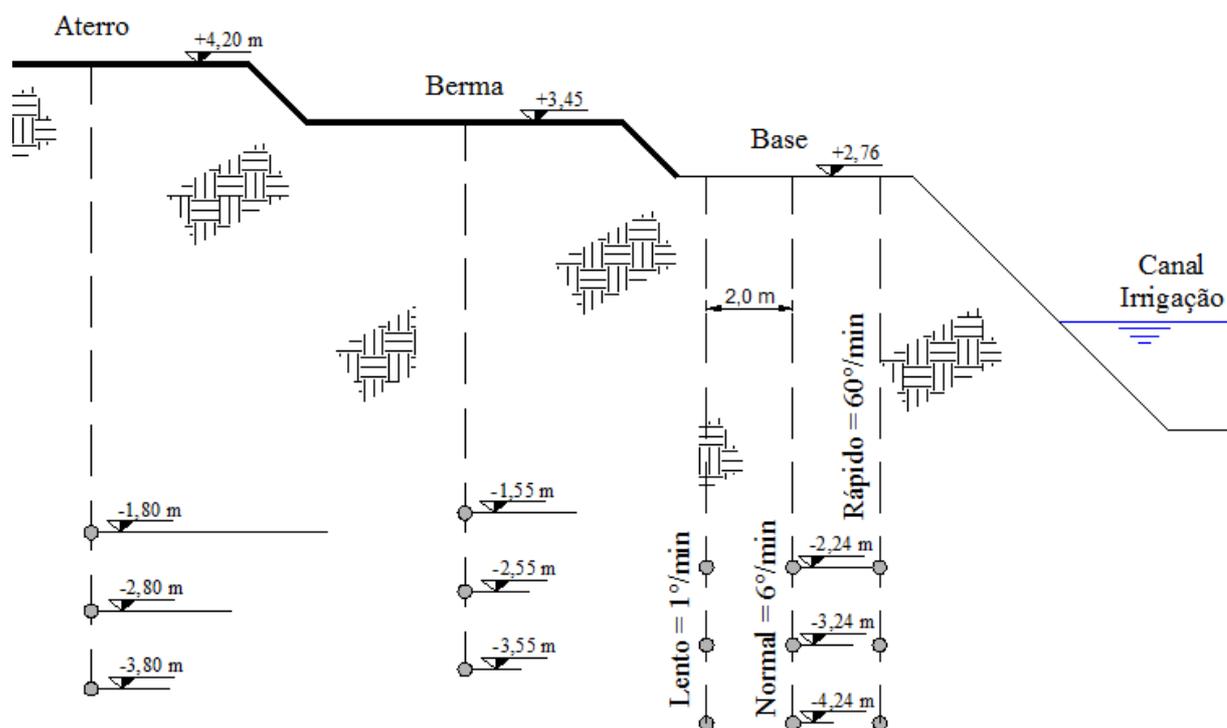


Figura 64: Esquema dos ensaios de palheta BR 448, Est. 11+900.

Os coeficientes de adensamento horizontal e vertical do material, calculados com base em ensaios de dissipação em piezocone (Est. 12 + 175), são de $6,34 \times 10^{-4}$ e $5,26 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$, respectivamente, obtidos a partir do relatório parcial de projeto (RP-02) do Consórcio Ecoplan - Magna. Fotografias ilustrando a execução dos ensaios são mostradas na Figura 65. Nas Figuras 66, 67 e 68 são apresentados os resultados dos ensaios na argila da BR-448 em Canoas/RS.



Figura 65: Localização dos ensaios.

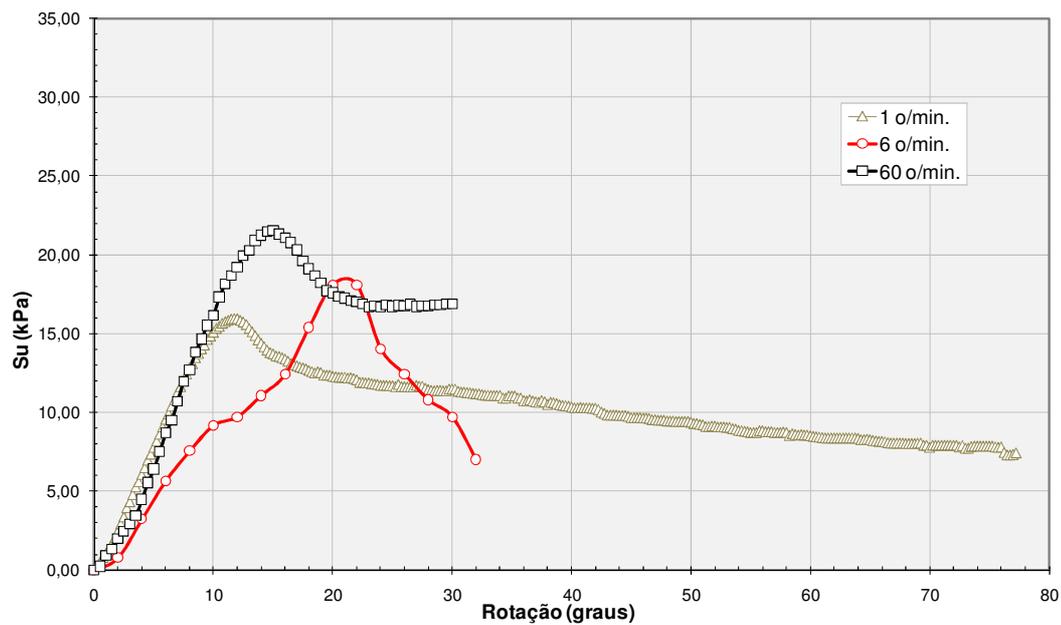


Figura 66: Resultados dos ensaios de palheta argila BR-448 prof. 5 m.

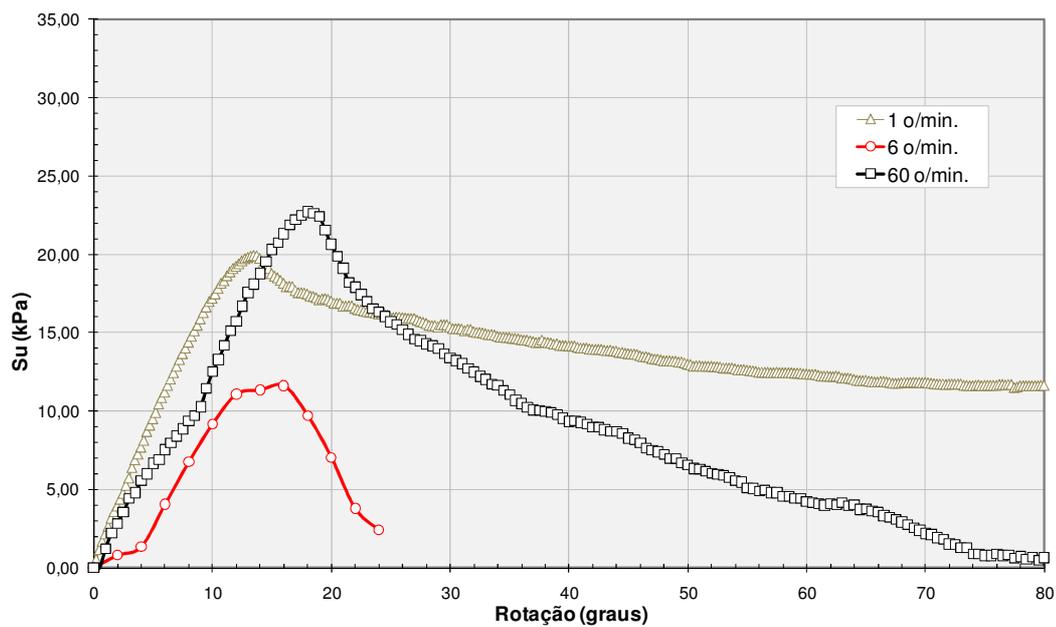


Figura 67: Resultados dos ensaios de palheta argila BR-448 prof. 6 m.

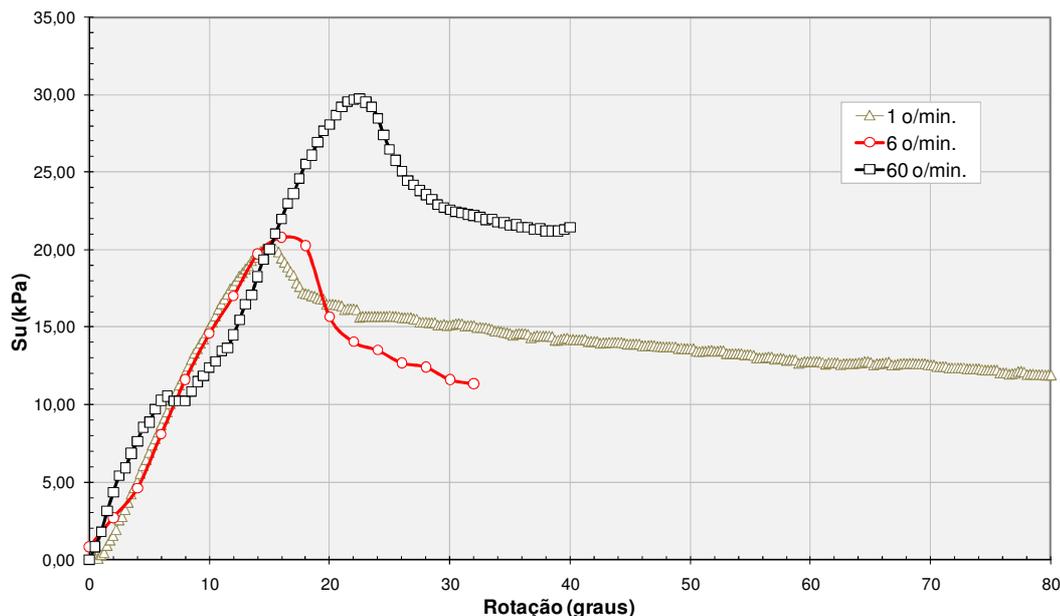


Figura 68: Resultados dos ensaios de palheta argila BR-448 prof. 7 m.

Os resultados apresentam alguma dispersão, porém possibilitam generalizações com relação ao comportamento observado:

- a) A declividade da curva S_u x rotação (ou torque x rotação) independe da velocidade de rotação adotada nos ensaios;
- b) O valor de S_u máximo aumenta com o aumento da velocidade de rotação, atribuído à componente coesiva disponível, cuja magnitude depende da velocidade de rotação e da deformação angular (TORSTENSON, 1977);
- c) Não é possível identificar o valor de S_u residual, pois não há estabilização das leituras para as máximas deformações do ensaio.

Com os valores da rotação da palheta na ruptura, obtidos a partir das curvas de rotação x S_u com correção do trecho inicial, pode-se observar que a rotação na ruptura reduz com o aumento da velocidade nos ensaios realizados na argila, no entanto, é menos acentuada que no resíduo de zinco, e praticamente independe da velocidade de rotação da palheta, expressa pelas linhas praticamente horizontais (pontilhadas), conforme indicado na Figura 69. Os resultados contrastam com os valores observados nos ensaios de resíduos de zinco, que mostram redução acentuada da rotação até a ruptura com o aumento da velocidade (linha

superior inclinada), especula-se que é o efeito de drenagem parcial, no entanto, é necessário um maior número de dados para validar estas afirmações.

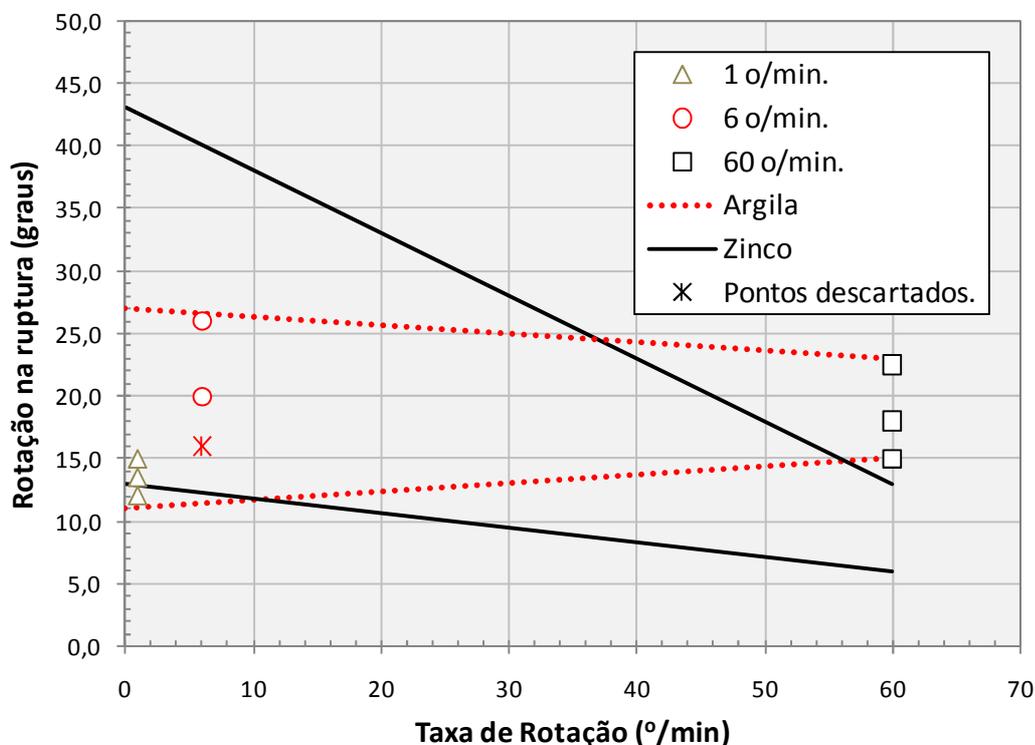


Figura 69: Valores de rotação na ruptura com as diferentes velocidades do ensaio de palheta na argila BR-448.

A variação da rotação na ruptura varia de 12 a 26 °, e, se considerarmos apenas as velocidades de 6 ° e 60 °/min. o intervalo reduz para de 15 a 22,5 ° e pode estar de acordo com as observações de Torstensson (1977) da existência de uma deformação cisalhante crítica, a partir da qual não há influência da velocidade na máxima tensão cisalhante.

Não há forma padronizada para interpretação dos valores de fragilidade em resíduos e, por este motivo, utiliza-se simplesmente os valores de referência utilizados para argilas e resumidos na Tabela 11. A fragilidade da argila da BR 448 varia tipicamente entre 1,3 e 2,5 correspondendo a materiais de baixa a média sensibilidade. Já os valores medidos no zinco apresentam uma faixa de variação mais significativa, com valores entre 1,5 e 6,0. Valores de 6,0 (limite superior) seriam representativos de solos sensíveis. Esta característica pode ser explicada a partir das informações coletadas nos ensaios de laboratório, que indicam que a presença de sulfato de cálcio nas amostras. A presença de sulfato poderia resultar em comportamento semelhante ao descrito no Item 4.3.2.

Tabela 10: Valores de S_u , S_u residual e fragilidade.

ESTAÇÃO	Prof. (m)	Velocidade (°/min.)	S_u (kPa)	S_u residual (kPa)	Fragilidade
PZC 01	2,0	6	1,94	0,38	5,11
		60	2,57	-	-
	4,0	6	4,67	1,15	4,06
		60	3,24	-	-
	6,0	6	11,45	4,53	2,53
		60	7,45	5,08	1,47
	8,0	6	11,83	6,60	1,79
	10,0	6	28,33	11,0	2,58
11,0	6	33,70	10,5	3,21	
PZC 02	2,0	1	5,35	1,93	2,77
		6	4,67	2,66	1,76
		60	4,92	2,00	2,46
	4,0	1	15,58	5,40	2,89
		6	13,42	5,60	2,40
		60	9,26	2,40	3,86
	6,0	1	18,42	6,50	2,83
		6	18,34	6,70	2,74
		60	20,66	6,45	3,20
	8,0	6	38,94	7,50	5,19
	10,0	6	32,06	5,60	5,72
	PZC 03	2,0	1	8,02	1,35
6			8,72	5,00	1,74
60			7,24	1,78	4,08
4,0		1	12,34	5,00	2,47
		6	12,40	7,25	1,71
		60	9,21	1,92	4,80
6,0		1	33,14	-	-
		6	19,82	10,00	1,99
		60	23,12	4,60	5,03
8,0		6	43,30	18,12	2,39
10,0		6	51,93	23,80	2,18
11,0	6	36,92	13,47	2,74	
BR 448 (Argila)	5,0	1	15,96	7,90	2,02
		6	18,09	7,02	2,58
		60	21,52	16,80	1,28
	6,0	1	19,90	11,60	1,72
		6	11,60	2,43	4,77
		60	22,71	-	-
	7,0	1	20,15	12,04	1,67
		6	20,80	11,34	1,83
		60	29,73	21,31	1,40

5.3 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE PIEZOCONE

O presente item apresenta os resultados dos ensaios de piezocone e cone sísmico que visam caracterizar complementarmente o resíduo de mineração de zinco. Foram realizados 3 ensaios

de piezocone na velocidade padrão (20 mm/s) e 3 ensaios com uma velocidade de cravação de 200 mm/s, sendo dois por estação até a profundidade de aproximadamente 12 m.

Tabela 11: Sensibilidade de argila (SKEMPTON & NORTHEY, 1952 *apud* SCHNAID, 2000).

SENSIBILIDADE	S_t
Baixa	2,0 – 4,0
Média	4,0 – 8,0
Alta	8,0 – 16,0
Muito alta	> 16,0

No programa de investigação deste trabalho foi utilizada uma ponteira elétrica com diâmetro de 3,57 cm cravada no terreno através de um sistema hidráulico de cravação (SCL 50 kN - Geofoma). As células de medição são instrumentadas com *strain-gauges* e um transdutor de pressão de diafragma que, acoplados a um microcomputador, permitem o registro contínuo das informações durante o ensaio. O equipamento permite o registro da resistência de ponta, atrito lateral e das poro pressões geradas durante a cravação do elemento cônico no terreno na posição u_2 . Para o piezocone utilizado nesta pesquisa o valor de a é 0,7 (obtido a partir de calibração) e a luva de atrito do equipamento utilizado possui área da superfície externa de 150 cm^2 .

Devido às dificuldades de ancoragem do equipamento hidráulico nos resíduos de zinco (solo muito mole junto à superfície do terreno), a reação necessária para cravação foi obtida com a colocação de pesos sobre as vigas metálicas, acopladas aos pistões hidráulicos, que compõem o sistema.

As Figuras 73 - 75 apresentam os resultados dos ensaios de piezocone realizados na Barragem dos Peixes com a velocidade normal, em cada estação. Em seguida são apresentadas as superposições dos ensaios relativos às diferentes velocidades de cravação, para cada uma das estações estudadas (Figuras 76 - 78). Verifica-se nestas figuras que as diferenças observadas não são muito significativas, nas escalas apresentadas. Assim para melhor visualização dos resultados, e de forma a facilitar a visualização das diferenças entre os ensaios é apresentada uma análise comparativa dos resultados nas Tabelas 12, 13 e 14. Quase não há diferença entre os ensaios, tanto para os valores de resistência à cravação quanto para as poro pressões. Isto demonstra que os ensaios apresentam parâmetros na mesma faixa de comportamento.

Nas figuras são apresentados os perfis de resistência de ponta corrigida, poro pressões geradas, poro pressões de equilíbrio, parâmetro de poro pressão e razão de atrito, das estações PZC 01, PZC02 e PZC03 distribuídas em pontos distintos no reservatório. A estação PZC03 está situada na parte mais afastada do dique de contenção, a estação PZC01 está localizada em área com resíduo mais mole e úmido, junto à estação de bombeamento do sobrenadante.

Os perfis de poro pressões registrados nos ensaios apresentaram camadas nas quais as poro pressões geradas são próximas a de equilíbrio e camadas com elevada geração de poro pressão durante a cravação. Essa variabilidade de comportamento indica a presença de lentes essencialmente arenosas, possivelmente devido ao processo de lançamento.

A partir da proposta de classificação das camadas de solo desenvolvida por Robertson (1990), utilizada na avaliação das estações de ensaio, é possível classificar o solo como um material de comportamento predominantemente de misturas de silte – silte argiloso a argila siltosa – valores de I_c que variam de 2,60 a 2,95, e a presença de camadas argilosas – silte argiloso a argila – com I_c variando de 2,95 a 3,60 e camadas de misturas de areia – silte arenoso a areia siltosa – com I_c variando de 2,05 a 2,60.

Os parâmetros geotécnicos analisados a partir dos ensaios de piezocone são a resistência ao cisalhamento, o coeficiente de adensamento e coeficiente de condutividade hidráulica do resíduo. Com relação a S_u ($N_{kt} = 12$), os valores apresentam boa concordância com os valores determinados a partir do ensaio de palheta (6 %/min.), da mesma forma, o coeficiente de adensamento apresentou valores comparáveis aos ensaios de laboratório (Figura 70).

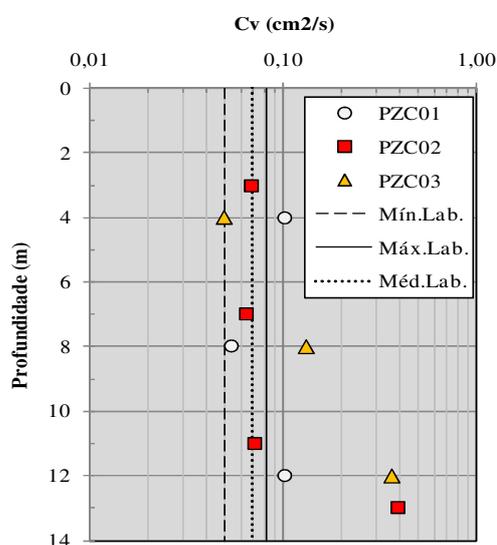


Figura 70: Comparação dos coeficientes de adensamento determinados em laboratório e campo (CPTU).

A escolha do N_{kt} se deu a partir da análise da influência da velocidade de rotação da palheta na variação deste parâmetro, calculando os valores a partir da Equação 25. A Figura 71 apresenta os resultados desta análise, para o resíduo de zinco, na qual é possível verificar que ao aumentarmos a velocidade de rotação do ensaio de palheta o valor de N_{kt} aumenta aproximando-se de 12, esta variação ocorre devido às características de permeabilidade dos resíduos de mineração. A adoção de $N_{kt} = 12$ é devido à maior velocidade empregada e conseqüente menor dissipação das poro pressões geradas durante os ensaios, ou seja, valores mais próximos da resistência ao cisalhamento não drenada.

$$N_{kt} = \frac{(q_t - \sigma_{v0})}{S_{u(vane)}} \quad \text{Equação 25}$$

onde:

N_{kt} = fator de capacidade de carga.

$S_{u(Vane)}$ = Resistência ao cisalhamento não drenada dos ensaios de palheta.

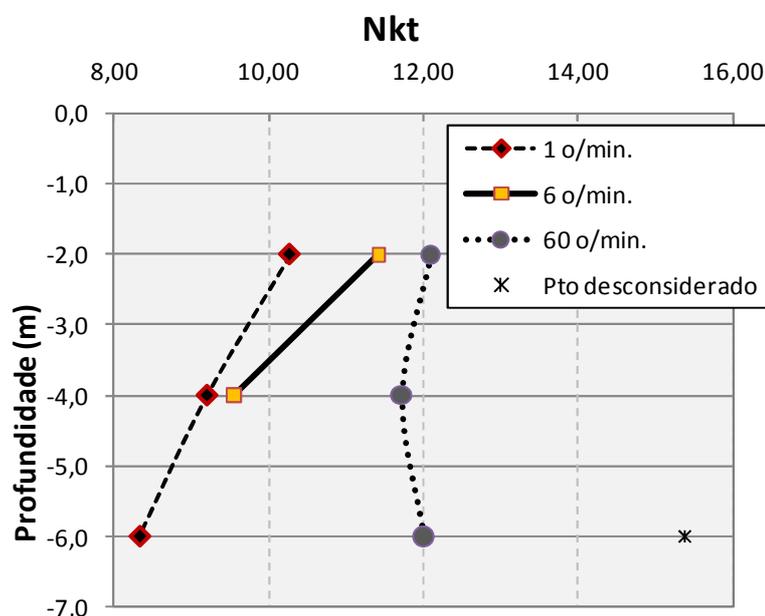


Figura 71: Variação de N_{kt} com a variação da taxa de rotação do vane.

Os valores de condutividade hidráulica são comparáveis aos valores encontrados na literatura para resíduos de mineração e variam de $4,52 \times 10^{-9}$ a $1,11 \times 10^{-8}$ m/s, conforme apresentado na Figura 72.

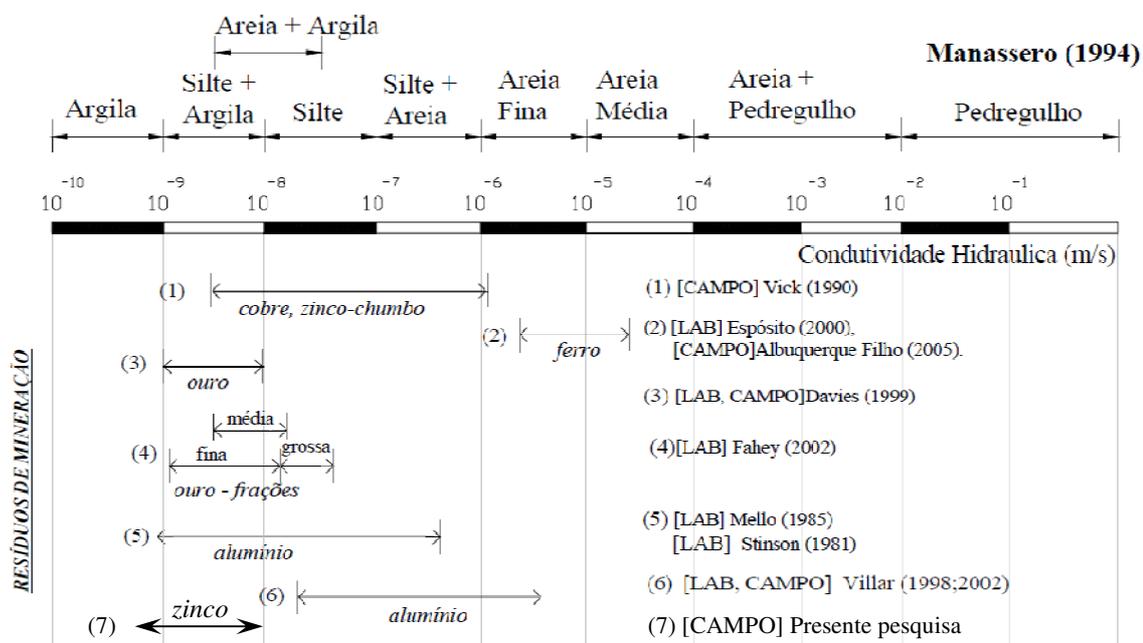


Figura 72: Valores de condutividade hidráulica de resíduos de mineração (BEDIN, 2006).

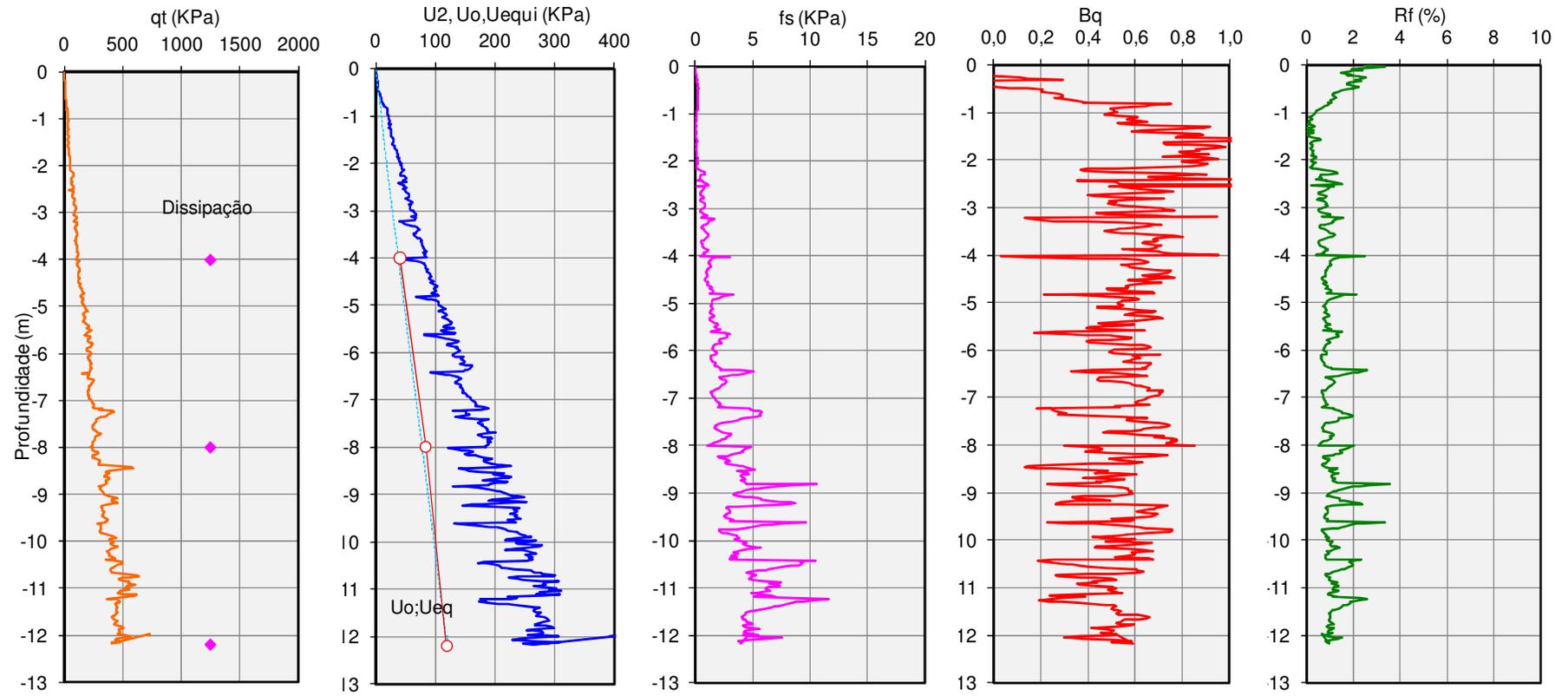


Figura 73: Resultados dos ensaios de piezocone velocidade padrão estação PZC01.

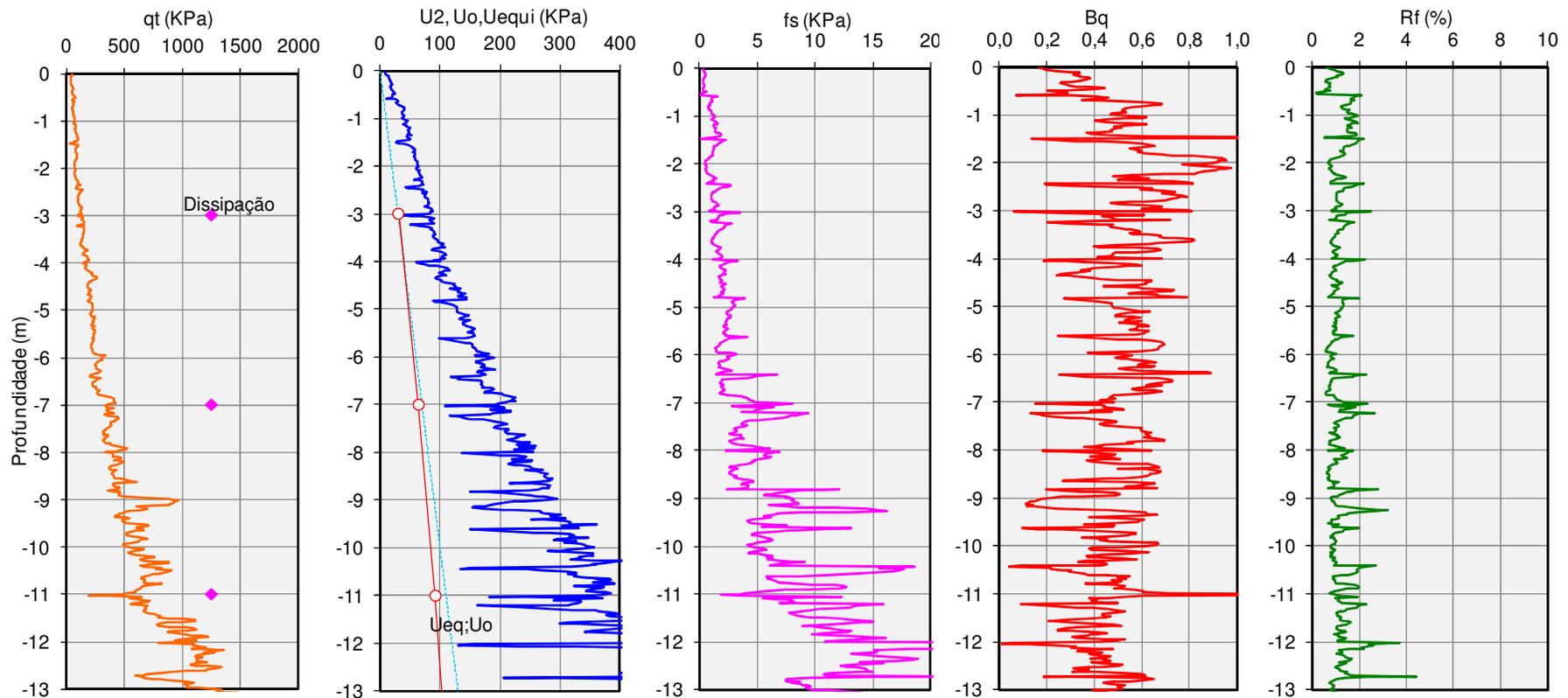


Figura 74: Resultados dos ensaios de piezocone velocidade padrão PZC02.

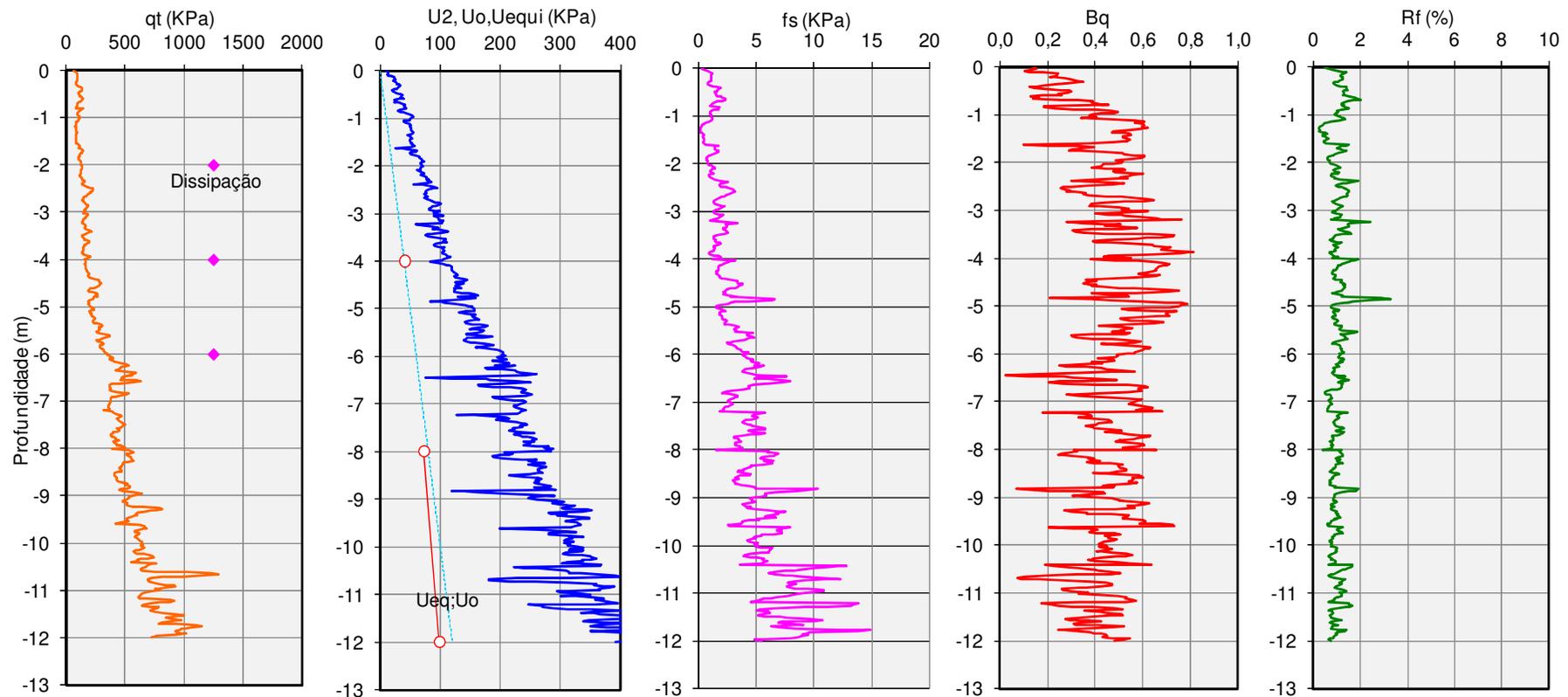


Figura 75: Resultados dos ensaios de piezocone velocidade padrão estação PZC03.

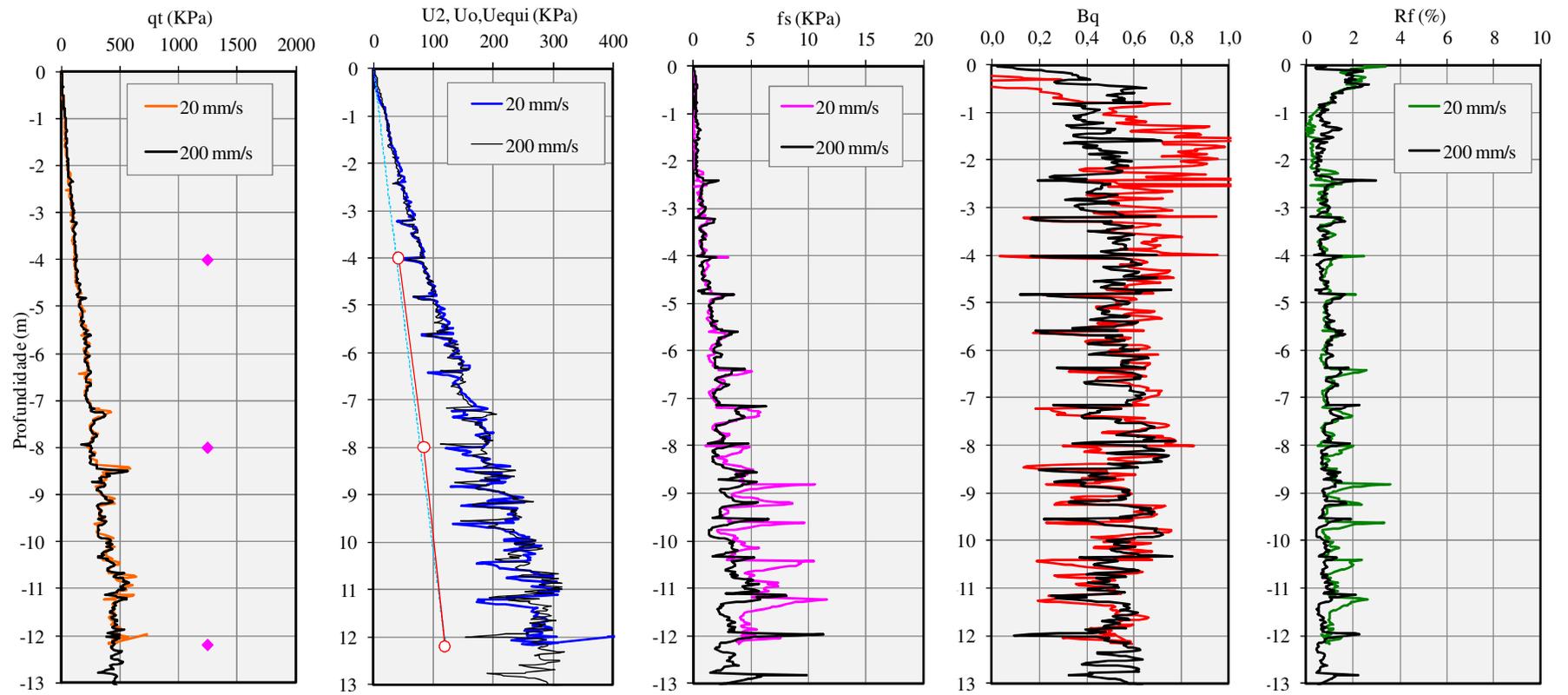


Figura 76: Superposição dos ensaios de piezocone Estação PZC 01.

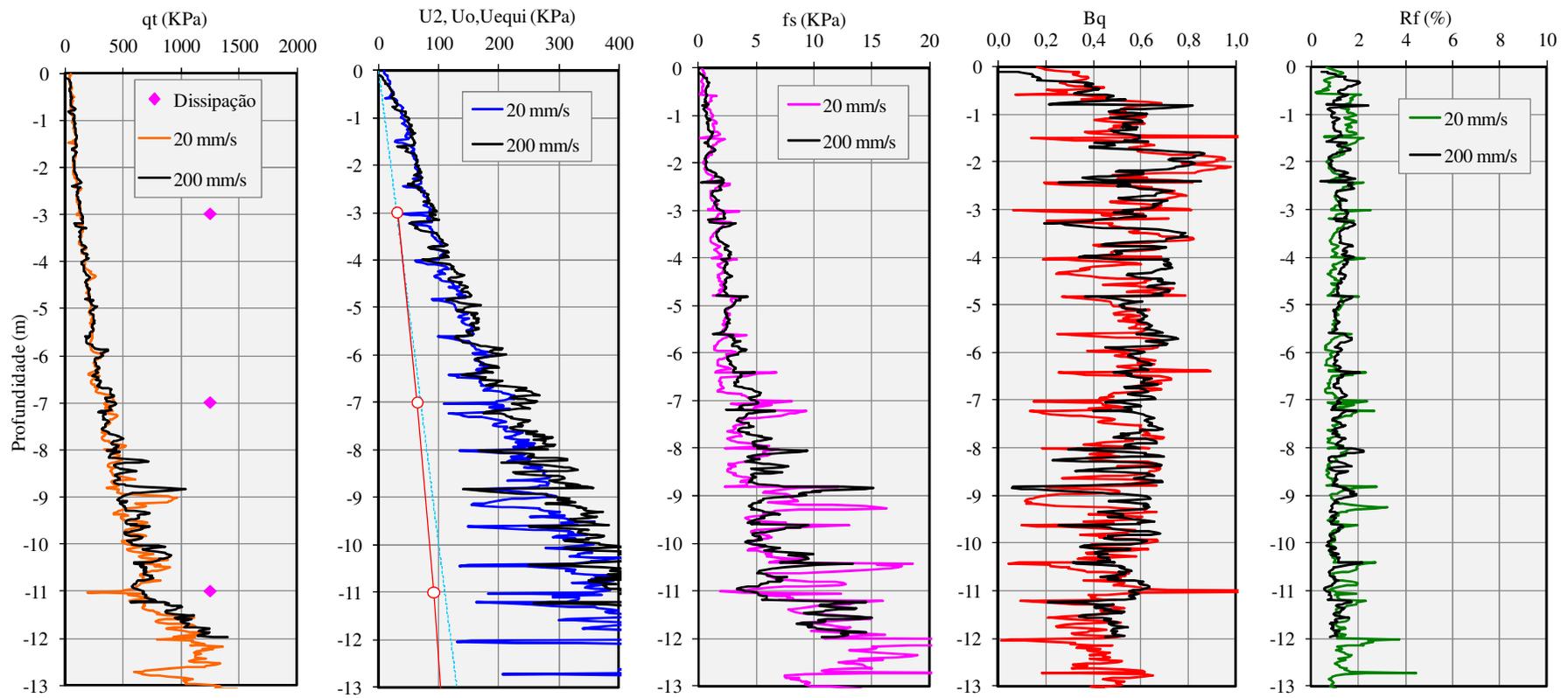


Figura 77: Superposição dos resultados de piezocone Estação PZC02.

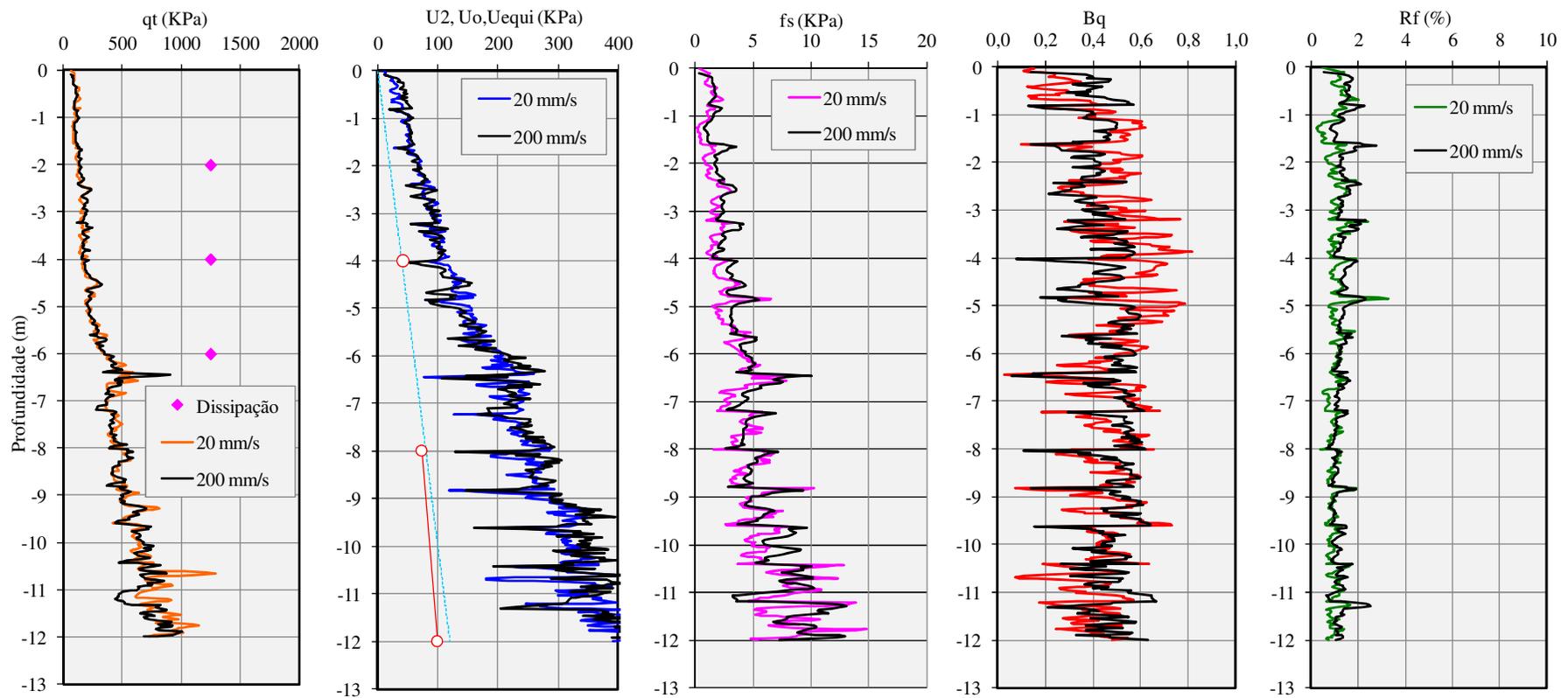


Figura 78: Superposição dos resultados de piezocone Estação PZC03.

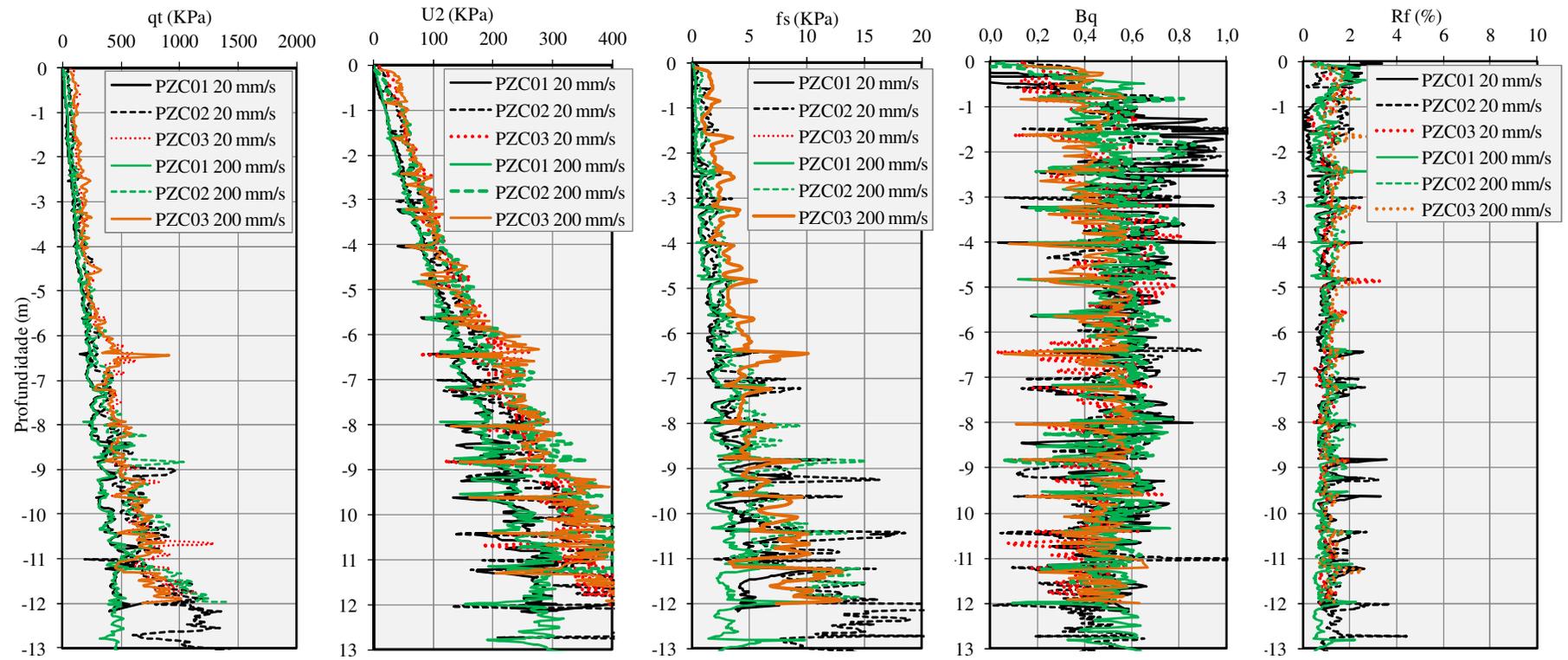


Figura 79: Superposição dos resultados todas as Estações.

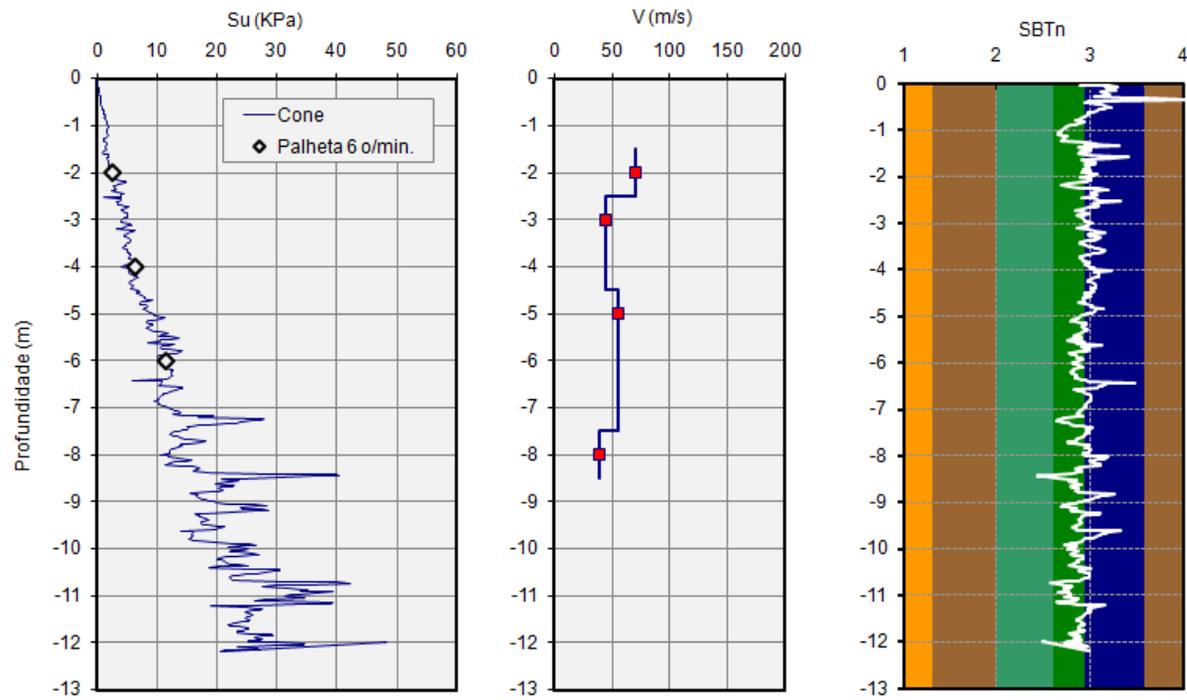


Figura 80: Resultados ensaios de cone sísmico, cálculo de S_u , e sistema de classificação SBT da estação PZC01.

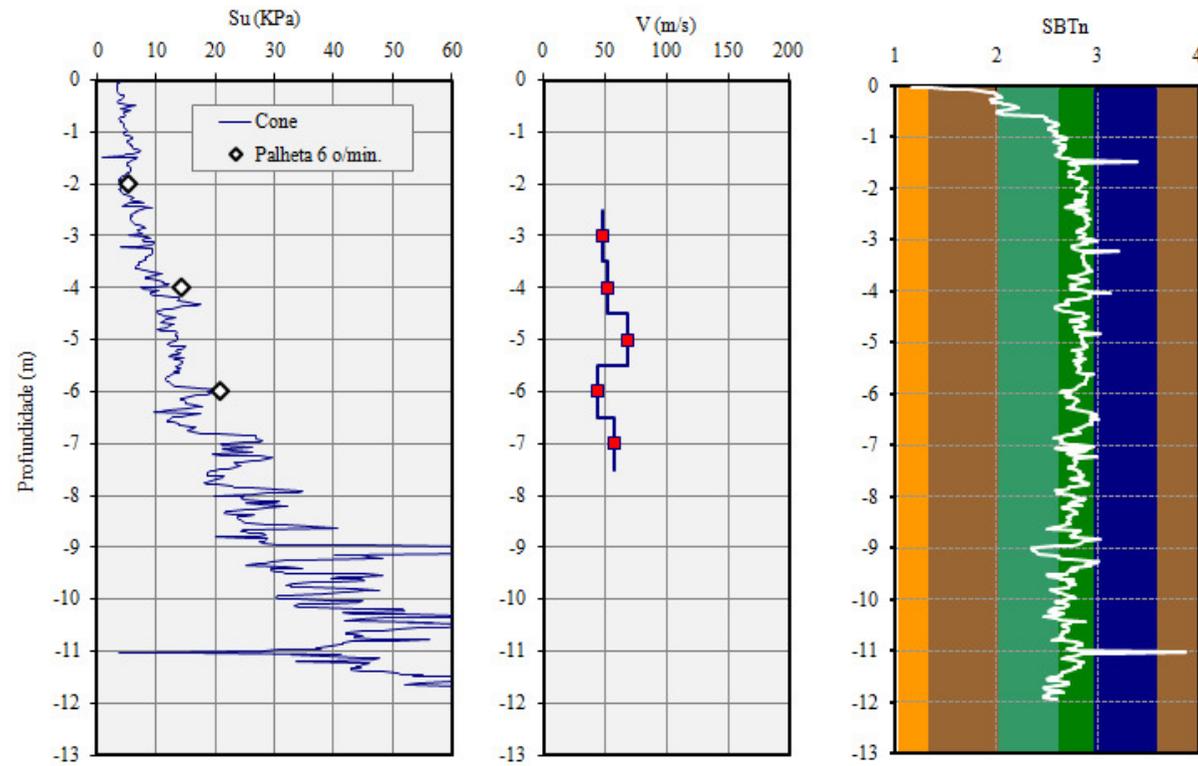


Figura 81: Resultados ensaios de cone sísmico, cálculo de S_u , e sistema de classificação SBT da estação PZC02.

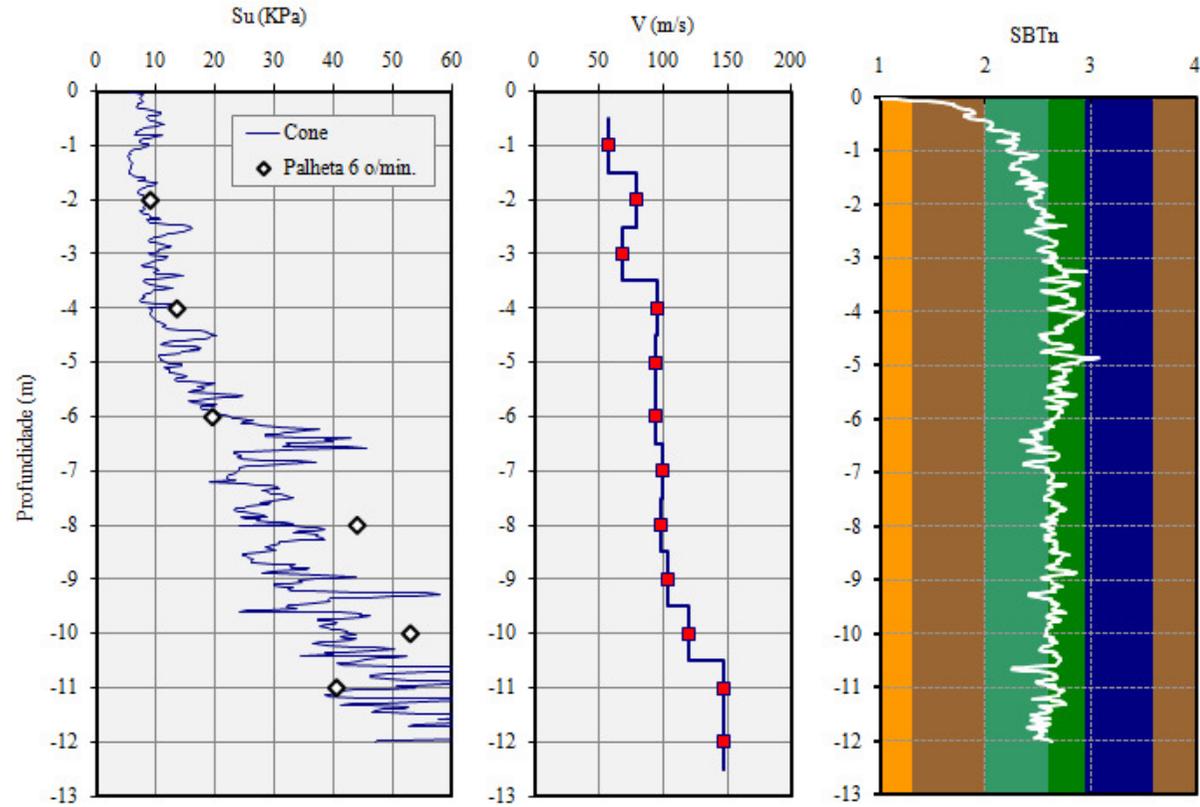


Figura 82: Resultados ensaios de cone sísmico, cálculo de Su, e sistema de classificação SBT da estação PZC03.

Tabela 12: Comparação dos resultados Estação PZC01.

Resultados ensaio padronizado (20 mm/s - referência) - PZC01									Relação entre os ensaios (Rápido/Padronizado)				
Prof. (m)	q _t	u ₂ (kPa)	f _s (kPa)	B _q	R _f (%)	t ₅₀ (s)	k _h (m/s)	c _v cm ² /s)	q _t /q _{tref}	u ₂ /u _{2ref}	f _s /f _{sref}	B _q /B _{qref}	R _f /R _{fref}
1	15,20	8,03	0,18	0,15	1,55				1,22	1,28	1,31	2,76	0,90
2	39,65	30,32	0,09	0,78	0,23				1,19	0,91	3,59	0,56	3,09
3	75,54	50,27	0,55	0,66	0,70				1,08	0,94	1,24	0,68	1,17
4	103,96	70,18	0,84	0,62	0,81	21	3,20E-08	1,00E-01	1,09	0,99	1,07	0,80	0,98
5	138,22	90,15	1,38	0,58	0,99				1,05	1,00	0,91	0,90	0,84
6	197,94	120,39	1,81	0,53	0,91				0,99	0,97	1,10	0,91	1,11
7	218,50	142,93	2,15	0,59	1,00				1,02	1,00	1,08	0,95	1,04
8	281,08	174,75	2,92	0,59	1,01	39	3,74E-09	5,40E-02	0,98	0,99	1,02	0,93	1,06
9	336,45	184,40	4,19	0,47	1,29				0,95	1,03	0,70	1,12	0,71
10	359,68	221,77	4,19	0,55	1,18				0,97	1,00	0,68	1,02	0,68
11	456,05	253,10	5,58	0,48	1,22	21	3,29E-09	1,00E-01	0,97	1,03	0,66	1,07	0,68
12	476,00	268,26	5,63	0,48	1,20				0,98	0,99	0,72	1,00	0,73
Média									1,04	1,01	1,17	1,06	1,08

Tabela 13: Resultados do ensaio de cone Estação PZC02.

Resultados ensaio padronizado (20 mm/s - referência) - PZC02									Relação entre os ensaios (Rápido/Padronizado)				
Prof. (m)	q_t	u_2 (kPa)	f_s (kPa)	B_q	R_f (%)	t_{50} (s)	k_h	c_v cm ² /s	q_t/q_{tref}	u_2/u_{2ref}	f_s/f_{sref}	B_q/B_{qref}	R_f/R_{fref}
1	57,54	24,66	0,68	0,38	1,14				0,96	0,97	0,97	0,98	1,08
2	82,54	50,33	1,25	0,60	1,48				1,06	1,10	0,73	1,01	0,70
3	103,99	71,66	1,16	0,69	1,08	31	1,11E-08	6,80E-02	1,10	1,03	1,27	0,89	1,17
4	149,41	89,79	1,66	0,54	1,11				1,00	1,02	1,29	1,01	1,28
5	205,09	113,11	2,22	0,48	1,09				0,96	1,16	1,16	1,31	1,20
6	236,25	146,97	2,30	0,57	0,98	33	4,52E-09	6,39E-02	1,04	1,09	1,20	1,09	1,17
7	290,71	179,55	2,65	0,58	0,90				1,08	1,12	1,38	1,03	1,30
8	380,26	205,09	4,54	0,48	1,19				1,02	1,19	0,99	1,23	0,97
9	459,72	248,03	4,74	0,50	1,04				1,16	1,08	1,42	0,99	1,24
10	616,25	276,49	7,16	0,42	1,19				0,93	1,22	0,80	1,33	0,84
11	686,18	337,85	8,62	0,45	1,22	30	1,07E-09	7,03E-02	1,04	1,14	0,80	1,11	0,79
12	826,73	370,57	10,95	0,42	1,34				1,17	1,35	0,92	1,15	0,78
Média									1,04	1,12	1,08	1,10	1,04

Tabela 14: Comparação dos resultados de piezocone Estação PZC03.

Resultados ensaio padronizado (20 mm/s - referência) - PZC03									Relação entre os ensaios (Rápido/Padronizado)				
Prof. (m)	q _t	u ₂ (kPa)	f _s (kPa)	B _q	R _f (%)	t ₅₀ (s)	k _h	c _v cm ² /s	q _t /q _{tref}	u ₂ /u _{2ref}	f _s /f _{sref}	B _q /B _{qref}	R _f /R _{fref}
1	106,45	31,00	1,33	0,27	1,23				0,96	1,36	1,17	1,45	1,24
2	102,06	54,10	0,80	0,48	0,75				1,18	1,02	2,00	0,83	1,73
3	156,52	79,33	1,77	0,45	1,11				1,11	0,98	1,38	0,83	1,27
4	162,52	98,64	1,74	0,55	1,08	43	3,44E-09	4,90E-02	1,11	0,99	1,44	0,84	1,29
5	210,14	127,60	2,60	0,56	1,24				1,06	0,87	1,33	0,70	1,26
6	274,01	165,31	3,04	0,55	1,09				1,03	0,99	1,23	0,93	1,21
7	442,99	211,23	4,38	0,43	0,99				1,00	1,06	1,24	1,10	1,23
8	421,38	233,98	3,84	0,50	0,90	16	3,34E-09	1,30E-01	0,96	1,02	1,11	1,09	1,18
9	497,35	245,05	5,07	0,43	1,01				0,98	1,07	1,04	1,13	1,08
10	587,47	310,21	5,25	0,48	0,89				1,01	1,06	1,17	1,05	1,16
11	740,17	319,87	7,53	0,38	1,02				0,94	1,09	1,08	1,17	1,16
12	830,38	381,61	8,08	0,41	0,97	13	2,00E-09	3,60E-01	0,86	0,99	1,07	1,20	1,25
Média									1,02	1,04	1,27	1,03	1,25

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS (INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE)

Este capítulo tem por objetivo apresentar uma análise integrada das informações constantes nesta pesquisa, apresentando inicialmente a interpretação de ensaios em argila e posteriormente de ensaios nos solos siltosos. O objetivo da análise consiste em buscar um procedimento integrado de identificação dos efeitos de drenagem observados em ensaios *in situ*, válido para todos os geo-materiais.

6.1 ARGILA BR 448

A partir dos ensaios de palheta realizados às três velocidades distintas, correspondentes a 1, 6, e 60 %/min. (0,54, 3,40 e 34,03 mm/min. respectivamente) pode-se observar que a velocidade de rotação empregada no ensaio de palheta influencia na resistência não drenada da argila. Em geral a resistência mobilizada nos ensaios aumenta com o aumento da velocidade em decorrência dos efeitos viscosos observados nestes materiais.

Para interpretação dos resultados buscou-se explorar diferentes formas de representação dos dados medidos, com o objetivo de encontrar a que melhor representa a influência da velocidade. Para esta análise foram adotadas duas formas de representação, a primeira através de um gráfico que correlaciona $S_u/S_{u\text{ref}} \times v_p$, onde $S_{u\text{ref}}$ (de referência) é a resistência não drenada determinada com a velocidade de 6 %/min., velocidade padronizada de ensaio que resulta em comportamento não drenado para faixa de valores usuais de c_v de argilas. A segunda forma de representação consiste de um gráfico $S_u/S_{u\text{ref}} \times V$, sendo V a velocidade normalizada, conforme expresso na Equação 17. Os resultados são apresentados nas Figuras 83 e 84, respectivamente.

Embora os resultados apresentem alguma dispersão, pode-se observar nos gráficos que os valores de S_u são crescentes com o aumento da velocidade de rotação dos ensaios de palheta, para todas as profundidades de ensaio. Esta tendência é observada em ambas as formas de representação, sendo que os valores de 1 e 6 %/min. ($V = 0,09$ e $0,54$ respectivamente, com C_v

de $6,82 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$) podem ser utilizadas para determinar o valor de S_u , pois velocidades superiores podem ser influenciadas por efeitos viscosos.

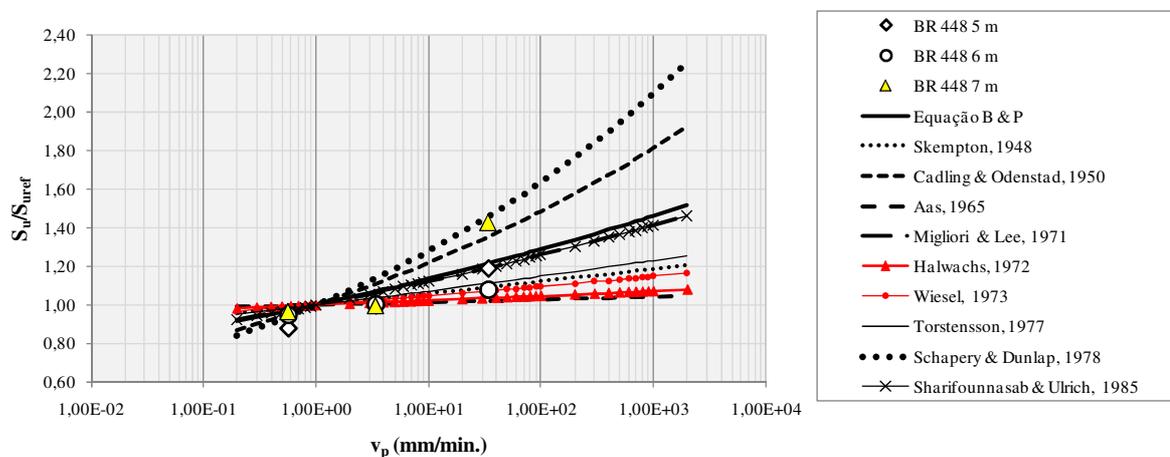


Figura 83: Resultados das argilas em função da velocidade periférica.

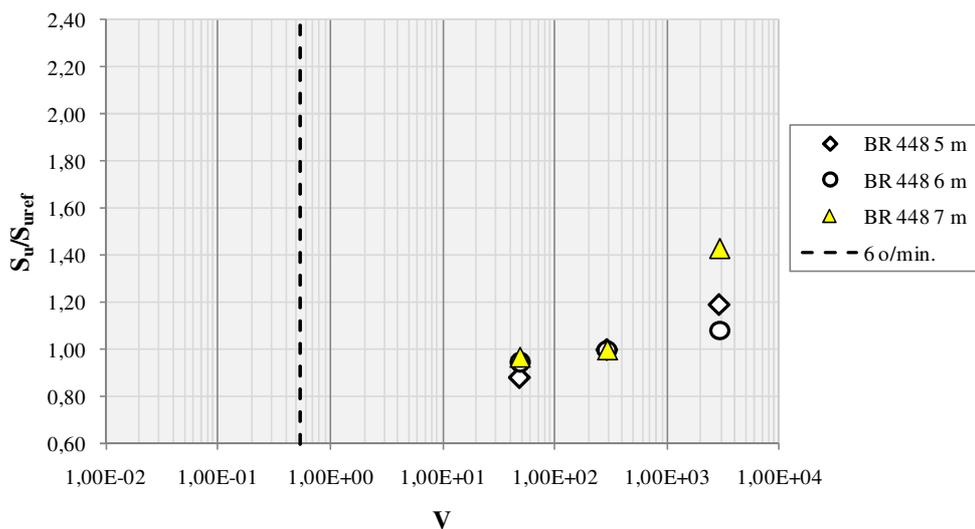


Figura 84: Resultados das argilas em função da velocidade adimensional.

Nas análises apresentadas nesta pesquisa, a parcela viscosa é tratada simplesmente através das relações exponenciais e logaritmas representadas na Figura 83 (Equações 4 e 5). Essas equações têm sido amplamente utilizadas na interpretação de ensaios de campo (inclusive de ensaios de palheta), conforme representado na Tabela 15. Nesta tabela são indicados os materiais ensaiados, os parâmetros α e β que caracterizam o comportamento viscoso e as referências correspondentes.

Observa-se da Tabela 15 e da Figura 83 que a argila da BR448 apresenta comportamento similar a outras argilas de mesma natureza mineralógica, resultando em valores de α da ordem de 0,14 e β da ordem de 0,05. Estes valores estão na faixa de ocorrência de depósitos argilosos.

6.2 RESÍDUO DE MINERAÇÃO DE ZINCO (SILTE)

Com os ensaios realizados nas diferentes velocidades, nas profundidades de 2, 4 e 6 m, pode se observar inicialmente que resultados das diferentes estações produzem valores de resistência distintos. O mesmo acontece com ensaios realizados nas diferentes profundidades. Esta variação pode estar relacionada com as diferentes tensões efetivas de cada ponto e também pela segregação hidráulica do material durante o processo de disposição do rejeito. Em consequência disso, os resultados foram normalizados para cada estação e para cada profundidade separadamente. Além disso, foram exploradas três formas de representação dos resultados com o objetivo de identificar a melhor maneira de analisar a influencia da velocidade nos resultados e comparar com trabalhos apresentados por outros autores.

Duas das representações gráficas utilizadas com os resultados no silte são idênticas às apresentadas para as argilas, nas quais a diferença está apenas no valor utilizado como referência. Neste caso o valor utilizado como valor de referência foi o menor valor de S_u obtido nos ensaios com a taxa de rotação de 60 %/min., considerado como o valor mais próximo à resistência ao cisalhamento na condição não drenada.

Para a faixa de valores empregada na presente análise não foi possível identificar a partir da qual velocidade a resistência na condição não drenada é realmente obtida, no entanto, os resultados mostram que este valor tende a ser próximo de 60 %/min. (34,03 mm/min.) ou acima deste valor.

Tabela 15: Faixa de valores dos parâmetros do solo (BISCONTIN & PESTANA, 2001).

Argila	Ip (%)	Detalhes do ensaio de palheta			Parâmetros		Referência
		H/D	D (mm)	Velocidade, w (°/min.)	α (%)	β	
Grangemouth	~22	1,5	50, 75	6 - 300	5 - 6	0,025	Skempton, 1948
Bromma	~31	2,5	80	6 - 600	~ 20	0,086	Cadling & Odenstad, 1950
Aserum, Drammen, Lierstranda, Manglerud	8 - 9	0,25 - 4	65 - 130	6 - 60	~ 1 - 2	0,006	Aas, 1965
Silts and clays (disturbed & remolded)	-	2	12,7	6 - 672 6 - 720	~ 16 +/- 5	0,05 +/- 0,01	Migliori & Lee, 1971 Halwachs, 1972
Ska Edeby	50 - 100	0,25 , 0,5 , 1, 2	16,2, 65, 130	0,06 - 600	3 - 6	0,02	Wiesel, 1973
Backebol Askim	50 - 65 80 - 90	2	65	~ 0,006 300	12	0,05 +/- 0,01	Torstensson, 1977
Gulf of Maine & Mexico Exuma Sound, Bahamas	-	2	12,7	21 - 79	13 27	~ 0,05 ~ 0,10	Smith & Richards, 1975
San Diego silt I	64	1,2	12,7	72 - 79	36	0,13	Perlow & Richards, 1977
San Diego silt II	-	-	76, 101		21	0,08	
Gulf of Maine Clay	78	1,2	12,7, 51, 76	21 - 79	60	0,2	
Guf of Mexico Clay	-	2	12,7	4,8 - 708	33	0,107	Schapery & Dunlap, 1978
Pierre shale	103	1, 1,5 , 2	12,7	4,8 - 107	12	0,05	Sharifounnasab & Ulrich, 1985
Saint-Louis de Beacours Saint-Alban Clay	13 - 19 6 - 18	2	65	6 - 120	2 - 3 1	0,01 0,004	Roy & LeBlanc, 1988
Bentonite-Kaolinite mix	75	2	55	2 - 3000	15 +/-	0,055	Biscontin & Pestana, 2001
Zinc Tailings	22 - 54	2	65	1 - 60	14	0,050	Presente Pesquisa

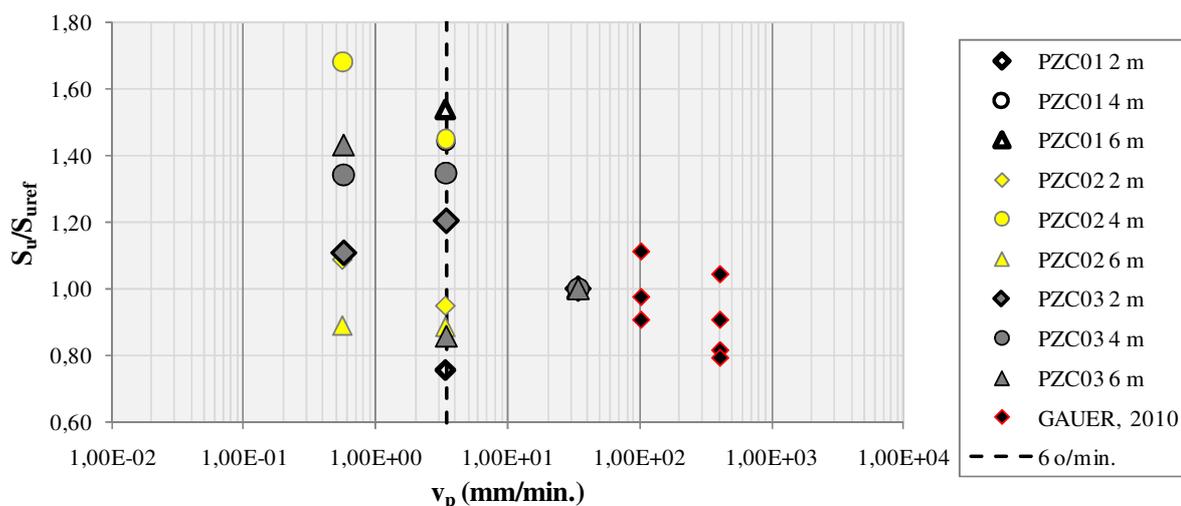


Figura 85: Resultados do resíduo em função da velocidade periférica.

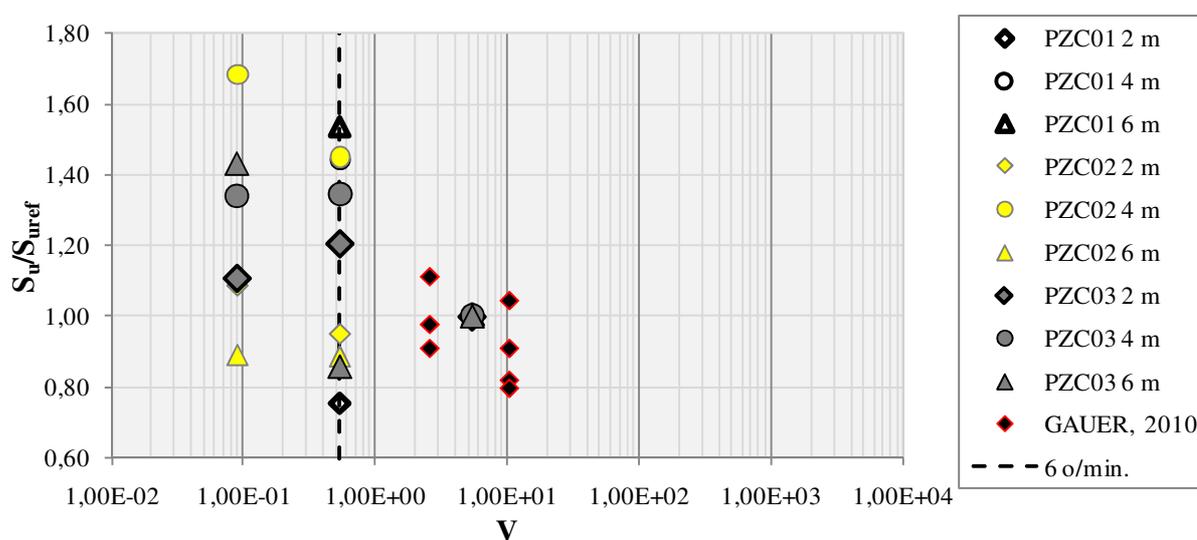


Figura 86: Resultados do resíduo em função da velocidade normalizada.

A partir dos gráficos anteriores, expressos nos espaços $S_u/S_{u\text{ref}}$ versus v_p e V , fica clara a diferença entre valores de resistência mobilizados, verificando-se que com o aumento da velocidade há uma redução da resistência ao cisalhamento.

Em complemento à análise realizada, foram adicionados à figura os resultados de ensaios CPTU, considerando como referência a velocidade padrão de penetração de 20 mm/s. Os resultados realizados a esta velocidade são comparados aos valores medidos à velocidade de 200 mm/s. Conforme discutido no Capítulo 4.2, a resistência à penetração e as poro pressões não se alteram para velocidades entre 20 e 200 mm/s, indicando que os ensaios encontram-se na faixa não-drenada, não exibindo efeitos viscosos. Interessante observar que os ensaios de

piezocone e palheta são concordantes, indicando um comportamento não-drenado para velocidades normalizadas superiores a 10.

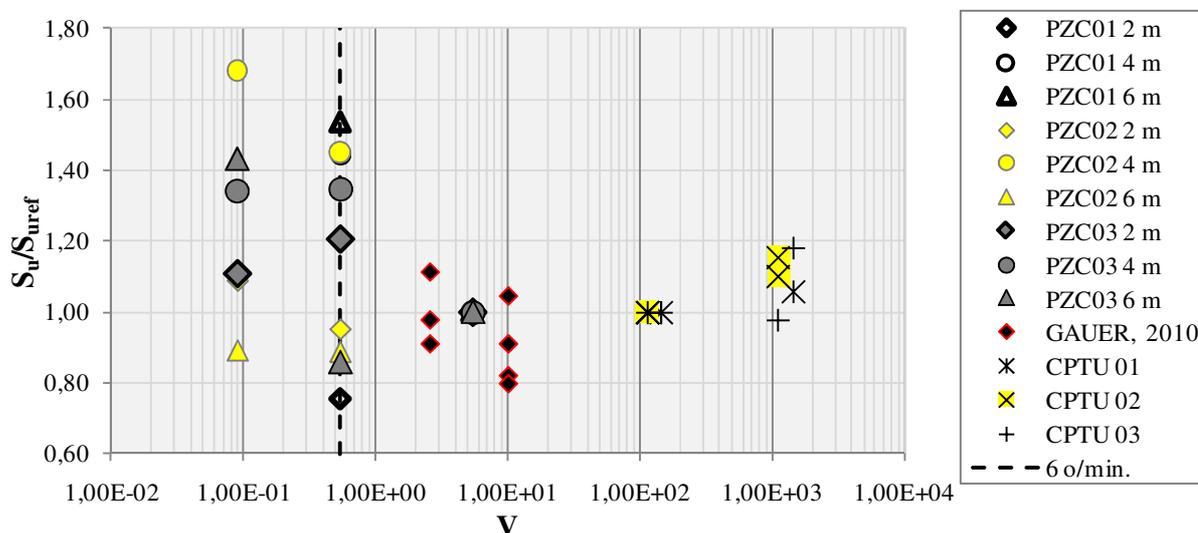


Figura 87: Resultados do resíduo de zinco ensaio de palheta e piezocone.

A outra forma de representação utilizada foi proposta por Blight (1968). Os resultados são apresentados no espaço $U = \frac{V - V_1}{V_0 - V_1}$ versus T , como uma adaptação da Equação 14, uma vez

que não há uma determinação precisa dos valores dos torques drenados e não drenados. Em substituição a estes valores foram utilizados o torque máximo V_1 (~drenado) e mínimo V_0 (~não drenado) para cada profundidade.

Os resultados obtidos na presente pesquisa são apresentados na figura proposta por Blight (Figura 88). A definição de comportamento do resíduo de zinco não é precisa, pois foram realizados ensaios com apenas três velocidades, correspondentes a três graus de drenagem para cada profundidade. Apesar da dispersão nos resultados, o gráfico permite identificar a tendência de comportamento e eventual distinção entre as condições drenada, parcialmente drenada e não drenada. Há a necessidade da realização de um maior número de ensaios para definir claramente os valores de transição entre as três condições, mas pode-se afirmar que a faixa de valores que se encontra a condição parcialmente drenada é entre $0,02 < T < 2,00$.

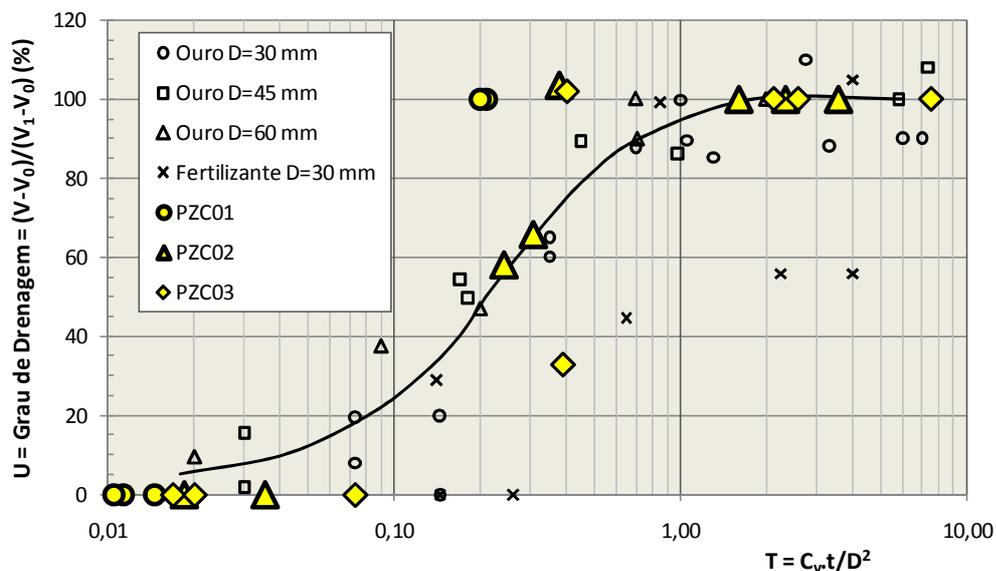


Figura 88: Resultados do resíduo conforme Blight, 1968.

Conforme apresentado no Capítulo 7, a resistência diminui com o aumento da taxa de rotação, que expressos por valores correspondentes de variação de T indicam a ocorrência de condições não drenadas para velocidades acima de 60 %/min. e condições drenadas para velocidade menores que 1 %/min. Salienta-se a necessidade do emprego de uma faixa maior de velocidades para se definir claramente esta variação.

6.3 ARGILA E SILTE: ANÁLISE INTEGRADA

Em princípio não é possível fazer uma análise integrada de diferentes geo-materiais, pois sabe-se que os efeitos da velocidade de carregamento são influenciados pelas propriedades constitutivas dos solos, como resistência (ângulo de atrito), deformabilidade, história de tensões, entre outros (Schnaid, 2005). Reconhecidas estas limitações, e pressupondo que haverá dispersão devido à variabilidade de propriedades, buscou-se representar todos os dados disponíveis em uma figura representada no espaço S_u/S_{uref} versus V (Figura 89). Neste espaço, as medidas de resistências se agrupam formando uma parábola com concavidade voltada para cima (representada por uma equação do tipo $f(x) = ax^2 + bx + c$, com $a > 0$). O ponto inferior da parábola foi obtido para uma velocidade normalizada na faixa entre $1,0 \times 10^2$ e $1,0 \times 10^3$ e representa - em teoria - a resistência não-drenada. Velocidades maiores são sujeitas a efeitos viscosos que aumentam o valor da resistência medida.

Velocidades menores resultam também em resistências ao cisalhamento maiores que, neste caso, são associadas a efeitos de drenagem parcial durante o cisalhamento.

É grande a dispersão dos ensaios realizados no resíduo de zinco, isso pode ter ocorrido devido ao processo de lançamento do material em campo, conforme descrito no Capítulo 2. Esta dispersão é muito menor para os dados de Biscontin & Pestana, os quais foram realizados em laboratório, com um controle muito maior.

Os dados apresentados na Figura devem ser usados com indicativos de comportamento, i.e. indicativos da variação de resistência em função da velocidade de cisalhamento do solo. Recomenda-se em cada caso determinar a curva característica de comportamento de cada material para definir com precisão as mudanças nas condições de drenagem: drenada, parcialmente drenada e não-drenada. Com isto é possível prever, com maior precisão e confiabilidade, o risco de ruptura de obras geotécnicas, comparando a velocidade de cisalhamento de ensaios de caracterização com a velocidade de carregamento da obra.

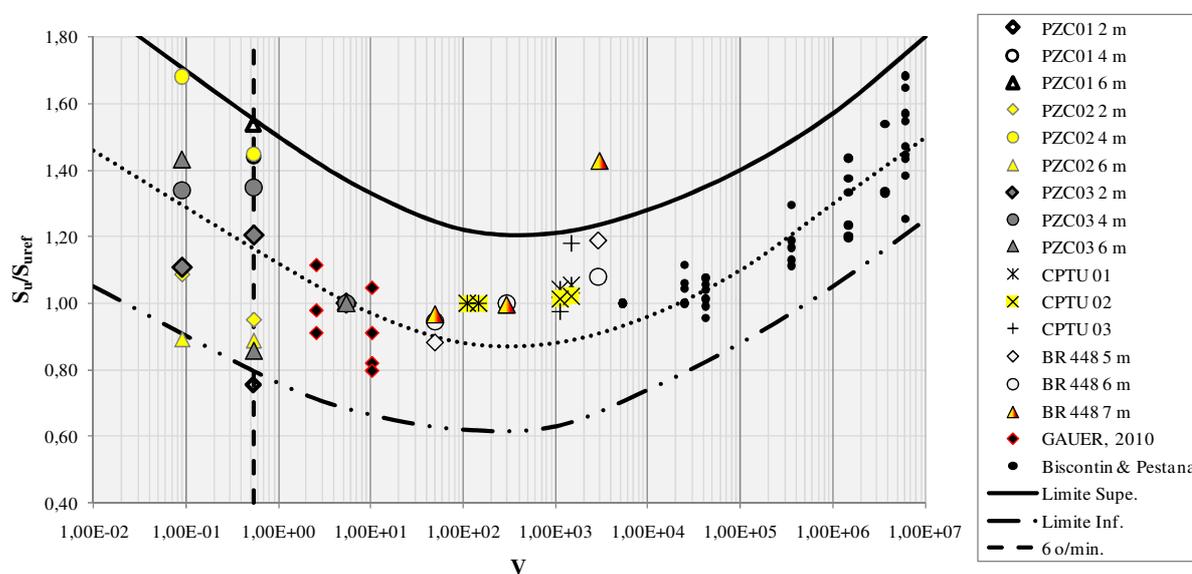


Figura 89: Resultados da argila e silte em função da velocidade normalizada.

7 CONCLUSÕES

Neste capítulo são descritas as principais conclusões estabelecidas na presente pesquisa.

O comportamento não convencional do resíduo de zinco dificulta a comparação dos resultados obtidos com outros geo-materiais (índices físicos).

Nos gráficos de granulometria do resíduo de zinco é possível observar uma descontinuidade das curvas granulométricas, o que não é observado normalmente nos ensaios com materiais convencionais, e pode estar relacionada por uma quebra das partículas durante o peneiramento, perda de material, ou à secagem prévia que pode provocar alterações nos argilominerais e agregação de partículas finas (RIGO, 2005), ou a presença de sulfato de cálcio que poderia aglomerar partículas no meio dispersor durante os ensaios de sedimentação.

O comportamento apresentado pelo resíduo de zinco durante a realização dos ensaios de laboratório dificultou a determinação de alguns dos parâmetros do material, sendo este comportamento associado à presença de elementos cimentantes, e.g. sulfato de cálcio hidratado, que se forma durante o processo de secagem do material a temperaturas superiores a 60 °C. De acordo com Dutrizac (2002), a solubilidade do sulfato de cálcio acima de 50 °C é reduzida, o que provoca a cristalização do sulfato de cálcio.

Observa-se que nos ensaios de palheta a declividade da curva S_u x rotação (ou torque x rotação) não apresenta qualquer tendência, independe da velocidade de rotação adotada nos ensaios, para a faixa de velocidades empregada.

A resistência ao cisalhamento da argila aumenta como aumento da velocidade dos ensaios de palheta e este aumento está associado a efeitos viscoplásticos. As equações exponenciais ou logarítmicas podem ser usadas para reproduzir a influência do efeito viscoso na resistência, expresso em função de α e β , cujos valores são similares aos relatados na literatura.

Em contrapartida, para o resíduo de zinco o valor de resistência ao cisalhamento reduz com o aumento da velocidade de rotação, fator atribuído à falta de dissipação de poropressões com o aumento da taxa de rotação.

Já o valor de S_u residual é praticamente independente da velocidade do ensaio para o resíduo em estudo.

Os resultados mostram que quanto maior a velocidade do ensaio, menores as deformações correspondentes à ruptura do material nos ensaios de palheta. No caso das argilas a redução, no entanto, é menos acentuada que no resíduo de zinco, e praticamente independe da velocidade de rotação da palheta.

A partir dos valores de S_u dos ensaios de palheta com as diferentes velocidades empregadas foi possível verificar a variação do N_{kt} , que se aproxima de 12 para a maior velocidade empregada de 60 °/min., valor considerado mais próximo da resistência ao cisalhamento não drenada.

Não foi possível determinar a influência da velocidade nos ensaios de piezocone de acordo com o método proposto por Randolph & Hope (2004) posteriormente adaptados por Schnaid (2005) devido ao intervalo de velocidades empregado (20 mm/s e 200 mm/s). A única maneira para utilizar o método seria empregar a Equação 20, com a estimativa de n para o resíduo de zinco, no entanto, esta estimativa aumenta as incertezas quanto a determinação da curva $U \times V$.

Para se obter a resistência ao cisalhamento não drenada do resíduo de mineração avaliado na presente pesquisa e materiais similares, recomenda-se realizar ensaios com velocidade adimensional (V) superior a 100 e inferior a 1000.

Salienta-se a importância de adotar um coeficiente de adensamento consistente para representar o comportamento de resíduos, visto que há influência significativa na velocidade normalizada. Este parâmetro deverá ser determinado a cada metro em toda extensão do material.

Recomenda-se em cada caso determinar a curva característica de comportamento de cada material para definir com precisão as mudanças nas condições de drenagem: drenada, parcialmente drenada e não-drenada, além das condições de viscosidade. Com isto é possível

prever, com maior precisão e confiabilidade, o risco de ruptura de obras geotécnicas, comparando a velocidade de cisalhamento de ensaios de caracterização com a velocidade de carregamento da obra.

REFERÊNCIAS

AAS, G. **Study of the effect of vane shape and rate of strain on measured values of in situ shear strength of clays.** In: Proc. 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering, v. 1, pp. 141-145. Montreal, 1965.

ABREU, C. B. de. **Processamento de zinco primário para a recuperação de sulfato de cálcio visando aplicação industrial.** 2009. 96 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, UFMG, Belo Horizonte.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459: Solo – Determinação do Limite de Liquidez. São Paulo, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6508: Grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica. São Paulo, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180: Solo – Determinação do Limite de Plasticidade. São Paulo, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: Solo – Análise granulométrica. São Paulo, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9820: Coleta de amostras indeformadas de solo em furos de sondagem. São Paulo, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10905: Ensaio de Palheta *in situ*. São Paulo, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12007: Ensaio de adensamento unidimensional. São Paulo, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12069: Ensaio de penetração de cone *in situ* (CPT) – Método do ensaio. São Paulo, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13028: Elaboração de projeto de disposição de rejeitos de beneficiamento, em barramento, em mineração. Rio de Janeiro, 1993.

BISCONTIN, G.; PESTANA, J. M. **Influence of peripheral velocity on undrained shear strength in deformability characteristics of a bentonite-kaolinite mixture.** Research Report UCB/GT/99-19, Dep. Of Civil and Envir. Engng. University of California, Bekerley, 1999.

BISCONTIN, G.; PESTANA, J. M. **Influence of peripheral velocity on vane shear strength of an artificial clay**. Geotechnical Testing Journal. ASTM, v. 24, No 4, p. 423-429, 2001.

ABREU, C. B. de. **Tratamento Hidrometalúrgico do Resíduo da Rota de Processamento de Zinco Primário para a Recuperação de Sulfato de Cálcio Visando Aplicação Industrial**. 2009. 154p. Dissertação (Mestrado Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, UFMG, Belo Horizonte.

BEDIN, J. **Interpretação de Ensaios de Piezocone em Resíduos de Bauxita**. 2006. 150p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

BLIGHT, G.E. "A Note on Field Vane Testing of Silty Soils", Can. Geotech. J., 5(3), p. 142-149, 1968.

BROCCHI, E. de ALBUQUERQUE; **Os Metais: Origem e Principais Processos de Obtenção**. Disponível em: <http://web.ccead.puc-rio.br/condigital/mvsl/Sala%20de%20Leitura/conteudos/SL_os_metais.pdf>. Acesso: 18/08/2011.

CAMPOS, T. M. P. **Geotecnia e meio ambiente: relato do estado da arte**. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, 8, 1986. Anais... ABMS, Porto Alegre, 1986, p. 123-157.

CASTRO, L. A. S. de. **Processamento de Amostras para Microscopia Eletrônica de Varredura**. 2002. Pelotas: Embrapa Clima Temperado. 37 p.

COLLET, H. B. **Ensaios de Palheta de Campo em Argilas Moles da Baixada Fluminense**. 1978. 243p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro.

D'AGOSTINO, L. F. **Praias de Barragens de Rejeitos de Mineração: características e análise da sedimentação**. 2008. 374 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP, São Paulo.

DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. **Microscopia Eletrônica de Varredura: aplicações e preparação de amostras**. 2007. Porto Alegre: EDIPUCRS. 60 p.

DUTRIZAC, J. E. **Calcium Sulphate Solubilities in Simulated Zinc Processing Solutions**. Hydrometallurgy n. 65, p.109–135, 2002.

FEIJÓ, F. D. **Redução das perdas de zinco associadas aos processos de purificação do licor por cementação e de tratamento dos resíduos gerados da Votorantim Metais**. 2007. 178 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, UFMG, Belo Horizonte.

FLAATE, K. **Factors influencing the results of vane tests.** Canadian Geotechnical Journal. V. 3, No 1, p. 18-31, 1966.

FREIRE NETO, J. P. **Estudo da liquefação estática em rejeitos e aplicação de metodologia de análise de estabilidade.** 2009. 154 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Programa de Pós Graduação Núcleo de Geotecnia - NUGEO, UFOP, Ouro Preto.

GAUER, E. A. **Influência da velocidade de rotação da mini-palheta na resistência de um solo siltoso.** 2010. 112 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

GEOFORMA ENGENHARIA LTDA. **Relatório RE 124-11/07.** 2008. Consórcio - Obra: Molhes de Rio Grande – 4p. 2 apêndices.

GOMES, M. F. M. **Metodologia de análise hierárquica aplicada para escolha do sistema de disposição de subproduto da mineração com ênfase nos rejeitos de minério de ferro.** 2009. 193 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Programa de Pós Graduação Núcleo de Geotecnia – NUGEO, UFOP, Ouro Preto.

J MENDO CONSULTORIA. **Relatório Técnico 65 – Perfil do Zinco,** 08/2009. DESENVOLVIMENTO DE ESTUDOS PARA ELABORAÇÃO DO PLANO DUODECENAL (2010 - 2030) DE GEOLOGIA, MINERAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO MINERAL, 33 p.

JAMIOLKOWSKY M., LADD, C.C., GERMAINE, J.T. & LANCELLOTTA, R. - **New Developments of Field and Laboratory Testing of Soils.** In: XI ICSMFE, San Francisco, V 1, p.57-153, 1985.

KIMURA, T. & SAITTOH, K. **Effect of Disturbance Due to Insertion on Vane Shear Strength of Normally Consolidated Cohesive Soils.** Soils and Foundation. Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering. V. 23, No 2, p. 113-124, 1983.

LAMBE, T.W. & WHITMAN, R.V. **Soil mechanics.** New York: John Wiley & Sons, USA. 553 p. 1979.

LARSSON, R. & AHNBERG, H. **On the Evaluation of Undrained Shear Strength and Preconsolidation Pressure from Common Field Tests in Clay.** Canadian Geotechnical Journal. V. 42, p. 1221-1231, 2005.

MATSUI, T. & ABE, N. **Shear Mechanisms of Vane Test in Soft Clays.** Soils and Foundation. Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering. V. 21, No 4, p. 69-80, 1981.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.** São Paulo: IBRACON, 2008. 674 p.

MENDES, M. B. **Comportamento geotécnico de uma barragem de rejeito de minério de ferro alteada para montante.** 2007. 189 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP, São Paulo.

MORRIS, P. H., & WILLIAMS, D. J. **A Revision of Blight's Model of Field Vane Testing.** Canadian Geotechnical Journal. V. 37, p. 1089-1098, 2000.

NETO, J. P. F. **Estudo da liquefação estática em rejeitos e aplicação de metodologia de análise de estabilidade.** 2009. 154 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Engenharia Geotécnica do Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas, UFOP, Ouro Preto.

ORTIGÃO, J. A. R.; COLLET, H. B. **A Eliminação de Erros de Atrito em Ensaios de Palheta.** In: Solos e Rochas, 9, 2. São Paulo: ABMS, 1986.

ORTIGÃO, J. A. R. **Introdução à Mecânica dos Solos dos Estados Críticos,** 2007. Terratek, edição 3. 385p

OSTERBERG, J. D., **Symposium on Vane Shear Testing of Soils,** STP 193, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1957, pp. 1-7.

PEREIRA, D. D. **Recuperação de zinco presente em efluentes industriais produzidos pela Votorantim Metais Unidade Três Marias utilizando-se a técnica de extração líquido-líquido.** 2006. 115 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Química, UFMG, Belo Horizonte.

PEREIRA, E. L. **Estudo do potencial de liquefação de rejeitos de minério de ferro sob carregamento estático.** 2005. 185 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, UFOP, Ouro Preto.

PERLOW, M.; RICHARDS, A. F. **Influence of shear velocity on vane shear strength.** Journal of the Geotechnical Engineering Division. ASCE, v. 103. No 1, p. 19-32, 1977.

RANDOLPH, M.F & Hope, S. **Effect of cone velocity on cone resistance and excess pore pressures.** Proc. Int. Symp. On Engineering Practice and Performance of Soft Deposits, Osaka. 2004.

RIGO, M. L. **Mineralogia, intemperismo e comportamento geotécnico de solos saprolíticos de rochas vulcânicas da Formação Serra Geral.** 2005. 348 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

SCHLUE, F. B.; MOERZ, T.; KREITER, S. **Influence of shear rate on undrained Vane shear strength of organic harbor mud.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. ASCE, p. 1437-1447, 2010.

SCHNAID, F. **Ensaios de Campo e suas Aplicações à Engenharia de Fundações,** 2000. São Paulo: Oficina de Textos, 189 p.

SCHNAID, F. **Geo-characterization and properties of natural soils by in situ tests.** In: International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. **Anais...** Vol. 1 p. 3-47, Osaka: 2005.

SCHNAID, F. **In Situ Testing In Geomechanics – The Main Tests.** 2008. London: Taylor & Francis. 352p.

SCHNAID, F & YU, S. **Interpretation of the seismic cone test in granular soils.** *Géotechnique*. V. 57, No 3, p. 265-272, 2007.

SILVA, W. R da. **Nova metodologia para determinação de propriedades de sedimentação e adensamento de rejeitos de mineração.** 2008. 136 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, UFV, Viçosa.

SOUZA, A. D. **Processo integrado: Biolixiviação e lixiviação química na indústria do zinco.** 2005. 110 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Rede Temática em Engenharia de Materiais, UFOP - CETEC - UEMG, Ouro Preto.

SOUZA PINTO, C. **Curso básico de mecânica dos solos.** 2ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2002.

TAVENAS, F. & LEROUEIL, S. **State-of-the-Art on Laboratory and in situ Stress-strain-time Behaviour of Soft Clays.** Int. Symp. on Geotechnical Engineering of Soft Soils, Mexico City, V. 2, p. 3-48, 1987.

TORSTENSSON, B. A. **Time-dependent effects in the field vane test.** In: International Symposium on Soft Clay, p. 387-397. Bangkok, 1977.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO. MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA. Disponível em <<http://www.degeo.ufop.br/laboratorios/microlab/mev.htm>>.

VICK, S.G. **Planning, Design and Analysis of Tailings Dams.** John Wiley & Sons, Inc., 369 p, 1983.

VILLAR, L.H.A. **Estudo do Adensamento e Ressecamento de Resíduos de Mineração e Processamento de Bauxita.** 2002. 461p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, PUC, Rio de Janeiro.