

**INTERPRETAÇÃO DE ENSAIOS DE PIEZOCONE EM  
RESÍDUOS DE BAUXITA**

**Jucélia Bedin**

**Porto Alegre  
Setembro de 2006**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**INTERPRETAÇÃO DE ENSAIOS DE PIEZOCONE EM**  
**RESÍDUOS DE BAUXITA**

Jucélia Bedin  
Engenheira Civil

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 na modalidade Acadêmico.

Área de Concentração: **Geotecnia**

Porto Alegre  
2006

**JUCÉLIA BEDIN**

**INTERPRETAÇÃO DE ENSAIOS DE PIEZOCONE EM  
RESÍDUOS DE BAUXITA**

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

Porto Alegre, 04 de setembro de 2006

---

Prof. Dr. Fernando Schnaid  
Ph. D. Oxford University, Reino Unido.  
Orientador/ Coordenador do PPGEC/UFRGS

---

Prof. Dr. Leandro de Moura Costa Filho  
Ph. D. Imperial College, Londres.  
Co-orientador

**BANCA EXAMINADORA :**

**Prof. Antônio Thomé (UFRGS)**  
Dr. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre

**Eng. Fernando Mantaras**  
Dr. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre

**Prof. Karla Salvagni Heineck (UFRGS)**  
Dr. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre

B412i      Bedin, Jucélia  
              Interpretação de ensaios de piezocone em resíduos de  
bauxita / Jucélia  
              Bedin. – 2006.

              Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio  
Grande do Sul.

              Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil.

              Porto Alegre, BR-RS. 2006.

              Orientação : Prof. Dr. Fernando Schnaid



## **AGRADECIMENTOS**

Nesta jornada em busca do aprimoramento profissional e pessoal sempre contamos com o apoio de pessoas que, de uma forma ou de outra, contribuem com esse processo. Por isso, nossas conquistas sempre são o resultado de um esforço conjunto.

Agradeço, primeiramente, aos meus pais Ivo e Azelinda pelo amor, incentivo e apoio incondicional sempre ofertados em todos os momentos da minha vida. Aos meus irmãos Dilmo e Diogo pela força e companheirismo.

Ao orientador, Prof. Fernando Schnaid por sua dedicação, amizade, interesse e confiança sempre transmitidos no desenvolvimento desta dissertação, por todas as oportunidades e pelo contínuo aprendizado.

Ao Prof, Leandro de Moura Costa Filho pela valiosa colaboração e interesse sempre demonstrados.

À Felipe Gobbi pelo carinho e compressão sempre presente.

Às amigas Bianca, Carla e Marcela pela ajuda e companheirismo.

Aos colegas do PPEGEC-UFRGS, em especial ao Vinicius, Alvaro, Luizmar e José, pela amizade e ajuda em todos os momentos.

A todos os professores da área de Geotecnia do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS, pelos ensinamentos.

As bolsistas de iniciação científica Caroline, Emanuele e Emanuel, pela ajuda e interesse, sobretudo, pela amizade e ao laboratorista João Diniz e secretária Ana Luiza de Oliveira, pela disponibilidade e presteza na solução dos problemas técnicos.

Ao CNPq e à UFRGS pelo suporte financeiro, sem o qual este trabalho não poderia ter sido realizado.

A Empresa ALUMAR e LPS Consultoria e Engenharia pelo apoio e fornecimento dos resultados.

À todos que de alguma forma participaram da realização deste trabalho.

## RESUMO

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.

A extração e processamento de minério resultam na geração de elevadas quantidades de resíduos, cuja disposição gera impacto e risco ambiental. Nesta dissertação é apresentado um estudo referente às campanhas de investigação geotécnica em área de disposição de resíduos de bauxita, procedimento necessário à extração da alumina. Os estudos referem-se a resíduos do processamento da lama de lavagem de uma mina localizada no estado do Pará, depositados em forma de lama, em reservatórios ditos ARBs (Área de Resíduos de Bauxita). No presente trabalho foram utilizados dados de dois reservatórios de deposição, ARB #2 e ARB #3. Ênfase foi dada à interpretação de ensaios de piezocone em diferentes pontos da área de deposição de resíduos. A análise integrada entre a resistência à penetração, excesso de poro pressão e poro pressão de equilíbrio possibilitaram uma avaliação correta das condições de contorno do reservatório, com identificação precisa da posição do nível d'água ( $u_0$ ) no período de realização dos ensaios, bem como da estimativa dos parâmetros geotécnicos do resíduo expressos através da resistência ao cisalhamento não-drenada. Ensaios de laboratório em equipamentos convencionais e equipamentos desenvolvidos especialmente para esse tipo de material complementaram as informações geotécnicas obtidas *in situ*. A análise conjunta dos ensaios de campo e de laboratório possibilitou a caracterização do resíduo e a estimativa de parâmetros constitutivos necessários a projetos geotécnicos e geo-ambientais nestes materiais. Uma nova metodologia foi proposta para identificação das condições de drenagem dos ensaios, com base na normalização dos resultados. Estes estudos sugeriram que os ensaios possam ser interpretados no espaço definido pela relação do parâmetro de velocidade  $V$  versus à resistência normalizada do cone, sendo  $V$  definido em função da velocidade de penetração do cone ( $v$ ), diâmetro de sonda ( $d$ ) e coeficiente de adensamento ( $C_v$ ), expressa na forma adimensional como  $V = v.d/C_v$ . Com base na metodologia proposta é possível identificar, para áreas de deposição de resíduos, as condições de drenagem que, uma vez estabelecidas, permitem uma estimativa racional dos parâmetros constitutivos que controlam o comportamento geo-mecânico do resíduo.

## ABSTRACT

BEDIN, J. **Interpretation of Piezocone test in Bauxite Residues**. 2006. 150p. M.Sc. Dissertation – Graduate Course in Civil Engineering, UFRGS, Porto Alegre.

Production and deposition of mining tailings is a problem confronting geotechnical engineers given the dimension of tailing deposits and their environmental risk assessment given the relevance of this topic. A case study reporting a site characterization programme in an area of disposal of tailings from bauxite mining operations is investigated in the present work. The studies focus on residues of a processing of the slime of washing of a mine located in the state of Pará, deposited in slime form in tailings called ARBs (Bauxite tailings), in particular from two tailings of deposition named, ARB #2 and ARB #3. Emphasis is given to the interpretation of piezocone tests carried out in different locations along these tailing dams. A combined interpretation of penetration resistance and pore pressure enabled boundary conditions in the dam to be established, with an accurate identification of the ground water pressure at the time of the testing programme. In addition, the piezocone data constitutive parameters of tailings to be predicted, expressed in terms of undrained shear strength  $S_u$ . The laboratory testing in conventional equipment and an equipment especially developed to this type of material had complemented the geomechanical information obtained from the in situ tests. The combined analysis of the laboratory and field test made possible the characterization of the residue and the estimate of necessary constitutive parameters to geotechnical and geo-environment projects. A new methodology was offered to identify the drained conditions in residues which is based on the normalization of test result in a space of normalized velocity  $V$  expressed as a function of normalized cone penetration. Values of  $U$  are defined as a function of cone penetration ( $v$ ), diameter of the cone ( $d$ ) and coefficient of consolidation ( $C_v$ ), expressed in dimensionless form as  $V = v.d/C_v$ . Based in this methodology drainage conditions have been established, giving the possibility of separating out the stress paths from drained, partially drained and undrained tests.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	p.1
1.1 IMPORTÂNCIA E APLICABILIDADE DO ESTUDO.....	p.1
1.2 JUSTIFICATIVAS DA PESQUISA.....	p.1
1.3 OBJETIVOS DA PESQUISA.....	p.2
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	p.3
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	p.4
2.1 ASPECTOS GERAIS SOBRE RESÍDUOS DE BAUXITA.....	p.4
<b>2.1.1 Introdução</b> .....	p.4
<b>2.1.2 Descoberta do alumínio</b> .....	p.5
<b>2.1.3 Processo de produção do alumínio</b> .....	p.5
<b>2.1.5 Composição química – mineralógica</b> .....	p.6
2.1.5.1 Difratoograma por raios-X.....	p.9
2.1.5.2 Microscopia eletrônica por varredura.....	p.10
2.2 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA.....	p.12
<b>2.2.1 Caracterização básica</b> .....	p.12
<b>2.2.2 Triaxial</b> .....	p.16
<b>2.2.3 Adensamento</b> .....	p.18
<b>2.2.4 Condutividade Hidráulica</b> .....	p.21
<b>2.2.5 Piezocone</b> .....	p.24
2.2.5.1 Perfis característicos.....	p.25
2.2.5.2 Segregação hidráulica.....	p.27
2.2.5.3 Parâmetros Geotécnicos.....	p.28
<b>2.2.6 Comentários Finais</b> .....	p.33
<b>3 PROGRAMA EXPERIMENTAL</b> .....	p.34
3.1 LOCAL ESTUDADO.....	p.34
<b>3.1.1 Reservatórios de resíduos de bauxita</b> .....	p.34
<b>3.1.2 Ensaios realizados</b> .....	p.37
3.2 METODOLOGIA DAS INVESTIGAÇÕES GEOTÉCNICAS DE CAMPO E LABORATÓRIO.....	p.43
<b>3.2.1 Amostragem</b> .....	p.43
<b>3.2.2 Caracterização</b> .....	p.44

3.2.3 Ensaio de compressão triaxial.....	p.47
3.2.4 Ensaio de condutividade hidráulica e adensamento.....	p.49
3.2.5 Ensaio de piezocone.....	p.55
3.2.6 Palheta (‘Vane Test ‘).....	p.56
3.2.7 Ensaio de condutividade hidráulica em piezômetro Casagrande.....	p.57
3.2.8 Comentários finais.....	p.57
<b>4 ENSAIOS DE LABORATÓRIO: APRESENTAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>p.58</b>
4.1 INTRODUÇÃO.....	p.58
4.2 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA.....	p.59
4.2.1 Determinação das curvas granulométricas.....	p.59
4.2.2 Determinação dos índices físicos.....	p.67
4.2.3 Análise físico-química-mineralógica.....	p.74
4.3 ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL.....	p.76
4.3.1 Ensaios triaxiais CIU.....	p.77
4.3.2 Ensaios Triaxiais UU.....	p.79
4.4 ENSAIO DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA E ADENSAMENTO.....	p.79
4.4.1 Oedômetro CRD (Constant Rate of Displacement).....	p.79
4.4.2 Permeâmetro de parede flexível (PUC/Rio).....	p.81
4.4.3 Oedômetro de lama.....	p.82
4.4.4 Permeâmetro de parede rígida (UFRGS).....	p.84
4.4.5 Ensaio de adensamento (UFRGS).....	p.84
<b>5 ENSAIOS DE CAMPO: APRESENTAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>p.88</b>
5.1 INTRODUÇÃO.....	p.88
5.2 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS.....	p.88
5.2.1 Classificação textural dos resíduos.....	p.89
5.2.2 Avaliação do processo de segregação hidráulica.....	p.107
5.2.3 Síntese dos resultados.....	p.108
5.3 PARÂMETROS GEOTÉCNICOS.....	p.110
5.3.1 Resistência ao cisalhamento dos resíduos.....	p.110
5.3.2 Estimativa do coeficiente de adensamento.....	p.118

<b>5.3.3 Estimativa da permeabilidade</b> .....	p.125
5.4 COMENTÁRIOS FINAIS.....	p.129
<b>6 EFEITOS DE DRENAGEM PARCIAL</b> .....	p.130
6.1 INTRODUÇÃO.....	p. 130
6.2 AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE DRENAGEM.....	p.130
<b>6.2.1 Metodologias</b> .....	p.133
<b>6.2.2 Resíduos de bauxita</b> .....	p.138
6.3 COMENTÁRIOS FINAIS.....	p.141
<b>7 CONCLUSÕES</b> .....	p.143
<b>8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	p.147

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Fluxograma da Fabricação de alumínio.....	p. 7
Figura 2.2: Difratoograma da Lama Vermelha.....	p. 10
Figura 2.3: Foto Microscopia Eletrônica da Lama vermelha, ampliação 500 vezes.....	p. 11
Figura 2.4: Foto por Microscopia Eletrônica da Lama vermelha, ampliação 1000 vezes	p. 11
Figura 2.5: Foto por Microscopia Eletrônica da Lama vermelha, ampliação 5000 vezes	p. 11
Figura 2.6: Curvas Granulométricas de diferentes resíduos (Campos, 1986.....	p. 13
Figura 2.7: Curvas Granulométricas de diferentes resíduos (Abrão, 1987).....	p. 13
Figura 2.8: Influência do tipo de fluido em Ensaios de Graulometria.....	p. 14
Figura 2.9: Curvas granulométricas da lama vermelha OP(Villar 2002).....	p. 15
Figura 2.10: Valores de ângulo de atrito, CPTU e triaxial para o Silte de Stjordal.....	p. 17
Figura 2.11: Coeficiente de Adensamento Obtidas de Ensaios Convencionais.....	p. 19
Figura 2.12: Resultados de EnsaioCRD na lama vermelha SL: compressibilidade.....	p. 20
Figura 2.13: Resultados de EnsaioCRD na lama vermelha PC: compressibilidade.....	p. 20
Figura 2.14: Comparação de medições de campo, lama vermelha PC E SL .....	p. 21
Figura 2.15: Valores de condutividade hidráulica para resíduos de mineração.....	p. 23
Figura 2.16: Comparação de resultados de ensaios de campo e laboratório nas lamas vermelhas PC E SL.....	p. 24
Figura 2.17: Resultados de CPTU, no resíduo de minério de ferro.(Gongo Soco).....	p. 25
Figura 2.18: Resultaods de CPTU, no resíduo de minério de ouro.....	p. 26
Figura 2.19: Resultaodos de CPTU, no Silte de Stjordal.....	p. 26
Figura 2.20: Resultados de ensaios de CPT. Áreas de resíduo de minério de ouro I .....	p. 28
Figura 2.21: Resultados de ensaios de CPT. Áreas de resíduo de minério de ouro II....	p. 28
Figura 2.22: Resultados de ensaios de CPTU e Vane Test - resíduo de minério de ouro.	p. 32
Figura 3.1: Seção típica de alteamento.....	p. 36
Figura 3.2: Vista de um depósito de armazenamento de resíduos de minério.....	p. 36
Figura 3.3: Localização das Áreas de disposição existentes e das futuras áreas.....	p. 37
Figura 3.4: Localização das estações de ensaios campanhas de 1999,2002 e 2004.....	p. 41
Figura 3.5: Localização das estações de ensaios da campanha de 2005.....	p. 42
Figura 3.6: Amostra do resíduo retirada com o amostrados Shelby - campanha de 2005	p. 43
Figura 3.7: Suporte para a amostra ser analisada do equipamento de MEV.....	p. 46
Figura 3.8: Visualização da tela do equipamento MEV.....	p. 47
Figura 3.9: Foto do equipamento triaxial utilizado nos ensaios com os resíduos.....	p. 48

Figura 3.10: Foto da célula desenvolvida para preparação de corpos de provas.....	p. 49
Figura 3.11: Edometro de lama tipo CRD.....	p. 50
Figura 3.12: Foto da célula de adensamento de lammas .....	p. 51
Figura 3.13: Foto da vista geral do equipamento desenvolvido.....	p. 52
Figura 3.14: Equipamento permeâmetro de parede rígida – UFRGS.....	p. 54
Figura 3.15: Equipamento de adensamento – UFRGS.....	p. 55
Figura 3.16: Barco de navegação e equipamento piezocone no reservatório de resíduo..	p. 56
Figura 4.1: Curvas granulométricas do resíduo, ARB# 2 desativada a 1 ano (1999).....	p. 60
Figura 4.2: Curvas granulométricas do resíduo, ARB#2 com operação upstream (2002)	p. 61
Figura 4.3: Variação da percentagem de finos com a distância do dique (2002).....	p. 61
Figura 4.4: Curvas granulométricas do resíduo, ARB#2 operação upstream encerrada (2004).....	p. 62
Figura 4.5: Variação da porcentagem de finos com a profundidade (campanha 2004)...	p. 63
Figura 4.6: Distribuição granulométrica do resíduo nas diferentes campanhas de ensaio da ARB#2.....	p. 64
Figura 4.7: Curvas granulométricas do resíduo obtidas para diferentes soluções (2005).	p. 65
Figura 4.8: Curvas granulométricas do resíduo obtidas para diferentes estações- ABR#3 (2005).....	p. 66
Figura 4.9: Variação da porcentagem de finos com a profundidade.....	p. 66
Figura 4.10: Variação dos índices físicos com a profundidade , ARB# 2 (1999).....	p. 67
Figura 4.11: Variação dos índices físicos -ARB#2 com operação upstream (2002).....	p. 69
Figura 4.12: Variação dos índices físicos - ARB#2 com operação upstream (2002).....	p. 70
Figura 4.13: Variação dos índices físicos - ARB#2 operação upstream encerrada (2004).....	p. 71
Figura 4.14: Variação dos índices físicos ao longo da profundidade - ABR#3 (2005)....	p. 72
Figura 4.15: Difratograma do resíduo de minério de alumínio .....	p. 74
Figura 4.16: Foto por Microscopia eletrônica do resíduo – ampliação 1000 vezes .....	p. 74
Figura 4.17: Foto por Microscopia eletrônica do resíduo – ampliação 2000 vezes.....	p. 75
Figura 4.18: Curva tensão x deformação e Curva tensão x variação de poro pressão - ensaio triaxial CIU.....	p. 78
Figura 4.19: Diagrama q x p' - ensaio triaxial CIU.....	p. 78
Figura 4.20: Variação do índice de vazios com a tensão efetiva (amostra LW-5).....	p. 81
Figura 4.21: Variação do índice de vazios com a tensão efetiva (amostra LW-10S(1))...	p. 81
Figura 4.22: Variação do índice de vazios com a tensão efetiva (amostra LW-10S(2))..	p. 81
Figura 4.23: Variação do índice de vazios com a tensão efetiva (amostra TS=41,6%)	p. 83
Figura 4.24: Variação do índice de vazios com a tensão efetiva (In natura TS=40%)	p. 83



Figura 4.25: Variação do índice de vazios com a tensão efetiva (estação 1- ARB#3)....	p. 85
Figura 4.26: Variação do índice de vazios com a tensão efetiva (estação NI- ARB#3)..	p. 85
Figura 4.27: Valores de condutividade hidráulica para resíduos de mineração.....	p. 87
Figura 5.1: Perfil integrado de $q_t$ , $u$ , $u_o$ , $B_q$ e $R_f$ . ARB#2(campanha 1999).....	p. 91
Figura 5.2: Proposta de classificação de Robertson & Campanella (1983) - estações 2 e 5. (ARB#2 - campanha 1999).....	p. 92
Figura 5.3: Proposta classificação de Robertson (1986)-estações 2 e 5.(ARB#2-1999)	p. 93
Figura 5.4: Perfil integrado de $q_t$ , $u$ , $u_o$ , $B_q$ e $R_f$ - ARB#2(campanha 2002 - estações 3,4,5,6,7,8).....	p. 95
Figura 5.5: Perfil integrado de $q_t$ , $u$ , $u_o$ , $B_q$ e $R_f$ - ARB#2(campanha 2002- estações 1,2).....	p. 95
Figura 5.6: Proposta de classificação de Robertson & Campanella (1983) - estações 1 e 7. (ARB#2 - campanha 2002).....	p. 96
Figura 5.7: Proposta de classificação de Robertson (1986) - estações 1 e 7. (ARB#2 - campanha 2002).....	p. 96
Figura 5.8: Perfil integrado de $q_t$ , $u$ , $u_o$ , $B_q$ e $R_f$ - ARB#2(campanha 2004- estações 1,2,5,6).....	p. 97
Figura 5.9: Perfil integrado de $q_t$ , $u$ , $u_o$ , $B_q$ e $R_f$ - ARB#2 (campanha 2004- estações 3,4,7).....	p.98
Figura 5.10: Proposta de classificação de Robertson & Campanella (1983) - estações 4 e 6. (ARB#2 - campanha 2004).....	p.99
Figura 5.11: Proposta de classificação de Robertson (1986) - estações 4 e 6. (ARB#2 - campanha 2004).....	p.99
Figura 5.12: Perfil integrado de $q_t$ , $u$ , $u_o$ , $B_q$ e $R_f$ - ARB#3(campanha 2005- estações 1, 2, 3, 4LE, 4LD, 6AC, 7).....	p.102
Figura 5.13: Perfil integrado de $q_t$ , $u$ , $u_o$ , $B_q$ e $R_f$ - ARB#3(campanha 2005- estações 6,8 e 9).....	p.102
Figura 5.14: Proposta de classificação de Robertson & Campanella (1983) - estações 4 LE e 6. (ARB#3 - campanha 2005).....	p.103
Figura 5.15: Proposta de classificação de Robertson (1986) - estações 4LE e 6 (ARB#3 - campanha 2005).....	p.103
Figura 5.16: Perfil integrado de $q_t$ , $u$ , $u_o$ - estação 5(2002) e estação 1 (2004).....	p.105
Figura 5.17: Perfil integrado de $q_t$ , $u$ , $u_o$ - estação 2(1999) e estação 3 (2002) e estação 6 (2004).....	p.106
Figura 5.18: Perfil integrado de $q_t$ , $u$ , $u_o$ - estação 6(2004) e estação 4 LE (2005).....	p.106
Figura 5.19: Perfil integrado de $q_t$ , $u$ , $u_o$ - estações 4 e 6 da ARB#2(campanha 2004)...	p.108
Figura 5.20: Perfil integrado de $q_t$ , $u$ , $u_o$ - estações 4 LE e 6, da ARB#2 (campanha 2005).....	p.108

Figura 5.21: Variação de valores de $S_u$ com a profundidade e de $S_u$ com $\sigma'_{vo}$ - campanha de 1999.....	p.113
Figura 5.22: Variação de valores de $S_u$ com a profundidade e de $S_u$ com $\sigma'_{vo}$ - campanha de 2002.....	p.114
Figura 5.23: Variação de valores de $S_u$ com a profundidade e de $S_u$ com $\sigma'_{vo}$ - campanha de 2004.....	p.115
Figura 5.24: Variação de valores de $S_u$ com a profundidade e de $S_u$ com $\sigma'_{vo}$ - campanha de 2005.....	p.117
Figura 5.25: Comparação da variação de valores resistência não drenada (piezocone) para as campanha de 1999, 2002, 2004 e 2005.....	p.118
Figura 5.26: Ensaio de dissipação da poro pressão realizado na ARB#2 e ARB#3.....	p.119
Figura 5.27: Variação de valores de $q_t$ , $C_h$ e $C_v$ ao longo da profundidade- ( 1999).....	p.120
Figura 5.28 Variação de valores de $q_t$ , $C_h$ e $C_v$ ao longo da profundidade- ( 2002).....	p.121
Figura 5.29:Variação de valores de $q_t$ , $C_h$ e $C_v$ ao longo da profundidade- ( 2004).....	p.121
Figura 5.30: Variação de valores de $q_t$ , $C_h$ e $C_v$ ao longo da profundidade- ( 2005).....	p.122
Figura 5.31: Variação das poro pressões de equilíbrio, tensões totais e efetivas com a profundidade nas 4 campanhas de ensaios.....	p.123
Figura 5.32: Variação de valores de $C_v$ e $C_h$ - comparação das campanhas de 1999,2002 e 2004e campanha de 2005.....	p.123
Figura 5.33: Variação da permeabilidade com a profundidade da lâmina d'água e a profundidade a partir do topo do resíduo -campanha 2004.....	p.126
Figura 5.34: Tentativa de valores de condutividade hidráulica para resíduos de mineração.....	p.128
Figura 6.1: Condições de drenagem de um depósito de silte.....	p.131
Figura 6.2: Condições de drenagem – área ABR#2 .....	p.132
Figura 6.3: Condições de drenagem – área ARB#2.....	p.132
Figura 6.4: Condições de drenagem – área ARB#2.....	p.132
Figura 6.5: condições de drenagem – área ARB#3.....	p.133
Figura 6.6: Curva de drenagem empírica obtida por ensaios de palheta em resíduos (adaptados de Blight, 1968).....	p.135
Figura 6.7: Avaliação das condições de drenagem pelo ensaio de piezocone em argila. (adaptados de Randolph e Hope, 2004) .....	p.137
Figura 6.8: Comparação dos resultados, diferentes velocidades de cravação do piezocone - estação 6.....	p.139
Figura 6.9: Comparação dos resultados para diferentes velocidades de cravação do piezocone - estação 6 acima.....	p.139
Figura 6.10: Avaliação das condições de drenagem.....	p.141

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Constituição Química Básicas das Bauxitas.....	p. 7
Tabela 2.2: Componentes Químicos Mineralógicos mais comuns nas lamas vermelha...	p. 8
Tabela 2.3: Análise Químico mineralógico de resíduos de Mineração e processamento	p.9
Tabela 2.4: Resultados de difratograma de raio X na Lama Vermelha.....	p. 10
Tabela 2.5: Valores de densidade real dos grãos de diferentes resíduos.....	p. 16
Tabela 2.6: Algumas Funções Ajustadas à Comportamento de Compressibilidade.....	p. 19
Tabela 2.7: Valores de coeficiente de adensamento de resíduos de diferentes minério apresentados na literatura.....	p. 21
Tabela 2.8: Valores de coeficiente de adensamento e ângulo de atrito de diferentes tipos de resíduos apresentados na literatura.....	p. 30
Tabela 2.9: Valores do fator $\alpha$ proposto por Mitchell & Gardner (1975).....	p. 31
Tabela 3.1: Resumo dos ensaios realizados nas áreas de disposição.....	p. 38
Tabela 4.2: Valores para cada solução utilizada na distribuição granulométrica.....	p. 65
Tabela 4.3: Distribuição granulométrica para cada estação de ensaio.....	p. 66
Tabela 4.4: Resumos dos resultados de caracterização.....	p. 73
Tabela 4.5: Resultados da varredura por EDX no resíduo de minério de alumínio (incluindo carbono e oxigênio).....	p. 75
Tabela 4.6: Resultados da varredura por EDX no resíduo de minério de alumínio.....	p. 75
Tabela 4.7: pH, Teores Cáusticos, Alcalino e de Matéria Orgânica.....	p.76
Tabela 4.8: Resultado do ensaio triaxial UU.....	p.77
Tabela 4.9: Índices Físicos dos corpos de prova dos ensaios triaxiais.....	p. 78
Tabela 4.10: Resultados dos Ensaio Triaxiais.....	p. 79
Tabela 4.11: Índices físicos dos corpos de prova dos ensaios de adensamento CRD .....	p. 80
Tabela 4.12: Coeficiente de permeabilidade dos corpos de prova dos ensaios de adensamento CRD.....	p. 80
Tabela 4.13: índices físicos dos corpos de prova dos ensaios de permeâmetro de parede flexível.....	p. 82
Tabela 4.14: Resultados do ensaio de permeâmetro de parede flexível.....	p. 82

Tabela 4.15: Índices Físicos das Amostras dos Ensaios de Adensamento.....	p. 82
Tabela 4.16: Resultados dos Ensaios de Permeabilidade e Adensamento.....	p. 83
Tabela 4.17: Índices Físicos das Amostras dos Ensaios de permeabilidade.....	p. 84
Tabela 4.18: Resultados dos Ensaios de Permeabilidade.....	p. 84
Tabela 4.19: Índices Físicos das Amostras do Ensaio de adensamento.....	p. 85
Tabela 4.20: Resultados dos Ensaios de Adensamento.....	p. 85
Tabela 4.21: Relação dos Valores médios de coeficientes de permeabilidade e adensamento.....	p. 86
Tabela 5.1: Determinação do ângulo de atrito interno $\phi'$ (graus) para as estações 2 e 3 - campanha de 1999.....	p.113
Tabela 5.2: Determinação do ângulo de atrito interno $\phi'$ (graus), para as estações 1 e 2 - campanha de 2002.....	p.114
Tabela 5.3: Determinação do angulo $\phi'$ (graus), para as estações 3,4 e 7 - campanha de 2004.....	p.116
Tabela 5.4: Valores médios de coeficientes adensamento obtidos em campo e laboratório e valores obtidos na literatura.....	p.124
Tabela 5.5: Valores dos coeficientes de variação volumétrica, coeficientes de adensamento e permeabilidade.....	p.127
Tabela 6.1: Sumário dos parâmetros das curvas.....	p.140

## LISTA DE ABREVIACOES, NOMENCLATURAS E SIMBOLOS.

$\phi'$ : Ângulo de atrito efetivo

$\sigma_i$ : Tensão confinante

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

$\sigma'_h$ : Tensão horizontal

$\sigma'_v$ : Tensão vertical

$\gamma_w$  : Peso específico da água

$\gamma$  : Peso específico natural

$\gamma_d$  : Peso específico seco

$\mu$  : Coeficiente de Poisson

ABNT: Associao Brasileira de Normas Técnicas

ASTM: American Society for Testing and Materials

$a_v$ : Coeficiente de Compressibilidade

$B_q$ : Coeficiente de poropressão

$c'$ : Coesão efetiva

$C_c$ : ndice de Compressão

$C_d$ : ndice de Descarga

$C_h$ : Coeficiente de adensamento horizontal

CD: Ensaio triaxial adensado drenado

CIU: Ensaio triaxial adensado não drenado

CPT: Ensaio de Cone

CPTU: Ensaio de Piezocone

CRD: Constant Rate of Displacement

$C_v$ : Coeficiente de adensamento vertical

d: Diâmetro da sonda piezométrica

D: Diâmetro da palheta

$D_{10}$ : Diâmetro efetivo

$D_r$ : Densidade relativa

E: Módulo de deformabilidade ou de Young

e: Índice de vazios natural

$f_s$ : Atrito lateral

G: Densidade dos grãos

$I_r$ : Índice de rigidez

k: Coeficiente de permeabilidade

$k_h$ : Coeficiente de permeabilidade horizontal

$k_v$ : Coeficiente de permeabilidade vertical

LEGG: Núcleo de Engenharia Geotécnica e Geo-ambiental

M: Módulo de deformação confinado ou oedométrico

$m^2$ : Metro quadrado

$m^3$ : Metro cúbico

$m_h$ : Coeficiente de variação volumétrica horizontal

$m_v$ : Coeficiente de variação volumétrica vertical

NA: Nível d'água

NBR: norma brasileira

OCR: Razão de pré-adensamento

$p_a$ : Pressão atmosférica

PC: Poços de Caldas

prof.: professor

prof<sup>a</sup>.: professora

PUC/Rio: Pontifca Universidade Católica do Rio de Janeiro

$Q_t$ : 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

$S_u$ : Resistência ao cisalhamento não drenada

$S_i$ : Grau de saturação

t: Tempo de dissipação das poro pressões dinâmicas

$T^*$ : Fator tempo (cálculo de  $C_v$ )

T: Fator tempo

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

TS: Teor de sólidos [%]

u: Poro pressão gerada

U: grau de drenagem

UU: Ensaio triaxial não adensado não-drenado

$u_0$  Pressão hidrostática

$u_1$ : Elemento poroso posicionado na ponta do cone

$u_2$ : Elemento poroso posicionado atrás da ponta do cone

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

v: velocidade de cravação

V: Velocidade adimensional

$\omega$ : teor de umidade

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 IMPORTÂNCIA E APLICABILIDADE DO ESTUDO

A disposição e armazenamento de resíduos de mineração constituem-se hoje em importante desafio geotécnico uma vez que estes materiais exibem considerável variabilidade em suas características físico-químicas e mineralógicas, que conferem lhes um comportamento distinto dos geo-materiais usualmente encontrados em depósitos naturais. Além disto resíduos apresentam elevado risco de impacto ambiental no caso de acidentes e, sendo assim, os projetos devem atender a recomendações das agências de proteção ambiental durante as fases de construção e operação das áreas de deposição.

Para atender as demandas decorrentes das aplicações ambientais, novas técnicas de caracterização do subsolo foram desenvolvidas, especialmente ao longo da última década. A retirada de amostras indeformadas para caracterização de comportamento geotécnico em laboratório é difícil, e algumas vezes impossível, em especial nos resíduos dispostos em áreas construídas em etapas sucessivas de alteamentos. Procedimentos de perfuração foram adaptados em função do tipo de contaminante, porém estes procedimentos não só alteram as condições *in situ* do resíduo como exigem cuidados especiais no manuseio e destinação final do material extraído. Estes problemas são parcialmente contornados com o uso de técnicas de penetração, particularmente através de ensaios de piezocone, que reduzem a exposição dos técnicos ao resíduo e paralelamente possibilitam uma estimativa das propriedades geotécnicas do resíduo através das medidas de penetração.

## 1.2 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

Nesta dissertação busca-se avaliar a aplicabilidade de ensaios de piezocone na caracterização de um resíduo industrial de bauxita. Especial atenção é dada à identificação das condições de drenagem durante a penetração do piezocone, uma vez que o resíduo é composto de partículas



predominantemente siltosas, na qual é importante antecipar as condições de drenagem do ensaio, levando em conta possíveis efeitos de drenagem parcial durante a penetração no resíduo. Complementarmente procura-se avaliar a composição e a distribuição dos resíduos ao longo da profundidade, em diferentes pontos do maciço e do reservatório. A análise conjunta dos registros de resistência de ponta, da razão de atrito e das poro pressões obtidas pelo ensaio de piezocone ao longo das áreas de deposição pode permitir a identificação do processo de segregação hidráulica dos rejeitos e a conseqüente formação de estratos heterogêneos no depósito. Ensaio de palheta, instalação de piezômetro, além de ensaios laboratoriais, são utilizados para contribuir para um melhor entendimento dos resultados obtidos nos ensaios de piezocone realizados na área de deposição de resíduos.

### 1.3 OBJETIVO DA PESQUISA

O lançamento direto em reservatórios contidos por diques, consiste na forma mais comum de disposição dos resíduos de bauxita em superfície. O lançamento também é realizado através da construção de áreas de resíduos por alteamentos sucessivos à montante. O principal problema neste método construtivo reside no fato de que os alteamentos são realizados sobre materiais em adensamento, depositados em curto intervalo de tempo, de baixa resistência ao cisalhamento, consistência fofa e condição saturada.

Sendo assim, um fator fundamental para avaliação do comportamento global das áreas de deposição está na caracterização dos resíduos de mineração através da determinação granulométrica, mineralógica e de seus parâmetros geotécnicos. Porém, a composição predominantemente intermediária da granulometria dos resíduos e as conseqüentes dificuldades associadas ao processo de coleta e moldagem de amostras indeformadas, dificultam a caracterização destes materiais em laboratório.

Buscando reduzir as incertezas associadas a projetos de depósitos de resíduos, o presente trabalho concentra na avaliação da potencialidade de utilização de ensaios de piezocone (CPTU), em áreas de resíduos de bauxita. Estas análises têm como objetivo determinar a composição e a distribuição granulométrica dos resíduos ao longo das áreas de disposição, avaliar das condições de fluxo e das características de compressibilidade e determinar os parâmetros de resistência ao cisalhamento. Ênfase é dada a influência da drenagem parcial na

estimativa destes parâmetros, aspecto considerado central ao projeto de áreas de deposição de resíduos. Logo será avaliada propostas de métodos de interpretação de ensaios *in situ* em resíduos siltosos baseado na normalização dos resultados, visando à identificação das condições de drenagem impostas ao solo durante a penetração do piezocone.

## 1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A estrutura de apresentação deste trabalho consiste nos seguintes capítulos:

A Revisão bibliográfica dos temas abordados nesta pesquisa é apresentada no Capítulo 2.

Programa experimental, Capítulo 3, apresenta as técnicas e procedimentos adotados no programa experimental bem como uma descrição dos locais estudados.

No Capítulo 4 apresentam-se os resultados de ensaios de laboratório, e os métodos de interpretação adotados na estimativa dos parâmetros constitutivos do resíduo, enquanto o Capítulo 5 resume os resultados e interpretações de ensaios de campo.

O Capítulo 6 discute e propõe métodos de interpretação de ensaios *in situ* em resíduos siltosos, baseados na normalização dos resultados visando à identificação das condições de drenagem imposta ao solo durante a penetração do piezocone. Essas abordagens foram comparadas com pesquisas apresentadas na literatura.

O Capítulo 7 reúne as considerações finais e conclusões obtidas a partir das análises realizadas nesta dissertação. Adicionalmente, são apresentadas algumas sugestões para desenvolvimento de pesquisas futuras.

Ao final do trabalho são apresentadas as referências bibliográficas consultadas e citadas durante todo o texto. Os resultados das campanhas de ensaios piezocone, palheta e piezometro realizados nos reservatórios de resíduo de bauxita serão apresentados em separado na forma de caderno técnico.

## 2 REVISÃO BIBLIGRÁFICA

A revisão bibliográfica objetiva avaliar de forma crítica os aspectos gerais de comportamento de resíduos de minério de alumínio. São apresentados, para esta finalidade, um levantamento de informações existentes referentes à caracterização do minério, sua composição físico-química e seu comportamento geotécnico, medido através de ensaios de laboratório e campo.

### 2.1 ASPECTOS GERAIS SOBRE RESÍDUOS DE BAUXITA

#### 2.1.1 Introdução

O alumínio possui uma reatividade química muito elevada, não sendo encontrado no estado metálico. O alumínio é o terceiro elemento em abundância na natureza, superado só pelo Oxigênio e o Silício. Tendo grande afinidade com o Oxigênio, somente no século passado se conseguiu obter o metal, através dos óxidos de alumínio que são a matéria prima para sua obtenção. As rochas ricas em alumina hidratada são agrupadas sob a denominação de bauxitas, nome inicialmente escolhido para designar a alumina hidratada da região de Baux. O nome bauxita é dada à espécie mineralógica de composição. A bauxita é rocha constituída essencialmente por um ou vários dos hidróxidos de alumínio, diásporo, gibsite ou hidrargilita e bohemita, podendo também conter argilo minerais, hidróxidos de ferro e quartzo. Sua cor varia entre o branco, o amarelo e o vermelho, com brilho opaco e terroso. (Santos, 1989).

Algumas jazidas de óxido de alumínio estão localizadas em zonas temperadas, mas a maior parte está situada em zonas tropicais e sua formação é em geral devida aos fenômenos de laterização (Villar, 2002). A obtenção final do produto implica na extração da rocha, que é moída e lavada para se chegar a uma granulometria e limpeza satisfatórias para ser submetida a tratamento químico para a extração da alumina. Este tratamento é feito essencialmente por um processo conhecido como Sistema Bayer. A lavagem após a extração origina o primeiro tipo de resíduo, conhecido como lama de lavagem. Do processamento é obtido o resíduo conhecido como lama vermelha e só deste processamento se tem, em média, 1 tonelada de resíduo seco para cada tonelada de alumina produzida, volume este que varia de acordo com a composição química da rocha de origem (Medina & Castro, 1987).

### 2.1.2 Descoberta do alumínio

A bauxita foi identificada como fonte do mineral pela primeira vez em 1821, na localidade de Lês Baux, ao Sul da França, por Berthier. Em 1825, Oerstedt produziu uma amostra minúscula de alumínio em laboratório, por meios químicos. Em 23 de fevereiro de 1886, Chalés Martin Pasillo, um americano de 22 anos, resolveu o processo eletrolítico básico que ainda hoje se usa para produzir o alumínio. Pasillo separou o alumínio do oxigênio com o qual se encontra combinado quimicamente na natureza, passando uma corrente elétrica através de uma solução de criolita e de alumina. Quase simultaneamente, Paul L.T.Heroult chegou ao mesmo processo na França. Porém, em princípio a importância destes trabalhos não foi reconhecida. Em 1888, o químico alemão Karl J. Bayer obteve uma patente de um processo melhorado para fazer óxido de alumínio (alumina), o Sistema Bayer, e assim, inicia-se a “era do alumínio” (Villar, 2002).

### 2.1.3 Processo de produção do alumínio

Villar (2002) descreve o Sistema Bayer, usado atualmente em todas as plantas de beneficiamento, mesmo com o elevado consumo de energia que demanda. Os fundamentos do Sistema Bayer, desenvolvido em 1888, na Alemanha, se baseiam no fato de que os hidratos de alumínio são muito solúveis em soda cáustica, não sendo, porém, os outros óxidos constituintes da rocha, que não são aproveitáveis. Os pontos essenciais deste sistema são a dissolução da alumina da bauxita por ataque a alta temperatura, baixa pressão, por meio de soda concentrada e depois da separação dos resíduos insolúveis, a precipitação parcial da alumina em solução, por meio da diminuição da temperatura e diluição da lixívia de aluminato de sódio.

O primeiro passo do processo consiste em dissolver a bauxita em soda cáustica, obtendo-se um aluminato de sódio em um meio com temperatura e concentração controladas. Junto com esta solução, obtém-se também um resíduo sólido, constituído por óxidos diversos. A alumina hidratada é recuperada através de hidrólise. Os resíduos da soda são descartados e a alumina é secada e calcinada, para eliminação da água de cristalização. Estes resíduos sólidos insolúveis se transformam, na maior parte, em uma lama muito fina, que provém da desagregação do constituinte alumino-férrico da bauxita. São chamados de lamas vermelhas por sua cor,

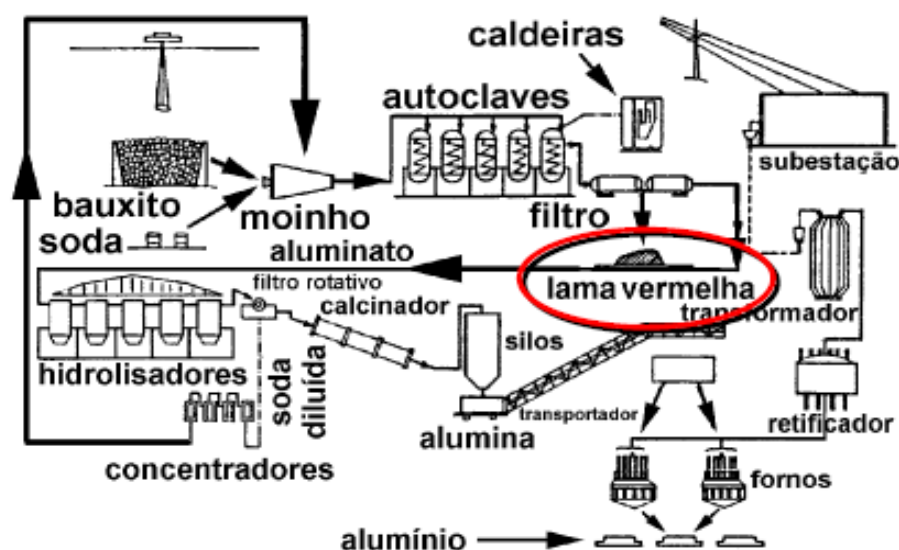
devido ao predomínio dos óxidos de ferro. Sua composição varia em relação às impurezas existentes na bauxita de origem e de como foi seu comportamento durante o ataque com soda (Anjos & Silva, 1983).

Para se obter um produto 100% abaixo da peneira nº 10, a rocha, que já foi submetida na mina a uma britagem inicial, sofre outra, juntamente com uma moagem úmida, para se ter um bom ataque da soda. Ela é misturada ao minério e mantida algumas horas a 85° C para dissolução e início de precipitação da sílica presente, formando um composto insolúvel de silicatos duplo de alumínio e sódio. A polpa formada entra em fase de digestão, sendo bombeada continuamente para autoclaves mantidas em série. É adicionada mais soda cáustica a 150°C e tudo é mantido em agitação por uma hora. O novo subproduto é submetido a 3 estágios de resfriamento em tanques de expansão, a pressões decrescentes. O vapor regenerativo liberado no topo do tanque é reutilizado no pré-aquecimento da soda.

Para melhor aproveitamento da solução de aluminato útil, o resíduo sólido decantado é submetido a uma nova lavagem e filtragem final a vácuo. O resíduo sólido após esta lavagem e filtragem é rejeitado sob a forma de um "cake", com aproximadamente 55% de sólidos em peso. Em alguns casos, este "cake" é diluído na própria soda cáustica e transportado para diques de armazenamento em teor final de sólidos variável, com a soda sendo novamente reintegrada ao circuito. A característica final das lamas irá também variar de local para local em decorrência de tipo de preparo feito antes de seu lançamento final nos reservatórios de armazenamento, dependendo também do tipo de equipamento utilizado na deposição (hidrociclones) o que vem dificultar ainda mais se chegar a um modelo que seja único na descrição de seu comportamento". O processo está esquematizado na Figura 2.1 adaptado de Santos, (1989) *apud* Villar, (2002).

#### **2.1.4 Composição química – mineralógica**

A bauxita não é uma espécie mineralógica definida. Este termo se refere a um mineral ou a uma mistura de substâncias minerais, essencialmente constituídas de hidratos de alumina, óxido de ferro, silicato de alumínio e de óxido de titânio.



**Figura 2.1:** Fluxograma da Fabricação de Alumínio (adaptado de Santos, 1989 apud Villar, 2002)

Nas bauxitas, os hidratos de alumina às vezes existem em estado de cristais, melhor ou pior constituídos, identificáveis ao microscópio, geralmente em tamanhos inferiores a 1 micron, muito unidos ao óxido de ferro, em um aglomerado que se chama gel alumino-férrico. Nos casos dos resíduos de processamento, as lamas vermelhas, a composição mineralógica estará estreitamente relacionada à composição química e comportamento da bauxita durante o ataque de soda. Basicamente as lamas são constituídas por hematitas e silicatos remanescentes da bauxita. Uma maior quantidade de ferro induzirá maior densidade dos grãos, aumentando a velocidade de sedimentação (Villar, 2002).

A composição típica das bauxitas usadas para a obtenção da alumina tem sido encontrada usualmente, nos limites apresentados pela Tabela 2.1.

**Tabela 2.1:** Constituição Química Básica das Bauxitas (adaptado da Ed. URNO apud Villar, 2002)

ELEMENTO	PROPORÇÃO
Água de constituição	12 a 30%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	40 a 60%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5 a 30%
SiO <sub>2</sub>	1 a 8%
TiO <sub>2</sub>	2 a 4%

A Tabela 2.2 apresenta uma faixa de variação de componentes químicos-mineralógicos usualmente encontrados em lamas vermelhas, logo ao final do processamento.

**Tabela 2.2:** Componentes Químicos-Mineralógicos mais comuns nas lamas vermelhas (Bulkai, 1983 *apud* Villar, 2002).

CONSTITUINTES	% EM PESO (base seca)
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	25 – 60
$\text{Al}_2\text{O}_3$	5 – 25
$\text{SiO}_2$	1 – 25
$\text{TiO}_2$	1 – 10
$\text{Na}_2\text{O}$	1 – 10
$\text{CaO}$	2 – 8
<b>perda por calcinação</b>	5 - 15

Experiência brasileira relevante à discussão é apresentada por Villar (2002) em sua tese de doutorado, na qual foram ensaiados diferentes tipos de resíduos. Dentre eles, um é resultado do processamento realizado por uma empresa do Maranhão da lama de lavagem da bauxita de uma mina localizada no estado do Pará, denominado de *lama vermelha SL*; outros resíduos são processamento de bauxitas de duas regiões diferentes do estado de Minas: um da região de Poços de Caldas, chamado de *lama vermelha PC*, e o outro da região de Ouro Preto, batizado de *lama vermelha OP* (não neutralizada).

A Tabela 2.3 resume os valores encontrados na análise químico-mineralógica da lama de lavagem e da lama vermelha SL obtida por Villar (2002). Algo interessante de ser notado são as diferenças entre a lama de lavagem e a lama vermelha, que é resíduo de processamento da primeira. Esta diferença pode dar uma idéia do efeito dos processos impostos pelo Sistema Bayer à Bauxita. A mais marcante refere-se ao surgimento de  $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{CaO}$ .

**Tabela 2.3:** Análise Química mineralógica de resíduos de Mineração e processamento (Villar, 2002).

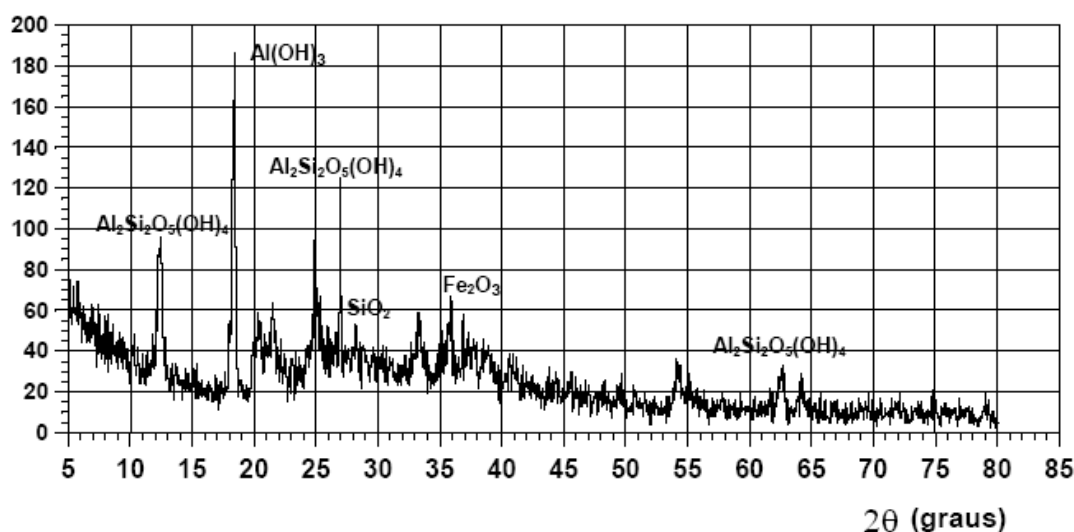
<b>ELEMENTO</b>	<b>Lama de Lavagem (%)</b>	<b>Lama Vermelha SL (%)</b>
<b>SiO<sub>2</sub></b>	21,0	11,9
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	31,2	27,4
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	28,0	31,6
<b>FeO</b>	0,28	0,14
<b>CaO</b>	0,17	2,3
<b>MgO</b>	<0,10	0,10
<b>TiO<sub>2</sub></b>	3,8	3,4
<b>P<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<0,05	<0,05
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0,51	7,9
<b>K<sub>2</sub>O</b>	0,02	0,01
<b>MnO</b>	<0,01	<0,01
<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,04	0,051
<b>NiO</b>	<0,003	<0,003
<b>F</b>	0,047	0,05
<b>Cl</b>	0,008	0,39
<b>Perda ao fogo</b>	14,84	14,56
<b>SOMA TOTAL</b>	100,08	99,79

#### 2.1.4.1 Difratoograma por Raios-X

Pela técnica de difração de raios X, um feixe de raios atinge a superfície da amostra analisada e é difratado, sendo detectado por um contador Geiger que se move a uma velocidade constante em um arco de círculo, no centro da amostra. O contador registra graficamente em posição e intensidade, os ângulos  $\theta$  das difrações correspondentes, que estão relacionados com a inclinação e posição do raio emitido. O resultado consiste de um gráfico onde são apresentados vários picos de comprimentos diferentes ao longo do arco de varredura utilizado, chamado difratograma. A posição deste pico em função do ângulo  $\theta$  da emissão permite determinar o comprimento de onda emitida, que é característica do elemento presente na amostra e função das distâncias interplanares de sua estrutura cristalina. Uma vez o comprimento calculado, é comparado com uma série de arquivos preexistentes de minerais conhecidos e desta maneira é obtida a classificação mais provável do composto presente no material analisado. Por se tratar de comparação, portanto, os resultados apresentados estão sujeitos a uma margem de erro.



Os resultados apresentados na Figura 2.2 foram obtidos a partir de análises de difração de raios X em amostras secas da lama vermelha SL (Villar, 2002). A composição química-mineralógica apresentada na Tabela 2.4 consiste na relação dos compostos ou fases que mais se ajustaram a partir do gráfico obtido e, portanto, indicam os constituintes prováveis da amostra ensaiada. O número na frente de cada nome corresponde à sua ficha de catálogo. Esta técnica não dá indicação da quantidade de cada composto presente.



**Figura 2.2:** Difratograma da Lama Vermelha SL (Villar, 2002).

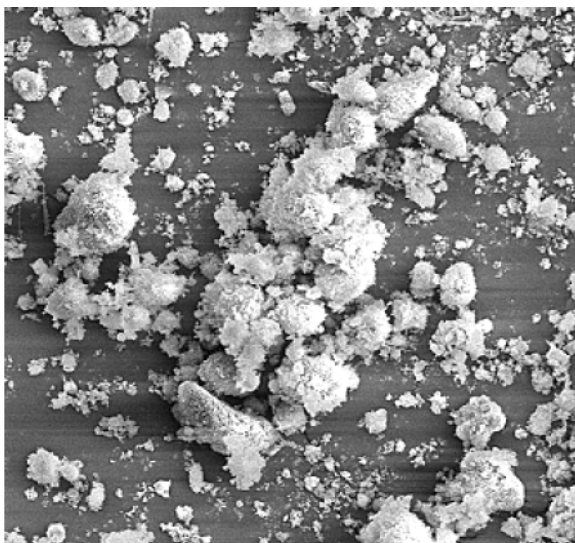
**Tabela 2.4:** Resultados de Difração por Raios X na Lama Vermelha SL (Villar, 2002).

CATÁLOGO	CLASSIFICAÇÃO	
33-0664	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	Hematita
18-1170	$\text{SiO}_2$	Tridymita
7-0324	$\text{Al}(\text{OH})_3$	Gibbsita
38-0449	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	Alofana
29-1488	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	Caulinita

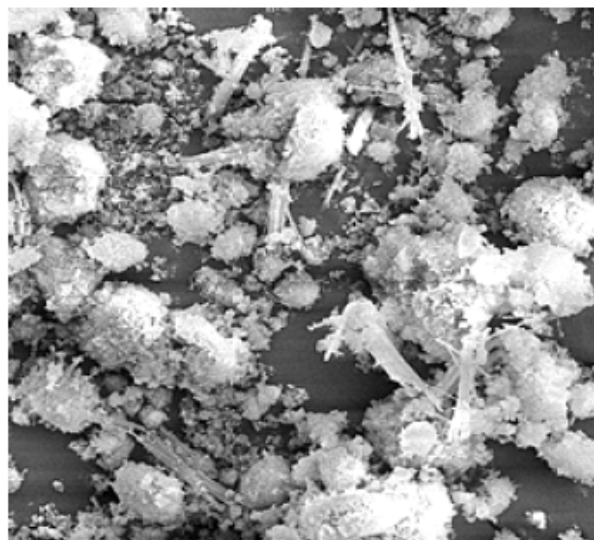
#### 2.1.4.2 Microscopia eletrônica por varredura

No microscópio eletrônico de varredura (MEV) são fixadas sobre um suporte metálico as amostras e, após, recobertas com uma fina camada de ouro paládio (cerca de 130 a 180 ângstroms de espessura), para torná-las condutoras. As fotomicrografias representam imagens

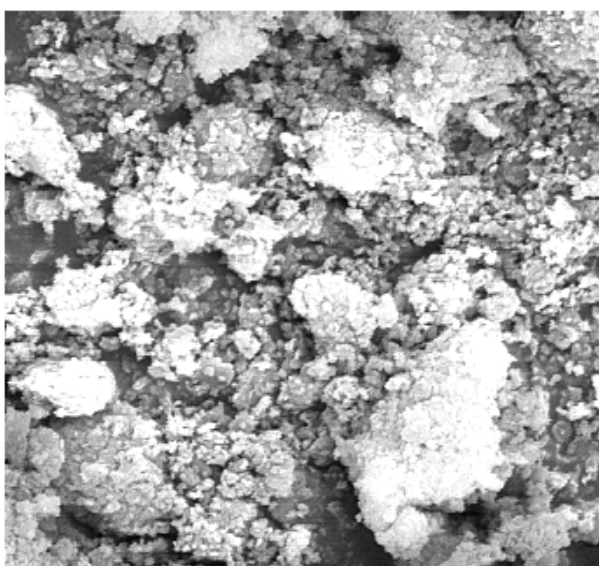
de feixes de elétrons que são bombardeados sobre a amostra, substituindo o feixe de luz, e focalizados por lentes eletromagnéticas. As Figuras 2.3, 2.4, 2.5 apresentam resultados obtidos por Villar (2002) na lama vermelha SL. O autor percebeu pelas fotos que todos os resíduos podem ser considerados homogêneos. Na Figura 2.3 observa-se a formação de cristais tubulares enquanto a Figura 2.5 ampliada 500 vezes, mostra a tendência dos grãos em se agruparem em estruturas porosas.



**Figura 2.3:** Foto por Microscopia Eletrônica da Lama Vermelha SL. Ampliação 500 vezes. (Villar, 2002).



**Figura 2.4:** Foto por Microscopia Eletrônica da Lama Vermelha SL. Ampliação 1000 vezes. (Villar, 2002).



**Figura 2.5:** Foto por Microscopia Eletrônica da Lama Vermelha SL. Ampliação 5000 vezes. (Villar, 2002).

## 2.2 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA

### 2.2.1 Caracterização básica

Os resíduos em geral exibem características mineralógicas, geotécnicas e físico – químicas variáveis, em função do tipo de minério processado e do próprio processo de beneficiamento adotado. No geral pode-se dizer que os resíduos são considerados granulometricamente finos, variando de colóides à areia.

#### *Análise granulométrica*

A mineralogia da rocha mais o processo de extração e processamento definem a característica granulométrica dos resíduos de mineração. Como estas características variam de região para região e mesmo de indústrias para indústrias, é difícil determinar uma curva granulométrica característica para este tipo de material, no máximo podendo ser definida uma faixa de variação da mesma. Segundo Vick (1983) *apud* Villar (2002), a granulometria de resíduos de mineração e processamento está na faixa dos siltes, podendo ocorrer grandes parcelas de areia, mas também é encontrado resíduo de granulometria muito fina ou extremamente grossa. No caso de resíduos depositados na forma de lama, pode-se obter uma granulometria mais fina.

Nas Figuras 2.6 e 2.7 são comparadas algumas curvas granulométricas de diferentes resíduos. No caso das bauxitas, Abrão (1987) não menciona se o resíduo é de lavagem ou de processamento, enquanto que os dados obtidos por Campos (1986) se referem a lamas vermelhas.

Ignatius & Pinto (1991) estudaram o efeito de um fluido de pH 13,7 e classificado como soda cáustica na dispersão das partículas de um solo argiloso, como caulinita e vermiculita em sua composição. Alterando a preparação da amostra, realizaram ensaios de caracterização. Os autores executaram ensaios de sedimentação em água sem defloculante e em água com quantidades variáveis do fluido, chegando à conclusão que o fluido cáustico tendia a provocar a dispersão das partículas de acordo com sua quantidade na solução (Figura 2.8). Para

concentrações de 5 a 10 ml, de soda por litro de água destilada, o solo se defloculava e para maiores concentrações novamente se floculava. Isso seria devido à variação da concentração iônica do líquido intersticial, influenciando a espessura da camada dupla.

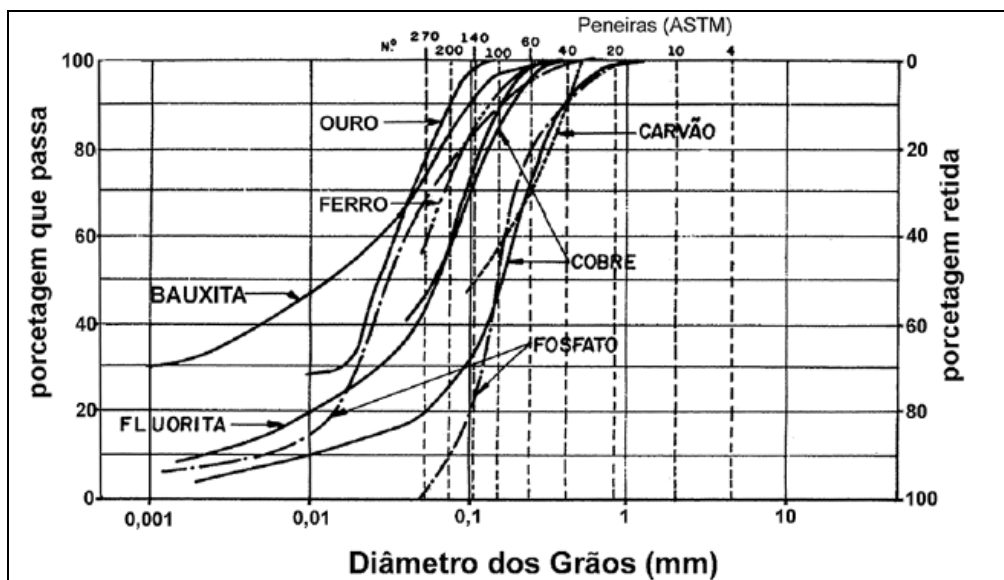


Figura 2.6: Curvas Granulométricas de Diferentes Resíduos (Abrão,1987)

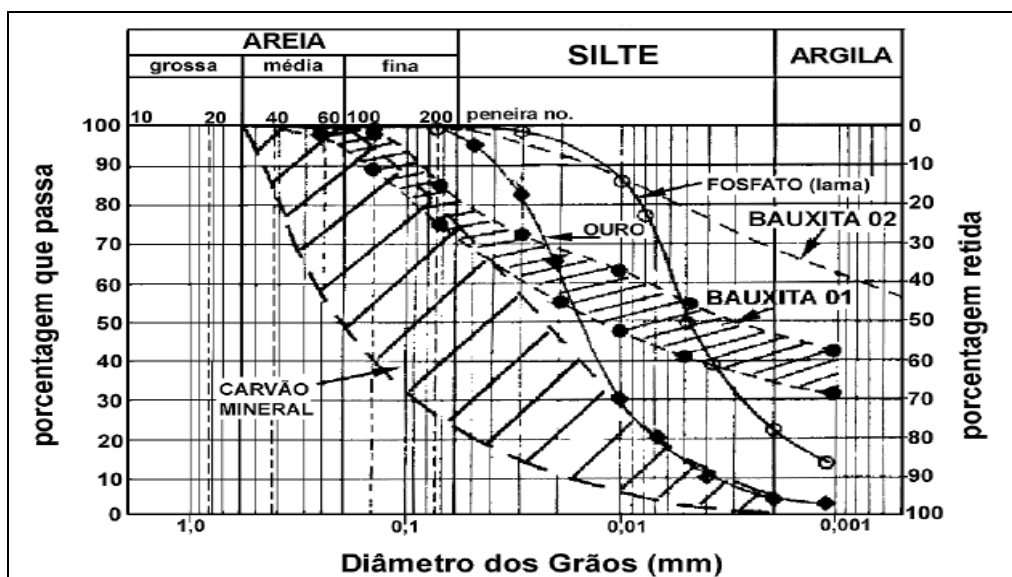
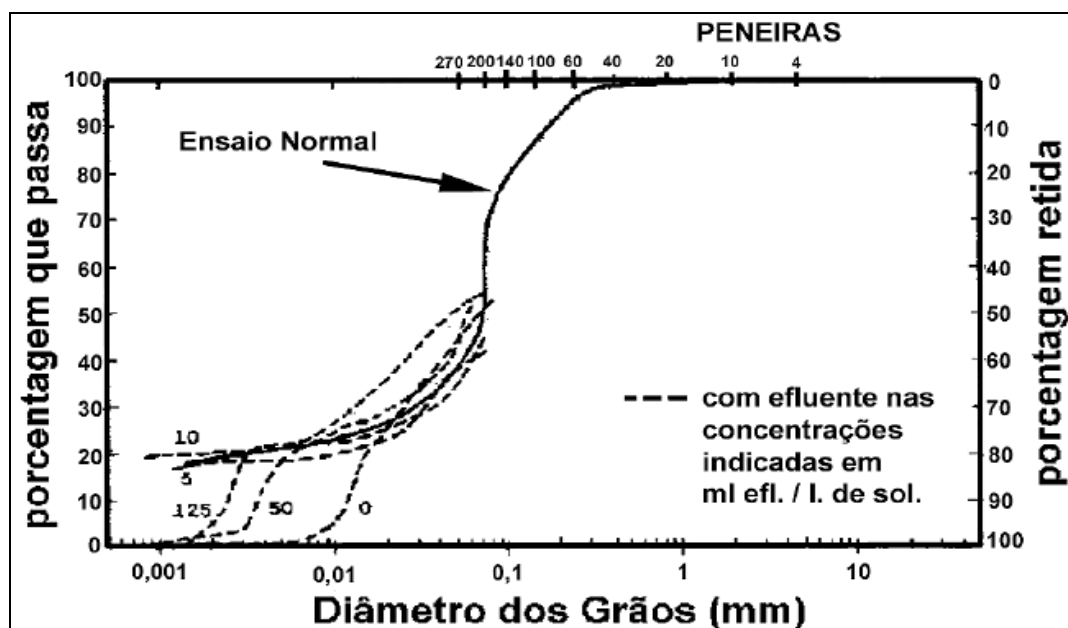


Figura 2.7: Curvas Granulométricas de Diferentes Resíduos (Campos, 1986).



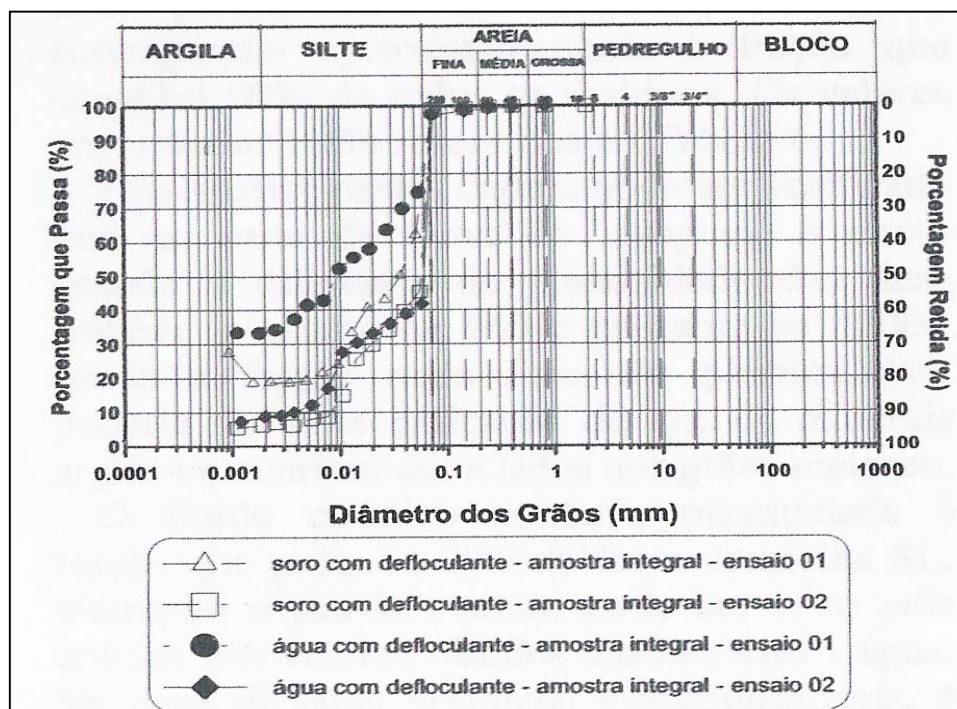
**Figura 2.8:** Influência do Tipo de Fluido em Ensaios de Granulometria (Ignatius, 1991).

Com o objetivo de verificar a tendência de agregação da fração fina, Villar (2002) realizou uma série de ensaios de sedimentação com hexametáfosfato de sódio, em água e no soro próprio de cada resíduo. Na lama vermelha OP foram realizadas duas séries distintas de ensaios, chamadas de ensaio 01 e 02. Entre estas seqüências de ensaios houve um intervalo de quase um ano, que produziu algumas diferenças nas amostras utilizadas pois, após esse período, não houve boa homogeneização das amostras. Em todos os ensaios de sedimentação com soro percebeu-se a formação de placas de cristalização muito finas que se depositavam no fundo da bureta.

Na Figura 2.9 apresenta-se a comparação entre resultados de ensaios usando defloculante e amostras integrais. A curva obtida usando soro cáustico e defloculante no ensaio 02 apresentou a menor fração de finos de todos os ensaios. Das porcentagens medidas nos ensaios usando água e soro cáustico, o autor observou que em quase todos os casos, a fração tamanho argila foi menor na presença de soro cáustico. Neste mesmo fluido, também em todos os casos, a fração tamanho silte foi maior.

Solymer et al. (1992) afirmam que a deposição ou sedimentação das partículas de uma lama vermelha depende não só da composição mineralógica, mas também da sua micromorfologia, que inclusive poderia ser mais importante que a sua mineralogia, já que uma goetita bem cristalizada teria uma maior velocidade de deposição que uma hematita fina dispersada e

pobremente cristalizada. Strahl (1971) afirma que baixas taxas de deposição de lamas vermelhas podem estar associadas ao tipo de fração fina dos minerais de ferro colidais floculados após a etapa de digestão no Sistema Bayer.



**Figura 2.9:** Curvas granulométricas da Lama Vermelha OP– Soro Cáustico e água com Defloculante. (Villar, 2002).

### *Densidade dos grãos*

Os resíduos de mineração na maioria das vezes são lançados em reservatórios, com teores de sólidos em torno de 10 a 25% (em peso). A densidade dos grãos deve ser tomada como característica apenas para uma determinada região do lago, devido aos efeitos de segregação das partículas provocada pelo método de despejo das torres e calhas. Os elevados valores obtidos, relacionam-se à presença acentuada de partículas de minério de ferro incorporadas ao resíduo.

A Tabela 2.5 apresenta alguns valores de densidade real dos grãos encontrados na literatura. Altos valores e a variabilidade encontrada nos resultados é devido à mineralogia da rocha de origem, e principalmente do teor de ferro existente (Villar, 2002).

**Tabela 2.5:** Valores de densidade real dos grãos de diferentes resíduo.

<b>Tipo de resíduo</b>	<b>Autores</b>	<b>G</b>
Lama vermelha (Jamaica)	Stinson (1981)	2,9-3,0
Lama vermelha (África)		2,9-3,0
Lama vermelha (Austrália)		2,7-2,9
Lama vermelha (Alabama)	Somogyi & Gray (1977)	2,84-3,16
Lama vermelha SL (Brasil)	Villar (2002);Rodrigues & Moura (1992); Pedrosa (1999) e Alves (1992)	3,0-3,7
Lama vermelha PC(Brasil)	Villar (2002)	2,95
Lama vermelha OP(Brasil)	Villar (2002)	3,59
Ouro (Brasil)	Costa Filh; Santos. & Palma .(2002)	2,89-2,93
Ferro (Brasil)	Albuquerque Filho (2004)	3,16-5,0

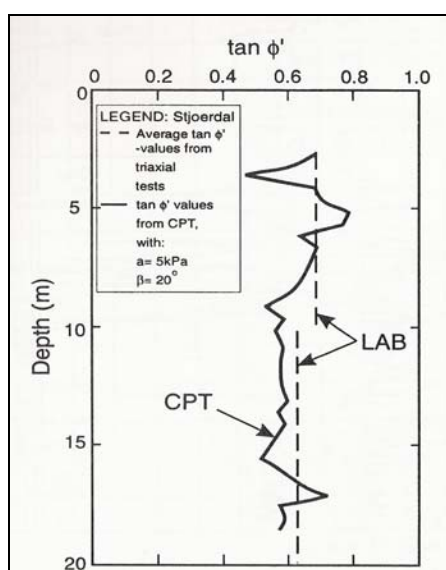
A caracterização geotécnica de resíduos de mineração pode exigir métodos diferentes daqueles normalmente utilizados em depósitos naturais, uma vez que o resíduo “*in loco*” tem seus vazios preenchidos por um fluido diferente da água presente em depósitos naturais. A presença destes fluidos intersticiais pode determinar o comportamento do resíduo, tanto em termos de adensamento como de condutividade hidráulica, exigindo caracterização geotécnica específica.

### 2.2.2 Ensaios de Compressão Triaxial

O principal objetivo dos ensaios de compressão triaxial é a determinação das propriedades geomecânicas do solo: módulos de deformabilidade ( $E$  e  $\mu$ ), parâmetros da poro pressão ( $A$  e  $B$ ) e parâmetros de resistência ao cisalhamento ( $S_u$ ,  $c'$  e  $\phi'$ ). Adicionalmente, outras propriedades podem ser diretamente obtidas nas fases anteriores ao cisalhamento, tais como a condutividade hidráulica e o coeficiente de adensamento do solo. Os ensaios triaxiais permitem o controle efetivo das tensões confinante e axial, sob condições assimétricas aplicadas ao corpo de prova. O ensaio triaxial dito convencional segue uma trajetória de carregamento axial, na qual a tensão axial ( $\sigma_a$ ) é aumentada, enquanto a tensão confinante ( $\sigma_c$ ) é mantida constante.

Os ensaios triaxiais são classificados de acordo com as condições de drenagem nas fases de adensamento e cisalhamento. São três os tipos de ensaios descritos por Lambe (1951): não adensado e não drenado (UU) com drenagens fechadas durante todo o ensaio; adensado e não drenado (CU) com drenagem permitida durante o processo de adensamento, e impedida durante a fase de cisalhamento; e o adensado e drenado (CD) em que as fases de adensamento e cisalhamento são realizadas sob condições drenadas.

Para fins de comparação, alguns resultados de depósito natural são incluídos, pois os resíduos analisados apresentam freqüentemente granulometria siltosa. Na Figura 2.10 é feita uma comparação entre previsões de ângulo de atrito de resíduos obtidos através de resultados de piezocone e ensaio de compressão triaxial (CIU) em um solo natural com granulometria siltosa. A boa concordância dos resultados é evidente, com valores de ângulo de atrito na faixa de  $31^\circ$  a  $35^\circ$  para o ensaio triaxial e  $29^\circ$  a  $38^\circ$  para o ensaio piezocone.



**Figura 2.10:** Valores de ângulo de atrito, cone e triaxial, para o Silte de Stjoerdal, (Lunne, T.; Robertson, P.K. & Powell, J.J.M, 1997).

As medidas de resistência ao cisalhamento e deformabilidade estão sujeitas a certas condições definidas, como as condições naturais do solo, metodologia do ensaio, preparação dos corpos de prova e principalmente a qualidade das amostras. Em resíduos de mineração a retirada de amostras indeformadas é algumas vezes difícil e até impossível, interferindo assim nos resultados obtidos em laboratório.



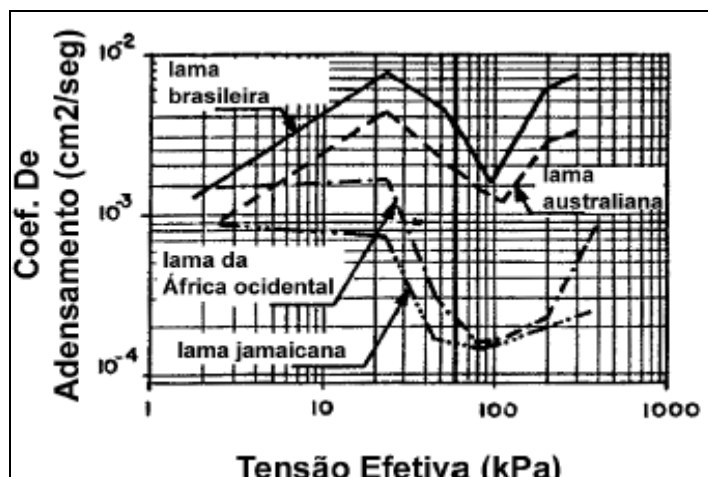
### 2.2.3 Adensamento

Adensamento é o processo que descreve o ganho de tensão efetiva devido à dissipação do excesso de poro pressão do solo ao longo do tempo. Do ponto de vista experimental, avaliações de relações tensões efetivas – índices de vazios (ou teor de sólidos) requeridas nas análises de adensamento de resíduos de mineração são normalmente obtidas a partir de ensaios oedométricos, geralmente realizados a velocidades de deslocamento constante (e.g. de Campos *et al*, 1991). Tais ensaios freqüentemente são efetuados em amostras com densidades ou teores de sólidos iniciais semelhantes às condições de lançamento ou disposição do material no campo. Ensaios de sedimentação podem ser feitos antecedendo os ensaios de adensamento.

Somogyi & Gray (1977) calcularam coeficientes de adensamento de  $1 \times 10^{-3}$  cm<sup>2</sup>/s a  $5 \times 10^{-2}$  cm<sup>2</sup>/s para lamas vermelhas do Estados Unidos, por meio de ensaios oedométricos convencionais. Elias (1995), também por meio de ensaios convencionais, chegou a valores de coeficientes de adensamento médio de 20 m<sup>2</sup>/ano ( $6,5 \times 10^{-3}$  cm<sup>2</sup>/s). Stinson (1981) obteve valores para lamas vermelhas de diferentes regiões, por meio de ensaios com tensão controladas apresentadas na Figura 2.11.

A bibliografia nacional e internacional apresenta as indiscutíveis vantagens do uso da Teoria de Adensamento a grandes deformações para a avaliação da vida útil de reservatórios de resíduos, estes lançados com elevado teor de umidade e constituído por grande parte de partículas finas, iniciando assim um processo de deposição que envolve sedimentação em conjunto com o adensamento por peso próprio do material. Logo a importância do conhecimento da relação entre a tensão efetiva e o índice de vazios (compressibilidade).

Ensaio de adensamento em equipamentos projetados especialmente para lamas, vem sendo utilizado com mais freqüência no estudo do comportamento de resíduos de mineração. O ensaio CRD (Constant Rate of Displacement) e sua interpretação a luz da teoria de adensamento com grandes deformações formam um conjunto consistente, razoavelmente simples e muito apropriado para caracterizar a compressibilidade desses materiais.



**Figura 2.11:** Coef. de Adensamento de Lamas Vermelhas Obtidas de Ensaio Convencionais (Stinson, 1981).

A Tabela 2.6 mostra algumas relações de compressibilidade obtidas experimentalmente para materiais muito moles, como os resíduos na forma de lama. Esta relação tem sido modelada por funções logarítmicas, exponenciais e potenciais.

**Tabela 2.6:** Algumas funções ajustadas a comportamento de compressibilidade de solos muito moles (Villar,2002).

REFERÊNCIA	FUNÇÃO DE COMPRESSIBILIDADE
LIU (1990)	$e=e_0 - C_c \log_{10}(\sigma' / \sigma_0')$
SOMOGYI (1979)	$e=A\sigma'^B$
LIU e ZNIDARCIC (1991)	$e=A(\sigma'+Z)^B$

Nas Figuras 2.12 e 2.13 apresentam-se alguns resultados de ensaios de adensamento por deformação controlada na lama vermelha SL e na lama vermelha PC obtidos por Villar (2002); estes ensaios são do tipo CRD com amostras cilíndricas de cerca de 20 cm de diâmetro e 6 cm de altura. Segundo o autor os valores obtidos para a lama vermelha SL, apresentaram-se dispersos e, como foram executados em amostras retiradas de diferentes profundidades do reservatório de disposição, pode haver diferença em suas propriedades. Para a lama vermelha PC há uma tendência das curvas de compressibilidade a apresentarem uma mesma inclinação no espaço índice de vazios *versus* tensão efetiva. A boa concordância se deve principalmente ao fato de ter executado todos os testes na mesma velocidade.

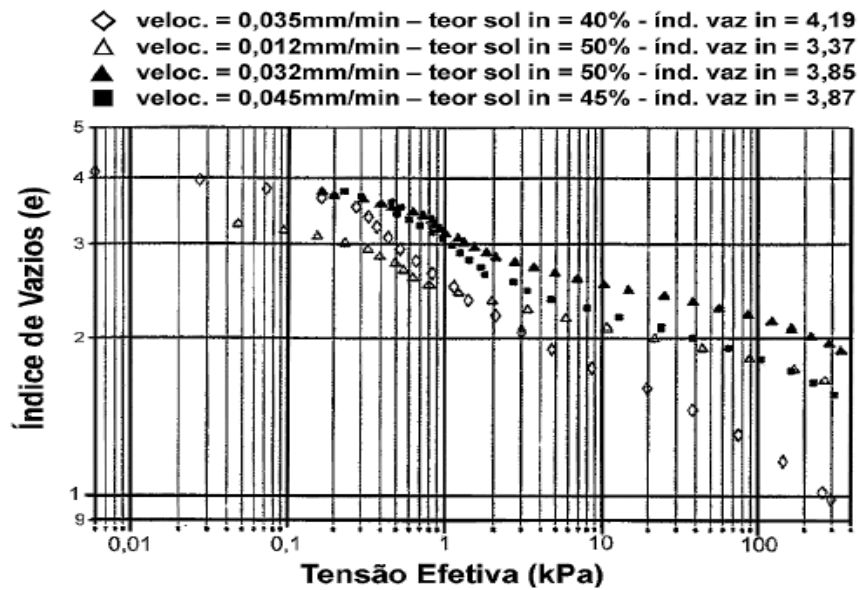


Figura 2.12: Resultados de Ensaio CRD na lama vermelha SL: curvas de compressibilidade (Villar, 2002).

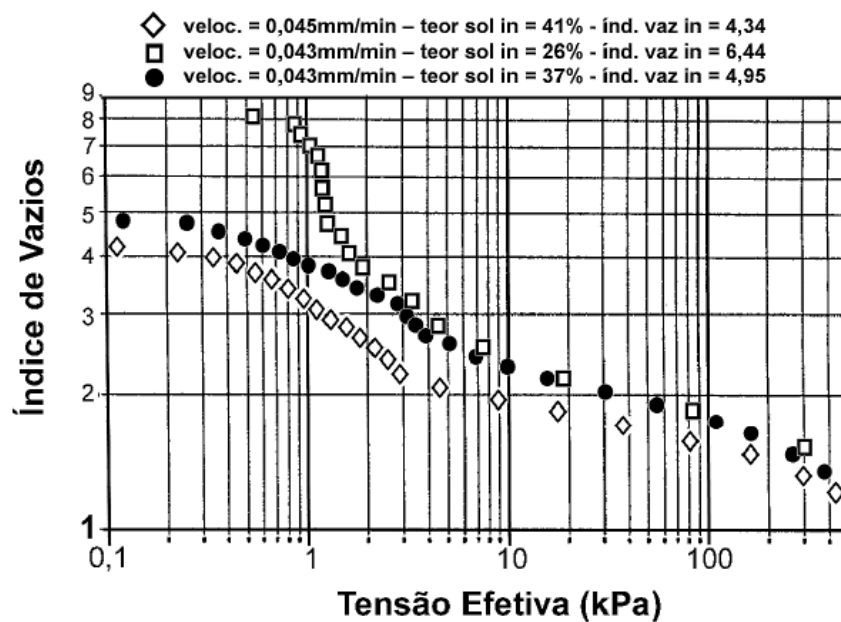
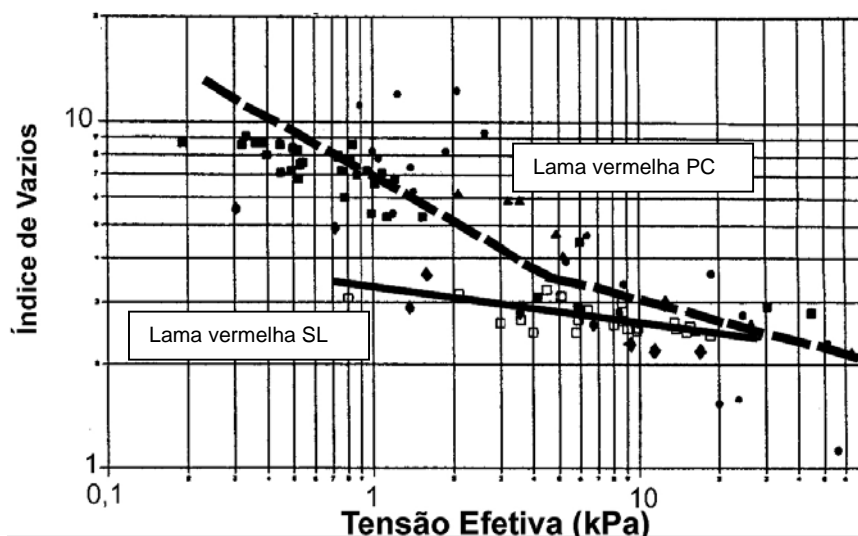


Figura 2.13: Resultados de Ensaio CRD na lama vermelha PC: curvas de compressibilidade (Villar, 2002).

Outra relação tensão efetiva – índice de vazios, para a lama vermelha SL e lama vermelha PC foi obtida por Villar (2002) através de ensaios de campo, com medições de poro pressões por meio de sondas piezométricas, com transdutor de pressão e leitura em um sistema de aquisição de dados. A Figura 2.14 apresenta as medições de campo para as duas lamas. Segundo o autor, a diferença entre os resultados pode ser creditada ao fato de que as lamas são originadas de jazidas diferentes.



**Figura 2.14:** Comparação de medições de campo, lama vermelha PC e lama vermelha SL, obtidas por Villar (2002).

A Tabela 2.7 apresenta um resumo de valores de coeficientes de adensamento descritos na literatura.

**Tabela 2.7:** Valores de coeficiente de adensamento de resíduos de diferentes minérios apresentados na literatura

Tipo de solo	Equipamento	Autores	$C_v$ (NA) $\text{cm}^2/\text{s}$
Resíduo de bauxita Estados Unidos	(LAB) Oedométrico convecional	Somogyi & Gray (1977)	$10^{-3} - 10^{-2}$
Resíduo de bauxita Estados Unidos	(LAB) Oedométrico convecional	Elias (1995)	$1,6 \times 10^{-3} - 9,5 \times 10^{-3}$
Resíduo de bauxita brasileira	(LAB) Ensaios com tensão controlada	Stinson (1981)	$1 \times 10^{-3} - 7 \times 10^{-3}$
Resíduo de bauxita australiana			$9 \times 10^{-4} - 4 \times 10^{-3}$
Resíduo de bauxita África ocidental			$8 \times 10^{-4} - 2 \times 10^{-3}$
Resíduo de bauxita jamaicana			$3 \times 10^{-4} - 9 \times 10^{-4}$

## 2.2.4 Condutividade Hidráulica

A condutividade Hidráulica é uma propriedade básica que depende do meio poroso e do fluido circulante. Sabe-se, entretanto, que todos os solos, por serem meios porosos, são permeáveis, uns mais, outros menos. Diversos ensaios para determinação do coeficiente de condutividade hidráulica têm sido desenvolvidos e aperfeiçoados ao longo do tempo. Busca-

se através disto uma maior representatividade nos resultados, a redução dos custos dos ensaios e o aperfeiçoamento dos aparelhos de medição em campo, tornando-os mais práticos e de fácil utilização, (Aguilar, 2001).

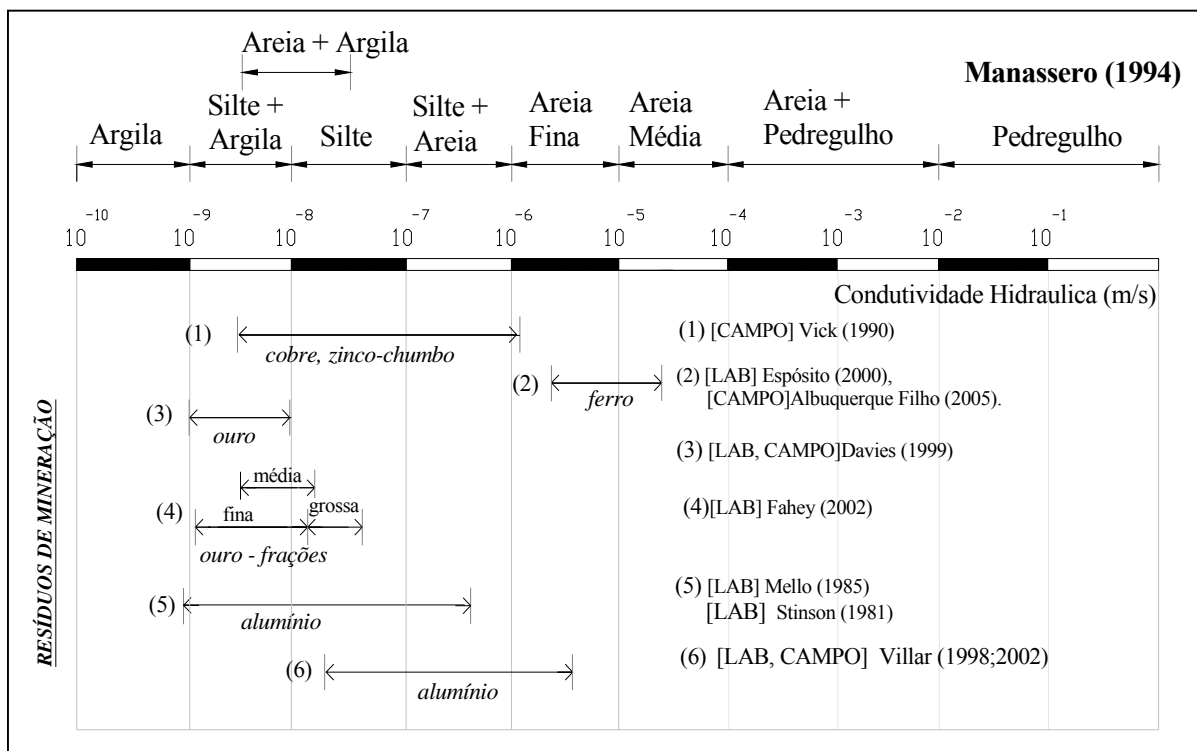
O coeficiente de condutividade hidráulica de um solo pode ser obtido através de métodos diretos e indiretos. Entre os métodos diretos encontram-se os ensaios de laboratório e de campo. No laboratório pode ser usados o ensaio de carga constante (permeâmetro de parede rígida), para solos arenosos, e o ensaio de carga variável (permeâmetro de parede flexível), para solos argilosos devido à grande diferença de condutividade hidráulica dos dois solos e o tempo que seria necessário para um solo argiloso num ensaio de carga constante (Vargas, 1981). Para a obtenção desse coeficiente, através de métodos indiretos, podem ser utilizados relações empíricas ou resultados de ensaios de adensamento.

Diversos fatores podem interferir na condutividade hidráulica, justificando a afirmação que a condutividade dos solos constitui o parâmetro utilizado nos projetos de engenharia que apresenta maior variação de valores (e.g. Cedergreen, 1977). De uma maneira geral, os valores dos coeficientes de condutividade hidráulica encontram-se condicionados a fatores característicos do material (distribuição granulométrica, forma e textura das partículas e composição mineralógica), a fatores associados ao arranjo estrutural (índice de vazios e grau de saturação), a fatores associados ao fluido permeante (natureza do fluido, tipo de fluxo e temperatura) e a fatores associados ao estado natural dos solos (heterogeneidade e anisotropia) segundo Albuquerque Filho, (2004).

Especial atenção deve ser dada aos resíduos de mineração, esses materiais apresentam considerável variabilidade em suas características físico-químicas e mineralógicas, que lhes conferem um comportamento distinto dos materiais usualmente encontrados em depósitos naturais. Como já mencionado estas características têm efeito dominante na condutividade hidráulica do solo, e conseqüentemente em seu comportamento *in situ*, sendo sempre necessário estimar o coeficiente de condutividade hidráulica dos resíduos de mineração.

Um resumo de valores de coeficientes de condutividade hidráulica descritos na literatura é apresentado na Figura 2.15, demonstrando que resíduos de mineração possuem uma condutividade hidráulica intermediária que varia de  $1 \times 10^{-9}$  a  $1 \times 10^{-5}$  (m/s). Fahey (2002) apresenta valores de coeficientes de três frações da granulometria de um resíduo de minério de ouro, assumindo o processo de segregação hidráulica. Os resíduos de minério de ferro, por

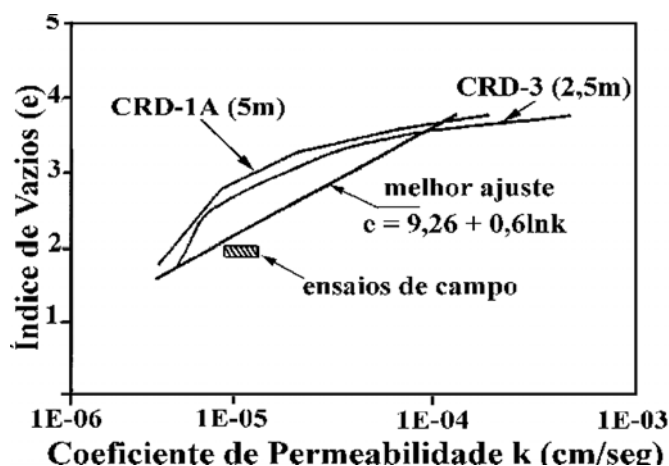
terem uma composição granulométrica arenosa, apresentam-se mais permeáveis que os demais. Esse comportamento parcialmente drenado dos rejeitos de mineração inclui uma variedade de granulometria, incluindo partículas com tamanho de areias, siltes e argilas ( Manassero, 1994).



**Figura 2.15:** Valores de condutividade hidráulica para resíduos de mineração.

Na Figura 2.16 apresenta-se uma comparação entre os resultados dos ensaios de campo obtidos através da instalação de piezômetros e ensaios de laboratório com equipamentos CRD obtidas por Villar (1998), na lama vermelha SL. O autor notou que os valores de campo apresentam maior condutividade hidráulica, podendo ser uma consequência da influência da macro-drenagem produzida por das lentes de areia.

A resposta parcialmente drenada, entre as condições drenadas (areia e pedregulho) e não drenadas (argila) apresentada pelos resíduos de mineração, podem conduzir a uma avaliação irreal de propriedades geotécnicas por correlações numéricas e empíricas (Schnaid, 2004). Atualmente não se tem conhecimento de como executar ou interpretar ensaios *in situ* nesses materiais. A interpretação de ensaio de campo é restringida a argilas ou areias, sendo as recomendações para solos com condutividade hidráulica intermediária empíricas e baseadas em observações de campo.



**Figura 2.16:** Comparação entre resultados de ensaios de campo e laboratório em amostras da lama vermelha SL. (Villar et al., 1998)

### 2.2.5 Piezocone

Ensaio de campo apresentam reconhecida utilidade na determinação das propriedades de resistência, deformabilidade e condutividade hidráulica dos solos. A rapidez de execução possibilita a realização de campanhas mais completas, ajustes e eventuais modificações no planejamento da investigação, fatores que reproduzem economia e flexibilidade na investigação de campo em comparação com as metodologias convencionais de laboratório (Lancellota, 1995).

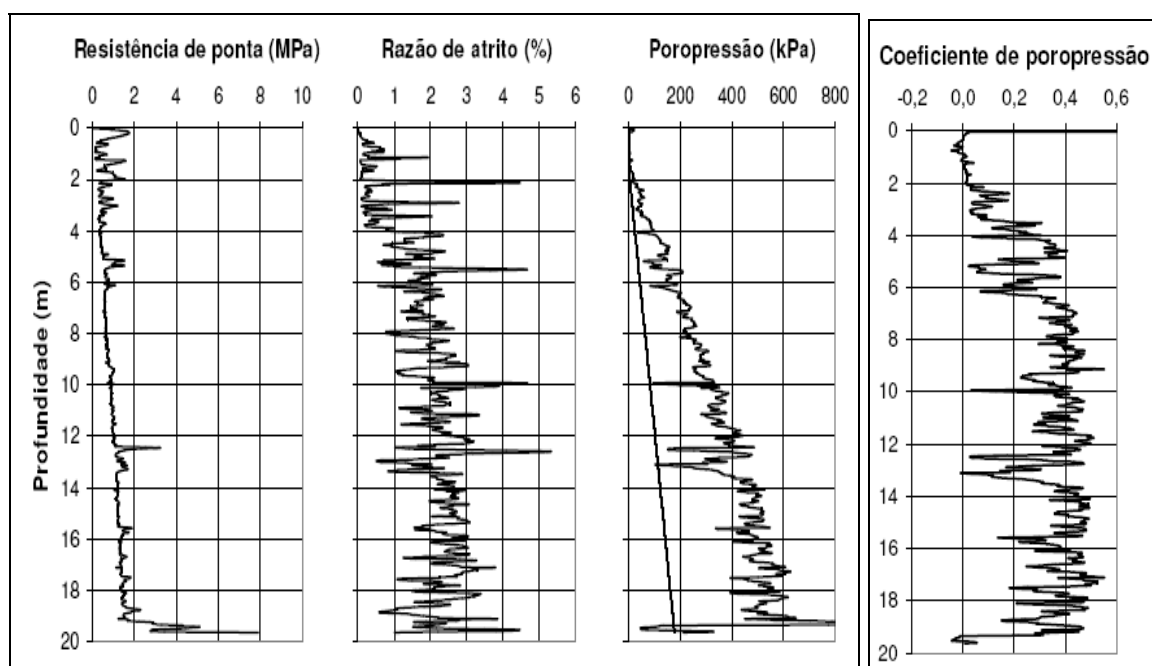
Dentre as várias metodologias e técnicas de investigações geotécnicas *in situ*, indiretas e semidiretas disponíveis, deve-se destacar os ensaios de cone e piezocone, conhecidos pelas siglas CPT (Cone Penetration Test) e CPTU (Piezocone Penetration Test) respectivamente. Estes ensaios vêm se caracterizando internacionalmente como uma das mais importantes ferramentas de prospecção geotécnica. Resultados de ensaios podem ser utilizados para determinação estratigráfica de perfis de solos, determinação de propriedades dos materiais prospectados, particularmente em depósitos de argilas moles, e previsão da capacidade de carga de fundações (e.g. Schnaid, 2000).

No ensaio de piezocone são continuamente medidas as seguintes grandezas: resistência de ponta ( $q_c$ ), atrito lateral ( $f_s$ ) e poro pressão gerada ( $u_2$ ). A partir desses valores são determinados dois parâmetros fundamentais para identificação do tipo de solo, razão de atrito ( $R_f$ ) e parâmetro de poro pressão ( $B_q$ ), a partir dos tais pode-se caracterizar a estratigrafia do perfil do solo através de diferentes sistemas de classificação. (Lunne et al, 1997; e.g. Schnaid, 2000).

### 2.2.5.1 Perfis característicos

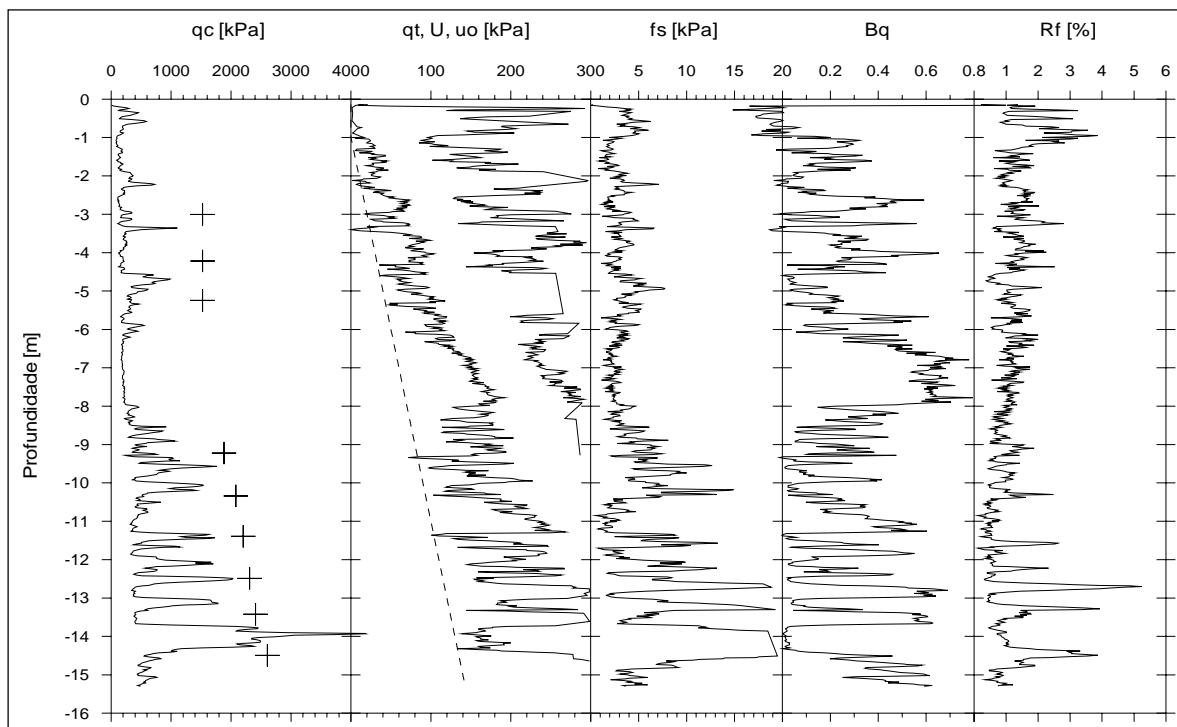
A estabilidade estrutural de depósitos de resíduos de minério é um dos maiores problemas confrontados na engenharia geotécnica. As propriedades físicas e mecânicas destes depósitos dependem muito do tipo de minério depositado, processo de produção do resíduo, tipo de deposição, concentração de sólidos durante a deposição, local e idade da jazida, logo apresentam grande variabilidade em suas características físico-químicas e mineralógicas. O ensaio de piezocone é particularmente útil na identificação destes depósitos, embora se reconhecendo as dificuldades na interpretação de resultados fornecidos devido à grande variabilidade de comportamento e a necessidade de uso de abordagens não convencionais para auxiliar nestas interpretações (Lunne, Robertson & Powell, 1997).

Nas Figuras 2.17, 2.18 e 2.19 são apresentados perfis típicos de resultado de CPTU em diferentes tipos de materiais de mineração e um material natural usado para ilustrar as características discutidas. O depósito natural é incluído para fins de comparação, pois os resíduos analisados apresentam freqüentemente partículas de tamanho de silte e problemas de drenagem parcial durante a penetração do piezocone.

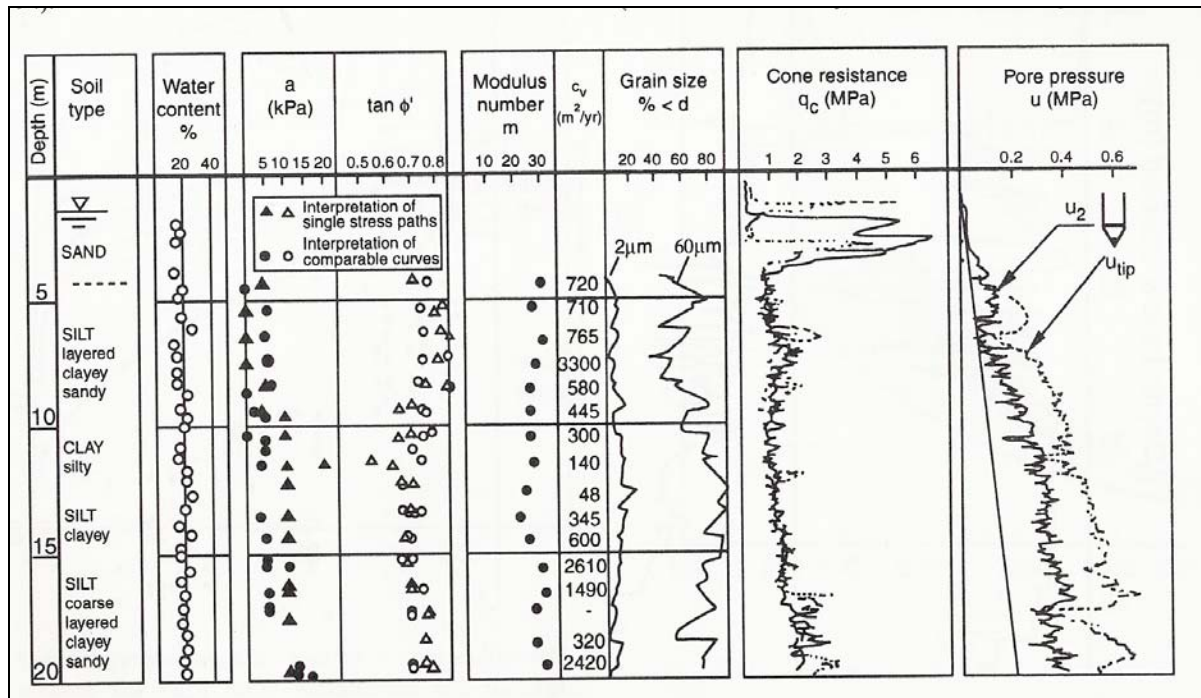


**Figura 2.17** – Resultados do ensaio de piezocone - resíduo de minério de ferro.(adaptados de Albuquerque Filho, 2004).





**Figura 2.18:** Resultados do ensaio de piezocone - resíduo de minério de ouro (adaptados de Schnaid, F, Lehane, B.M. & Fahey, 2004).



**Figura 2.19:** Resultados de ensaios de pizocone - Silte da Stjordal (adaptados de Senneset, et al., 1988)

Quando se observa as Figuras 2.17, 2.18 e 2.19, fica claramente ilustrada a semelhança entre os resultados, incluindo também o caso do silte natural. Os perfis apresentam condições de pronunciada variabilidade de resistência em função da profundidade, bem como considerável heterogeneidade espacial de propriedades.

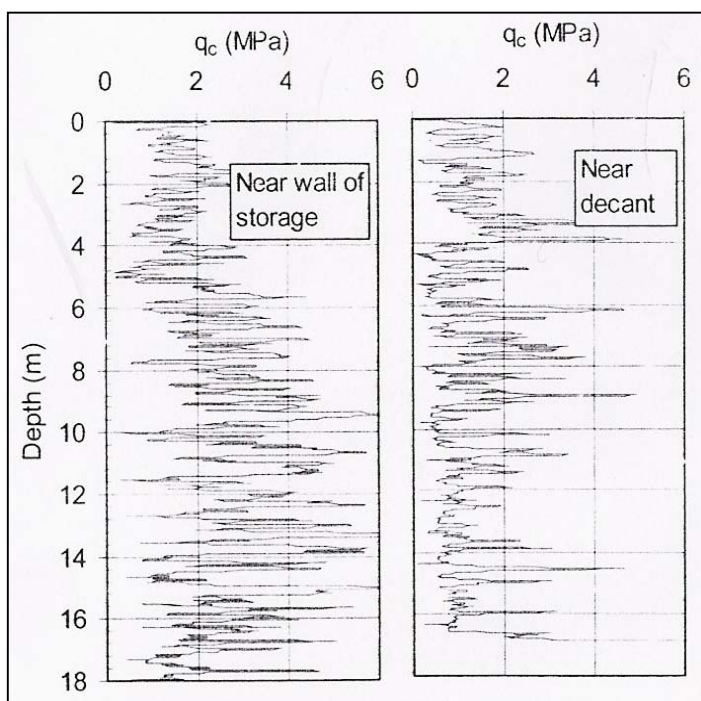
O comportamento característico destes materiais é identificado essencialmente nos perfis de poro pressão. Na Figura 2.17, que se trata de um minério de ferro, a geração acentuada de poro pressões dinâmicas ocorre ao longo de praticamente todo o perfil, com um parâmetro de poro pressão inferior a 0,4. A Figura 2.18 corresponde a um resíduo de minério de ouro no qual verifica-se a presença de uma camada menos permeável entre 6,00 e 9,00 metros, com parâmetro de poro pressão na ordem de 0,6 a 0,8, enquanto em outras profundidades estes valores são inferiores a 0,3. No caso do silte natural mostrado na Figura 2.19, é observa-se o mesmo comportamento de drenagem com geração de poro-pressão em praticamente todo o perfil, para um piezocone com leituras nas posições ( $u_1$ ) e ( $u_2$ ). A medida da resistência do cone são semelhantes, enquanto, o resultado da poro pressão apresentou uma diferença da ordem de  $u_2 = 0.6 u_1$ .

Em geral esses rejeitos apresentam sucessões de camadas de silte argilo arenoso, intercaladas por extratos essencialmente arenosos e, em alguns casos, camadas de argilas normalmente adensadas. A variação de poro pressão (decorrência no parâmetro  $B_q$ ) é comum a todos os depósitos. A medida de poro pressões durante a cravação pode comprometer a estimativa de parâmetros geotécnicos a partir das medidas de penetração, pois não é possível caracterizar de forma inequívoca condições perfeitamente drenadas e não-drenadas.

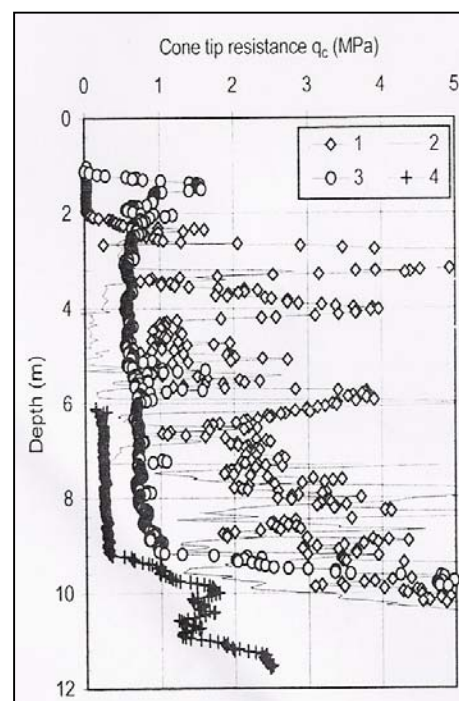
#### 2.2.5.2 Segregação hidráulica

Fahey. et al. (2002) apresenta resultados de uma investigação em depósitos de resíduos de minério de ouro, cujo objetivo é avaliar o processo de segregação hidráulica dos resíduos. A Figura 2.20 mostra os resultados de piezocone obtidos de dois pontos no reservatório, um ponto situado perto do dique de contenção e outro perto do vertedouro. O resultado é um depósito altamente estratificado nos dois locais investigados. Perto do dique, o valor da resistência de ponta é ligeiramente superior ao valor obtido perto do vertedouro, indicando o

processo de segregação granulométrica durante a deposição, formando praias de material mais grosseiro e material mais fino. Resultados de análise granulométrica para esse material indicaram que o conteúdo de argila é baixo, aproximadamente 10%.



**Figura 2.20:** Resultados de ensaios de CPT. 2 pontos distintos no reservatório de resíduo de minério de ouro I (adaptados de Fahey, et al., 2002).



**Figura 2.21:** Ensaios de piezocone. 4 pontos distintos no reservatório de resíduo de minério de ouro II (adaptados de Fahey, et al., 2002).

Resultados semelhantes para um segundo local são mostrados na Figura 2.21. Neste caso, quatro ensaios foram realizados: os pontos dos ensaios #1 e #2 estão localizados no canto do reservatório, enquanto os ensaios #3 e #4 encontram-se na área onde a lagoa de sedimentação está situada. Observando a figura fica clara a zona ao redor do vertedouro pode apresentar problemas ao projeto geotécnico em função da baixa resistência do resíduo nesta área. A Figura 2.21 mostra que a segregação deste local é mais pronunciada que aquela mostrada na Figura 2.20 para o primeiro local investigado.

### 2.2.5.3 Parâmetros Geotécnicos

Ensaios de piezocone só podem ser interpretados quando asseguradas condições não-drenadas (análise em termos de tensões totais) ou perfeitamente drenadas (análise em termos de tensões

efetivas); drenagem parcial apresentada pelos rejeitos de mineração altera o estado de tensões ao redor da sonda piezométrica e, como este estado de tensões não pode ser quantificado, a estimativa de parâmetros constitutivos do solo a partir da resistência à penetração é imprecisa (e.g. Schnaid, 2005).

No caso de solos granulares, o ensaio de cone pode fornecer uma estimativa de vários parâmetros geotécnicos, devendo ser destacados: densidade relativa ( $D_r$ ), ângulo de atrito efetivo ( $\phi'$ ), módulo de deformação cisalhante inicial, indicação do estado de tensões *in situ* ( $\sigma_h$  e  $K_o$ ) e história de tensões (OCR).

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) e de cisalhamento máximo ( $G_o$ ).

Ensaio de medição de poro pressões realizados com o piezocone para determinação dos coeficientes de adensamento horizontal e vertical ( $C_h$  e  $C_v$ ), são particularmente úteis nos depósitos de resíduos, fornecendo informações quanto às condições de drenagem e a poro pressão estabilizada no ponto ou da eventual ocorrência de fluxo. O ensaio consiste basicamente em interromper a cravação do piezocone até a dissipação atingir o equilíbrio. Os valores de  $C_h$  foram calculados segundo a metodologia proposta por Houslby & Teh(1988), com um índice de rigidez ( $I_r$ ) igual a 100 e corrigindo-se os efeitos de pré-adensamento através da proposição de Jamiolkowsky e outros (1985), na qual foram adotados, valores de  $k_v/k_h=1/4$ .

Os mesmos autores que apresentaram os perfis de piezocone da Figura 2.17, 2.18 e 2.19, fizeram também estimativas de valores dos coeficientes de adensamento (condição não-drenada) e ângulo de atrito (condição drenada), através de resultados de piezocone para os respectivos depósitos. Estes se encontram resumidos na Tabela 2.8, juntamente com alguns valores de coeficiente de adensamento obtidos em ensaios de laboratório encontrados apresentados na literatura.

**Tabela 2.8:** Valores de coeficiente de adensamento e ângulo de atrito de diferentes tipos de resíduos apresentados na literatura.

Tipo de solo	Tipo de ensaio	Autores	$\phi'$ (°)	Faixa de valores ou valores médios.	
				Ch (PA) cm <sup>2</sup> /s	Cv (NA) cm <sup>2</sup> /s
Resíduo de bauxita Estados Unidos	LAB) Oedométrico convencional	Somogyi & Gray (1977)	-	-	$10^{-3} - 10^{-2}$
Resíduo de bauxita Estados Unidos	(LAB) Oedométrico convencional	Elias (1995)	-	-	$1,6 \times 10^{-3} - 9,5 \times 10^{-3}$
Resíduo de bauxita brasileira	(LAB) Ensaio com tensão controlada	Stinson (1981)	-	-	$1 \times 10^{-3} - 7 \times 10^{-3}$
Resíduo de bauxita australiana					$9 \times 10^{-4} - 4 \times 10^{-3}$
Resíduo de bauxita África ocidental					$8 \times 10^{-4} - 2 \times 10^{-3}$
Resíduo de bauxita jamaicana					$3 \times 10^{-4} - 9 \times 10^{-4}$
Resíduo de minério de ferro	(CAMPO) Piezocone	Albuquerque Filho (2004)	26-28	$5,2 \times 10^{-1}$	$3,75 \times 10^{-2}$
Resíduo de minério de ouro	(CAMPO) Piezocone	Schnaid.; Lehane & Fahey (2004)	26-30	$7,9 \times 10^{-1}$	$2,85 \times 10^{-2}$
Silte de Stjordal	(CAMPO) Piezocone	Senneiset (1988)	27-35	$8,2 \times 10^{-1}$	$2,93 \times 10^{-2}$

Um parâmetro de considerável interesse para a avaliação do comportamento dos resíduos de mineração é o coeficiente de condutividade hidráulica ( $k$ ), que pode ser estimado a partir de ensaios de dissipação. Com o coeficiente de adensamento vertical determinado, torna-se possível estimar o coeficiente de permeabilidade vertical:

$$k_v = C_v \cdot (1/M) \cdot \gamma_w \quad (2.1)$$

onde  $M$  é o módulo confinado drenado do solo. Campanela et al. (1995) citam uma correlação para o módulo confinado drenado ( $M$ ) proposta por Mitchell & Gardner em 1975:

$$M = 1/m_v = \alpha \cdot q_c \quad (2.2)$$

onde:  $m_v$  = módulo de variação volumétrica do ensaio de compressão edométrica;  $q_c$  = resistência de ponta do cone e  $\alpha$  = fator empírico relaciona-se às características do depósito, que pode ser avaliado através da Tabela 2.9.

**Tabela 2.9:** Valores do fator  $\alpha$  proposto por Mitchell & Gardner (1975)

<b>Tipo de solo</b>	<b>Resistência de ponta(<math>q_c</math>)</b>	<b><math>\alpha</math></b>	
Argila de baixa plasticidade	$q_c < 700\text{KPa}$	$3 < \alpha < 8$	
	$700\text{KPa} < q_c < 2\text{MPa}$	$2 < \alpha < 5$	
	$q_c < 2\text{MPa}$	$1 < \alpha < 2,5$	
Siltes de baixa plasticidade	$q_c < 2\text{MPa}$	$3 < \alpha < 6$	
	$q_c < 2\text{MPa}$	$1 < \alpha < 3$	
Siltes e argilas plásticas	$q_c < 2\text{MPa}$	$2 < \alpha < 6$	
Siltes orgânicos	$q_c < 1,2\text{MPa}$	$2 < \alpha < 8$	
Argilas orgânicas e turfas	$q_c < 700\text{Kpa}$	$50\% < W < 100\%$	$1,5 < \alpha < 4$
		$100\% < W < 200\%$	$1 < \alpha < 1,5$
		$W > 200\%$	$0,4 < \alpha < 1$

Pelo fato dos ensaios de piezocone serem facilmente interpretados quando asseguradas condições não-drenadas ou perfeitamente drenadas, antecipar as condições de drenagem do ensaio, evitando a drenagem parcial durante a penetração, é um desafio para quem concebe um programa de investigação em solos siltosos com base em ensaios de campo.

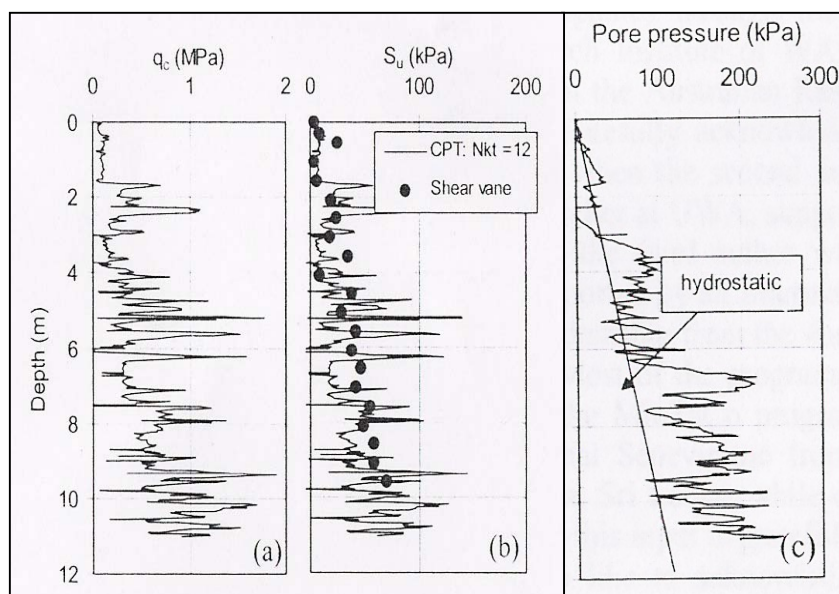
Para solos com permeabilidade inferior a  $10^{-8}$  m/s, é comum que aconteçam respostas não drenadas para taxas de penetração padrões de ensaios de campo, no caso do piezocone (20mm/s) e palheta ( $6^\circ \pm 0,6^\circ/\text{mim}$ ). A literatura propõe algumas aproximações que oferecem condições para avaliar o comportamento da drenagem durante a penetração em solos de permeabilidade intermediária ( $10^{-8}$  a  $10^{-5}$  m/s).

Blight (1968) apresenta um conceito chamado de fator tempo  $T = C_v \cdot t/d^2$ , onde  $d$  é diâmetro da palheta,  $C_v$  o coeficiente de adensamento e  $t$  o tempo de giro. Na análise  $T$  é relacionada à resistência normalizada definida para ensaios de palheta. Uma relação parecida com a proposta por Blight (1968), foi apresentada por House et al. (2001), e mais tarde por Randolph e Hope, (2004). Esta relação propõe uma função da taxa de penetração  $v$ , diâmetro de sonda,  $d$ , e coeficiente de adensamento  $C_v$ , expresso em forma adimensional como  $V = vd/C_v$ . Pesquisas recentes utilizam a correlação de Randolph e Hope para ensaios de centrifuga, e através de análises numéricas (Schnaid, 2005).

Hight *et al.* (1994) propõe a relação entre  $B_q$ ,  $(q_t - \sigma_{vo})/\sigma'_{vo}$  para interpretar resultados identificando condições completamente não drenadas. Através das análises, o autor sugeriu que a penetração é completamente não drenadas para valores de  $B_q$  maior que 0,5, e substanciou esta evidência ao teor de argila dos materiais ensaiados.

Novas metodologias baseadas na análise da velocidade de penetração associada aos coeficientes de adensamento são utilizadas para avaliar as condições de drenagem do resíduo usado neste trabalho. Esta discussão será aprofundada no Capítulo 6 e constitui-se em um dos eixos principais da presente pesquisa.

Fahey (2002) apresenta uma comparação de resultados de ensaio de piezocone e palheta “Vane Test” realizados em um reservatório de resíduo de minério de ouro no Kaltails em Kalgoorlie. O ponto de localização do ensaio está situado a 20 m da linha de descarga, neste ponto Fahey interpretou os resultados obtidos pelo piezocone, como um material não drenado, apesar do perfil de poro pressão apresentar condições de drenabilidade para algumas camadas, mais acentuadas nas profundidades iniciais. A Figura 2.22 mostra o perfil de resistência de ponta, resistência não drenada obtida pelo ensaio piezocone e pelo ensaio de palheta e o perfil de poro pressão.



**Figura 2.22:** Resultados de ensaios de piezocone e palheta. Reservatório de resíduo de minério de ouro de Kalgoorlie (adaptados de Fahey, et al., 2002).

Os resultados mostram a proximidade dos resultados de resistência não drenada obtida pelo ensaio de piezocone e palheta, a resistência é geralmente baixa, o material é saturado. Este tipo de informação é inestimável na administração de armazenamento, particularmente se o reservatório possuir deposição pelo método de alteamento a montante.

### 2.2.6 Comentários Finais

Nos itens anteriores foi apresentada uma revisão dos resultados obtidos em ensaios de campo e laboratório realizados em depósitos de resíduos de minério de ferro, alumínio, ouro e cobre.

A disposição e armazenamento de resíduos de mineração constituem-se hoje em importante desafio geotécnico, uma vez que a retirada de amostras indeformadas para caracterização de comportamento geotécnico em laboratório é difícil, e algumas vezes impossível, em especial nos resíduos dispostos em reservatórios construídos em etapas sucessivas de alteamento. Por esse fato, se opta pela escolha de outros métodos, esse mais adequado para a aquisição dos dados.

O ensaio de piezocone é de grande utilidade na solução de problemas de estabilidade em resíduos de mineração, já que fornece resultados da estratigrafia e das condições de fluxo e drenagem, bem como permite uma estimativa dos parâmetros de projeto. A interpretação dos resultados de ensaios deve, no entanto ser realizada com critério e julgamento, uma vez que as correlações propostas na literatura foram estabelecidas em materiais sedimentares com características físicas, granulométricas e mineralógicas definidas. Além disso, a condição de drenagem parcial imposta por estes materiais e a estratigrafia acentuada limita o uso de ensaios *in situ*, criando respostas que podem ser afetadas e, por conseguinte correlações existentes podem conduzir a avaliação irreal de propriedades geotécnicas.

Em decorrência destes fatos, identifica-se a necessidade de pesquisa técnicas e procedimentos destinados à estimativa de propriedades de depósitos siltsos (resíduos em particular). Este trabalho objetiva contribuir na investigação das características de depósitos de resíduos, analisando em particular aspectos relacionados à interpretação de ensaios de piezocone.



### 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Este capítulo apresenta uma descrição do resíduo de minério de alumínio, material empregado no estudo desenvolvido nesta dissertação. Optou-se por apresentar somente técnicas e procedimentos adotados no programa experimental. Resultados de ensaios e suas interpretações são discutidas posteriormente no capítulo 4 e 5.

O programa experimental envolveu a reinterpretação de resultados de quatro campanhas de investigações geotécnicas em duas áreas de disposição do resíduo, envolvendo ensaios de campo (piezocone, palheta e piezometro) e laboratório (análise granulométrica e índices físicos) desenvolvidos pelo Núcleo de Engenharia Geotécnica e Geo-ambiental da UFRGS. Nesse trabalho optou-se por utilizar alguns resultados complementares de laboratório (condutividade hidráulica, adensamento, triaxial), realizados com equipamentos não convencionais projetados para lamas, executados pelo Núcleo de Geotecnia da PUC-Rio.

#### 3.1 LOCAL ESTUDADO

##### 3.1.1 Reservatórios de resíduos de bauxita

As áreas de deposição dos resíduos de bauxita, ARB #2 e ARB #3, estudadas neste trabalho estão situadas na fábrica de alumínio da ALUMAR, na cidade de São Luis no estado do Maranhão. O resíduo de bauxita gerado pelo processo Bayer contém uma solução alcalina que apresenta grande potencial de contaminação, capaz de causar danos à qualidade das águas superficiais e subterrâneas da região. Por esta razão, o resíduo é disposto em áreas impermeabilizadas e dotadas de drenagem de fundo, que funcionam em circuito fechado com a Refinaria. Tais áreas, chamadas ARB's (Áreas de Resíduo de Bauxita) são construídas especialmente para dar proteção adequada ao meio ambiente, atendendo à legislação ambiental vigente no país e aos padrões corporativos da refinaria, formadas por diques de solo compactado recebendo resíduos pela técnica convencional (*Wet-Disposal*). Após seu enchimento, as Áreas de Resíduos de Bauxita recebem resíduo pela técnica de alteamento a montante (*Upstream Stacking*), técnica de disposição mais econômica porém mais insegura, não recomendada pela NBR 13028 (1993) pela dificuldade de conhecimento das propriedades de condutividade hidráulica e adensamento do reservatório.

O transporte do resíduo de bauxita desde a Refinaria até as áreas de disposição, bem como a disposição propriamente dita, são feitos por via úmida, bombeado com uma baixa concentração de sólidos (10 – 25% em peso). O enchimento das ARB's é monitorado periodicamente através de levantamentos batimétricos que indicam o volume de resíduos sedimentados e a quantidade de água sobrenadante. A partir destes volumes se fazem as projeções de vida útil, de acordo com as previsões de geração futura de resíduos e do volume de água estocada. Este último, por sua vez, é diretamente influenciado pelo regime pluviométrico durante o período de operação da ARB.

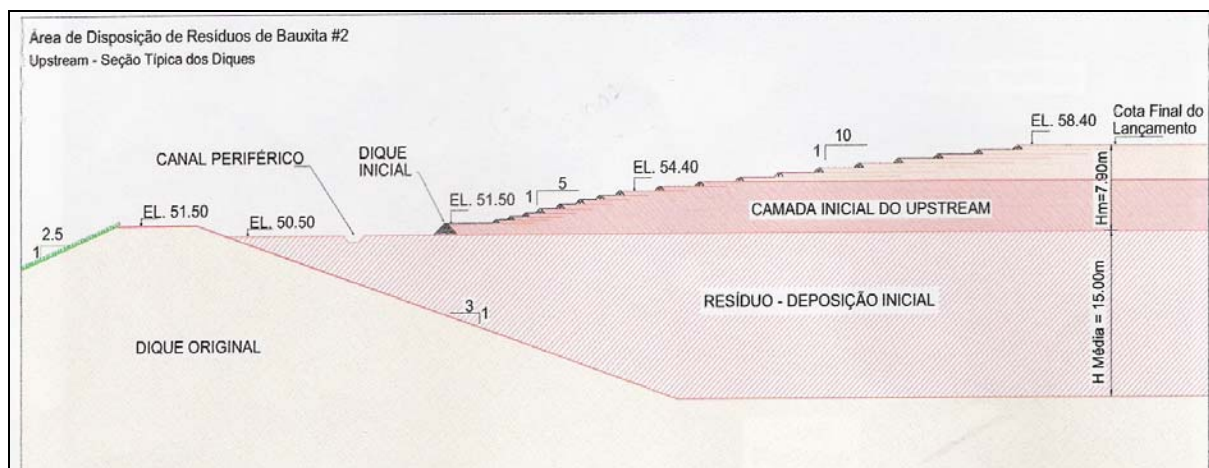
Quatro dessas áreas de disposição foram construídas no local, todas com as mesmas características técnicas básicas, constituídas de diques de contenção periféricos, construídos como aterros compactados, cuja parte interna (fundo e taludes) é impermeabilizada e dotada de drenagem de fundo, que atua tanto na consolidação do resíduo como na captação e reciclagem do licor cáustico percolado e, principalmente, na redução da carga hidráulica sobre a impermeabilização.

A ARB#1, já com reabilitação da superfície, ficou em operação de 1984 até 1990, após o alteamento dos diques em 4 metros ocorrido em 1988. A ARB#2, com capacidade para aproximadamente quatro milhões de metros cúbicos, esteve em operação de outubro de 1990, quando começou a receber o extravasamento da água sobrenadante da ARB#1, até dezembro de 1997. Esta área foi então desativada, entrando em operação a primeira fase da ARB#3. A metodologia alternativa para alteamento da área por montante foi utilizada para garantir um volume adicional de estocagem na ARB#2 na qual foram utilizados diques de pequena altura com lançamento de resíduos (Figura 3.1 e 3.2).

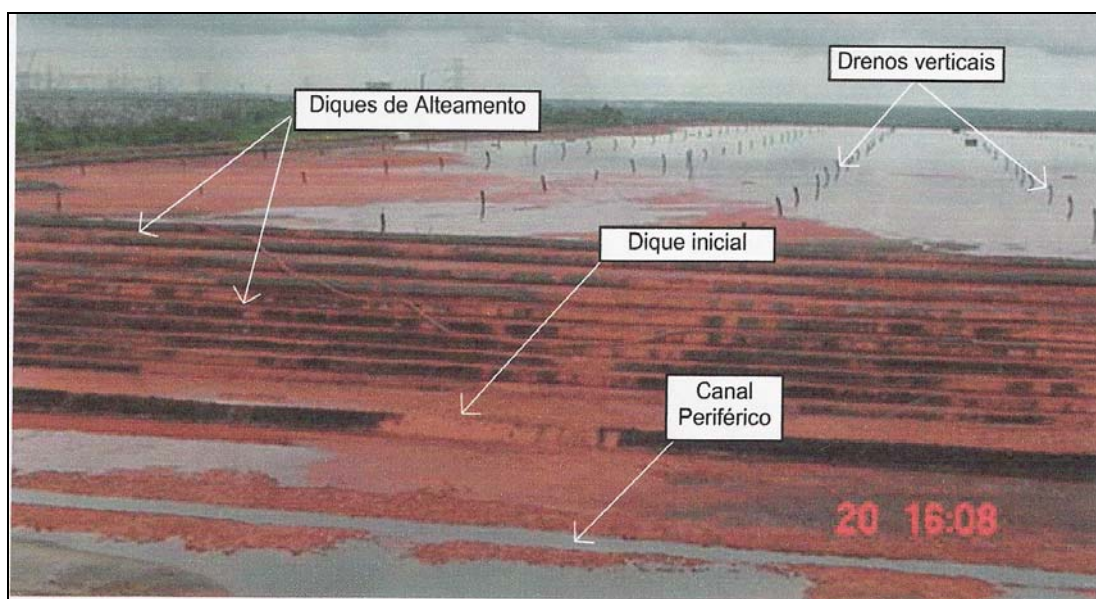
O 1º alteamento iniciou em maio de 2000 e em janeiro de 2002, ao ser interrompido o lançamento de resíduos, o alteamento encontrava-se aproximadamente na cota +53,0m, ou seja, 2,50m acima da cota do resíduo depositado no lago antes dos alteamentos. Lançamentos subsequentes foram feitos até fevereiro/2004, atingindo uma altura de 5,2m, quando o lançamento pela técnica de alteamento a montante (upstream) foi encerrado em função da necessidade de iniciar o processo de reabilitação.

A ARB #3 iniciou sua operação em 1997, quando começou a receber o extravasamento da água sobrenadante da ARB#2. Atualmente, a ARB # 3 encontra-se em final de operação pelo método convencional e posteriormente, passará a operar pelo método de alteamento a

montante. A implantação física da ARB #4 ocorreu no ano de 2005. O projeto está dimensionado para 5 anos de operação, entre 2006 (1º ano) e 2010. A ARB #4 se situará na região das outras três áreas existentes de resíduos de bauxita, distante cerca de 5Km da refinaria, adjacente a ARB #3. O croqui da Figura 3.3 mostra uma vista geral da área de deposição de resíduos.

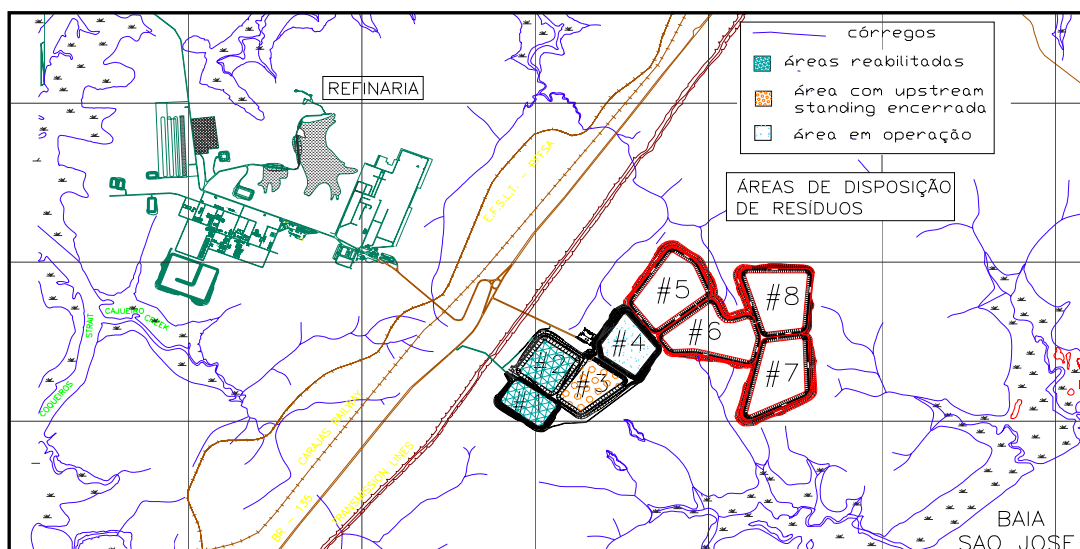


**Figura 3.1:** Seção típica do alteamento (Pedrosa et al, 2003).



**Figura 3.2:** Vista do depósito de Armazenamento de Resíduos de bauxita com alteamento. (Pedrosa *et al*, 2003).

A primeira ARB está localizada cerca de 5 Km ao leste da refinaria, enquanto as ARB's seguintes desenvolveram-se na direção geral norte a partir da ARB #1. Cada nova área será adjacente à anterior, para equilíbrio entre os volumes de terraplenagem. A ocupação da área foi realizada respeitando os limites das reservas legais e mantendo um afastamento de 50 metros de cursos d'água conforme ilustrado na Figura 3.3



**Figura 3.3:** Localização das áreas de disposição existentes e futuras.

A capacidade de acumulação de resíduos depende fundamentalmente do comportamento geotécnico do resíduo, cujas propriedades determinam a estabilidade a curto e longo prazo da pilha que será construída sobre a superfície do resíduo antigo. O monitoramento das áreas de resíduo de bauxita cobre as diversas fases de vida das ARB's (construção, pré-Operação, operação com Água, operação com resíduo pelo Método Convencional, operação de lançamento de resíduo por alteamento a montante, intervalo entre alteamentos, seqüência de lançamentos por alteamentos a montante, operação, reabilitação, área reabilitada).

### 3.1.2 Ensaios realizados

O trabalho envolveu 4 campanhas de investigações geotécnicas, envolvendo ensaios de campo e laboratório realizado por empresas privadas contratadas pela proprietária da obra e universidades, (UFRGS e PUC/Rio).

Ensaios complementares de laboratório foram realizados com equipamentos não convencionais que envolveram amostras de resíduo simulando condições de saída do lavador, estes executados pelo Núcleo de Geotecnica Ambiental da PUC-Rio. Três destas campanhas de ensaios foram realizadas na Área de disposição de resíduos ARB #2 e uma na ARB#3.

Alguns ensaios em laboratório foram realizados com equipamentos convencionais, envolvendo programas experimentais do Núcleo de Engenharia Geotécnica e Geo-ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Neste programa os ensaios realizados envolveram amostras deformadas do resíduo da campanha de 2005 na área ARB#3.

Essas campanhas foram realizadas na ARB#2 nos seguintes períodos:

- a) 1999, na superfície do resíduo antigo, com a área desativada a mais de um ano e com apenas a operação convencional;
- b) 2002, com a área recebendo resíduo pelo método alteamento a montante com uma cota em torno de 2,5 metros acima do resíduo antigo;
- c) 2004, a área encontrava-se com a disposição pelo método alteamento a montante encerrada e com uma cota de 5 metros acima do resíduo antigo.

A campanha de 2005 foi realizada na ARB#3 na fase de encerramento do método de disposição convencional. Apresenta-se na sequência uma descrição dos ensaios realizados em cada uma das campanhas de investigação e uma Tabela 3.1 com o resumo dos ensaios realizados nas áreas de disposição de resíduos.

**Tabela 3.1:** Resumo dos ensaios realizados nas áreas de disposição

ENSAIOS	CAMPANHAS				
	Ano 1999	Ano 2002	Ano 2003	Ano 2004	Ano 2005
<b>Piezocone</b>	7	8		7	10
<b>Palheta</b>	7	5		4	-
<b>Piezômetro</b>	-	-		10	-
<b>Índices Físicos</b>					
Granulometria	8	30		39	58
Peso específicos	50	30		39	58
Teor de umidade	50	30		39	58
Índices de vazios	50	30		39	58
Densidade dos grãos	50	30		39	58
Oedômetro CRD			3 <sup>1</sup>		
<b>Oedômetro de Lama</b>			2 <sup>1</sup>		
<b>Permeâmetro de parede flexível</b>			1 <sup>1</sup>		
<b>Permeâmetro de parede rígida</b>					3*
<b>Adensamento convencional</b>					2*
<b>Microscopia eletrônica</b>					1*
Triaxial UU			12 <sup>1</sup>		
<b>Triaxial CIU</b>			3 <sup>1</sup>		

\*ensaios realizados na UFRGS, <sup>1</sup>ensaios realizados na PUC/Rio

### **Campanha de 1999**

A locação dos pontos (estações) da investigação geotécnica de 1999 está apresentada na Figura 3.4. A estação 6 está localizada em área com resíduo úmido junto ao descarte de água da ARB#1, onde a construção do dique resultou em ondulações do terreno e abertura de trincas no resíduo. A estação 7 está localizada na área com resíduo mais mole junto à antiga

estação de bombeamento e ao atual vertedouro para ARB#3. A estação 4 está situada próxima à torre central. A cota da boca dos ensaios ficou entre 49,677m e 51,292m. Em cada uma das estações (com exceção da estação 4) foram executados:

- Ensaios de cravação de piezocone, com paralisação em diversas profundidades para dissipação de poro-pressões e medida de poro-pressão estabilizada, totalizando 7 verticais e 16 ensaios de dissipação.
- Ensaios de palheta de campo (Vane-Test) a diversas profundidades (43 ensaios).
- Coleta de amostras semi-indeformadas por amostrador Shelby de pistão estacionário a diferentes profundidades com a realização dos seguintes ensaios geotécnicos: análise granulométrica (8 ensaios); determinação de valores de peso específico (50 ensaios), teor de umidade (50 ensaios), índice de vazios e teor de sólidos das amostras Shelby (50 ensaios);
- Na estação 4 foi realizada sondagem à percussão em função da dificuldade encontrada na cravação do piezocone e retirada de amostras no solo arenoso.
- Nas estações 1, 2 e 5 foram coletadas amostras superficiais indeformadas do resíduo para execução de ensaios geomecânicos de laboratório. Estes consistiram em 12 ensaios triaxiais não adensados não drenados (UU).

### ***Campanha de 2002***

A localização das investigações está apresentada na Figura 3.4. As investigações foram programadas em cinco locais distintos, sendo os pontos 1, 3, 5, 7 e 8 no topo atual da pilha (el. ~53,00m) e os pontos 2, 4 e 6 sobre a primeira berma da pilha de resíduos (el. ~51,00, atrás do dique de refratários, cerca de 1m acima do resíduo “antigo”). Em cada uma das estações foram executados:

- Ensaios de penetração de cone com medida de poropressão, totalizando 8 verticais e 20 ensaios de dissipação;
- Ensaios de palheta (“vane tests”) nos pontos 1, 3, 5, 6 e 7;
- Sondagens à percussão num total de 8 verticais, com coleta de amostras deformadas a cada 2m de profundidade; as sondagens tiveram comprimentos de 6m nos pontos inferiores - estações (2, 4 e 6) e 10m nos demais; coleta de 30 amostras deformadas para ensaios de caracterização nas 5 estações localizados no topo da pilha, a distâncias de 1, 2, 4, 7, 10 e 20m do dique de contenção; coleta de 30 amostras indeformadas (em cilindro biselado) nos mesmos pontos, para determinação de densidade do resíduo; determinação de umidade natural

nas amostras indeformadas superficiais e nas amostras coletadas nas sondagens à percussão; determinação da granulometria nas 30 amostras superficiais.

### ***Campanha de 2004***

A Figura 3.4 apresenta a localização das investigações, que foram programadas em sete estações distintas, sendo as estações 1, 3, 4, 5, 6 e 7 no topo atual da pilha (cota ~55,3 metros) e a estação 2 na bacia (cota ~50,10 metros). As estações 3 e 4 foram posicionadas perto das torres de lançamento do resíduo, buscando uma caracterização do resíduo mais arenoso em profundidade. Em cada uma das estações foram executados:

- Ensaios de penetração de cone com medida de poro-pressão (piezocone), com comprimento de ~16 metros e na estação 2 com 12 metros; 26 ensaios de dissipações de poro-pressão em algumas profundidades;
- Ensaios de palheta (“vane tests”) nas estações 1, 2, 6 e 7;
- 10 ensaios de piezômetros do tipo Casagrande foram instalados em furos de 5" de diâmetro com bulbo de areia com 0,50m de extensão, com execução de ensaios de permeabilidade;
- Coleta de 39 amostras em tubo shelby com pistão estacionário, Nas estações 1, 2, 3, 4, 6 e 7 procede-se a determinação da densidade e peso específico dos grãos, umidade natural, granulometria.

### ***Campanha de 2005***

A Figura 3.5 apresenta um croqui com a localização dos furos de sondagem. As Estações 7, 8 e 9 correspondem aquelas nas quais se procurou verificar a influência do hidrato depositado no comportamento geomecânico do resíduo. Durante os serviços de campo, a superfície do resíduo na ARB# 3 encontrava-se submersa, sob lâmina d'água de altura variável tipicamente entre 0,5 a 2,0 m. As investigações foram programadas em nove estações distintas, sendo a cota da boca dos ensaios ficou entre 49,5 e 50,5 m. Em cada estação foi realizado:

- Ensaios de penetração por piezocone com velocidade distintas do padrão (0,2 cm/s) na estação 6 e estação 6 acima; 9 ensaios de penetração por piezocone, com medidas de poro-pressões, totalizando 11 verticais e 26 medidas de dissipações;

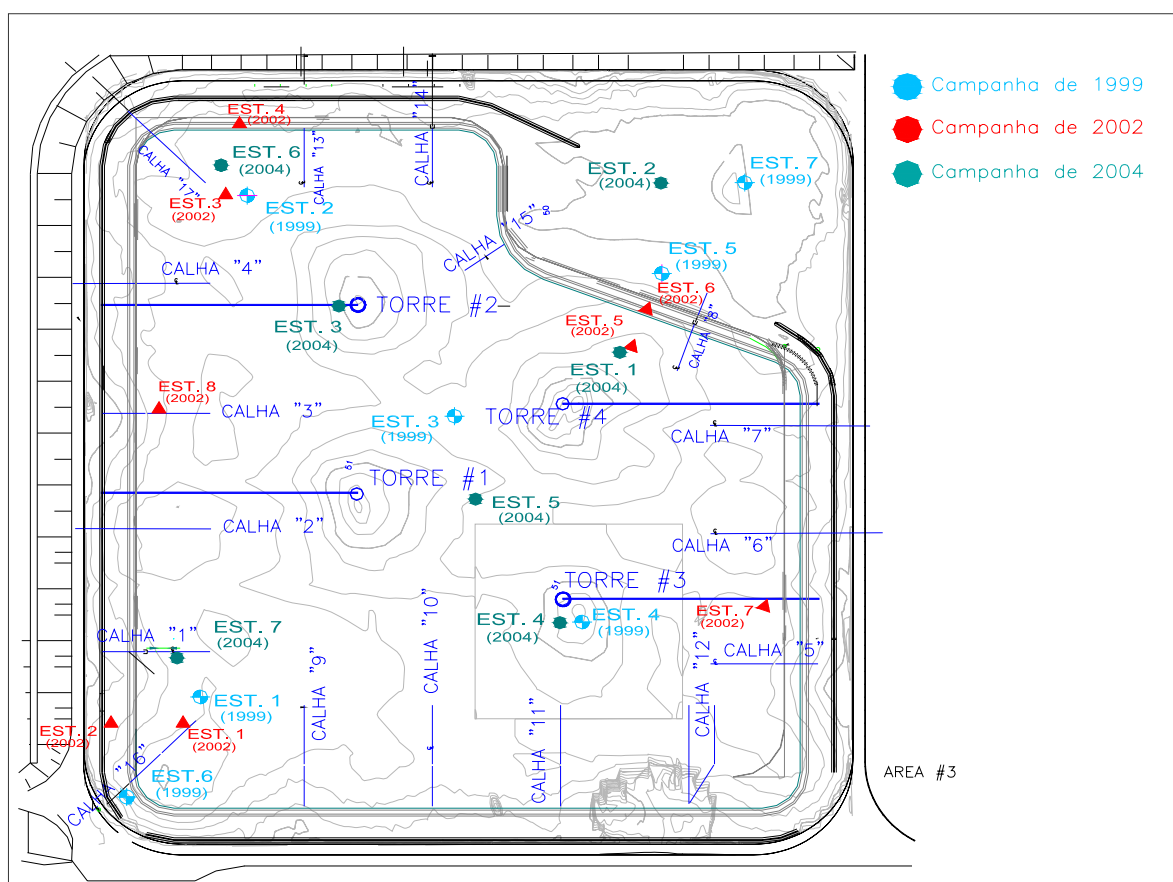
- Coleta de 58 amostras ao longo da profundidade do resíduo utilizando amostrador de pistão estacionário ou tipo caneco (função da consistência do resíduo) para determinação do peso específico, teor de umidade, densidade dos grãos, granulometria.

### ***Ensaio complementares de laboratório***

Os ensaios realizados em laboratórios com equipamentos ditos não convencionais envolveram 3 programas experimentais executados pelo Núcleo de Geotecnia Ambiental da PUC-Rio. Os equipamentos utilizados foram: triaxial (ensaio CIU e UU), oedometro de lama tipo CRD, oedometro de lama e permeômetro de parede flexível.

A primeira etapa de ensaios foi realizada em junho de 2003, utilizando de três amostras (LW-5, LW-10[1] e LW -10[2]) e envolveu ensaios de permeabilidade e adensamento.

A segunda etapa de ensaios foi realizada em julho de 2003, utilizando de duas amostras (LW-5 e LW-10) e envolveu ensaios de caracterização (LW-5 e LW-10), ensaios triaxiais CIU (LW-5), ensaios de permeabilidade (LW-5).



**Figura 3.4:** Localização das estações de ensaios das campanhas de 1999, 2002 e 2004 no reservatório ARB # 2.





## 3.2 METODOLOGIA DAS INVESTIGAÇÕES GEOTÉCNICAS DE CAMPO E LABORATÓRIO

### 3.2.1 Amostragem

#### *Equipamento*

As coletas de amostras do resíduo foram feitas por meio de amostrador de lama (tipo caneco), para extração de amostras de lama de baixa consistência, com volume da ordem de  $600\text{ cm}^3$  e amostrador tipo pistão estacionário, para coleta de amostras mais consistentes, com diâmetro interno mínimo de 50,0 mm (2") e amostrador tipo SPT, como alternativa ao pistão estacionário no caso material mais resistente foram também utilizados. Procedimentos seguiram a preconizados na norma NBR 9820 (1993).

#### *Execução*

Amostras de maior consistência foram extraídas com amostrador tipo Shelby com pistão estacionário. O equipamento desce até a cota de amostragem com o pistão posicionado na boca do amostrador. Com a haste do pistão mantida estacionária procede-se à descida do amostrador até que o pistão atinja a cota de fundo e o equipamento era alçado à superfície.

Da amostra extraída foram eliminados o terço superior e inferior e preservado o terço central, que, após medida do comprimento, era dividido em duas sub-amostras aproximadamente iguais, colocadas em cápsulas ou sacos plásticos cuidadosamente selados. A Figura 3.6 apresenta uma foto das amostras do resíduo extraídas com amostrador tipo Shelby com pistão estacionário, na campanha de 2005.



**Figura 3.6:** Amostra do resíduo retirada com o amostrados Shelby – campanha de 2005

O amostrador de baixa densidade consiste em um caneco, descido tampado até a cota de amostragem. Nesta cota, a tampa é levantada, permitindo que a lama preencha o caneco. A tampa é, em seguida, reposicionada no caneco e o conjunto alçado à superfície, para retirada da amostra, transferida para um saco plástico ou cápsula por meio de uma concha.

### **3.2.2 Caracterização**

A caracterização do material em laboratório foi realizada para determinação do peso específico, massa específica, teor de umidade, granulometria e análise físico-química do resíduo.

#### ***Peso específico***

O peso específico das amostras coletadas do resíduo foi obtido utilizando-se equipamentos e procedimentos próprios para trabalhar com soda cáustica, valores de peso específico foram estimados por medida direta, considerando o volume medido durante a amostragem e o peso determinado em laboratório, descontado o peso da cápsula ou saco utilizado, e por determinação indireta, por meio da determinação dos teores de umidade das amostras, admitindo-se que as mesmas encontram-se saturadas e considerando o valor da densidade dos grãos obtido nos ensaios à mesma profundidade.

#### ***Teor de umidade***

O teor de umidade das amostras de resíduo coletadas nas campanhas de ensaio foi obtida de acordo com os procedimentos usuais de laboratório de solos, tomando-se os cuidados de não utilizar cápsulas de alumínio, substituindo por cápsulas de PVC, sacos plásticos ou qualquer outro tipo de material compatível com soda cáustica. Em função do material das cápsulas, a estufa para secagem das amostras foi regulada para temperaturas da ordem de 80°C.

#### ***Massa específica dos grãos***

A massa específica dos grãos foi obtida de acordo com os procedimentos preconizados na norma ABNT 06508 (1984).

### ***Granulometria por peneiramento e sedimentação***

O ensaio de granulometria foi realizado de acordo com os procedimentos preconizados pela norma NBR 7181 da ABNT, em amostras coletadas a cada vertical de amostragem, deformadas e indeformadas. Foram realizados ensaios com água destilada, água do resíduo (cáustica) e solução ABNT.

### ***Determinação de pH, teor cáustico, teor alcalino e material orgânica***

A coleta de amostras de efluentes foi realizada, seguindo-se os procedimentos pela norma NBR 10007- Amostragem de Resíduos.

Determinou-se o pH das sub-amostras coletadas pelo método eletrométrico, de acordo com as técnicas sugeridas pelo Laboratório da Refinaria ALUMAR, conforme o documento revisado nº4000648/01. A rotina utilizada compreendeu em preparar as soluções de Cloreto de Potássio 3M, Tampão pH 4.01 e Tampão pH 7.00, calibrar o pH-metro junto às soluções preparadas anteriormente, medir o pH das sub-amostras utilizando o pH-metro. Utilizou-se um aparelho WTW pH/Cond 340i com eletrodo TetraCon®325 nas medidas de pH.

O teor cáustico, correspondente à alcalinidade hidróxida do material, foi determinado de acordo com o documento emitido, via WEB, pelo Laboratório da Refinaria ALUMAR nº 4000595/01. A rotina foi a preparar as soluções de fenolftaleína 1%, ácido sulfúrico 0,1N, cloreto de bário 10% e de carbonato de sódio 0,05N (Padrão Primário), padronizar a solução de Ácido Sulfúrico 0,1N, analisar as amostras utilizando as soluções preparadas anteriormente, e calcular a alcalinidade hidróxida.

Para a obtenção do teor alcalino dos materiais, correspondente às alcalinidades hidróxida, de carbonatos e de bicarbonatos, utilizou-se o seguinte procedimento, segundo o Laboratório da Refinaria ALUMAR, nº 4000596/01, preparar as soluções de ácido sulfúrico 0,1N e carbonato de sódio 0,05N (padrão primário), padronizar a solução de ácido sulfúrico 0,1N, titular as amostras utilizando o pH-metro e as soluções preparadas anteriormente, determinar as alcalinidades hidróxida, de carbonatos e de bicarbonatos, através do resultado da titulação anterior, e calcular a alcalinidade total.

Para se determinar o teor de matéria orgânica do material, utilizou-se um Analisador de Carbono Resemount Analytical, modelo DC-190, com a seguinte rotina: Injetar a amostra no equipamento coletando, com auxílio de uma pipeta automática, 1 $\mu$ L da solução, após a leitura, anotar o valor do sinal apresentado, com o auxílio das equações de regressão linear, construídas com padrões de bifitalato de potássio e carbonato de cálcio, para carbono total e carbono inorgânico, obter-se os valores das concentrações de carbono total e carbono inorgânico, respectivamente, para obter o valor da concentração de carbono orgânico, efetuar a diferença entre a concentração de carbono total e carbono inorgânico.

Após as três determinações, foi calculada a média dos valores obtidos, excluindo-se valores expúrios, diferente dos demais. Os valores determinados em laboratório para as amostras de efluentes foram comparados com os limites apresentados pela Resolução CONAMA No 20 de 1986.

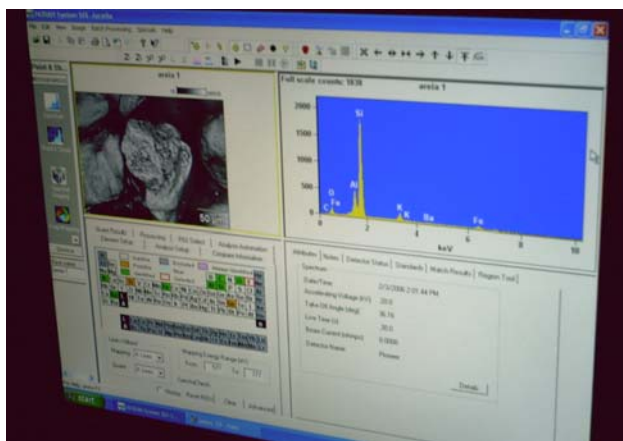
### ***Microscopia eletrônica***

Para análise física dos grãos do resíduo foi utilizado o microscópio eletrônico de varredura (MEV) do Centro de Microscopia Eletronica da UFRGS. As amostras foram fixadas sobre um suporte metálico e, após, metalizadas por uma fina camada de ouro paládio (cerca de 130 a 180 ângstrons de espessura), para torná-las condutoras. As imagens representam a superfície do material, obtida por meio de feixes de elétrons que bombardeiam a amostra, substituindo o feixe de luz, e focalizados por lentes eletromagnéticas. Na figura 3.7 pode-se observar um cadinho, suporte para análise das amostras analisadas por Microscopia. Na Figura 3.8 pode-se visualizar a tela do equipamento do MEV em funcionamento.



**Figura 3.7:** Suporte da amostra analisada do equipamento de MEV

O EDS OU EDX (energy dispersive x-ray detector) é um acessório essencial no estudo de caracterização microscópica de materiais. Quando o feixe de elétrons incide sobre o material, os elétrons mais externos dos átomos e os íons constituintes são excitados, mudando de níveis energéticos. Ao retornarem para sua posição inicial, liberam a energia adquirida a qual é emitida em comprimento de onda no espectro de Raios-X. Um detector instalado na câmara de vácuo do MEV mede a energia associada a esse elétron. Como os elétrons de um determinado átomo possuem energias distintas, é possível, no ponto de incidência do feixe, determinar quais os elementos químicos estão presentes naquele local e assim identificar em instantes que mineral está sendo observado.



**Figura 3.8:** Visualização da tela do equipamento MEV

### 3.2.3 Ensaio de compressão triaxial

Para os ensaios triaxiais foram utilizadas, prensas WF de velocidade de deslocamento controlada, com instrumentação eletrônica para monitorar força, deslocamento, variação de volume, pressão confinante e poro-pressão. Células especiais, em PVC e perxspex, foram especialmente desenvolvidas na PUC-Rio para a execução de ensaios utilizando resíduos cáusticos, que compõem o equipamento, incluindo também sistemas de drenagem especiais que possibilitam a utilização de fluidos cáusticos na fase drenada dos ensaios. A Figura 3.9 mostra uma vista geral do equipamento utilizado.

No monitoramento da carga axial foram usadas células de carga interna à câmara, com capacidade máxima de 500kN, propiciando uma resolução da ordem de 1kPa na medida da tensão desviadora tomando-se como base à área inicial das amostras. Medidas de

deslocamento foram efetuadas externamente à câmara, com transdutores do tipo LSCDT com resolução da ordem de  $10\mu\text{m}$ . Pressões na câmara e poro-pressões foram medidas com uma resolução de  $1\text{kPa}$  utilizando-se transdutores com capacidade máxima de  $10\text{Bar}$  ( $1000\text{kPa}$ ). Para medidas de variação de volume empregou-se medidor automático desenvolvido na PUC-Rio, com resolução de  $0,05\text{cm}^3$ . Após o adensamento, se procedia ao cisalhamento sob uma velocidade constante de deslocamento axial de  $0,008\text{mm}/\text{min}$ .



**Figura 3.9:** Foto do Equipamento triaxial utilizado nos ensaios com os resíduos

### ***Ensaio Triaxial CIU***

De modo a se conseguir amostras com uma consistência mínima, suficiente para se moldar corpos de provas triaxiais, foi especialmente projetado e construída uma célula de PVC de grandes dimensões (diâmetro de cerca de  $210\text{mm}$  e altura de cerca de  $400\text{mm}$ ), contendo drenagem dupla (topo e base). O corpo da célula, bipartido longitudinalmente, foi adequadamente vedado ao longo de sua altura para evitar perda de lama lateralmente (Figura 3.10). Após foi realizado a moldagem dos corpos de provas, nas dimensões requeridas de  $38\text{mm}$  de diâmetro e  $76\text{mm}$  de altura, utilizando procedimentos usuais associados a moldagem de corpos de provas a partir de blocos de amostras indeformadas.

Após instalar os corpos de provas nas câmaras triaxiais, aplicou-se acréscimos de pressões confinantes de cerca de  $50\text{kPa}$ , monitorando-se a resposta da poro-pressão atuante na base dos corpos de prova. Considerou-se que as amostras encontravam-se saturadas quando se obteve um valor do parâmetro  $B$  de Skempton maior ou igual a  $98\%$ . O adensamento dos corpos de prova foi efetuado mantendo-se o valor da máxima pressão confinante utilizada no processo



de saturação e aplicando-se contra-pressão no topo e base dos mesmos através de sistemas de drenagem contendo o fluido utilizado na preparação de cada amostra (licor cáustico). Nesta fase, as seguintes pressões efetivas nominais de adensamento foram utilizadas: 50; 100 e 200kPa.



**Figura 3.10:** Foto da Célula desenvolvida para preparação de corpos de prova a partir da condição de lama.

### ***Ensaio Triaxial UU***

Para os ensaios triaxiais UU foram utilizadas as amostras indeformadas obtidas pelo Shelby com pistão estacionário. Foi utilizados corpos de prova com diâmetro 38 mm e altura 80 mm. A moldagem foi feita diretamente das amostras retiradas do amostrador, segundo procedimentos usuais em laboratório de solos, porém requerendo cuidados especiais face à baixa consistência do material.

Em cada estação, os ensaios foram executados sob tensões confinantes de 50 e 150 kPa, com medição de poro-pressão. Com 2 ensaios nas amostras nas condições de campo e 2 ensaios em amostras após percolação de 2 volumes de vazios de licor cáustico sob gradiente 1,0. Neste caso o fluxo se deu com uma tensão efetiva constante e igual àquela obtida após aplicação da tensão confinante.

### **3.2.4 Ensaio de condutividade hidráulica e adensamento**

#### ***Oedômetro CRD( Constant Rate of Displacement )***

Alguns ensaios de adensamento e permeabilidade foram efetuados utilizando-se um oedômetro de lamelas tipo CRD ( Constant Rate of Displacement) em amostras reconstituídas



com teor de sólidos simulando as condições de saída do lavador, ilustrado na Figura 3.11. Nestes ensaios as amostras de lama são carregadas a partir da imposição de uma velocidade constante de deslocamento, aplicada utilizando-se um sistema com velocidade de deslocamento controlada, no caso uma prensa triaxial com controle de velocidade em décimos de mm/min. No oedômetro de lamas CRD, a drenagem ocorre pelo topo do corpo de provas, que possui 210mm de diâmetro e 60mm de altura. Na sua base, não drenada, são monitoradas tanto as tensões totais, quanto as poro pressões, geradas durante o carregamento. Como resultado destes ensaios obtém-se, diretamente, relações índice de vazios – tensões efetivas; enquanto que as relações condutividade hidráulica-tensões efetivas são passíveis de serem estimadas.

A preparação das amostras de resíduos cáusticos foi realizada através de adição de massas adequadas de licor cáustico a sub-amostras com uma massa total de sólidos de cerca de 3.000g. Cada uma das sub-amostras preparadas foi colocada em um recipiente plástico com tampa, devidamente identificado. Em seguida foi feita uma homogeneização do material requerido dentro do recipiente, transferência para um balde de plástico com homogeneização do material dentro do balde, seguida de retirada de resíduo para determinação do teor de sólidos inicial e colocação da suspensão dentro do oedômetro até a borda da célula oedométrica com o auxílio do Becker, tomando-se cuidado para evitar a ocorrência de bolhas de ar no processo.



**Figura 3.11:** Oedômetro de lama tipo CRD

Após a colocação da amostra o oedômetro é fechado e o pistão de aplicação de carga posicionados, definindo-se uma velocidade constante de deslocamento que possibilitasse a determinação de valores de permeabilidade do resíduo (velocidade que propiciasse a geração de uma razão entre excesso de poro-pressão e tensão total resultantes do carregamento, conforme recomendado na literatura especializada para o caso de ensaios em solos). Nesses

ensaios, variou-se a velocidade entre os limites de 0,02 e 1,00mm/min. Em nenhum caso se conseguiu obter a razão entre poro-pressão e tensão total variando dentro dos limites desejados ao longo de todo o tempo de ensaio, sendo os melhores resultados obtidos às menores velocidades (menores que 0,2mm/min), principalmente ao final do ensaio quando o material passa a ter maior consistência. Com base nestas observações, optou-se por executar os ensaios definitivos a uma velocidade relativamente lenta, de 0,04mm/min. Com esta velocidade, o tempo de duração dos ensaios foi de cerca de 20h.

### ***Oedômetro de lama***

Estes ensaios foram executados utilizando oedômetro de lama especialmente projetados e fabricados no LGMA/PUC-Rio. Os mesmos acomodam amostras de grandes dimensões (213,5mm de diâmetro e 80mm de altura), passíveis de serem submetidos a carregamentos e descarregamentos em etapas sucessivas, a partir da aplicação de esforços verticais pré-definido e execução de ensaios de condutividade hidráulica de carga constante ou variável ao final de qualquer estágio de carga. As Figuras 3.12 e 3.13 mostram, respectivamente, uma vista da célula de adensamento desmontada e do equipamento em funcionamento. Pressões verticais são aplicadas através de um sistema de braço de alavanca devidamente calibrado. Como resultado do ensaio obtém-se, relações índice de vazios – tensões efetivas, relações coeficiente de adensamento  $C_v$  (computados utilizando o método de Taylor), coeficiente de variação volumétrica  $m_v$  e coeficiente de condutividade hidráulica – tensões efetivas.



**Figura 3.12:** Foto da célula de adensamento de lamas desenvolvida

As lamas, preparadas com os teores de sólidos especificados, foram inseridas no oedômetro com auxílio de uma concha até atingir uma altura de 80mm, medida com paquímetro. Em seguida o equipamento foi montado, saturando-se a parte superior do mesmo (acima da placa de transmissão de pressão vertical) com o fluído utilizado na preparação das amostras.



**Figura 3.13:** Foto da vista geral do equipamento desenvolvido.

Na seqüência procede-se a aplicação de carga no topo da amostra, suficiente para provocar o movimento do pistão e garantir o contato da placa de transmissão de pressão com a amostra, com aplicação em estágios de no mínimo 24h de pressões nominais de 5, 8, 20, 30, 60, 100, 200, 100, 60, 30, 20 e 8kPa, para em seguida executar os ensaios de condutividade hidráulica.

Ensaio de condutividade hidráulica foram realizados após cada um dos estágios de carregamento dos ensaios oedométricos. Ensaio de carga constante, usando um sistema Mariotti de aplicação de pressão, foram inicialmente realizados. Entretanto, devido ao tempo elevado de execução dos mesmos, optou-se por adotar, como rotina, ensaios de carga variável. Os ensaios de carga variável foram efetuados utilizando-se uma pipeta graduada como coluna de aplicação da carga variável, preenchida com o fluido correspondente ao do material sendo ensaiado. Conforme se pode ver na Figura 3.12, a pipeta foi conectada à base do oedômetro. Leituras de variação de carga (referidas à posição da válvula de topo do oedômetro) foram iniciadas após verificação de saída de fluido da célula oedométrica em proporção equivalente à descida da coluna de fluido na bureta graduada.

#### ***Permeâmetro de parede flexível – (PUC/ Rio)***

Alguns ensaios de condutividade hidráulica foram do tipo carga constante, executados em permeâmetros de parede flexível (especialmente desenvolvidos na PUC-Rio para uso com fluidos agressivos) em amostras simulando condições de saída do último lavador, em corpos de provas com dimensões nominais de 38mm de diâmetro e 78mm de altura, foram realizados

ensaios com tensões confinantes de 50, 100 e 200kPa. Como resultado deste ensaio obtém-se os valores de coeficientes de permeabilidade determinados a partir da aplicação da lei de Darcy.

Após instalar os corpos de provas envoltos em membranas na base do permeâmetro, os mesmos foram adensados para uma tensão efetiva de 50kPa. Em seguida saturados, utilizando-se o fluido empregado na preparação de cada amostra, iniciou-se o ensaio aplicando-se um gradiente hidráulico (através da aplicação de um diferencial de contra-pressão entre a base e o topo dos corpos de provas) de aproximadamente 6, mantendo-se um fluxo vertical ascendente constante. Nestes ensaios, todas as pressões foram controladas e monitoradas continuamente, utilizando-se transdutores de pressão com resolução de 0,5 kPa. Variações de volume do fluido entrando nos corpos de prova foram monitoradas utilizando-se medidores automáticos de variação de volume com resolução de 0,05cm<sup>3</sup>. Variações de volume do fluido saindo dos corpos de prova foram periodicamente monitoradas por meio de buretas graduadas, com resolução de 0,05cm<sup>3</sup>.

#### ***Permeametro de parede rígida –(UFRGS)***

Alguns ensaios de permeabilidade foram executados no Núcleo de Engenharia Geotécnica e Geo-ambiental da (UFRGS), realizados seguindo ASTM D 5856, utilizando permeâmetros do tipo Compaction mold permeameter. O permeâmetro desenvolvido na UFRGS foi especialmente projetado para medições da condutividade hidráulica em materiais contaminados. No desenvolvimento deste equipamento foram tomados os cuidados de utilizar materiais inertes ao ataque de produtos químicos e tóxicos, como a soda cáustica presente no resíduo de bauxita. A Figura 3.14 apresenta uma foto do conjunto do equipamento.

As amostras então foram moldadas no próprio cilindro de 15 cm de diâmetro por 15 cm de altura, deixando as mesmas curar durante vinte e quatro (24) horas. O início de cada ensaio de condutividade hidráulica aconteceu com a percolação de água da base para o topo da amostra, usando um gradiente hidráulico de 3, valor esse adotado em função das condições impostas pelo equipamento, este não apropriado para se trabalhar com lamas.

Os ensaios seguiam com a retirada de leituras regulares, medindo-se a altura do material permeante no reservatório, onde se pode verificar o nível do líquido permeante e juntamente com o valor do peso do líquido já permeado pode-se calcular o coeficiente de permeabilidade da amostra. Os ensaios tiveram continuidade até se obter a estabilidade do coeficiente, ou seja, no mínimo quatro valores de coeficientes de permeabilidade próximos. Depois de obtida

esta estabilidade, terminou-se os ensaios, isolando-se a amostra através do fechamento das válvulas e retirando-se a pressão aplicada.



**Figura 3.14:** Equipamento permeâmetro de parede rígida - UFRGS

### ***Equipamento de Adensamento – (UFRGS)***

Com o objetivo de determinar o grau de compressibilidade do resíduo, alguns ensaios foram realizados com equipamento de adensamento da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. O equipamento descreve o processo do ganho de tensão efetiva devido à dissipação do excesso de poro pressão do solo ao longo do tempo, em função da parte sólida mais a líquida. O ensaio oedométrico seguiu a norma NBR MB 3336/1990 para ensaios de adensamento. A Figura 3.15 apresenta uma foto lateral do equipamento.

Os corpos de provas foram obtidos a partir de amostras deformadas do resíduo, moldados em um anel com 2cm de altura e 5cm de diâmetro. As amostras foram inundadas, colocando uma pedra porosa saturada e um papel filtro saturado sobre a base e a parte superior do consolidômetro, o anel contendo o corpo de prova foi posicionado sobre a base, aparafusando a seguir o anel de fixação do consolidômetro. O extensômetro então foi ajustado para medição do deslocamento vertical. A seguir foi aplicado a pressão de assentamento de 6,25 KPa, e após se iniciou o carregamento através da colocação de pesos no pendural, de modo que a tensão vertical aplicada ao corpo de prova seja igual a 12,5 KPa, 25 KPa, 50 KPa, 100 KPa, 200 KPa e 400 KPa. No qual para cada acréscimo de carga foi realizado leituras do

deslocamento vertical nos seguintes tempos 7,5", 15", 30", 1'2",4',8',15',30',1h,2h,4h,8h e 24h. Completadas as leituras correspondentes ao máximo carregamento previsto, foi efetuado o descarregamento do corpo de prova, em estágios. Após, foram retirados os corpos de prova e determinados os parâmetros derivados do ensaio.



**Figura 3.15:** Equipamento de adensamento - UFRGS

### 3.2.5 Ensaio de piezocone

Os ensaios de piezocone foram executados de acordo com os procedimentos preconizados na norma MB 3406 da ABNT e/ou ASTM/D 3441. Os equipamentos e procedimentos obedecem ao padrão internacional (International Reference Test Procedure – IRTP/ISSMFE), cuja descrição é apreentada por Schnaid (2000). A seguir apresenta-se uma rápida descrição das especificações para equipamentos e procedimentos exigidos pelo contratante.

Todos os equipamentos eram próprios para utilização em ambiente cáustico, não sendo empregadas peças de alumínio e outros materiais sensíveis à soda cáustica, o efeito de variação de temperatura durante os ensaios foi devidamente compensado ou corrigido. O piezocone possuía 10 cm<sup>2</sup> de área de ponta e 150 cm<sup>2</sup> de área lateral da luva de atrito, medida de poropressões na ponta, base e luva, capacidades das células de carga de 60 kN (ponta) e 10 kN (atrito), as acurácias dos sistemas de leitura foram, no mínimo, iguais a 1,0 kPa e 0,5 kPa para resistência de ponta  $q_c$ , força de atrito  $f_s$  e poropressão de cravação  $u$ , respectivamente. A Figura 3.16 mostra fotos da área de disposição ARB#3, com equipamento de navegação e equipamento de piezocone em ensaio.





**Figura 3.16:** Equipamento piezocone no reservatório de resíduo.

O equipamento de cravação tem capacidade para 200 kN, a velocidade de cravação foi constante e igual a 20 mm/s, e para somente dois ensaios com uma velocidade de cravação de 2 mm/s. A sonda foi saturada antes do início de cada ensaio, nas profundidades especificadas, paralisação da penetração e determinação da poro pressão durante a dissipação até atingir a poro pressão estabilizada. Esta foi correspondente ao valor obtido após 3 leituras consecutivas, em intervalos de, no mínimo, 15 minutos, com o mesmo valor, admitido como o existente no resíduo antes da cravação do piezocone;

As leituras de poropressão durante a dissipação foram efetuadas a intervalos que permitiram a definição da curva para determinação de coeficientes de adensamento e, principalmente a determinação da poro pressão estabilizada, assumida como igual a existente antes da cravação do piezocone.

### 3.2.6 Palheta (Vane Test)

Os ensaios de palheta de campo foram executados de acordo com os procedimentos preconizados na norma NBR 10905 da ABNT.

O equipamento usado foi do tipo A (vane borer) de acordo com a NBR 10905. A acurácia da aparelhagem permitiu a determinação da resistência ao cisalhamento  $s_u$  do solo entre valores de 5 kPa e 100 kPa, com precisão superior a 10% do valor medido. Todos os equipamentos eram próprios para utilização em ambiente cáustico, não empregado peças de alumínio e outros materiais sensíveis à soda cáustica.

O pré-furo revestido foi paralisado, no mínimo, a 0,50m acima da profundidade prevista para ensaio, a palheta foi cravada estaticamente no terreno, quando necessário com auxílio de tripé de sondagem, após a cravação da palheta à frente da sapata de proteção, o torque foi aplicado com velocidade de rotação das hastes de  $(6 \pm 0,6)$  °/min, realizando-se leituras a cada 2° de rotação, registrando-se todas as leituras até atingir o torque máximo. A rotação foi continua até 10 leituras sucessivas com intervalo de 2° indicando queda no torque ou sua estabilização.

### **3.2.7 Ensaio de condutividade hidráulica em piezômetro Casagrande**

Os ensaios de condutividade hidráulica foram realizados com a utilização de um piezometro elétrico no interior dos tubos do piezômetro de Casagrande, para medição da carga hidráulica. Após a inserção, era realizada a conferência do correto posicionamento do equipamento na cota desejada, através da medição do cabo excedente. O piezômetro era então ligado à caixa leitora, após permanecer imerso por 30 minutos a fim de garantir a saturação do elemento poroso. O passo seguinte consistiu na obtenção das leituras de referência, executadas de forma a deixar a unidade leitora realizar leituras num período de 5 minutos a intervalos de 10 segundos. Uma vez decorrido este tempo, iniciava-se o ensaio de fluxo descendente, inserindo-se 100 mililitros de água no piezômetro Casagrande. Os ensaios foram realizados deixando-se o equipamento executar leituras até que as mesmas estabilizassem após transcorridos, em média, 150 minutos. Uma vez finalizado o ensaio no campo, transferia-se a unidade leitora para o laboratório para descarregar os dados em um computador. O ensaio era considerado satisfatório, se, ao comparar as leituras de estabilização com as leituras de referência, obtidas no final e no início do ensaio respectivamente, se observasse a igualdade das mesmas, indicando a estabilização completa das leituras.

### **3.2.8 Comentários finais**

Ensaio de laboratório foram realizados tomando-se os cuidados de não utilizar qualquer tipo de material não compatível com soda cáustica, uma vez que o fluído usado para a realização dos ensaios era o próprio licor cáustico. Os mesmos cuidados foram verificados na realização dos ensaios de campo, próprios para utilização em ambiente cáustico, não sendo empregadas peças de alumínio e outros materiais sensíveis á soda cáustica.



## **4 ENSAIOS DE LABORATÓRIO: APRESENTAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS**

### **4.1 INTRODUÇÃO**

Essa dissertação tem por objetivo principal a interpretação de ensaios de piezocone em resíduos de bauxita. Para essa análise foi necessária a utilização de resultados de ensaios de laboratório utilizados para caracterizar as propriedades físico-químicas e mineralógicas do resíduo de forma a subsidiar a interpretação dos resultados de piezocone. A caracterização do resíduo em laboratório objetiva a determinação da composição, distribuição textural, propriedades de resistência, deformabilidade e condutividade hidráulica de resíduos de bauxita depositados em forma de lama.

Vários fatores determinam a grande variabilidade das características do resíduo no depósito. A segregação é uma característica importante e refere-se a tendência de uma parte da fração sólida, sedimentar, criando um gradiente de concentração dentro do reservatório apresentando efeito direto na distribuição granulométrica do depósito. O caminho de deposição dos resíduos sujeita a processos de segregação provoca a seleção de partículas que são depositadas em diferentes locais ao longo do caminho, gerando considerável variabilidade estrutural, alterando os parâmetros de resistência, deformabilidade e permeabilidade. Nas áreas de resíduo de bauxita da ALUMAR tal fato é visível pela concentração da fração arenosa junto às calhas de lançamento e ao redor das torres.

As relações constitutivas do resíduo, ou seja, a condutividade hidráulica e a compressibilidade relacionada com o índice de vazios, governam o comportamento dos reservatórios durante o enchimento. No lançamento dos resíduos, constituídos de grande porcentagem de partículas finas e elevado teor de umidade, inicia-se um processo de deposição que envolve sedimentação em conjunto com o adensamento por peso próprio do material, resultando em grandes deformações. Logo o conhecimento das leis de compressibilidade e permeabilidade nestas condições é uma etapa importante da pesquisa.

Embora se reconhecendo que este ambiente complexo de deposição não pode ser reproduzido no laboratório, ensaios de laboratório são essenciais na caracterização do resíduo e no entendimento de alguns fenômenos físico-químicos que regem seu comportamento.

Neste capítulo estão apresentados os resultados obtidos nas campanhas experimentais em laboratório descritas no Capítulo 3. Foi utilizado resíduo do processamento da bauxita em dois reservatórios de deposição, ARB#2 e ARB#3. Os pontos de coleta de amostras foram distribuídas em estações ao longo da área, em diversas profundidades e distâncias dos pontos de lançamento do resíduo, além de alguns ensaios complementares simulando condições de saída do resíduo do lavador, e ensaios em amostras deformadas da área ARB#3.

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA

A caracterização geotécnica consistiu de ensaios de granulometria, densidade real dos grãos, pesos específicos, umidade natural. A avaliação foi feita em função da posição de coleta de amostras no depósito, considerando a distância dos pontos de despejo do resíduo e a profundidade das amostras.

### 4.2.1 Determinação das curvas granulométricas

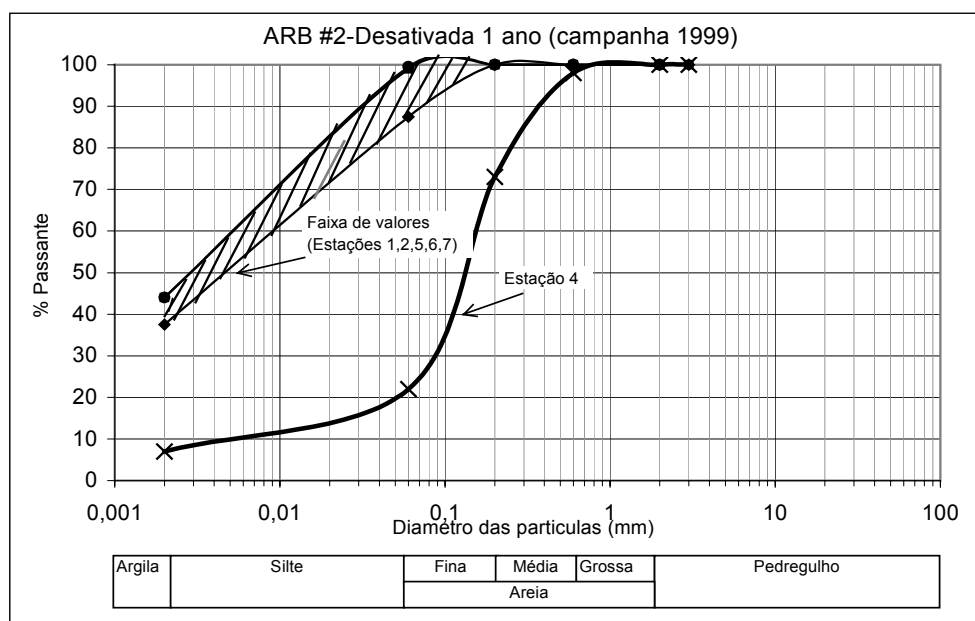
A determinação das curvas granulométricas é fundamental para a realização de qualquer trabalho na engenharia. Isso porque o tamanho e a distribuição das partículas condiciona um grande número de propriedades geotécnicas.

Pelo fato dos pontos de descarga do resíduo não serem simultâneos, situando-se em calhas laterais e torres distribuídas no centro dos reservatórios, as partículas mais grossas tendem a se depositar formando praias, enquanto as partículas finas e licor tendem a se concentrar na parte final do depósito, formando muitas vezes lagoas. Com a finalidade de avaliar este comportamento, foi feita uma avaliação granulométrica do resíduo em quatro diferentes campanhas de ensaios realizadas nos reservatórios de deposição, sendo que essas campanhas possuem pontos de sondagem situados próximos e outros distantes das torres e calhas de

lançamento do resíduo. Um croqui com a localização dos furos de sondagem foi anteriormente apresentado nas Figuras 3.4 e 3.5 no Capítulo 3.

**Campanha de 1999**

A Figura 4.1 apresenta curva granulométrica obtida de amostras superficiais semideformadas do reservatório ARB# 2 no ano de 1999, com a área desativada há mais de um ano e apenas a operação convencional. Observando a figura é evidente a característica predominantemente arenosa na estação 4, com cerca de 80 % do material retido na peneira #200, ela está situada próxima a torre de despejo central. As estações 1 e 2 estão situadas próximas a calhas de despejo, mas não apresentaram diferença em relação as demais. A estação 7 está localizada na área com resíduo mais mole junto á antiga estação de bombeamento e a estação 6 na área de resíduo úmido junto ao descarte de licor da ARB#1; ambas não apresentaram distinção das demais estações localizadas em torno de 100 metros dos pontos de despejo, compreendendo assim a uma faixa de 37 a 44% < 2 $\mu$  e 90 a 100% < # 200, classificado com um silte-argiloso.

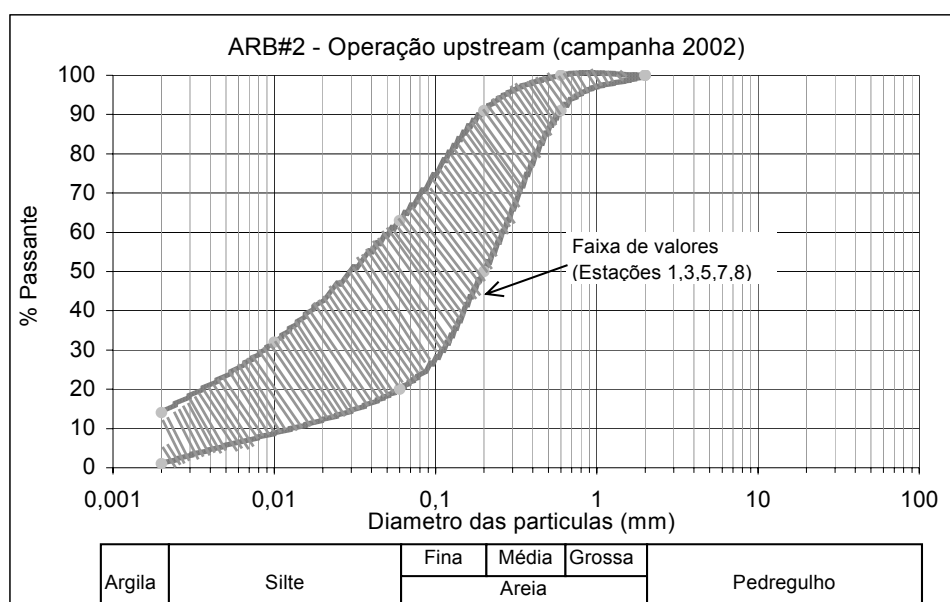


**Figura 4.1:** Curvas granulométricas do resíduo, ARB# 2 - desativada a 1 ano (campanha 1999).

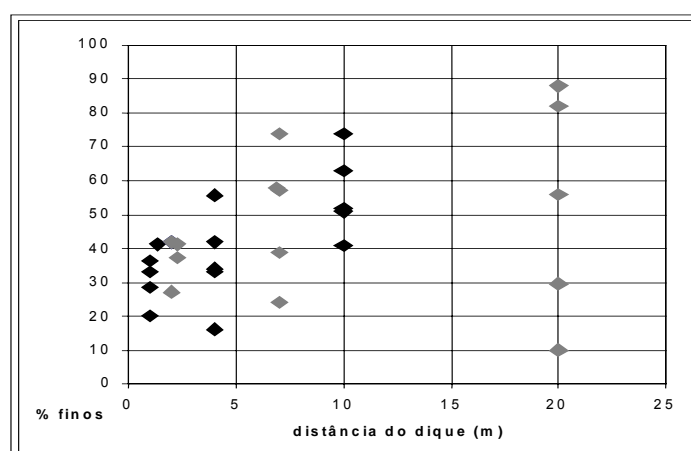
**Campanha de 2002**

Após ter iniciado a operação de alteamentos por montante na ARB# 2 no ano de 2002, com um acréscimo de cota de 2,5 metros na cota em relação ao resíduo antigo, foi realizada mais uma análise da granulometria em amostras superficiais deformadas nas estações 1,3,5,7,8.

Nesses ensaios foi feita uma avaliação na variação da porcentagem de finos em relação a distância do dique de alteamento, sendo as amostras coletadas na superfície, com variação de até 20 metros ao longo do ponto de lançamento. O material ensaiado apresentou uma faixa granulométrica de até 14% < 2 $\mu$  e 20 a 63% < # 200, compreendendo uma faixa de resíduo silte-arenoso e areno-siltoso (Figura 4.2). Observando a Figura 4.3 se percebe a tendência de aumento de porcentagem de finos à medida que aumenta a distância do ponto de lançamento, na amostra mais distante. A 20m do dique, houve maior dispersão no tamanho das partículas, o que pode ser creditado à interferência com o lançamento de resíduos por meio de mangotes flexíveis.



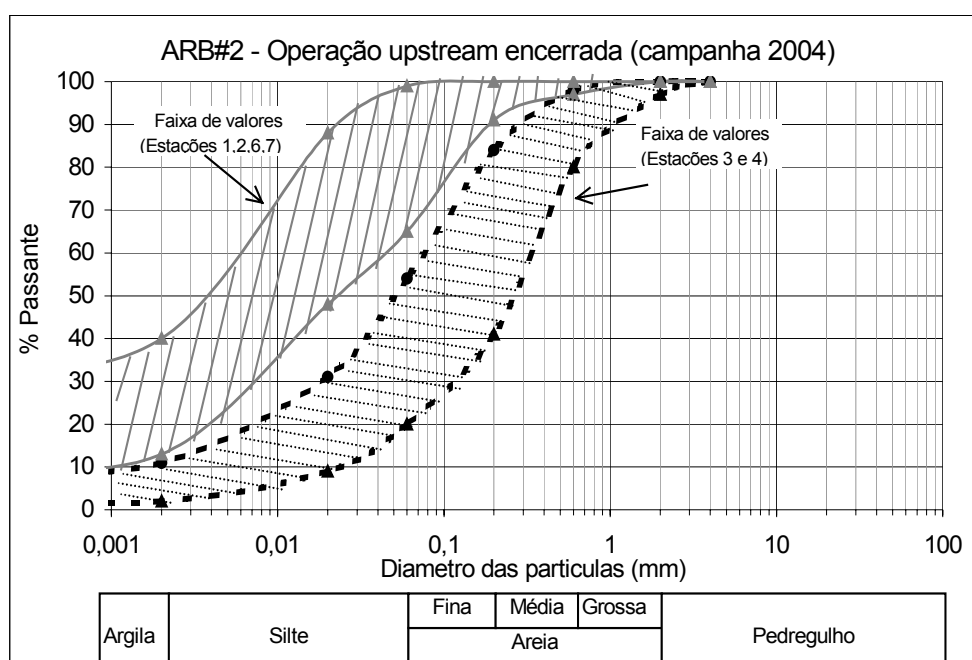
**Figura 4.2:** Curvas granulométricas do resíduo, ARB#2 com operação de alteamentos a montante (campanha 2002).



**Figura 4.3:** Variação da porcentagem de finos com a distância do dique (campanha 2002).

**Campanha de 2004**

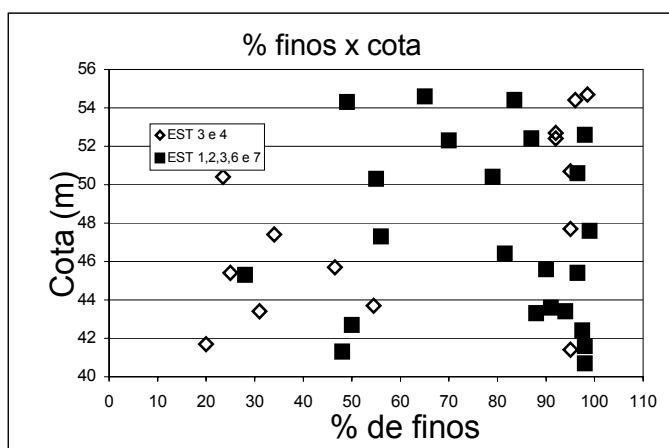
Com a disposição pelo método de alteamentos a montante encerrada e com uma cota em torno de 5 metros acima do resíduo antigo, uma nova campanha de ensaios foi realizada em amostras deformadas retiradas ao longo da profundidade. Nesta análise as curvas granulométricas permitiram uma distinção entre os materiais no entorno das torres de lançamento (estações 3 e 4, abaixo da cota 50,00m- resíduo antigo) essencialmente arenosos com uma faixa de 20 a 54% < #200, e as demais amostras, tanto na pilha de alteamentos quanto no resíduo antigo em que se tem entre 13 e 40% < 2 $\mu$  e de 65 a 100% < #200, sendo classificando como um material silte-argiloso (Figura 4.4). A Figura 4.5 apresenta os valores de porcentagem de finos contra a profundidade, onde se distinguem as estações 3 e 4 abaixo da cota 50,00m.



**Figura 4.4:** Curvas granulométricas do resíduo, ARB#2 - operação upstream encerrada (campanha 2004).

Uma comparação das estações próximas e das estações distantes das torres de despejo evidencia a influência da segregação na distribuição granulométrica. O fluxo do resíduo afetado pelo processo de segregação provoca a seleção de partículas que são depositadas em diferentes locais ao longo do caminho, gerando a variabilidade dos resultados como apresentado na Tabela 4.1 e na Figura 4.6. Em pontos localizados perto das torres de despejo, o resíduo pode ser classificado como uma areia-siltosa e silte-arenoso, já no restante do

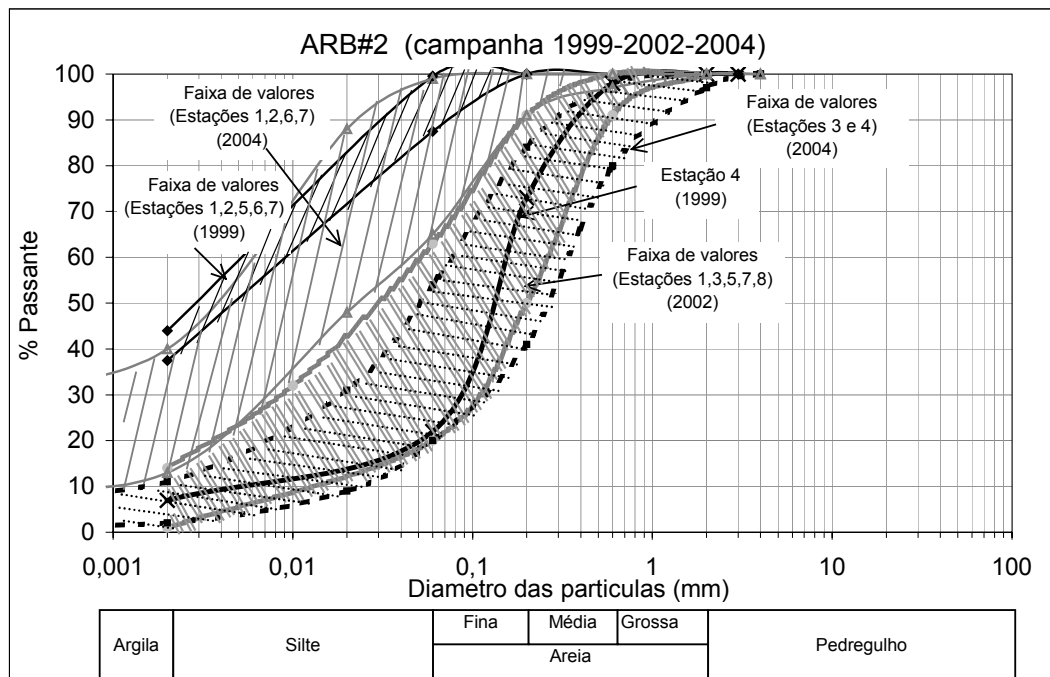
reservatório tem - se um material silte-argiloso. Cabe ressaltar que a análise granulométrica da campanha de 2002 é mais realista para o resíduo. Na campanha de 1999 provavelmente se teve erro nos ensaios (Costa Filho, 2006).



**Figura 4.5:** Variação da porcentagem de finos com a profundidade (campanha 2004).

**Tabela 4.1:** Média da distribuição granulométrica do resíduo nas diferentes campanhas de ensaio.

Situação	Ano	Estações	Dist. dos pontos de despejo(m)	Cota (m)	Valores médios/ máximos e mínimos				
					argila(%)	silte(%)	Areia fina(%)	Areia média(%)	Areia Grossa(%)
ARB#2 Desativada (1 ano) (amostras superficiais)	1999	EST 1,2,5,6,7	>100	~50,0	41	54	5	0	0
					38_44	43_62	2_13	0	0
	1999	EST 4	~20	51,30	7	15	51	15	2
ARB#2 Operação upstream (amostras superficiais)	2002	EST 1,3,5,7,8	0-20	53,00	5	32	40	20	3
					2_14	15_58	20_60	0_40	2_7
ARB#2 upstream encamado (amostras ao longo da profundidade)	2004	EST 1,2,6,7	> 100	55,50	25	54	13	8	0
					11_31	27_76	2_25	3_11	0
	2004	EST 3,4	~20	55,5	2_11	20_38	18_40	14_43	2_16
					6	26	30	27	11

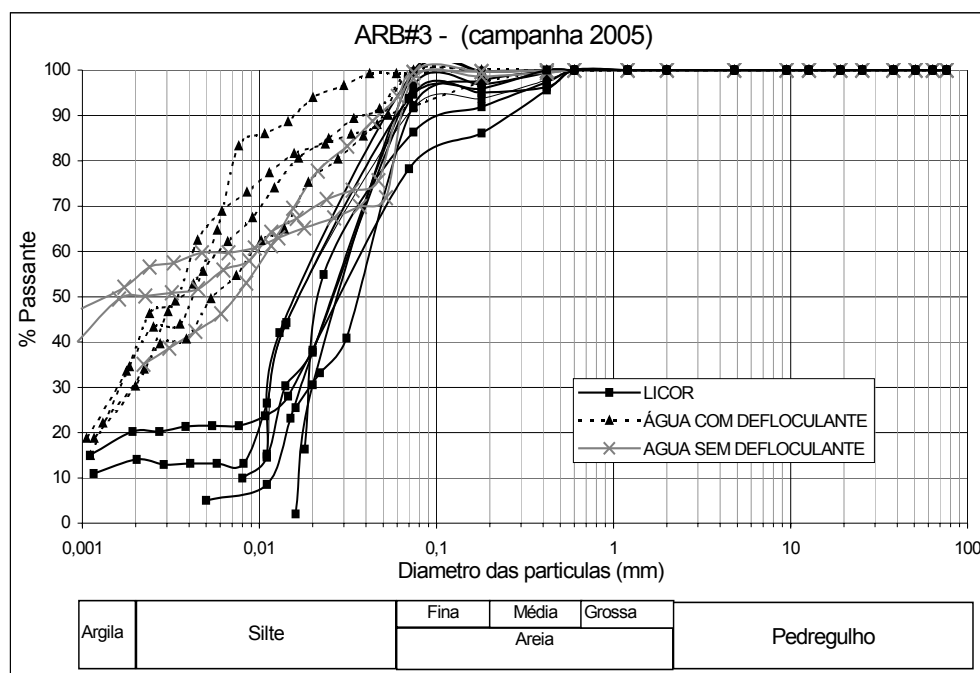


**Figura 4.6:** Média da distribuição granulométrica do resíduo nas diferentes campanhas de ensaio da ARB#2.

**Campanha de 2005**

No reservatório ARB#3, a análise granulométrica em amostras deformadas contemplou a avaliação das diferenças entre o comportamento dos resíduos em água com defloculante ou solução ABNT (hexametáfosfato de sódio), água sem defloculante e licor natural do rejeito (soro cáustico). O valor médio de estações que representam um comportamento geral está apresentado na Figura 4.7 e o valor médio dos resultados de cada solução utilizada está mostrado na Tabela 4.2.

Na avaliação dos resultados se percebe que o uso das distintas soluções na realização dos ensaios influenciou nas curvas granulométricas obtidas. A ação do defloculante é mais evidente nas frações superiores a 0,006 mm (silte), nas quais observa-se uma tendência de floculação das partículas, enquanto nas frações menores há pouca sensibilidade ao uso do hexametáfosfato de sódio. O licor tem uma ação floculante, a qual evidentemente atua na fração argila, levando o grânulo floculado ao tamanho de fração silte como pode ser evidenciado com o aumento da fração silte em 40% em relação ao ensaio feito com água.



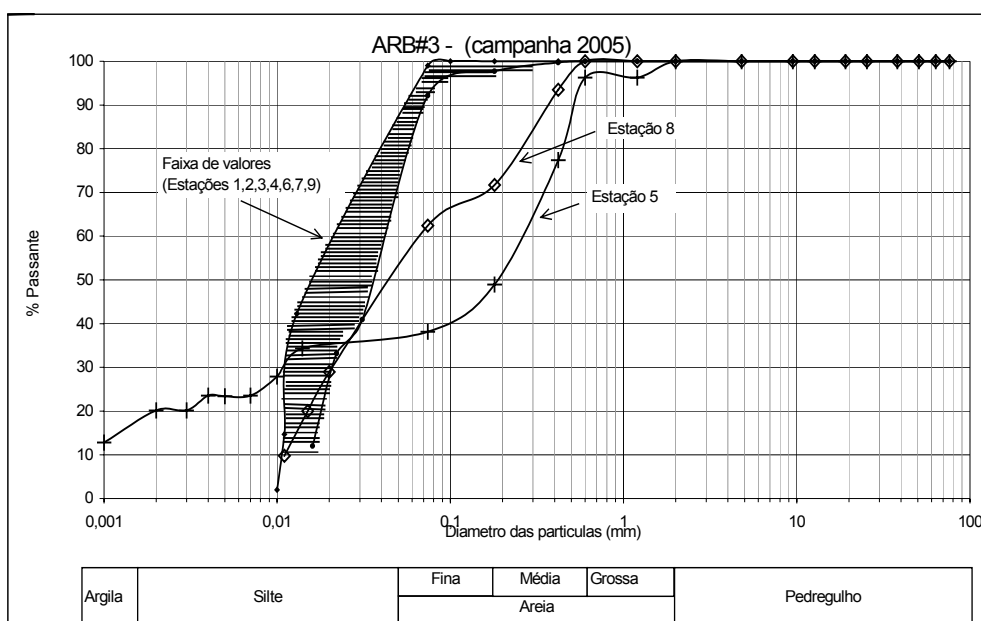
**Figura 4.7:** Curvas granulométricas do resíduo obtidas para diferentes soluções (campanha 2005).

**Tabela 4.2:** Valores para cada solução utilizada na distribuição granulométrica do resíduo.

Resíduo	Argila (%)	Silte (%)	Areia fina (%)
Água c/ defloculante	36	56	8
Água s/ defloculante	44	39	17
Licor	17	77	6

Amostras retiradas na superfície do resíduo foram utilizadas em ensaios de granulometria com o licor caustico como meio dispersor, sendo que nessas amostras foi feita uma avaliação do processo de segregação das partículas ( com uso de licor cáustico) apresentada na Figura 4.8 e uma média de valores na Tabela 4.3. A estação 5 localiza-se no dique Sul, próxima a uma calha de lançamento e apresentou um material mais arenoso. Em termos de granulometria, apenas o material da estação 5 e, menos significativamente, o material da estação 8 apresentaram um comportamento distinto do material das demais estações que estão localizadas distantes dos pontos de lançamento do resíduo.

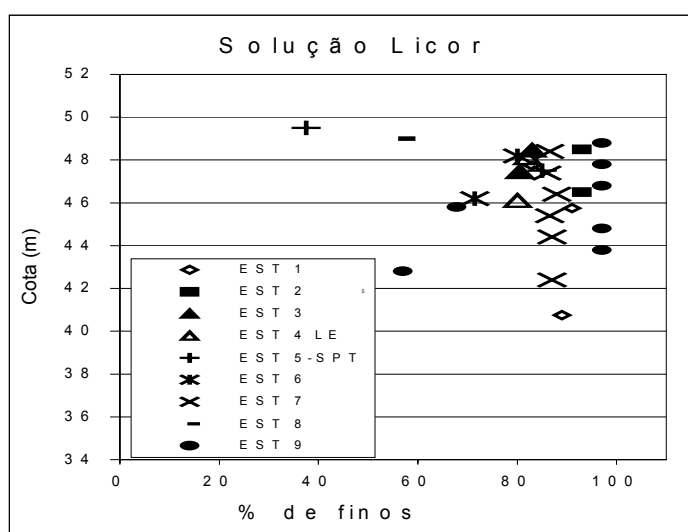




**Figura 4.8:** Granulometria do resíduo obtidas para diferentes estações, (solução: licor cáustico)- ABR#3 (campanha 2005).

**Tabela 4.3:** Distribuição granulométrica para cada estação de ensaio - ABR#3 (campanha 2005).

Estações	Argila (%)	Silte (%)	Areia fina (%)	Areia média (%)	Areia grossa (%)
1,2,3,4 LE,6,7,9	0	90	7	3	0
8	0	60	15	25	0
5	20	17	13	47	3



**Figura 4.9:** Variação da porcentagem de finos com a profundidade.

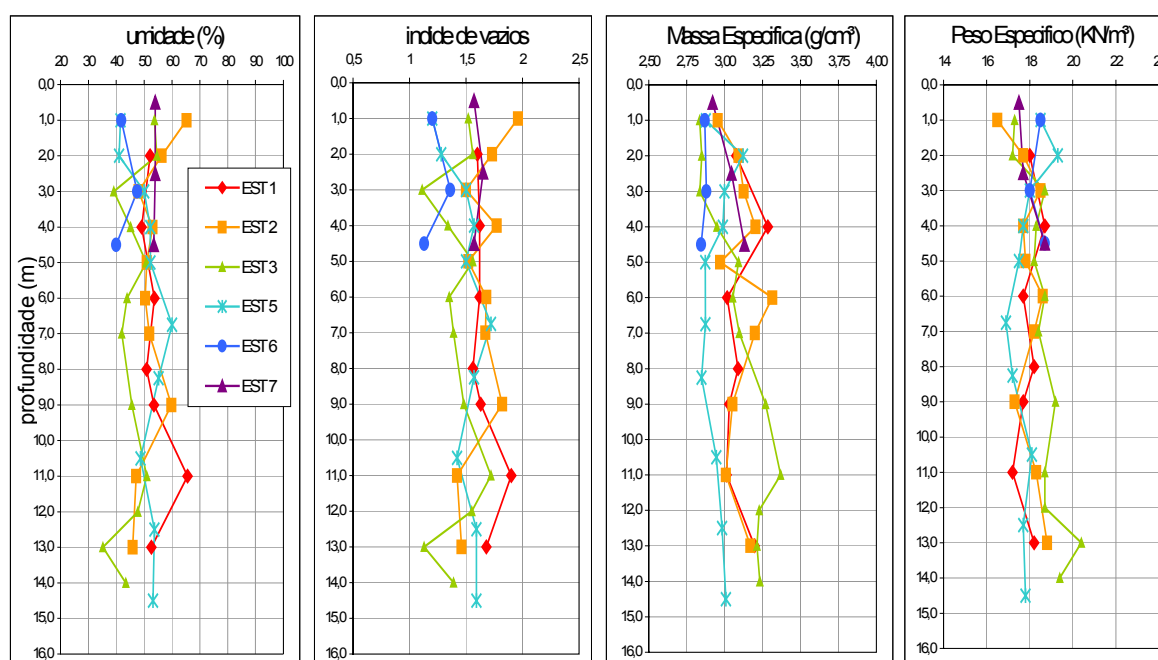
Também foi observado nessa campanha a variação de percentagem de finos com a profundidade nos ensaios realizados com licor caustico. Percebe-se neste local um material relativamente homogêneo com algumas lentes de material mais arenoso (Figura 4.9).

#### 4.2.2 Determinação dos índices físicos

Como a distribuição granulométrica, os índices físicos condicionam as propriedades de materiais geotécnicos. Os índices físicos apresentaram variações consideráveis em função do local de retirada das amostras, coletadas nos mesmos pontos da análise granulométrica.

##### *Campanha de 1999*

Na primeira campanha de ensaios foram determinados os valores de peso específico, massa específica, teor de umidade e índices de vazios. Os ensaios foram realizados em amostras semi-deformadas retiradas do reservatório ARB# 2. A área estava desativada a mais de um ano e com apenas a operação convencional. A Figura 4.10, apresenta os resultados plotados contra a profundidade, para as estações 1,2,3,4,5,6 e 7.



**Figura 4.10:** Variação dos índices físicos com a profundidade, ARB# 2 desativada a 1 ano (campanha 1999).

Observa-se alguma dispersão dos parâmetros com a profundidade, refletindo os efeitos combinados de adensamento do resíduo, nível d'água já rebaixado no seu interior e ressecamento superficial. Mesmo para a estação 6 e 7, em material mais mole e cujas investigações se restringiram a 5m de profundidade, os valores determinados não resultaram em um comportamento distinto das demais áreas. Entretanto para a estação 4 os parâmetros geotécnicos são completamente discrepantes, em função da sua granulometria essencialmente arenosa.

### ***Campanha de 2002***

Após ter iniciado a operação de alteamento a montante na ARB# 2, com um acréscimo de 2,5 metros na cota em relação ao resíduo antigo, uma nova campanha de ensaios foi realizada para determinação dos índices físicos. Essa campanha envolveu a retirada de amostras indeformadas na superfície do depósito distribuídos em até 20 metros do dique e também em amostras deformadas ao longo da profundidade, nas estações 1,2,3,4,5,6,7 e 8.

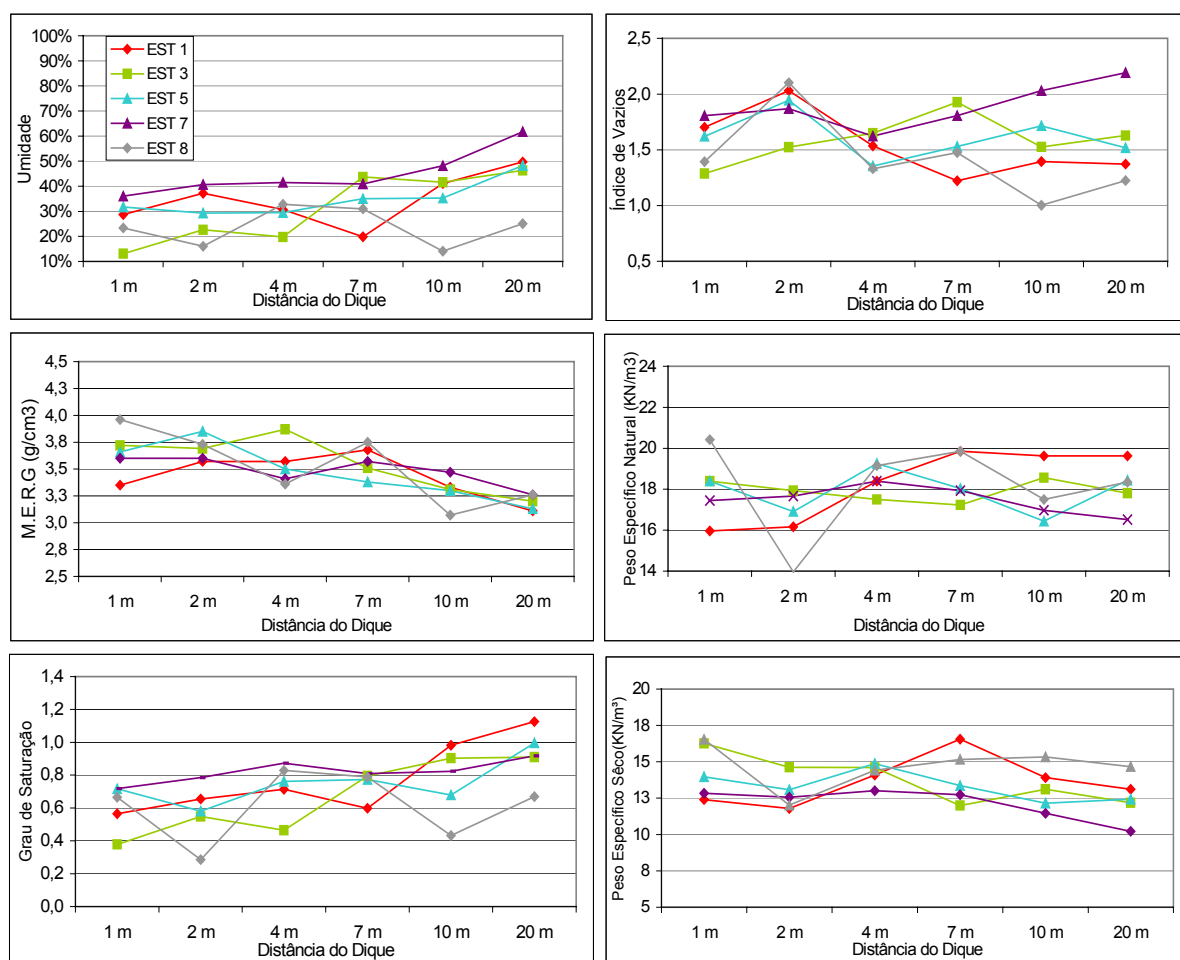
Para as amostras coletadas na superfície a Figura 4.11 apresenta a respectiva variação de valores de umidade, peso específico e massa específica determinados em laboratório e peso específico seco, índices de vazios e grau de saturação calculados a partir destes. O valor médio encontrado para o peso específico natural foi de  $18 \text{ KN/m}^3$ , sendo a variação em função da distância do dique errática, principalmente até os 7 m de distância. O peso específico seco, entretanto, decresce com a distância, notadamente a 10 e 20 metros, em decorrência do aumento no teor de finos.

Observa-se que o teor de umidade apresenta variação com a distância do dique, aumentando com o teor de finos do material, sendo o valor médio de umidade na superfície de 35%. A massa específica dos grãos decresce ligeiramente à medida que o material se torna mais fino. O valor médio encontrado foi de  $3,5 \text{ g/cm}^3$ . O valor médio de índice de vazios é de 1,52 com valores um pouco acima a profundidade de 2 metros, em decorrência do processo de segregação hidráulica.

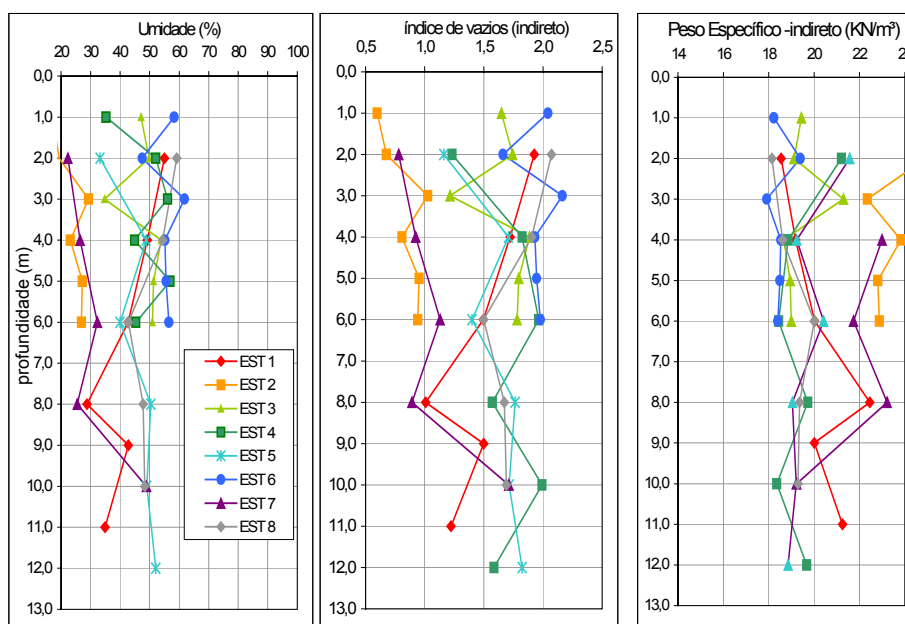
Nessa campanha de 2002, foi também realizada a determinação de umidade nas amostras deformadas, coletada em sondagens à percussão ao longo da profundidade. A partir destes valores de umidade e do valor médio da massa específica determinados na superfície, foram

calculados os valores de índice de vazios e peso específico total. Os resultados estão apresentados na Figura 4.12.

Nas estações 1,3,4, e 6 não se observa variação significativa dos índices físicos com a profundidade, indicando uma certa homogeneidade do material ao longo da profundidade. Já as estações 2 e 7 apresentaram valores distintos das outras estações, com valores de umidade e índices de vazios inferiores e valores mais elevados de peso específico, devido a redução nos teores de finos.



**Figura 4.11:** Variação dos índices físicos ao longo de 20 metros distantes do dique -ARB#2 com operação upstream (campanha 2002).



**Figura 4.12:** Variação dos índices físicos ao longo da profundidade - ARB#2 (campanha 2002).

### **Campanha de 2004**

Com a disposição pelo método de alteamentos a montante encerrada e com um acréscimo na cota de 5 metros em relação ao resíduo antigo de 50 metros de altura, uma nova campanha de ensaios foi realizada em amostras semideformadas nas estações 1,2,3,4,6 e 7.

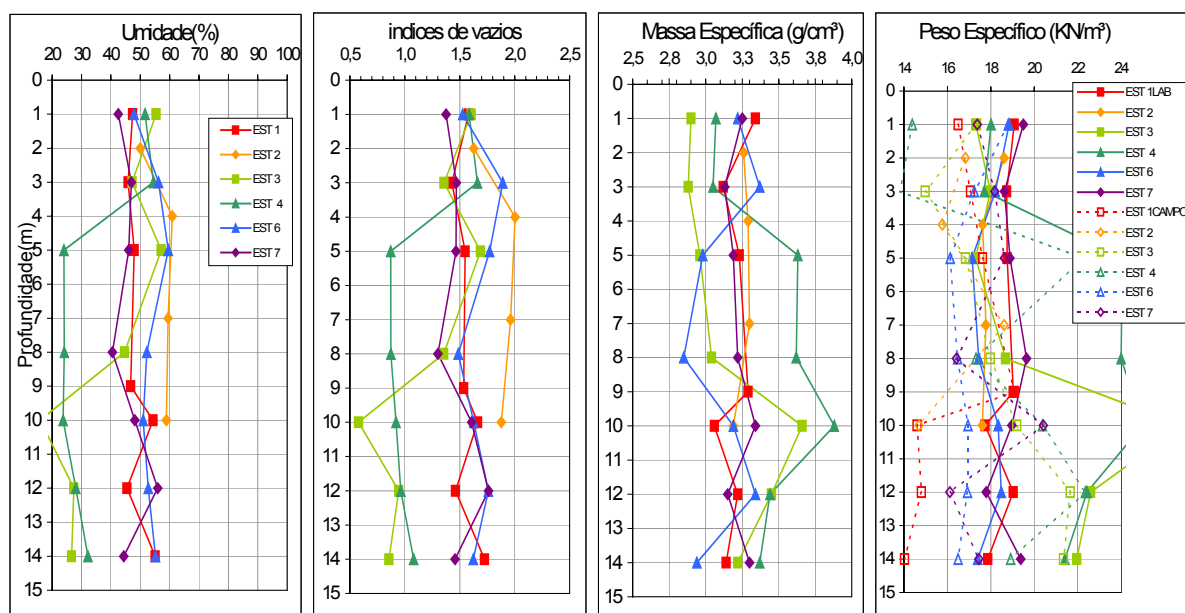
O peso específico do resíduo foi obtido diretamente a partir dos volumes medidos em campo, e indiretamente, a partir da umidade determinada em laboratório. Os resultados de laboratório são considerados mais confiáveis e apresentaram valores cerca de 11% superiores aos obtidos em campo. O valor médio encontrado para os pesos específicos de laboratório foi de 19,4 KN/m<sup>3</sup>. Conforme mostrado na Figura 4.13, não há uma tendência de variação no peso específico com a profundidade, nem entre o resíduo mais recente (operação alteamento a montante) das estações 2,3 e 4 e o restante das estações 1, 6 e 7.

Conforme esperado, pelos resultados da análise granulométrica, os valores de peso específico das amostras retiradas das estações 3 e 4 no resíduo antigo, localizadas próximas às torres de lançamento, apresentaram-se superiores aos outros, visto que consistem de materiais mais arenosos. Valores da ordem de 24 KN/ m<sup>3</sup> foram determinados.

A massa específica dos grãos obtidos das amostras de resíduo afastados das torres centrais variou entre 3,0 e 3,3 g/cm<sup>3</sup>. No material mais arenoso obtiveram-se valores superiores, entre

3,3 e 3,75 g/cm<sup>3</sup>, o que de certa forma explica os altos valores de peso específico dos resíduos comentados anteriormente.

O teor de umidade médio para o resíduo fino é de 50%, sendo que nas estações 3 e 4 o teor de umidade, a partir da cota 50, diminui para cerca de 25%. O mesmo comportamento ocorre com o índice de vazios, onde o valor médio encontra-se na faixa de 1,60, enquanto que nas estações 3 e 4 o índice de vazios, a partir da cota 50, diminui para cerca de 0,9. Os menores valores de índice de vazios e de teor de umidade correspondem ao resíduo arenoso. Observa-se, tal como na determinação de peso específico, pouca ou nenhuma variação destes parâmetros com a profundidade.



**Figura 4.13:** Variação dos índices físicos ao longo da profundidade - ARB#2 operação upstream encerrada (campanha 2004)

**Campanha de 2005**

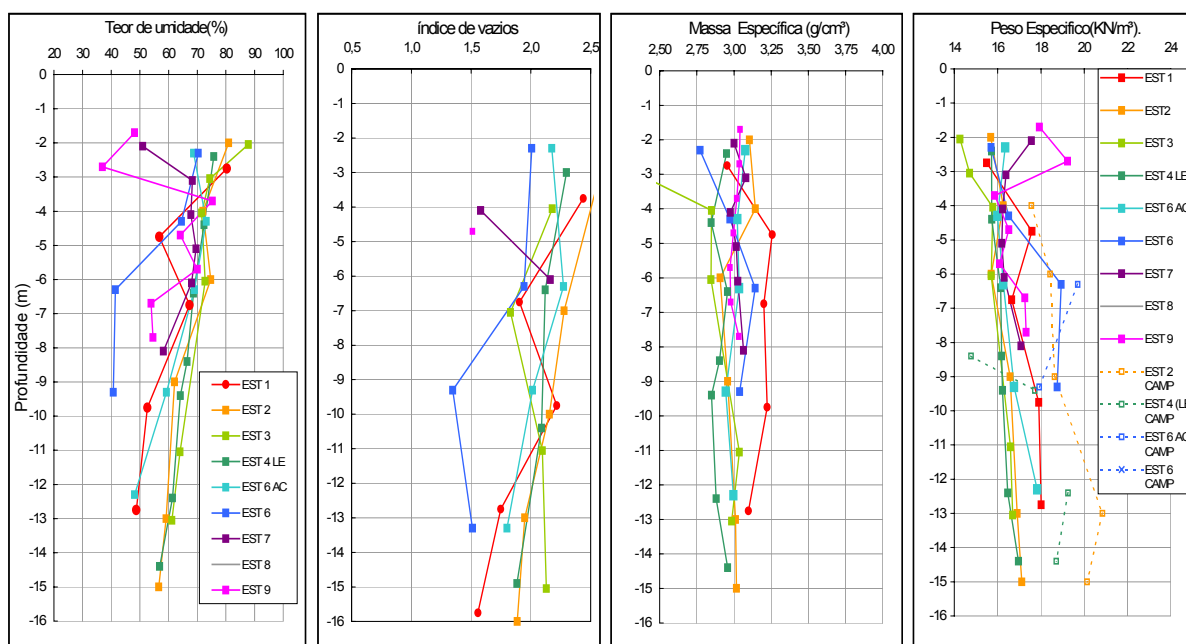
No ano de 2005, no reservatório da ARB#3, foi realizada uma análise dos índices físicos em amostras deformadas. A Figura 4.14 apresenta, respectivamente, os gráficos de umidade, índice de vazios, peso específico e massa específica ao longo da profundidade.

Com exceção das amostras retiradas da estação 5, que apresentaram valores de umidade natural em torno de 25%, as demais amostras apresentaram um teor de umidade médio de 60%. Estes resultados indicam a presença de um material mais arenoso na estação 5. Analisando separadamente as amostras de cada estação, observa-se uma tendência de redução

do teor de umidade com a profundidade. O mesmo comportamento pode ser observado em relação ao índice de vazios e pesos específicos que apresenta um pequeno aumento com a profundidade.

O peso específico do resíduo foi obtido indiretamente, a partir da umidade determinada em laboratório. O valor médio encontrado para os pesos específicos foi de  $17,5\text{kN/m}^3$ , como indica a Figura 4.14. Observa-se que não há diferença de valor para as amostras retiradas das estações 7, 8 e 9, pelo fato destas estações apresentarem hidrato depositado. Valores superiores de peso específico, da ordem de  $20\text{kN/m}^3$ , foram determinados na estação 5, localizada próximo ao bordo do dique Sul, em material arenoso.

Nota-se que a massa específica, determinado nas amostras de resíduo, variou entre 2,8 e  $3,2\text{g/cm}^3$ , com um valor médio da ordem de  $3\text{ g/cm}^3$ . Não se observa variação de comportamento com a profundidade. Valores atípicos, da ordem de  $23\text{kN/m}^3$ , foram registrados na estação 3, mas foram desconsiderados.



**Figura 4.14:** Variação dos índices físicos ao longo da profundidade - ABR#3 (campanha 2005).

A Tabela 4.4 apresenta um resumo dos resultados dos índices físicos com a média de cada estação e por fim a média e o desvio padrão das 4 campanhas de ensaio realizadas respectivamente nos anos de 1999, com a área desativada a mais de um ano e com apenas a operação convencional, em 2002, com a área recebendo resíduo pelo método de alteamento a montante com uma cota em torno de 2,5 metros acima do resíduo antigo, e em 2004 quando a

área encontrava-se com a disposição pelo método de alteamento a montante encerrada e com uma cota de 5 metros acima do resíduo antigo. Finalmente, apresenta-se a campanha de 2005 realizada na ARB#3 com a área em fase de encerramento do método de disposição convencional.

A posição das torres em relação ao ponto de lançamento do resíduo é o principal fator na diferença nos índices físicos, pelo já comentado processo de segregação das partículas. Pode-se observar que as estações mais próximas dos pontos de lançamento apresentam uma caracterização diferente das demais, com um menor índice de vazios e menor umidade, no caso de todas as estações da campanha de 2002, nas estações 3 e 4 da campanha de 2004 e na estação 5 da campanha de 2005.

**Tabela 4.4:** Resumos dos resultados de caracterização

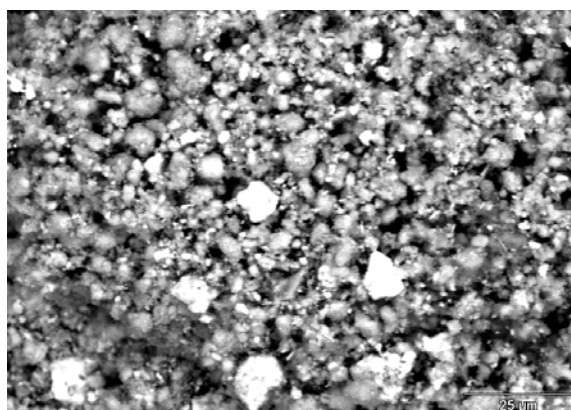
Situação	Ano	Estação	Massa Esp. g/cm <sup>3</sup>	Peso Esp KN/m <sup>3</sup>	e médio	W médio (%)
ARB#2 Desativada (1 ano)	1999	1	3,10	17,96	1,66	53,94
		2	3,10	17,94	1,65	52,87
		3	3,10	18,64	1,42	45,93
		5	2,95	17,87	1,5	50,4
		6	2,87	18,4	1,23	43,1
		7	3,03	17,56	1,59	53,83
		Valor médio			3,03	18,06
ARB#2 Operação upstream	2002	1	3,5	20,2	1,48	42,23
		2	3,5	23,7	0,83	23,81
		3	3,5	19,4	1,68	47,95
		4	3,5	19,4	1,69	48,42
		5	3,5	19,7	1,60	45,6
		6	3,5	18,5	1,95	55,81
		7	3,5	22,2	1,08	31,08
		8	3,5	19,1	1,77	50,5
Valor médio			3,5	20,2	1,51	43,18
ARB#2 upstream encerrado	2004	1	3,2	18,60	1,56	48,96
		2	3,26	17,90	1,87	57,30
		3	3,16	20,38	1,20	39,18
		4	3,44	21,80	1,14	34,03
		6	3,03	17,98	1,67	53,53
		7	3,22	18,97	1,49	46,35
Valor médio			3,23	19,17	1,49	46,56
ABR#3 Operação normal em encerramento	2005	1	3,15	17,12	1,92	61,16
		2	3,02	16,37	2,05	67,58
		3	2,75	15,62	1,96	71,95
		4	2,90	16,20	1,93	66,54
		5	3,03	21,26	0,76	25,40
		6	3,00	17,42	1,83	61,25
		7	3,03	16,62	1,93	63,83
		8	3,08	17,78	1,56	50,57
		9	3,01	17,17	1,73	57,57
Valor médio			3,18	18,68	1,57	50,02
Desvio Padrão			0,232	1,87	0,83	11,78
Coeficiente de Variação			7,3%	10%	53%	23,5%



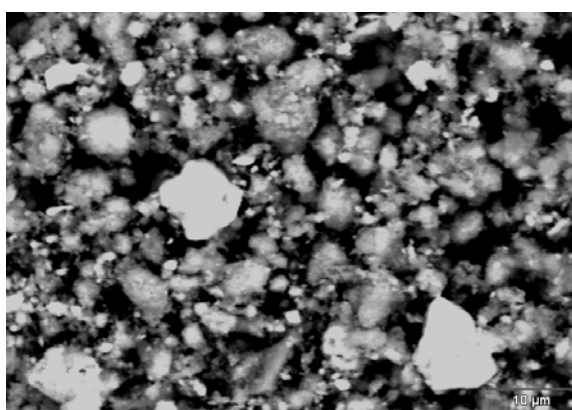
### 4.2.3 Análise físico-química-mineralógica

Foi realizada análise por MEV em uma amostra de resíduo seco, retirada na estação 1, em torno de 5 metros de profundidade no reservatório ARB#3. Nas Figuras 4.15 e 4.16 são apresentados os resultados obtidos pelo MEV. Observa-se nos dados que se trata de um resíduo com grãos relativamente homogêneos, arredondados e com tendência à flocculação.

Outros pontos e profundidades no reservatório podem apresentar resultados diferentes devido a grande variabilidade encontrada no resíduo. Logo o resultado obtido nessa amostra é particular não sendo necessariamente representativo de todo o reservatório.



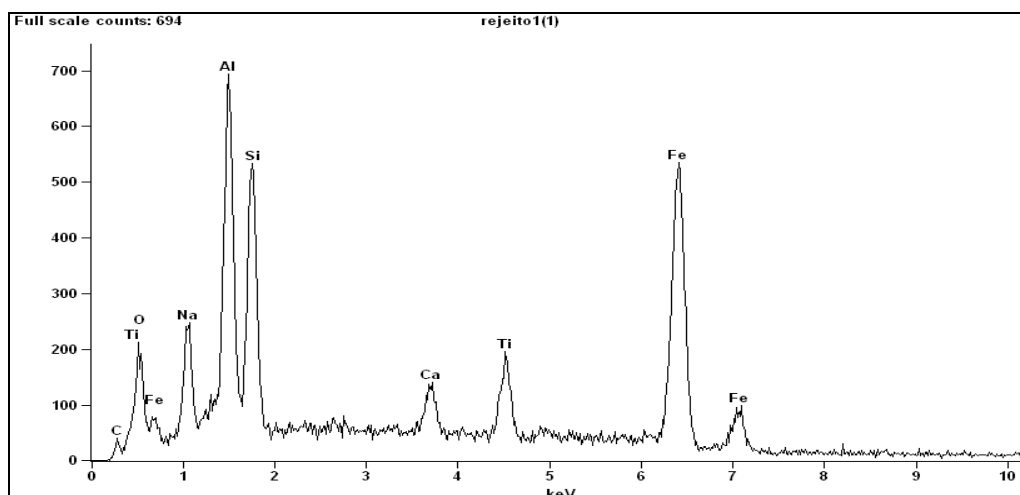
**Figura 4.15:** Foto por Microscopia eletrônica do resíduo – ampliação 1000 vezes



**Figura 4.16:** Foto por Microscopia eletrônica do resíduo – ampliação 2000 vezes

Após a análise dos grãos do resíduo pela ampliação das imagens pelo MEV foi realizado um estudo de caracterização microscópica do material por EDX (energy dispersive x-ray detector), que fornece a composição química pontual das elementos químicos que compõem o material. O resultado da varredura da amostra por EDX é apresentado no gráfico da Figura 4.17. A

relação dos elementos presente na amostra esta na Tabela 4.5 e na Tabela 4.6 com exceção dos elementos não metais (carbono e oxigênio). Os elementos dominantes do resíduo de bauxita estudado nesse trabalho são o Ferro, Alumínio e Silício e em menor quantidade o Titânio. O cálcio e o sódio presentes no material são oriundos do beneficiamento com soda cáustica, no processamento para obtenção do alumínio.



**Figura 4.17:** Difratograma do resíduo de bauxita

**Tabela 4.5:** Resultados da varredura por EDX no resíduo de bauxita (incluindo carbono e oxigênio)

Elemento	% em peso
<i>C</i>	7.23
<i>O</i>	46.82S
<i>Na</i>	6.59
<i>Al</i>	7.75
<i>Si</i>	5.78
<i>Ca</i>	1.32
<i>Ti</i>	3.08
<i>Fe</i>	21.44
<b>Total</b>	100.00

**Tabela 4.6:** Resultados da varredura por EDX no resíduo de bauxita

Elemento	% em peso
<b>Na</b>	14,34
<b>Al</b>	16,86
<b>Si</b>	12,58
<b>Ca</b>	2,87
<b>Ti</b>	6,7
<b>Fe</b>	46,66
<b>Total</b>	100.00

As determinações de pH, teor cáustico e teor alcalino foram realizadas em amostras do resíduo de processamento de bauxita, retirada da saída do lavador. As amostras foram preparadas no laboratório para ensaio de sedimentação, e após cada ensaio, as amostras de resíduo sedimentado e sobrenadante eram destinadas às análises físico-químicas para que fossem determinadas as características representativas a cada uma delas.

Determinou-se o pH das sub-amostras coletadas pelo método eletrométrico, teor cáustico, correspondente à alcalinidade hidróxida do material e teor alcalino dos materiais de acordo com as técnicas sugeridas pelo Laboratório da Refinaria ALUMAR. Para se determinar o teor de matéria orgânica do material, utilizou-se um Analisador de Carbono Resemount Analytical, modelo DC-190.

Após as determinações, foi calculada a média dos valores obtidos, excluindo-se algum valor muito desparelho dos demais (Tabela 4.7).

**Tabela 4.7:** pH, Teores Cáusticos, Alcalino e de Matéria Orgânica.

Amostra		Resíduo Sedimentado				Sobrenadante			
		pH	TA (mg/L de CaCO <sub>3</sub> )	TC (mg/L de CaCO <sub>3</sub> )	MO (mg/L)	pH	TA (mg/L de CaCO <sub>3</sub> )	TC (mg/L de CaCO <sub>3</sub> )	MO (mg/L)
LW-5S	1	11,19	14.06	4.995,5	578,5	11,86	32.83	4.510,5	170,8
	2	10,97	9.70	2.619,0	603,3	11,81	34.43	10.233,5	238,1
LW-10S	1	10,80	3.55	1.850	366,6	11,78	19.50	3.900,0	1.203,6
	2	10,83	4.25	1.750	1.535,9	11,46	20.25	8.150,0	1.155,7
LW-15S	1	11,34	10.18	3.443,5	542,5	11,73	39.28	9.748,5	172,6
	2	11,13	7.66	2.473,5	543,0	11,80	34.92	8.730,0	174,3
LW-20S	1	11,16	10.08	2.813,0	581,2	11,78	43.65	13.580,0	179,2
	2	11,02	8.92	2.716,0	540,1	11,75	45.59	11.155,0	179,7

TA = Teor Alcalino (Alcalinidade Total)

TC = Teor Cáustico (Alcalinidade Hidróxida)

MO = Teor de Matéria Orgânica (Carbono Orgânico)

### 4.3 ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL

A representatividade dos ensaios de laboratório pode ser questionada em função da variabilidade dos resíduos devido a suas condições de deposição. Entretanto é inegável a utilidade destes ensaios, especialmente na célula triaxial, para o estudo do comportamento tensão-deformação - resistência de geo-materiais. No caso desse trabalho foram utilizados

resultados de ensaios de compressão triaxial não-adensado não-drenado (UU) e ensaio de compressão triaxial adensado não-drenado (CIU), com a finalidade de determinar os parâmetros de resistência do resíduo em laboratório.

### 4.3.1 Ensaio triaxiais CIU

Amostras reconstituídas do resíduo cáustico, simulando condições de saída do último lavador, foram retiradas do reservatório ARB #2 com o objetivo de realizar ensaios de compressão triaxial CIU. A amostra possuía um teor de sólidos de 49% e um teor de umidade de 104,1%. A Tabela 4.8 apresenta os índices físicos dos corpos de prova triaxiais.

**Tabela 4.8:** Índices Físicos dos corpos de prova dos ensaios triaxiais

Amostra	CP	$\sigma'_c$ (kPa)	$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$w_i$ (%)	$e_i$	Sat.	$w_f$ (%)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)
LW-5S	4	50	18,02	12,09	42,01	1,36	94,6	37,74	18	76	6
	2	100	18,08	12,75	41,84	1,35	94,7	39,75			
	1	200	17,23	12,02	43,33	1,49	88,7	36,76			

A curva tensão cisalhante x deformação axial e de poro-pressão x deformação axial obtidas nos ensaios estão apresentadas na Figura 4.18. Observa-se que a tensão desviadora cresce com as deformações até atingir um valor máximo de resistência, seguindo de um ligeiro acréscimo de tensão desviadora para grandes deformações, comportamento típico de materiais normalmente adensados. Com o aumento do confinamento nota-se um acréscimo de resistência e rigidez das amostras.

A poro pressão varia como decorrência da tendência de variação de volume. As curvas são similares, com tendência dos corpos de prova de comprimir sob incremento da tensão desvio, e desenvolvimento de poro pressão positiva no início do ensaio, com ligeiro decréscimo.

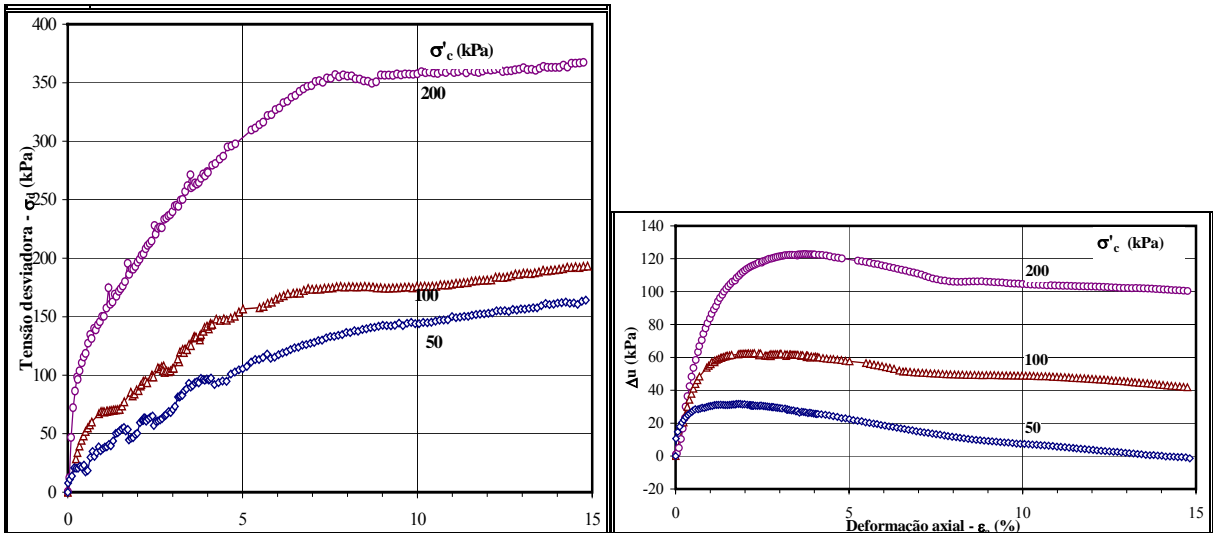
A trajetória de tensão efetiva, seguidas por cada corpo de prova, encontra-se traçada na Figura 4.19. Tais trajetórias foram plotadas usando-se o diagrama de *Lambe* (MIT), ou seja, com  $p' = (\sigma'_a + \sigma'_c) / 2$  e  $q = (\sigma'_a - \sigma'_c) / 2$ , onde  $\sigma$  = tensão normal e os sub-índices, “a” e “c”, representam tensões axiais e radiais ou confinantes, respectivamente.

Na Tabela 4.9, que se segue, estão apresentados os valores dos parâmetros não drenados e parâmetro efetivo de resistência ( $c'$  e  $\phi'$ ) definidos para a envoltória determinada dos 3

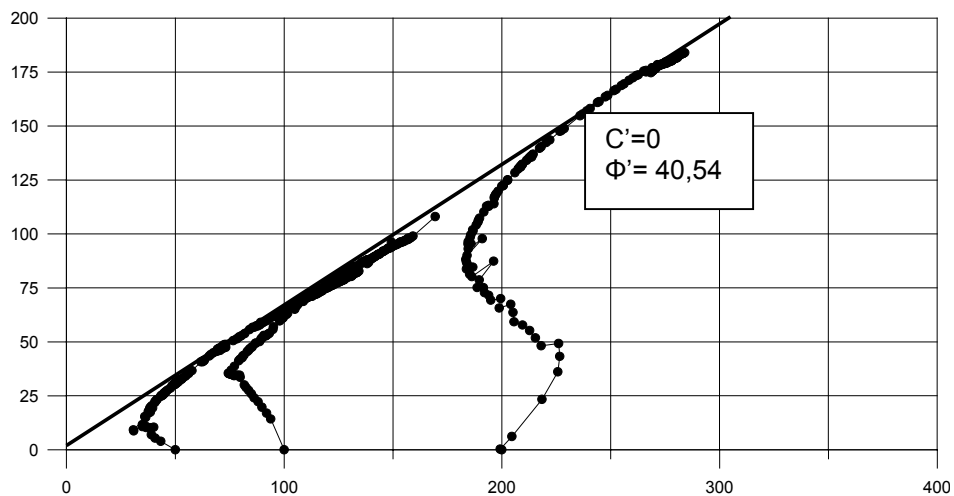
ensaios. O parâmetro efetivo foi estimado a partir do diagrama  $p'$  x  $q$ , assumindo-se como válido o critério de ruptura de Mohr-Coulomb (envoltória linear). O resultado apresentado pelos ensaios, não representou a condição real do material, e sim comportamento típico de materiais cimentantes, com elevado valor do ângulo de atrito interno efetivo igual a  $40,54^\circ$ .

**Tabela 4.9:** Resultados dos Ensaios Triaxiais

Amostra	Ensaio		Condições na Ruptura		Parâmetros Efetivos	
	CP	$\sigma'_c$ (kPa)	$\varepsilon_a$ (%)	$s_u$ (kPa)	$c'$ (kPa)	$\phi'$ (graus)
LW-5S	4	50	10,05	144,1	0	40,54
	2	100	8,73	175,5		
	1	200	7,65	356,9		



**Figura 4.18:** Curva tensão x deformação e Curva tensão x variação de poro pressão -ensaio triaxial CIU.



**Figura 4.19:** Diagrama  $q$  x  $p'$  - ensaio triaxial CIU.

### 4.3.2 Ensaio Triaxiais UU

Ensaio triaxiais UU foram realizados em amostras superficiais indeformadas obtidas pelo Shelby com pistão estacionário a cerca de 1,0m de profundidade, nas estações 1, 4 e 5 no reservatório ARB# 2, desativada há um ano (campanha 1999). Os ensaios de granulometria destas estações, apresentadas no item 4.2.1, indicaram um material com uma média de 40% de argila, 52% de silte e 8% de areia em sua constituição. Em cada estação, os ensaios foram executados sob tensões confinantes de 50 e 150 kPa, com medição de poro-pressão, sendo 2 ensaios nas amostras nas condições de campo e 2 ensaios em amostras após percolação de 2 volumes de vazios de licor cáustico sob gradiente 1,0. Os ensaios UU permitiram uma análise da influência da percolação do licor cáustico nos resultados dos parâmetros obtidos. A Tabela 4.10 apresenta um resumo dos resultados destes ensaios.

Analisando os resultados obtidos nos ensaios triaxiais UU se conclui que a percolação de licor cáustico no resíduo depositado altera sensivelmente as suas propriedades geomecânicas, com valores em torno de 30% superiores de resistência não drenada.

**Tabela 4.10** – Resultado do ensaio triaxial UU

ESTAÇÃO	CONDIÇÃO	$\sigma_i$ (kPa)	$S_u$ (kPa)
1	Umidade nat.	0.03	14.4
	Umidade nat.	0.60	24.2
	Percolado	22.6	80.8
	Percolado	25.2	60.4
2	Umidade nat.	0.2	20.6
	Umidade nat.	0.1	28.2
	Percolado	21.5	81.0
	Percolado	21.2	77.2
5	Umidade nat.	0.10	30.0
	Umidade nat.	0.2	35.0
	Percolado	27.3	105.4
	Percolado	26.6	79.6

## 4.4 ENSAIO DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA E ADENSAMENTO

### 4.4.1 Oedômetro CRD (Constant Rate of Displacement)

Amostras do resíduo cáustico foram retiradas do reservatório ARB #2, no mês de junho de 2003, com o objetivo de realizar ensaios de adensamento e condutividade hidráulica em

amostras reconstituídas com teor de sólidos simulando as condições de saída do lavador. Índices físicos dos corpos de prova ensaiados encontram-se resumidos na Tabela 4.11. Os valores de teor de sólidos (TS) indicados nesta tabela correspondem à razão entre a massa seca do resíduo e sua massa total.

As Figuras 4.20, 4.21 e 4.22 apresentam as relações índice de vazios  $\times \log \sigma'$ . Tais relações foram determinadas utilizando-se a técnica de interpretação de ensaios CRD. Destaca-se que devido ao alto índice de vazios usado na preparação dos corpos de prova, grandes deformações foram registradas até 10 KPa de tensão efetiva.

A Tabela 4.12 apresenta os valores de tensão efetiva ( $\sigma'_c$ ), coeficiente de condutividade hidráulica (k) e coeficiente de adensamentos ( $C_v$ ) obtidos para cada amostra. A legenda apresentada a seguir servirá como auxílio às demais tabelas ao longo do texto.

**Tabela 4.11:** Índices físicos dos corpos de prova dos ensaios CRD

Amostra	$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$w_i$ (%)	TS <sub>i</sub> (%)	$e_i$	S <sub>i</sub> (%)	$w_f$ (%)
LW-5S	14,87	7,17	107,50	48,20	3,15	100,00	38,40
LW-10S (1)	14,80	7,19	105,38	48,60	3,13	100,00	38,66
LW-10S (2)	15,12	7,59	99,14	50,22	2,94	100,00	37,98

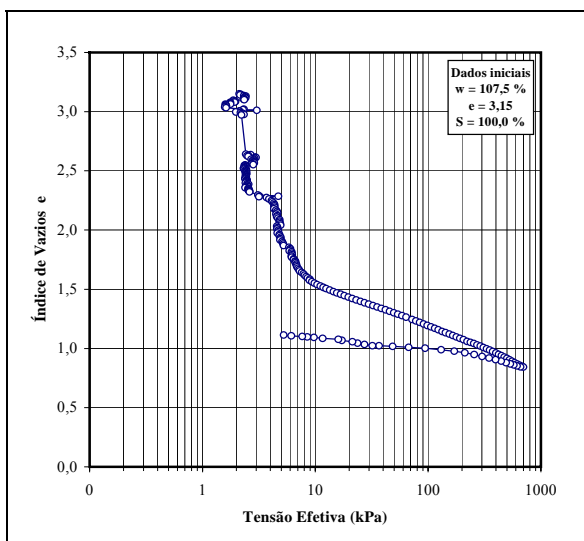
**Tabela 4.12:** Coeficiente de condutividade hidráulica dos corpos de prova dos ensaios CRD

Equipamento	Amostra	$\sigma'_c$ (kPa)	K(cm/s)	$C_v$ (cm <sup>2</sup> /s)
Edômetro de lama CRD	LW-5S	<10	$6,48 \times 10^{-6}$	0,0085
		>10	$8,08 \times 10^{-7}$	0,0214
	LW-10S(1)	<10	$6,88 \times 10^{-6}$	0,0073
		>10	$1,30 \times 10^{-6}$	0,0152
	LW-10S(2)	<10	$6,41 \times 10^{-6}$	0,0081
		>10	$1,03 \times 10^{-6}$	0,0149

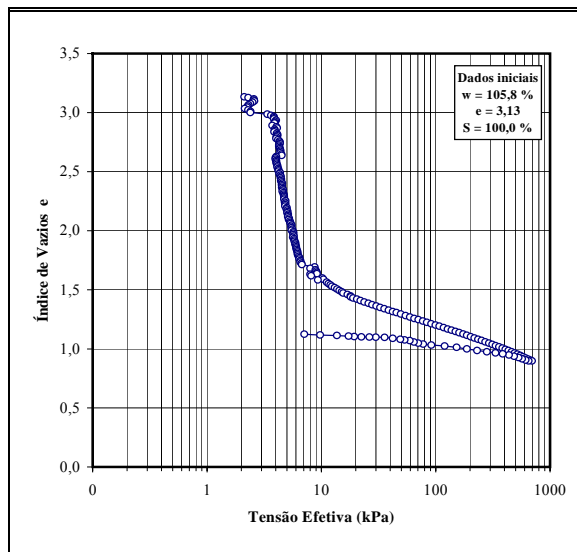
**Legenda:**

W=Umidade [%]
$e$ = Índice de vazios
$\gamma_t$ = Peso específico Natural [kN/m <sup>3</sup> ]
$G_s$ = Massa Específica dos grãos [g/cm <sup>3</sup> ]
$\gamma_d$ = Peso Específico Aparente seco [kN/m <sup>3</sup> ]
$a_v$ = Coeficiente de Compressibilidade [1/kPa]
$C_v$ = Coeficiente de Adensamento [cm <sup>2</sup> /s]

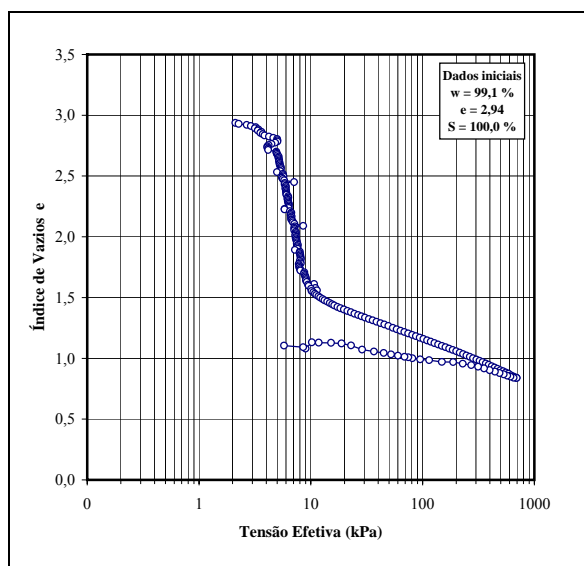
K= Coeficiente de condutividade hidráulica [cm/s]
$m_v$ = Coeficiente de variação volumétrica [1/kPa]
$C_c$ = Índice de Compressão [1/kPa]
$C_d$ = Índice de Descarga [1/kPa]
$\sigma'_c$ = Tensão efetiva [kPa]
TS= Teor de sólidos [%]
S <sub>i</sub> = Grau de saturação [%]



**Figura 4.20:** Variação do índice de vazios com a tensão efetiva (amostra LW-5).



**Figura 4.21:** Variação do índice de vazios com a tensão efetiva (amostra LW-10S(1)).



**Figura 4.22:** Variação do índice de vazios com a tensão efetiva (amostra LW-10S(2)).

#### 4.4.2 Permeâmetro de parede flexível (PUC/Rio)

Para o ensaio no permeâmetro de parede flexível mais uma amostra do resíduo cáustico, simulando condições de saída do último lavador foi retirada do reservatório ARB #2, um mês após a retirada das amostras para o ensaio CRD, com o objetivo de realizar ensaios de condutividade hidráulica do tipo carga constante. A amostra possuía um teor de sólidos de 49% e um teor de umidade de 104,1.



Os índices físicos do corpo de prova ensaiado encontram-se resumidos na Tabela 4.13. Na Tabela 4.14 estão incluídos os valores de tensão efetiva ( $\sigma'_c$ ), coeficiente de permeabilidade ( $k$ ) e índice de vazios ( $e$ ) dos coeficientes de condutividade hidráulica determinados a partir da aplicação da lei de Darcy.

**Tabela 4.13:** índices físicos do corpo de prova dos ensaios de permeâmetro de parede flexível.

Amostra	$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$w_i$ (%)	$e_i$ (%)	S(%)	$w_f$ (%)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)
LW-5	17,47	12,00	41,39	1,44	93,00	36,68	18	76	6

**Tabela 4.14:** Resultados do ensaio de permeâmetro de parede flexível.

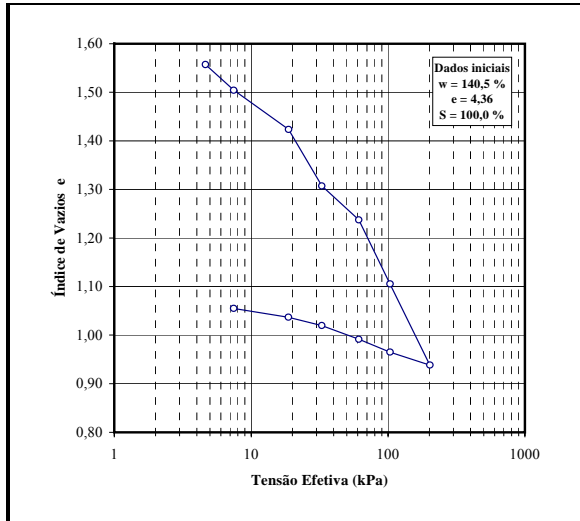
Amostra	$\sigma'_c$ (kPa)	Índice de Vazios	$k$ (cm/s)
LW-5	50	1,34	$2,0 \times 10^{-6}$
	100	1,31	$1,3 \times 10^{-6}$
	200	1,29	$1,5 \times 10^{-6}$

#### 4.4.3 Oedômetro de lama

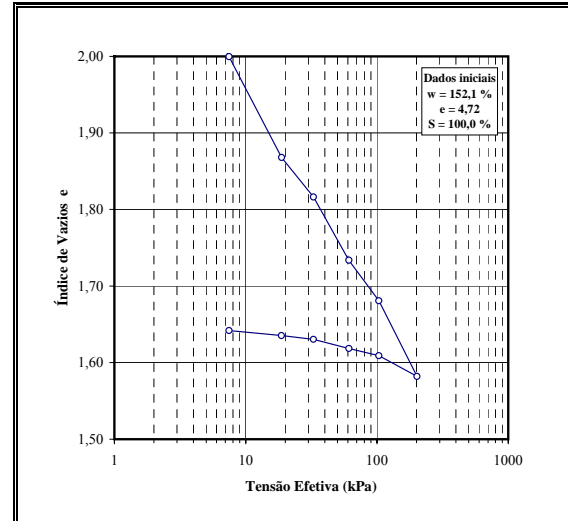
Em maio de 2005 foram realizados ensaios de condutividade hidráulica e adensamento em amostras do resíduo do reservatório ARB#3, como depositado no lago, denominado resíduo *In natura*. A amostra em condição natural apresentava um teor de umidade de 760,64 %, teor de sólidos de 11,6%, sendo que o teor de sólidos requeridos de 40% e os ensaios foram realizados em oedômetros de lama, esses que acomodam grandes dimensões (213,5mm de diâmetro e 80mm de altura). Os índices físicos dos corpos de provas ensaiados encontram-se resumidos na Tabela 4.15. As Figuras 4.23, 4.24 apresenta as relações  $e$  x  $\log \sigma'_c$ .

**Tabela 4.15:** Índices Físicos das Amostras dos Ensaios de Adensamento

Amostra	CP	TS (%)	$G_s$	$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$w_i$ (%)	$e_i$ (%)	$w_f$ (%)	Areia	Silte	Argila
In natura	01	41,6	3,09	13,64	5,67	140,5	4,36	40,5	14,1	57,0	18,9
	02	40,0		13,40	5,31	152,1	4,72	40,5			



**Figura 4.23:** Variação do índice de vazios com a tensão efetiva (amostra In natura – TS=41,6%)



**Figura 4.24:** Variação do índice de vazios com a tensão efetiva (amostra In natura – TS=40%)

Ensaios de condutividade hidráulica foram efetuados após cada um dos estágios de carregamento dos ensaios oedométricos. Os valores de tensão efetiva ( $\sigma'_c$ ), coeficiente de condutividade hidráulica (K) e coeficiente de adensamento ( $C_v$ ) dos ensaios de condutividade hidráulica executados encontram-se resumidos na Tabela 4.16. Para fins de comparação, foram também incluídos nesta Tabela os valores computados a partir dos resultados dos ensaios de adensamento (utilizando a teoria de adensamento de Terzaghi).

**Tabela 4.16:** Resultados dos Ensaios de condutividade hidráulica e Adensamento.

Amostra		$\sigma'$ (kPa)	e	Coef. de adensamento $c_v$ (cm <sup>2</sup> /s)	Coef. de compressibilidade $a_v$ (1/kPa)	Coef. de variação volumétrica $m_v$ 1/kPa)	Condutividade hidráulica (cm/s)	
							Medida	Calculada
Não neutralizada (In natura)	Am1	4,64	1,56	$6,93 \times 10^{-4}$	$6,03 \times 10^{-1}$	$2,4 \times 10^{-1}$	-	$1,6 \times 10^{-5}$
		7,46	1,50	$1,94 \times 10^{-4}$	$1,88 \times 10^{-2}$	$7,5 \times 10^{-3}$	$3,0 \times 10^{-6}$	$1,4 \times 10^{-7}$
		18,75	1,42	$5,56 \times 10^{-3}$	$7,14 \times 10^{-3}$	$2,9 \times 10^{-3}$	$3,2 \times 10^{-6}$	$1,6 \times 10^{-6}$
		32,85	1,31	$2,62 \times 10^{-3}$	$8,26 \times 10^{-3}$	$3,6 \times 10^{-3}$	$2,6 \times 10^{-6}$	$9,2 \times 10^{-7}$
		61,06	1,24	$7,39 \times 10^{-3}$	$2,48 \times 10^{-3}$	$1,1 \times 10^{-3}$	$2,1 \times 10^{-6}$	$8,0 \times 10^{-7}$
		103,37	1,10	$2,97 \times 10^{-2}$	$3,11 \times 10^{-3}$	$8,7 \times 10^{-4}$	$1,3 \times 10^{-6}$	$4,3 \times 10^{-6}$
		202,11	0,94	$2,58 \times 10^{-2}$	$1,69 \times 10^{-3}$	$1,4 \times 10^{-4}$	$1,1 \times 10^{-6}$	$2,2 \times 10^{-6}$
	Am2	4,64	2,07	$8,41 \times 10^{-4}$	$5,69 \times 10^{-1}$	$1,8 \times 10^{-1}$	-	$1,5 \times 10^{-5}$
		7,46	2,00	$7,73 \times 10^{-4}$	$2,75 \times 10^{-2}$	$9,2 \times 10^{-3}$	$2,6 \times 10^{-6}$	$6,9 \times 10^{-7}$
		18,75	1,87	$6,59 \times 10^{-3}$	$1,17 \times 10^{-2}$	$4,1 \times 10^{-3}$	$3,9 \times 10^{-6}$	$2,6 \times 10^{-6}$
		32,85	1,82	$3,70 \times 10^{-3}$	$3,65 \times 10^{-3}$	$1,3 \times 10^{-3}$	$3,4 \times 10^{-6}$	$4,7 \times 10^{-7}$
		61,06	1,73	$2,25 \times 10^{-2}$	$2,93 \times 10^{-3}$	$1,1 \times 10^{-3}$	$2,8 \times 10^{-6}$	$2,4 \times 10^{-6}$
		103,37	1,68	$5,89 \times 10^{-3}$	$1,25 \times 10^{-3}$	$4,7 \times 10^{-4}$	$2,3 \times 10^{-6}$	$2,7 \times 10^{-7}$
		202,11	1,58	$3,08 \times 10^{-2}$	$9,99 \times 10^{-4}$	$3,9 \times 10^{-4}$	$1,8 \times 10^{-6}$	$1,2 \times 10^{-6}$

#### 4.4.4 Permeâmetro de parede rígida (UFRGS)

Os ensaios para determinação do coeficiente de condutividade hidráulica foram realizados usando amostras do resíduo cáustico do depósito ARB#3, retiradas na estação 2, estação 4 LE e estação 4 da campanha de 2005. O resíduo foi armazenado em sacos plásticos e encontrava-se seco assim para chegar à umidade desejada na preparação dos corpos de prova, foi utilizado licor cáustico no material da estação 4LE e água no material da estação 4 e estação 2.

Os índices físicos dos corpos de prova ensaiados encontram-se resumidos na Tabela 4.17. A estação 4, não possui ensaios de caracterização, optou-se em usar os mesmos índices físicos da estação 4 LE necessários para os cálculos. Na Tabela 4.18 estão incluídos os valores do coeficiente de condutividade hidráulica (K) e do gradiente hidráulico (i).

**Tabela 4.17:** Índices Físicos das Amostras dos Ensaio de condutividade hidráulica

Amostra	LOCAL	$G_s$	$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$w_i$ (%)	$e_i$	Areia Média	Areia Fina	Silte	Argila
ARB#3	EST 4 -água	2,9	16,2	10,56	53,3	1,74	-	-	-	-
	EST 4 LE - licor	2,9	16,2	10,96	47,7	1,64	7,5	9,5	68,5	13,5
	EST 2- água	3,02	16,37	11,41	43,4	1,65	-	7	93	0

**Tabela 4.18:** Resultados dos Ensaio de condutividade hidráulica

Amostra	LOCAL	Gradiente hidráulico (i)	k (cm/s)
ARB#3	EST 4 -água	3	$5,34 \times 10^{-4}$
	EST 4 LE - licor	3	$1,50 \times 10^{-5}$
	EST 2	3	$2,10 \times 10^{-5}$

#### 4.4.5 Ensaio de adensamento (UFRGS)

Para a realização dos ensaios de adensamento foram utilizadas amostras da estação 1 e estação NI (estação não identificada) da ARB#3 na campanha de 2005. Na preparação dos corpos de prova, utilizou-se água, para chegar à umidade desejada. Os índices físicos dos corpos de prova ensaiados encontram-se resumidos na Tabela 4.19 e na Tabela 4.20 estão incluídos os resultados obtidos nos ensaios.

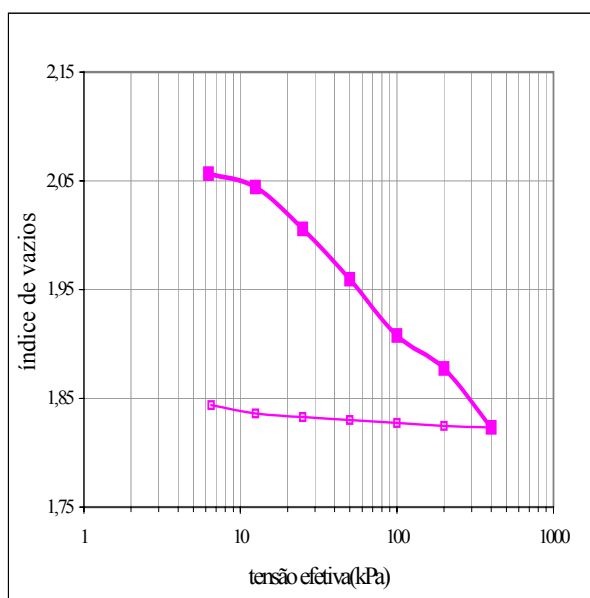
**Tabela 4.19:** Índices Físicos das Amostras do Ensaio de adensamento

Amostra	LOCAL	$G_s$	$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$w_i$ (%)	$e_i$	Areia	Silte	Argila
ARB#3	EST NI	3	18,89	12,68	48,9	1,36	-	-	-
	EST 1	3,3	17,12	13,69	25	1,21	17	83	0

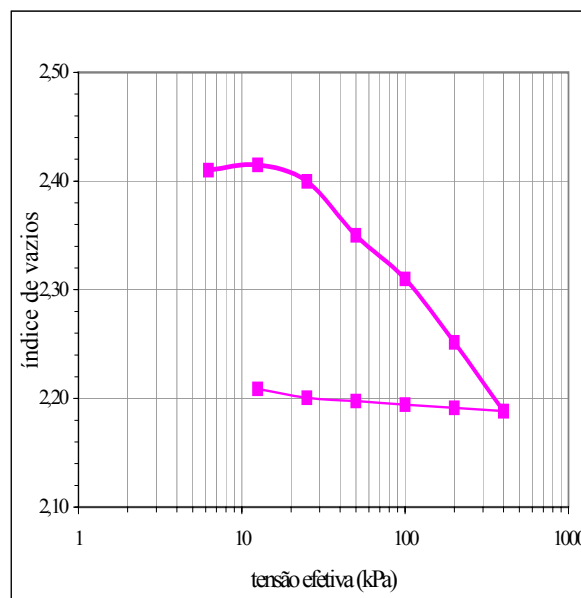
**Tabela 4.20:** Resultados dos Ensaios de Adensamento

Amostra	LOCAL	$C_v$ (cm/s)	$a_v$ (1/kPa)	$m_v$ (1/kPa)	$C_c$	$C_d$
ARB#3	EST NI	0,0077	$1,21 \times 10^{-3}$	$3,59 \times 10^{-4}$	0,24	0,01
	EST 1	0,0081	$1,26 \times 10^{-3}$	$4,21 \times 10^{-4}$	0,14	0,0094

As Figuras 4.25 e 4.26 apresentam as relações  $e$  x  $\log \sigma'$  obtidas a partir do ensaio de adensamento para as amostras da estação 1 e estação NI.



**Figura 4.25:** Variação do índice de vazios com a tensão efetiva (amostra estação 1-ARB#3)



**Figura 4.26:** Variação do índice de vazios com a tensão efetiva (amostra estação NI-ARB#3)

A Tabela 4.21 mostra um resumo de coeficientes de permeabilidade e adensamento do resíduo de bauxita da ALUMAR, determinados em laboratório com diferentes equipamentos.

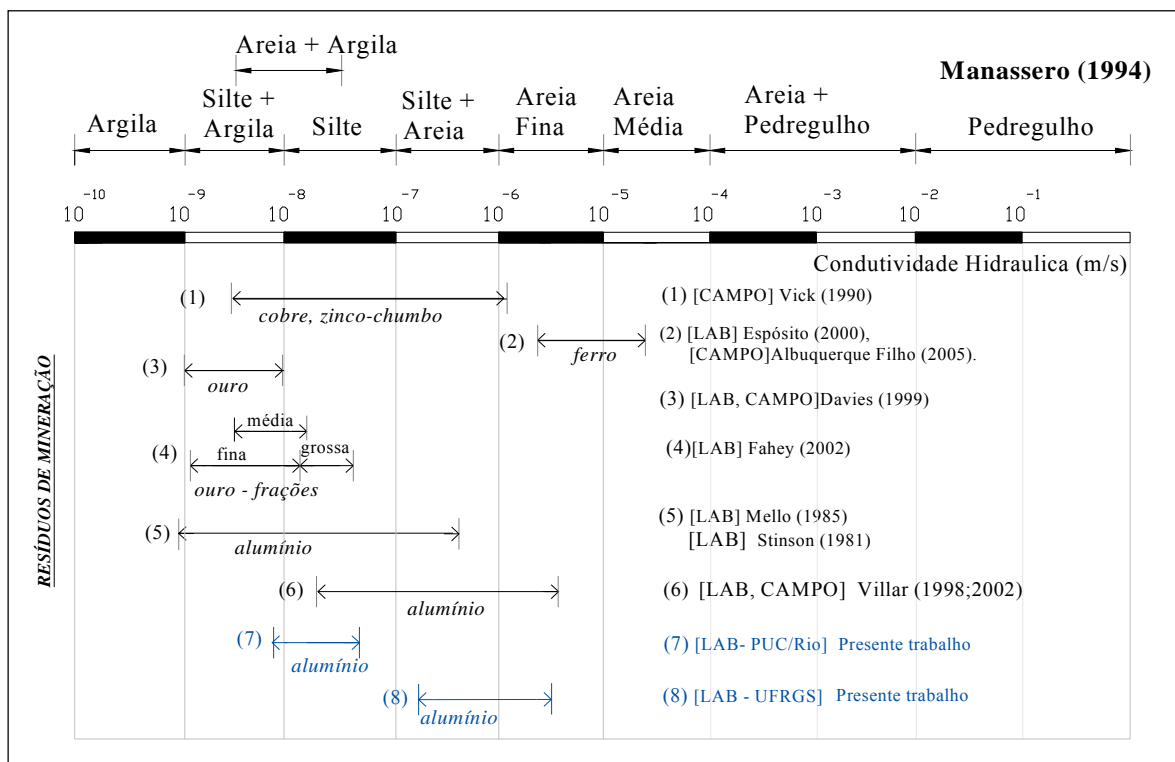
**Tabela 4.21:** Relação dos Valores médios de coeficientes de condutividade hidráulica e adensamento.

Equipamento	Amostra	$\sigma'_c$ (kPa)	k(cm/s)		$C_v$ (cm <sup>2</sup> /s)
			medida	calculada	
Edômetro CRD	LW-5S	<10	$6,48 \times 10^{-6}$	-	0,0085
		>10	$8,08 \times 10^{-7}$	-	0,0214
	LW-10S(1)	<10	$6,88 \times 10^{-6}$	-	0,0073
		>10	$1,30 \times 10^{-6}$	-	0,0152
	LW-10S(2)	<10	$6,41 \times 10^{-6}$	-	0,0081
		>10	$1,03 \times 10^{-6}$	-	0,0149
Permeâmetro parede flexível (PUC/Rio)	LW- 5	50	$2,0 \times 10^{-6}$	-	-
		100	$1,3 \times 10^{-6}$	-	-
		200	$1,5 \times 10^{-6}$	-	-
Oedômetro de lama	Am1-In natura	<200	$2,20 \times 10^{-6}$	$6,44 \times 10^{-6}$	0,023
	Am2-In natura	<200	$2,80 \times 10^{-6}$	$5,85 \times 10^{-6}$	0,0109
Permeâmetro parede rígida (UFRGS)	EST 4 - água	-	$5,34 \times 10^{-4}$	-	-
	EST 4 LE - licor	-	$1,50 \times 10^{-5}$	-	-
	EST 2	-	$2,10 \times 10^{-5}$	-	-
Adensamento Convencional	EST NI - água	-	-	-	0,0077
	EST 1 - água	-	-	-	0,0081

A variabilidade das características físico-químicas e mineralógicas tem efeito dominante na condutividade hidráulica e no adensamento do solo, e conseqüentemente em seu comportamento *in situ*, sendo sempre necessário uma estimativa desses coeficientes nos rejeitos de mineração. Ensaio de adensamento em laboratório, em equipamentos projetados especialmente para lamas vem sendo utilizado com mais freqüência no estudo do comportamento de resíduos de mineração.

Observando a Tabela 4.22 se percebe a mínima diferença nos valores de coeficientes de condutividade hidráulica determinados nos diferentes equipamentos da PUC/Rio, esses valores situam-se numa faixa que varia de  $8,0 \times 10^{-7}$  a  $1,0 \times 10^{-6}$  (cm/s) ou  $8,0 \times 10^{-9}$  a  $1,0 \times 10^{-8}$  (m/s), no equipamento da UFRGS os valores ficaram entre  $1,5 \times 10^{-7}$  a  $5,34 \times 10^{-6}$  (m/s). Isso reforça a afirmativa dos autores apresentada na revisão bibliográfica e rerepresentada na Figura 4.27 juntamente com os valores demonstrados nesse trabalho, de que resíduos de mineração possuem uma permeabilidade intermediária. Diferenças importantes foram observadas entre resultados de ensaios de laboratório realizados na PUC e na UFRGS. Na UFRGS os valores indicam solos mais permeáveis na faixa de silte-arenoso. Sendo que essas diferenças podem estar relacionadas tanto as amostras coletadas em diferentes locais e épocas do ano quanto aos diferentes equipamentos utilizados nos ensaios.

Os valores de coeficiente de adensamento dos resíduos de bauxita determinados em laboratório variaram de 0,007 a 0,023 (cm<sup>2</sup>/s), esses valores ficaram dentro da faixa encontrada na literatura por meio de ensaios oedométricos convencionais, ensaios com tensões controladas e ensaios de piezocone, (Tabela 2.8).



**Figura 4.27:** Valores de condutividade hidráulica para resíduos de mineração.

## **5 ENSAIOS DE CAMPO: APRESENTAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS**

### **5.1 INTRODUÇÃO**

O presente capítulo concentra na avaliação da potencialidade de utilização de ensaios de campo, particularmente de piezocone (CPTU), em áreas de resíduos de bauxita. Estas análises, primeiramente, avaliaram a composição e a distribuição granulométrica dos resíduos ao longo da profundidade em diferentes pontos das áreas de disposição. Adicionalmente, foi feita uma avaliação das condições de fluxo e das características de adensamento do reservatório através das curvas de dissipação do excesso de poro pressões geradas durante a cravação do cone. Em uma etapa posterior, foram determinados os parâmetros de resistência ao cisalhamento.

### **5.2 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS**

A avaliação do comportamento dos depósitos de resíduos apresenta diversas imposições. A forma hídrica de deposição, as mudanças contínuas nos pontos de descarga, e principalmente as alterações granulométricas provocadas pela variação do tamanho das partículas do minério lavrado impõem o desenvolvimento de métodos destinados especificamente à caracterização dos resíduos de mineração.

A fração sólida dos resíduos pode apresentar ampla variação granulométrica, mineralógica e físico-química, variando de materiais arenosos não plásticos até solos muito finos e de alta plasticidade. Os resíduos de granulometria siltosa e argilosa de elevada plasticidade apresentam um processo lento de adensamento, exigindo a execução de reservatórios relativamente grandes para sua disposição. Entretanto os resíduos granulares normalmente apresentam rápida sedimentação, com liberação imediata do líquido da polpa, garantindo capacidade de suporte para manipulação do material previamente lançado. Os resíduos considerados intermediários caracterizam-se por uma granulometria bastante dispersa, podendo variar de areias médias até argilas.

Na caracterização granulométrica dos resíduos de bauxita serão apresentadas algumas análises desenvolvidas a partir dos resultados dos ensaios de piezocone realizados nas áreas de deposição ARB#2, em três campanhas de ensaios, e ARB#3, em campanha única de ensaios. O objetivo destas avaliações consiste na determinação da classificação textural dos depósitos de resíduos, fundamental para avaliação de seu comportamento.

Além disso, através da avaliação conjunta da variação da resistência de ponta ( $q_c$ ), da razão de atrito ( $R_f$ ), poro pressão dinâmica ( $u$ ), poro pressão de equilíbrio ( $u_0$ ) e coeficiente de poro pressão ( $B_q$ ) ao longo da profundidade, buscou-se identificar a ocorrência de estratos e lentes de materiais heterogêneos. A presença destas lentes no interior dos depósitos representa um importante condicionante para posterior avaliação das características de resistência e das condições de fluxo das áreas de deposição do resíduo. Adicionalmente, foram analisadas as diferentes metodologias para classificação textural dos materiais a partir dos resultados dos ensaios de piezocone (CPTU), objetivando avaliar sua adequabilidade ao estudo dos resíduos de bauxita.

### 5.2.1 Classificação textural dos resíduos

As classificações textural de solos sejam depósitos naturais ou resíduos, pode ser obtida como função do excesso de poro pressão gerada durante a cravação do piezocone ou, alternativamente, através da razão entre as medidas de atrito lateral e resistência de ponta.

Na caracterização dos depósitos é necessário comparar os resultados das diferentes campanhas, realizadas em anos distintos. O critério adotado para a sobreposição dos ensaios é subjetivo, pois com o alteamento do reservatório as cotas de superfície são variáveis.

Para evitar contrariedades nas comparações considerou-se a cota máxima de elevação de cada campanha como a cota de referências (cota zero), sendo todos os ensaios plotados em relação a esta referência, um croqui representativo está apresentado no anexo IV do caderno técnico.

Outro aspecto importante refere-se à identificação das poro pressões de equilíbrio no interior do reservatório que pode ser obtida através de perfurações para amostragem e mais



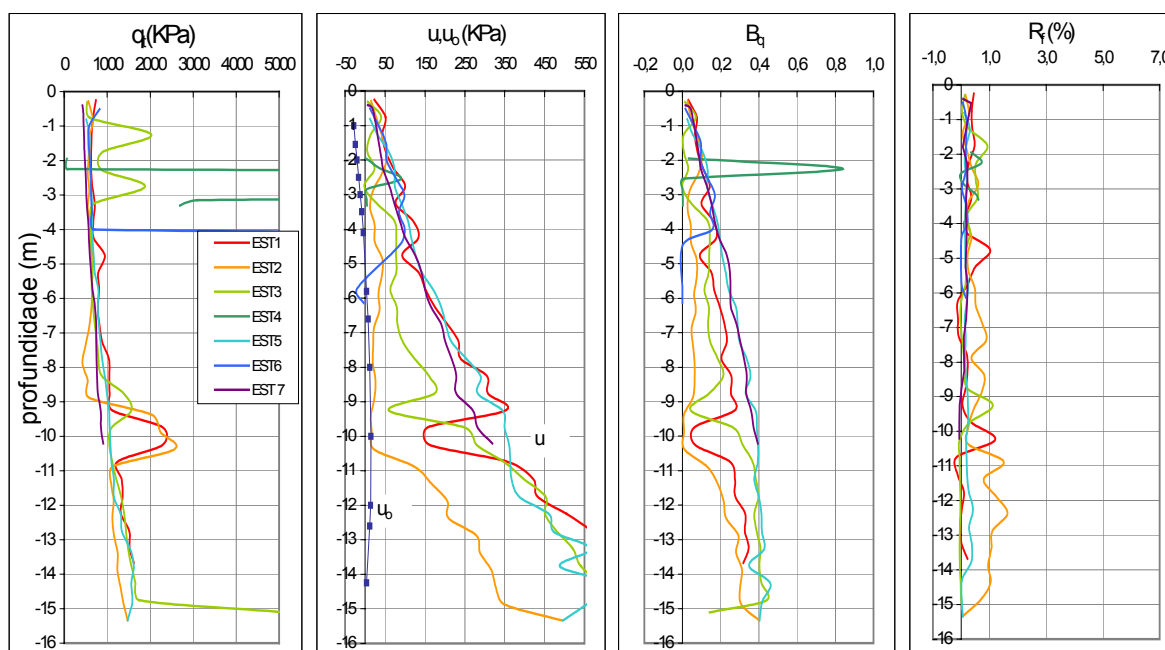
precisamente pela estabilização das poro pressões medidas na paralisação da penetração do piezocone a diferentes profundidades. Essa identificação é dificultada pela heterogeneidade do resíduo e pela presença de drenagem no fundo do reservatório. Devido a essa drenagem, as pressões de equilíbrio deverão reduzir gradativamente, enquanto na região superficial as pressões possam oscilar em função de processos de infiltração e evaporação. Resultados encontrados nas 4 campanhas de ensaio indicam a boa eficiência da drenagem de fundo, nos dois reservatórios estudados (ARB#2 e ARB#3).

### ***Campanha de 1999***

A primeira campanha de ensaios foi realizada na área ARB#2, desativada há quase dois anos. A Figura 5.1 apresenta os perfis de resistência de ponta corrigida, poro pressões geradas, poro pressões de equilíbrio, parâmetro de poro pressão e razão de atrito, das estações 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7 distribuídas em pontos distintos no reservatório, a maioria a uma distância em torno de 100 m dos pontos de lançamento. A estação 4 está situada próxima à torre de despejo central, as estações 5 e 7 estão localizadas em área com resíduo mais mole, junto à antiga estação de bombeamento do sobrenadante e vertedouro para a ARB#3, e a estação 6 na área de resíduo úmido junto ao descarte de licor da ARB#1.

Os perfis de poro pressões registrados nos ensaios apresentaram variabilidade de comportamento, camadas nas quais as poro pressões geradas são próximas a poro pressão de equilíbrio e camadas com acentuada geração de poro pressão durante a cravação. A variabilidade de comportamento fica claramente identificada através da observação dos perfis do parâmetro de poro pressão, que permite uma melhor visualização da sucessão de camadas de textura silto-argilosa intercaladas por lentes essencialmente arenosas. Na análise conjunta das estações observam-se valores de  $B_q$  variando de 0,2 a 0,4, típico do comportamento de materiais silto-argilosos, e algumas camadas ao longo dos perfis com valores inferiores a 0,2.

O atrito lateral apresentou valores extremamente baixos, resultando em razões de atrito irrealisticamente baixas, para as características silto-argilo-arenosas do resíduo. Esta evidência é posteriormente avaliada à luz das campanhas complementares realizadas nas áreas de deposição.



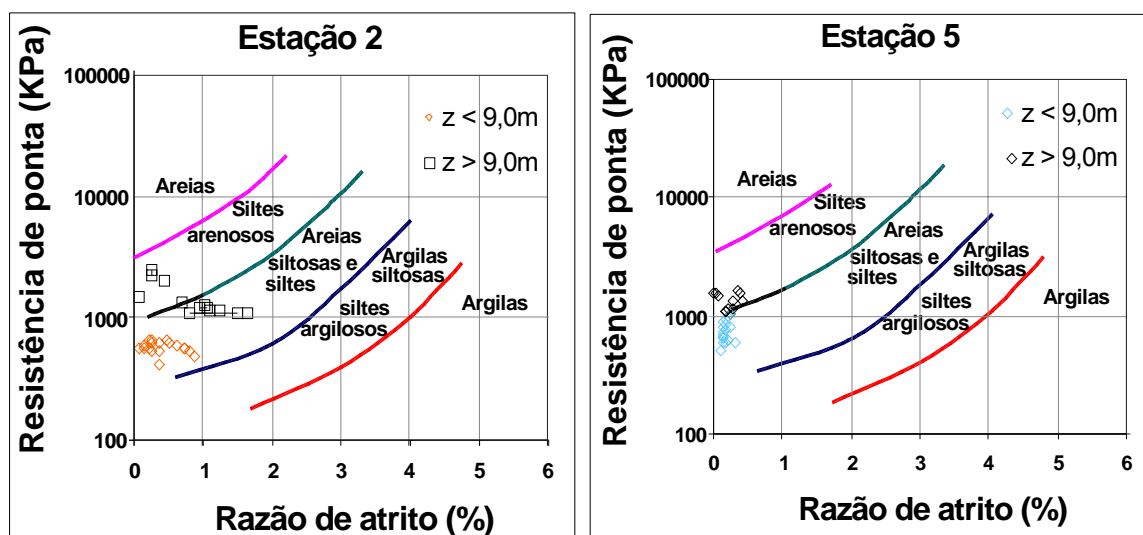
**Figura 5.1:** Perfil integrado de  $q_t$ ,  $u$ ,  $u_o$ ,  $B_q$  e  $R_f$  - ARB#2 - (campanha 1999- estações 1,2,3,4,5,6 e 7).

Na análise conjunta dos resultados observa-se a ocorrência de lentes arenosas em cotas variáveis, com alguma constância nas profundidades entre 9 e 11m. A estação 4 apresentou uma lente de areia compacta que impossibilitou a cravação do piezocone, o mesmo ocorrendo na estação 6 a partir de 4m. As estações 5 e 7 apresentaram um material homogêneo ao longo de toda profundidade. Além disso, observa-se uma composição majoritariamente silto-argilosa do depósito já identificada anteriormente nos ensaios de laboratório realizados em amostras superficiais nas mesmas estações onde foram realizados ensaios de piezocone (Figura 4.1).

A proposta de classificação das camadas de solo desenvolvida por Robertson & Campanella (1983) é utilizada na avaliação das estações de ensaio, possibilitando a construção de gráficos, que relacionam a resistência de ponta à razão de atrito. As estações 2 e 5 são avaliadas e apresentadas na Figura 5.2. Os resultados das estações 1,3,4 e 6 encontram-se no anexo III do caderno técnico publicado por Bedin (2006).

A análise dos gráficos obtidos para a estação 5 permitiu classificar o depósito como um material de comportamento areno-siltoso a siltoso para profundidades inferiores a 9 m e silte-arenoso para profundidades superiores a 9m. Já a estação 2 apresentou um material

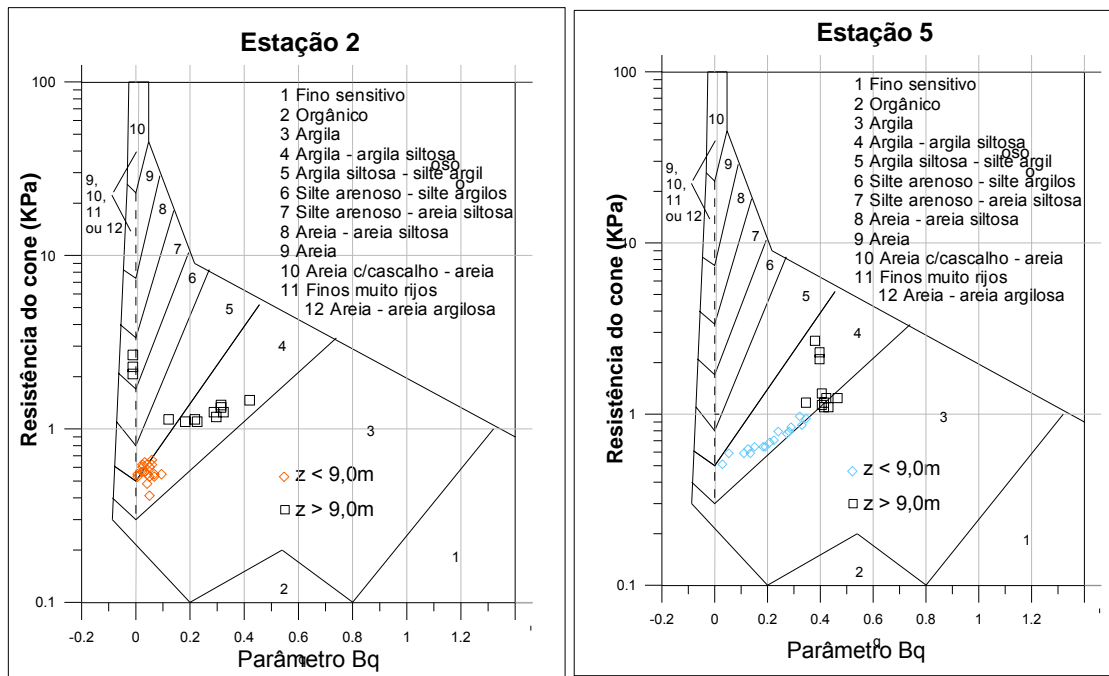
areno-siltoso a siltoso, com alguns pontos no gráfico representando a lente arenosa situada entre 9 e 11m. Para os demais resultados obtidos pela classificação de Robertson & Campanella, apresentados no anexo III do caderno técnico, observa-se um comportamento similar a estação 5 com materiais predominantemente na faixa das areias siltosas e siltes até 9m, seguindo de material silte-arenoso para menores profundidades.



**Figura 5.2:** Proposta de classificação de Robertson & Campanella (1983) - estações 2 e 5. (ARB#2 - campanha 1999).

Outro critério usado para classificação das camadas de resíduo foi desenvolvido por Robertson (1986), cuja proposta relaciona a resistência de ponta e o parâmetro de poro pressão. A Figura 5.3 apresenta os resultados obtidos para as estações 2 e 5. As demais estações encontram-se no caderno técnico, evidenciando padrões de comportamento semelhantes aos discutidos a seguir.

A análise do gráfico proposto permite classificar as estações 2 e 5 como um material argiloso ou argilo-siltoso, bem como identificar a ocorrência de uma lente arenosa na estação 2 entre 9 e 11m, evidenciada nos pontos situados na faixa compreendida para siltes-arenosos ou areia-siltosa. Em geral todos os gráficos obtidos indicaram que o depósito é composto por um material fino de composição argila ou argila-siltosa.



**Figura 5.3:** Proposta de classificação de Robertson (1986) - estações 2 e 5. (ARB#2 - campanha 1999).

**Campanha de 2002**

As investigações foram programadas em locais distintos, com distâncias de no máximo 20m dos diques, perto das calhas de despejo laterais, sendo os pontos 1, 3, 5, 7 e 8 no topo atual da pilha (el. ~53,00m) e os pontos 2, 4 e 6 sobre a primeira berma da pilha, no resíduo antigo (el. ~51,00m). A Figura 5.4 apresenta os resultados obtidos pelo piezocone das estações 3, 4, 5, 6 e 7. Algumas estações apresentaram comportamento distinto, com materiais mais arenosos, em região na qual o nível d’água do reservatório encontra-se aproximadamente a 7 m de profundidade.

Analisando o perfil de poro pressão gerada em relação às pressões de equilíbrio expresso pelo parâmetro de poro pressão ( $B_q$ ) nas Figuras 5.4 e 5.5, observa-se que nas estações 1, 3, 5, 7 e 8 não ouve geração de poro pressão na superfície do resíduo até 3,5 m, exatamente na camada que envolve o lançamento pelo método de alteamentos a montante, pois a

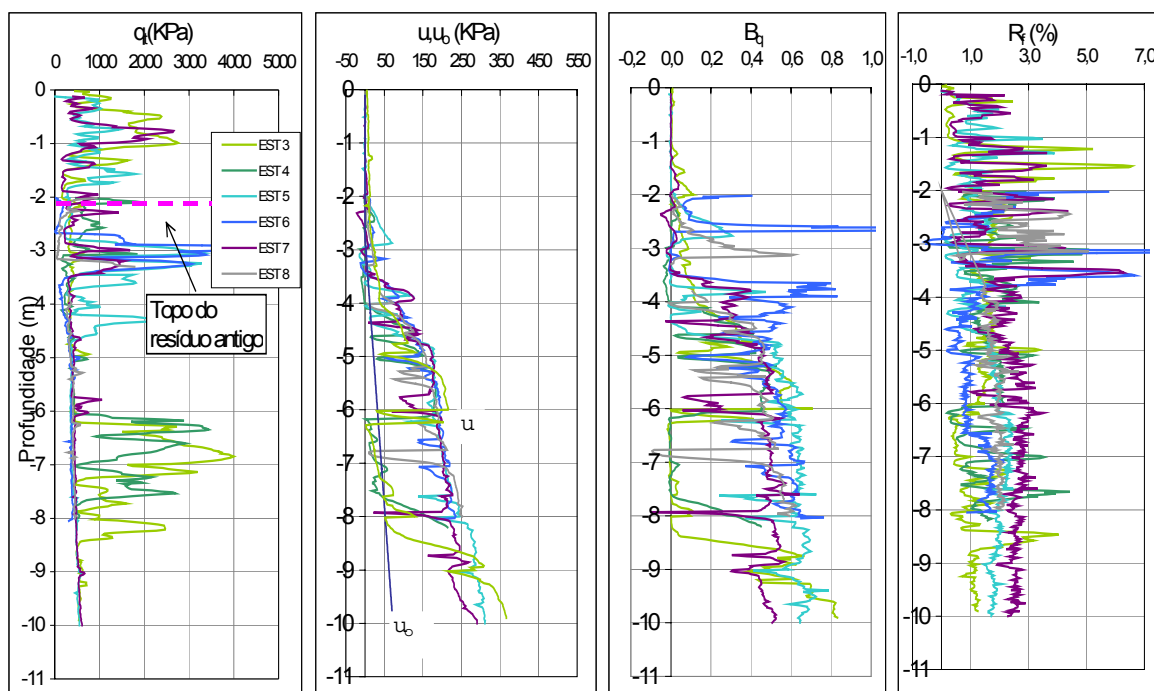
deposição é feita pelas calhas laterais apresentando um material mais arenoso. Na superfície do resíduo antigo, também não há geração expressiva de excesso de pressão, uma vez que esta região foi submetida a ressecamento antes do início da operação de lançamento por alteamentos. A partir desta profundidade, as estações 3, 4, 5, 6 e 7 apresentaram valores de poro pressões crescentes com a profundidade com várias lentes drenantes, com  $B_q$  entre 0,2 e 0,6, típicos de materiais silte-argilo-arenoso.

As estações 3 e 4, entre 6 e 8 m de profundidade, apresentaram uma camada mais espessa de material drenante, com valores de  $B_q$  iguais a zero, que é atribuída ao processo de segregação das partículas pelo fato do lançamento nessa camada ter sido efetuado pelas calhas laterais próximas às estações. Nas estações 1 e 2, os valores das poro pressões geradas ( $u$ ) são coincidentes com as poro pressões de equilíbrio ( $u_0$ ). A partir dos 4 metros foram registrados valores de  $u$  negativas, que podem estar associadas ao comportamento dilatante dos materiais siltosos e arenosos finos.

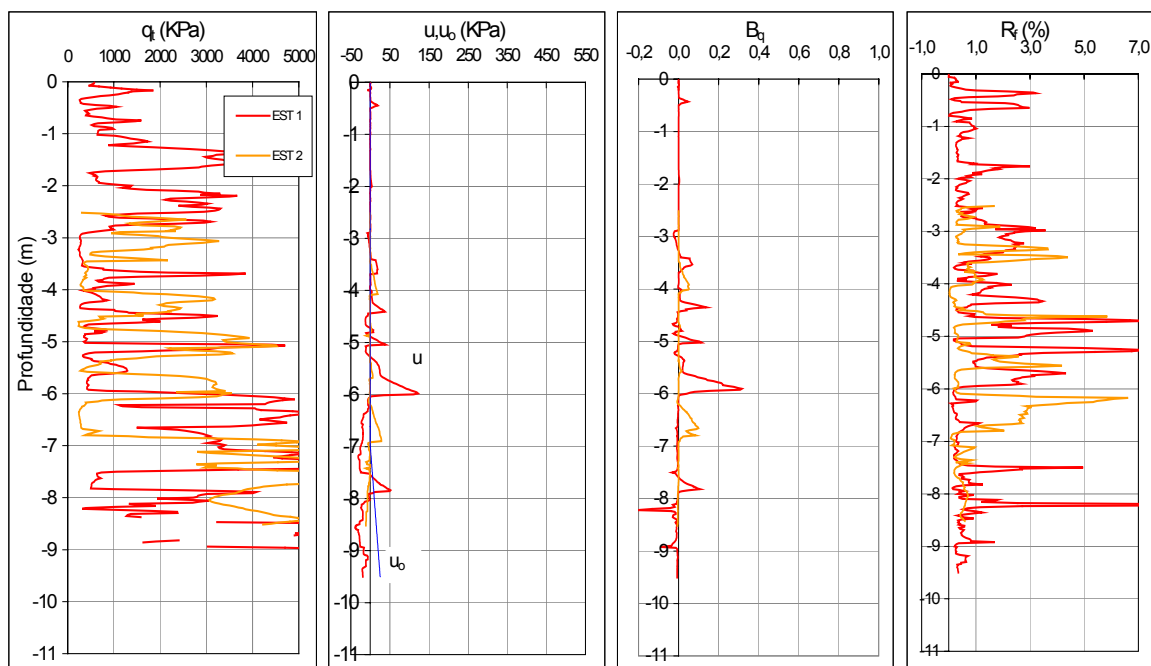
O perfil da razão de atrito lateral ( $R_f$ ) reforça a identificação de um perfil heterogêneo, com valores de  $R_f$  variando de 0 a 4. Analisando o conjunto de todos os perfis, observa-se a variabilidade estratigráfica do depósito, com uma matriz com valores de resistência de ponta baixos e várias lentes arenosas ao longo da profundidade. Em geral o material é classificado com um silte-areno-argiloso para a camada superficial, e silte-argilo-arenoso para as demais profundidades. O resultados obtidos em laboratório identificaram materiais na faixa de silte-arenosos a areia-siltosas, um material com fração granulométrica superior a de campo pelo fato das amostras terem sido retiradas na superfície do resíduo.

A proposta de classificação das camadas de solo desenvolvida por Robertson & Campanella (1983), usada na caracterização do resíduo na campanha de 1999, foi também utilizada nas campanhas de 2002, 2004 e 2005. A Figura 5.6 apresenta os resultados obtidos para as estações 1 e 7, enquanto as demais estações estão apresentadas no anexo III do caderno técnico.

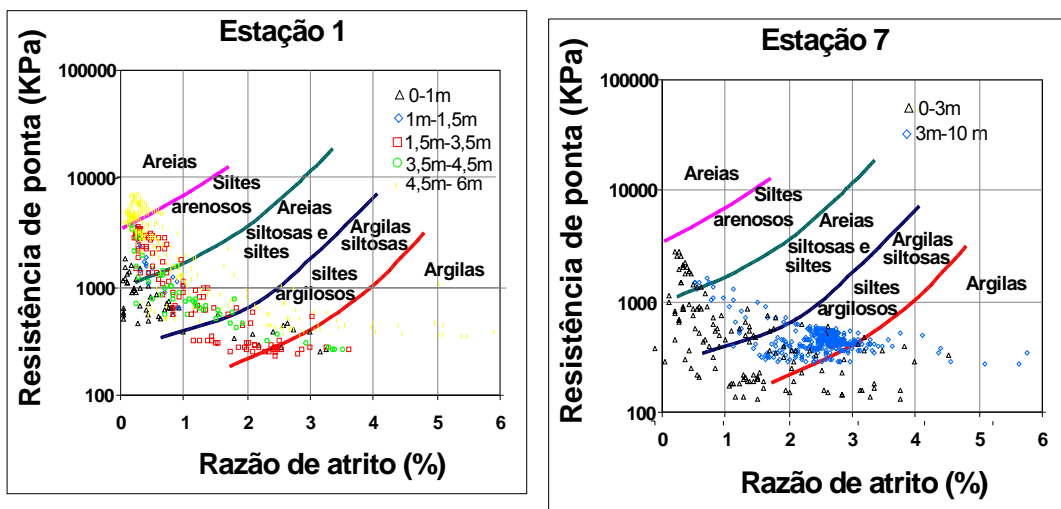
A estação 1 apresenta um material completamente heterogêneo, variando de silte-arenoso à argila e as estações 7 e 8 encontram-se solos na faixa das argila-siltosas ou silte-argilosos. Para as demais estações o comportamento é similar à estação 1, com grande variação de comportamento, de difícil classificação.



**Figura 5.4:** Perfil integrado de  $q_t$ ,  $u$ ,  $u_o$ ,  $B_q$  e  $R_f$  - ARB#2(campanha 2002 - estações 3,4,5,6,7,8).

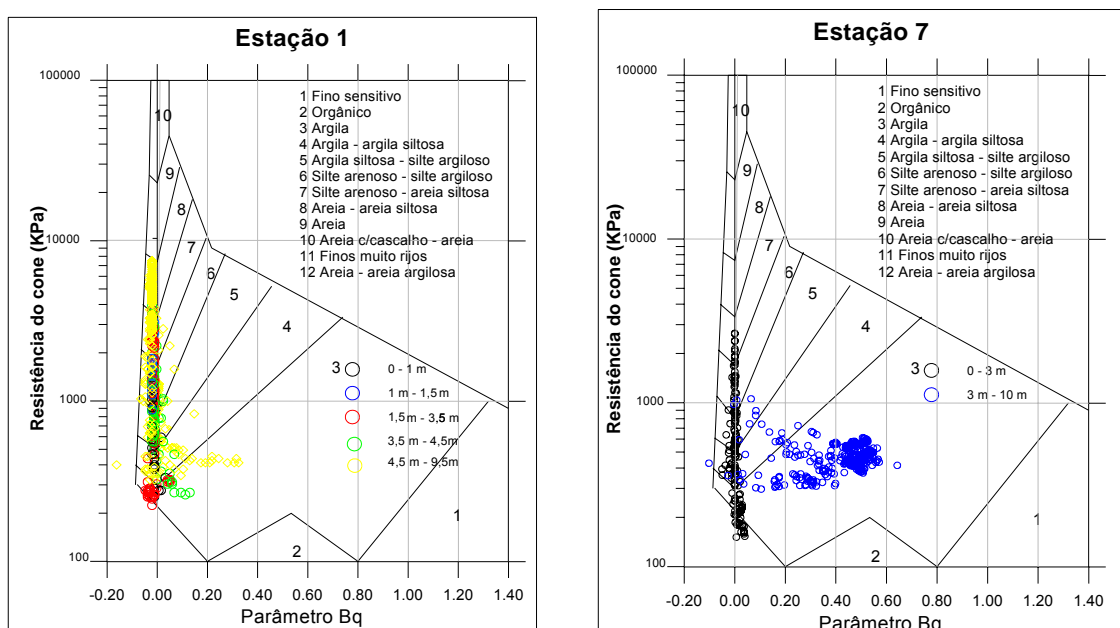


**Figura 5.5:** Perfil integrado de  $q_t$ ,  $u$ ,  $u_o$ ,  $B_q$  e  $R_f$  - ARB#2(campanha 2002 - estações 1,2).



**Figura 5.6:** Proposta de classificação de Robertson & Campanella (1983) - estações 1 e 7. (ARB#2 - campanha 2002).

O critério de classificação das camadas baseado no parâmetro de poro pressão está apresentado na Figura 5.7 para as estações 1 e 7. As demais figuras do caderno técnico apresentam os resultados das demais estações. Para este método de classificação observou-se novamente um material estratificado para a estação 1, enquanto na estação 7 o material ficou na faixa das argilas. Para as demais estações apresentadas no anexo III do caderno técnico, algumas camadas encontram-se na faixa das argilas, mas em geral o material apresenta características de acentuada heterogeneidade.

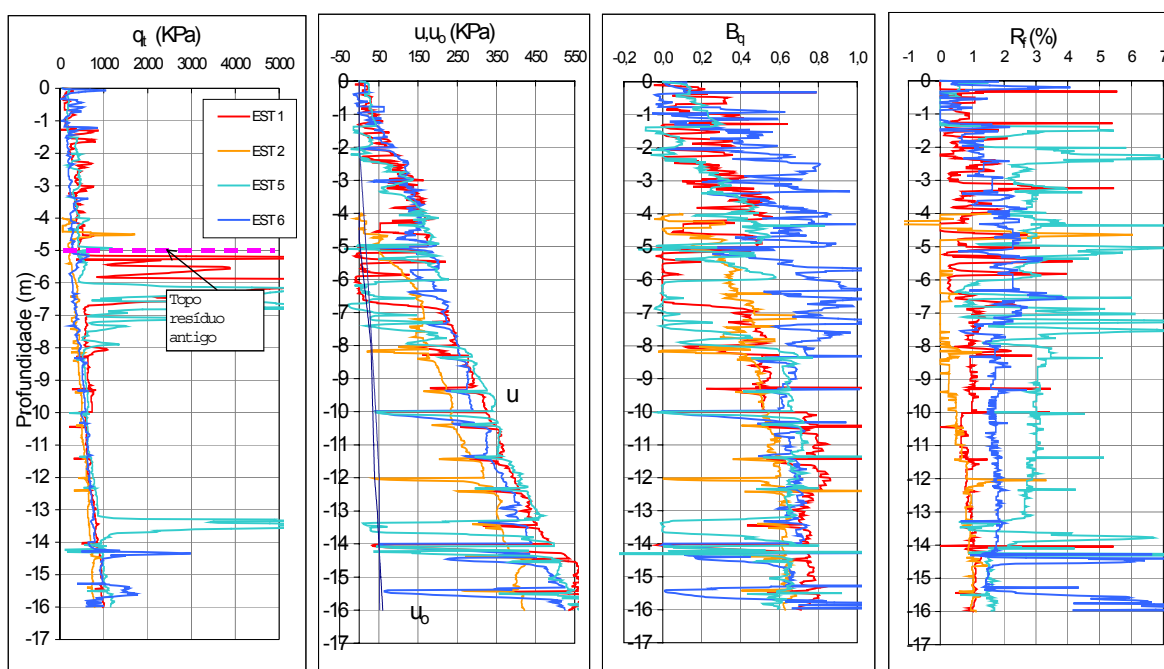


**Figura 5.7:** Proposta de classificação de Robertson (1986) - estações 1 e 7. (ARB#2 - campanha 2002).

### Campanha de 2004

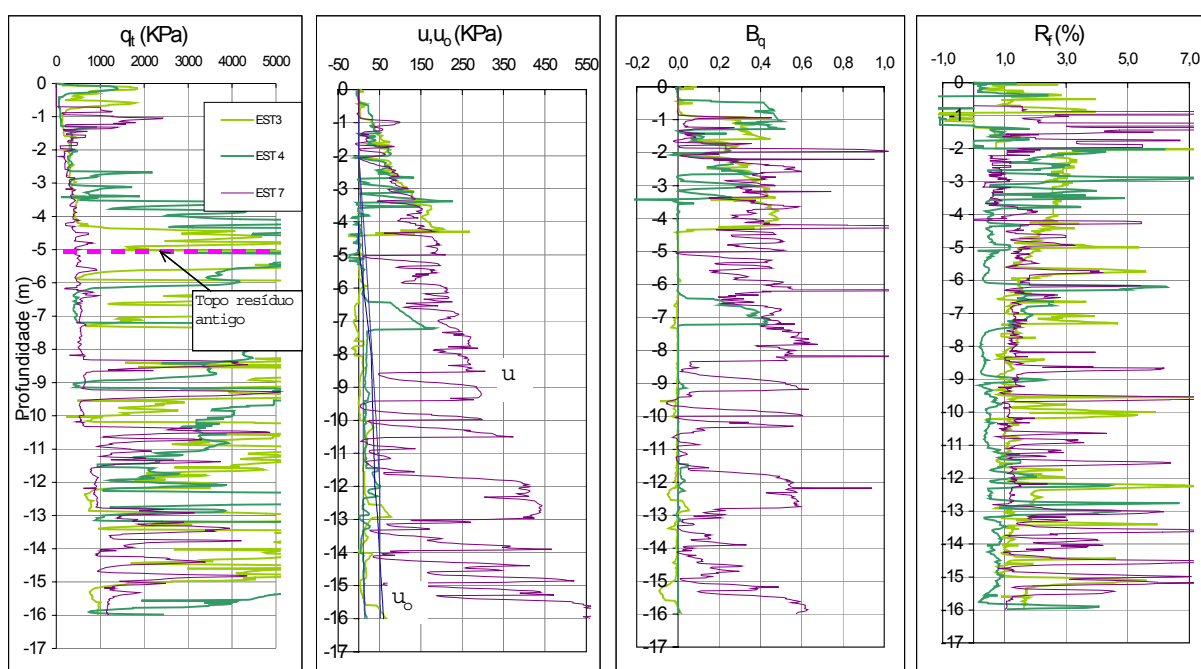
Em 2004 foi realizada uma nova campanha de ensaios, com uma cota em torno de 5 metros acima do resíduo antigo. Nesta campanha os ensaios foram realizados em 7 estações situadas em pontos diferenciados no reservatório, com distâncias superiores a 100m das torres centrais de despejo. As estações 3 e 4 foram locadas a uma distância inferior a 20m e a estação 7 perto de uma calha de despejo. Perfis com resultados típicos são apresentados na Figura 5.7; as estações 3, 4 e 7 foram plotadas em separado na Figura 5.9 por apresentarem comportamento distinto das demais.

Na análise dos perfis de poro pressão dinâmica ( $u$ ) e parâmetro de poro pressão ( $B_q$ ) observaram-se que as estações 3 e 4 não apresentaram geração de excesso de poro pressão, mas para as demais estações o perfil de  $B_q$  apresentou grande variabilidade de comportamento, com camadas típicas de materiais argilosos, com  $B_q$  superior a 0,3 e camadas com uma boa capacidade de drenagem, com valores inferiores a 0,3.



**Figura 5.8:** Perfil integrado de  $q_t$ ,  $u$ ,  $u_o$ ,  $B_q$  e  $R_f$  - ARB#2(campanha 2004 - estações 1,2,5,6).





**Figura 5.9:** Perfil integrado de  $q_t$ ,  $u$ ,  $u_o$ ,  $B_q$  e  $R_f$  - ARB#2 (campanha 2004 - estações 3,4,7).

Na análise conjunta dos resultados apresentados nas Figuras 5.8 e 5.9, observa-se a presença de um perfil estratigráfico formado de camadas de materiais compressíveis, intercaladas a camadas compostas por materiais heterogêneos e mais resistentes. O gráfico de resistência indica oscilações com presença de resistências variáveis ao longo do perfil, associadas com camadas arenosas ou ressecadas no resíduo antigo. Nas estações 1, 2, 5, 6 e 7 o resíduo é predominantemente silte-argiloso. Nas estações 3 e 4 foi identificado um material silte-arenoso a partir dos 5 m, ressaltando-se que o resíduo da operação de alteamento a montante, nestas estações, não é arenoso, pois o lançamento se deu apenas pelas bordas. Há que se considerar também que mesmo junto às torres, em períodos prolongados sem operação central, há um processo de deposição de resíduo mais fino, entremeadado à areia-siltosa.

A classificação granulométrica através dos resultados apresentados nos perfis de piezocone apresentou resultados similares aos obtidos em laboratório em amostras retiradas ao longo da profundidade. Para as estações 3 e 4 o resíduo antigo é formado de um material silto-arenoso, enquanto as demais amostras, tanto na pilha de alteamentos quanto no resíduo antigo, são compostas de material silte-argilo.

A proposta de Robertson & Campanella (1983) é apresentada na Figura 5.10 para as estações 4 e 6, (para as demais estações os resultados estão no caderno técnico). Para a estação 4 observa-se uma dispersão significativa dos resultados, com pequena concentração na faixa das areias e silte-arenosos; para a estação 6 e demais estações observa-se uma dispersão ainda maior, abrangendo a faixa de areias a argila-siltosas.

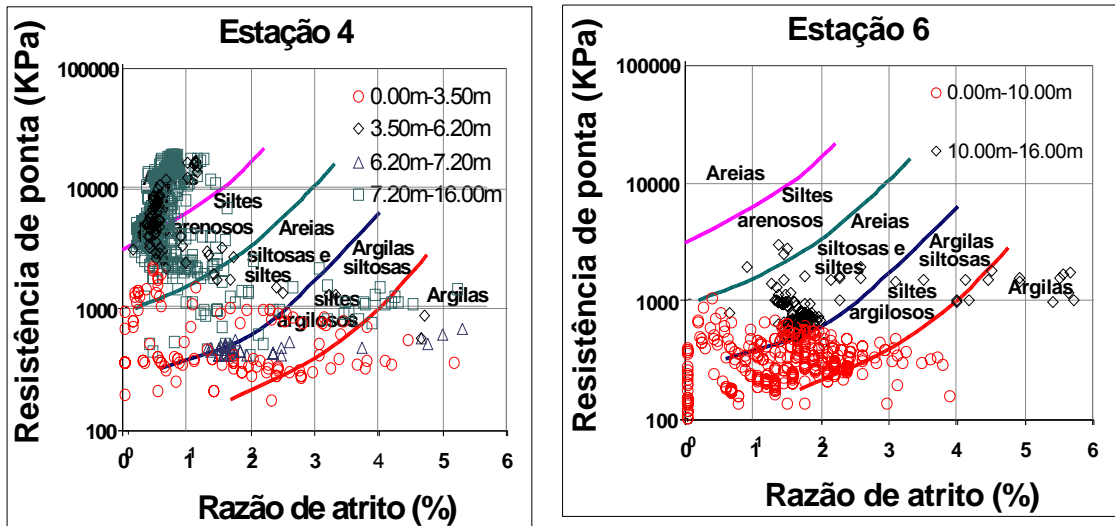


Figura 5.10: Proposta de classificação de Robertson & Campanella (1983) - estações 4 e 6. (ARB#2 - campanha 2004).

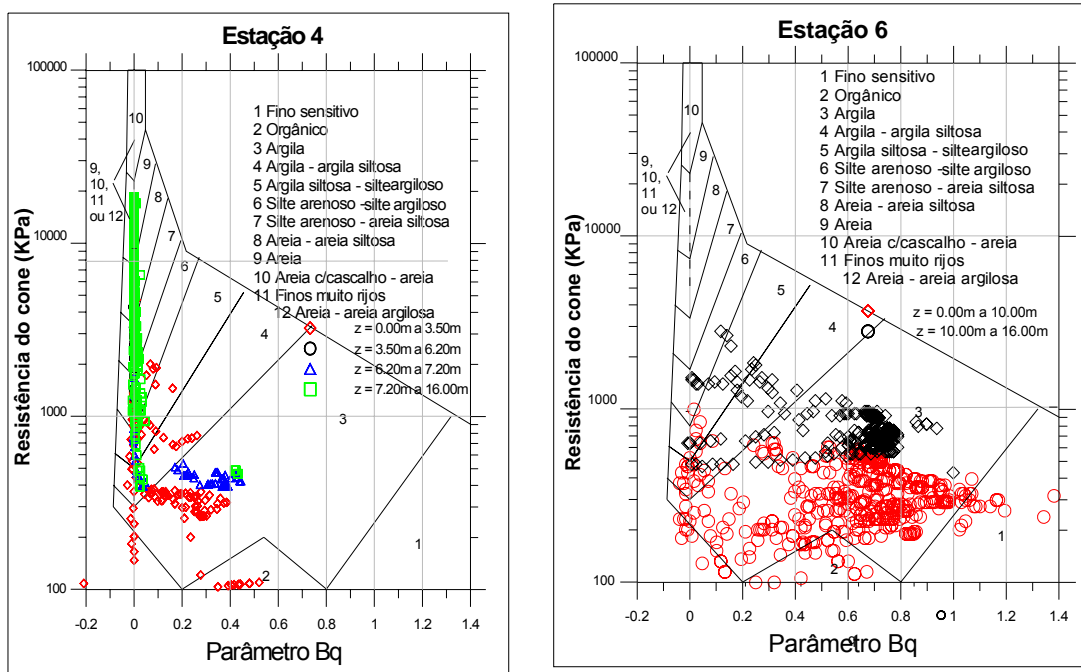


Figura 5.11: Proposta de classificação de Robertson (1986) - estações 4 e 6. (ARB#2 - campanha 2004).

O resíduo pode também ser classificado a partir dos parâmetros de poro pressão ( $B_q$ ) e da resistência de ponta ( $q_t$ ) usando a proposição desenvolvida por Robertson (1986), conforme apresentado na Figura 5.11 para as estações 4 e 6, (no caderno técnico estão as demais estações). Observa-se na estação 4 (e para a estação 3 em anexo), a predominância de material essencialmente arenoso para a camada referente ao resíduo antigo, enquanto nas demais estações há uma grande dispersão além da indicação de presença de material argiloso.

### ***Campanha 2005***

Nessa campanha as investigações foram programadas em nove estações distintas, localizadas distantes dos pontos de despejo do resíduo. Durante os ensaios, a superfície do resíduo na ARB# 3 encontrava-se submerso, sob lâmina d'água de altura variável, tipicamente entre 0,5m e 2,0 m acima da superfície do resíduo. As Estações 7, 8 e 9 correspondem àquelas nas quais se procurou verificar a influência do hidrato depositado no comportamento geomecânico do resíduo. A estação 5 localiza-se no dique Sul, próxima a uma calha de lançamento, na qual uma lente de areia compacta impossibilitou a cravação do piezocone.

As estações 1, 2, 3, 4LE, 4LD, 6AC, 7 estão apresentadas na Figura 5.12. Como as estações 6, 8 e 9 apresentaram comportamento distinto, pelo fato de estarem situadas mais próximas dos diques de contenção e calhas de despejo, seus resultados foram plotados em separado na Figura 5.13. Em todas as figuras adota-se como cota inicial à superfície do resíduo.

Os perfis na Figura 5.12 apresentaram características semelhantes em todas as estações, com valores de resistência e excessos de poro pressões crescendo monotonicamente com a profundidade. São também observados picos drenantes ao longo de praticamente todo o perfil, que devem estar associados a mudanças no ponto de descarga das linhas de resíduo, formando lentes de materiais arenosos devido ao já comentado processo de segregação hidráulica. Alguns picos estão associados à rápida dissipação da poro pressão durante a troca das hastes, enquanto outros identificam a presença de lentes drenantes. Existem pequenas variações nas profundidades na qual as lentes drenantes são identificadas quando se comparam diferentes verticais dos piezocones. Estas variações podem representar

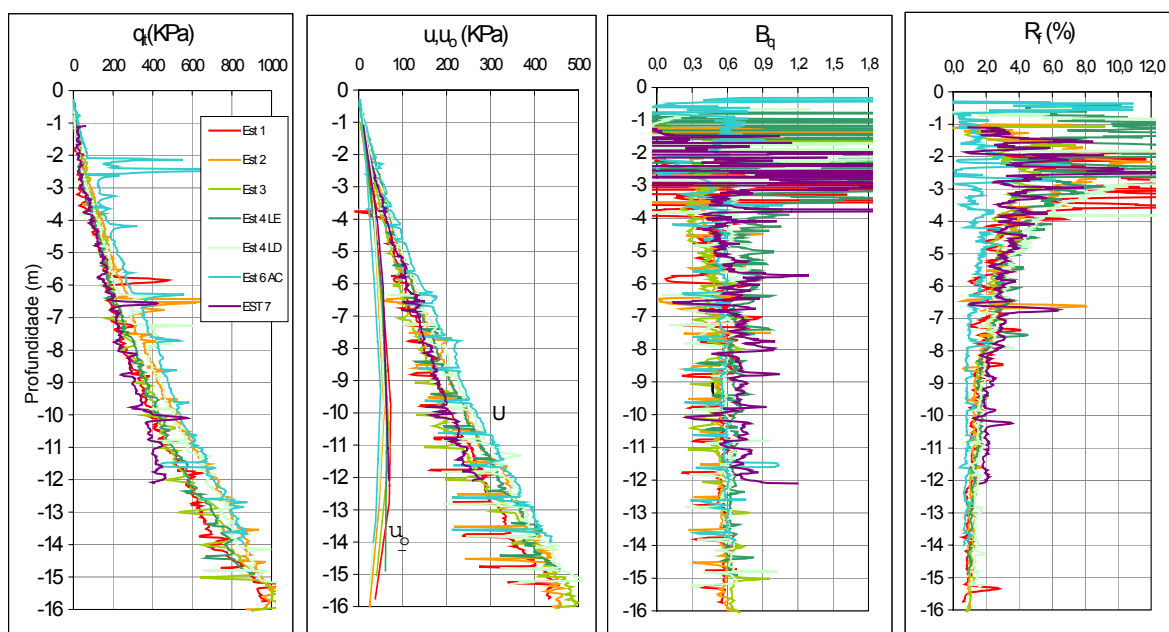
imprecisões na cota de topo do resíduo, utilizando como referência na comparação entre os ensaios ou variações de cota das camadas drenantes produzidas pelo processo de deposição.

O comportamento do resíduo nestas seções é também identificado através da observação dos perfis do parâmetro  $B_q$ , que apresenta valores dispersos até os 4 m de profundidade, mas, a partir desta profundidade, caracteriza-se por um valor médio de 0,6, com oscilações entre 0,3 e 0,8 produzidas pelas lentes de diferentes materiais. A análise conjunta da resistência de ponta, poro pressão e razão de atrito indica um padrão de variação de resíduo com a profundidade, mudanças de comportamento acentuada na profundidade de 4m identificação de material predominantemente silto-argiloso.

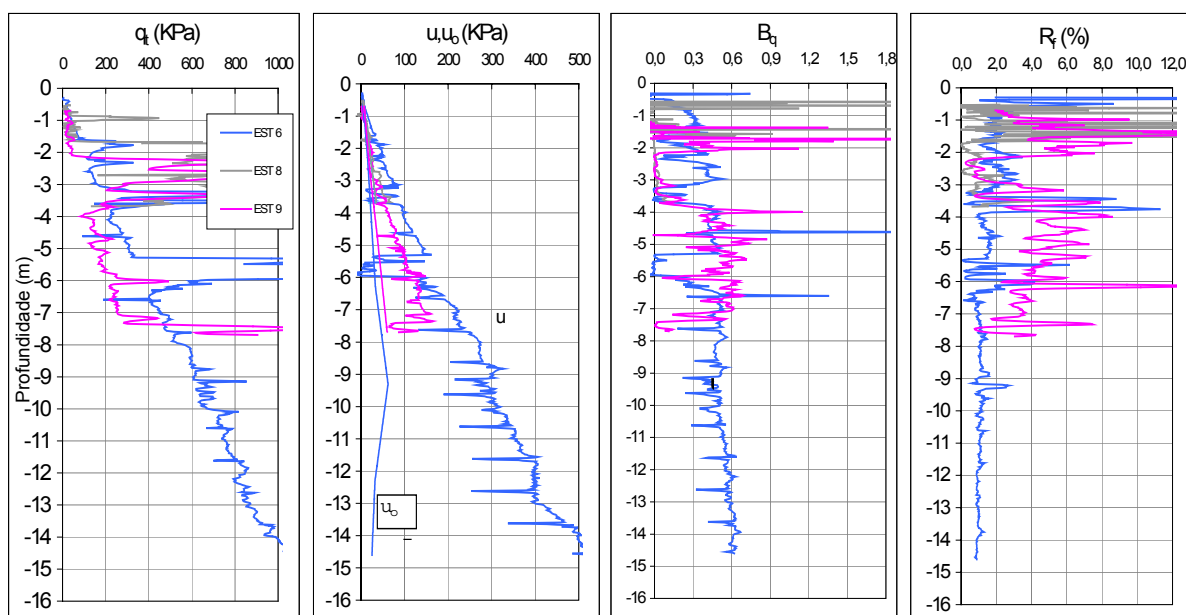
Para as estações 6, 8 e 9 apresentadas na Figura 5.13 observa-se um padrão de comportamento distinto daquele discutido anteriormente. A resistência cresce com a profundidade com valores de resistência significativamente maiores que os apresentados na Figura 5.12, especialmente nos primeiros metros de penetração.

A geração de poro pressão não é tão acentuada, com valores do parâmetro de  $B_q$  em torno de 0,4. Os perfis de poro pressões apresentaram uma geração discreta de poro pressão até os 8 m, sendo mais acentuada a partir desta profundidade. Em torno de 5,5m o ensaio realizado na estação 6 apresentou ocorrência de valores de poro pressão inferiores a linha de pressão de equilíbrio, que podem estar associados ao comportamento dilatante dos materiais siltosos e arenosos finos da crista.

Os resultados obtidos em laboratório, realizados em amostras superficiais, indicaram a presença de um material predominantemente siltoso. A estação 5 localiza-se próxima a uma calha de lançamento e apresentou um material mais arenoso. Em termos de granulometria, apenas o material da estação 5 e, menos significativamente, o material da estação 8 apresentaram um comportamento distinto das demais estações



**Figura 5.12:** Perfil integrado de  $q_t$ ,  $u$ ,  $u_o$ ,  $B_q$  e  $R_f$  - ARB#3(campanha 2005 - estações 1, 2, 3, 4LE, 4LD, 6AC, 7).



**Figura 5.13:** Perfil integrado de  $q_t$ ,  $u$ ,  $u_o$ ,  $B_q$  e  $R_f$  - ARB#3(campanha 2005, estações 6,8 e 9).

No critério de classificação de Robertson & Campanella, o resíduo ficou na faixa das argilas até a profundidade de 7 m, argila-siltosas ou silte-argilosos dos 7 a 12m e areia-siltosas e siltes após os 12 m, conforme ilustrado na Figura 5.14 para a estação 4 LE (as estações 1,2,3,4 DIR, 6 AC e 7 estão representadas no anexo III do caderno técnico). Já

para a estação 6 o resíduo apresentou dispersão acentuada até os 7 m, seguido de um material areno-siltoso ou silte. As estações 8 e 9 também apresentaram considerável nível de dispersão.

O critério de classificação de Robertson, baseado no parâmetro  $B_q$ , é ilustrado na Figura 5.15, na qual identifica-se um material na faixa das argilas, com inserções de material mais granular nas profundidades iniciais para a estação 6. Resultados correspondentes às demais estações são apresentados no caderno técnico e representam padrões similares aos discutidos.

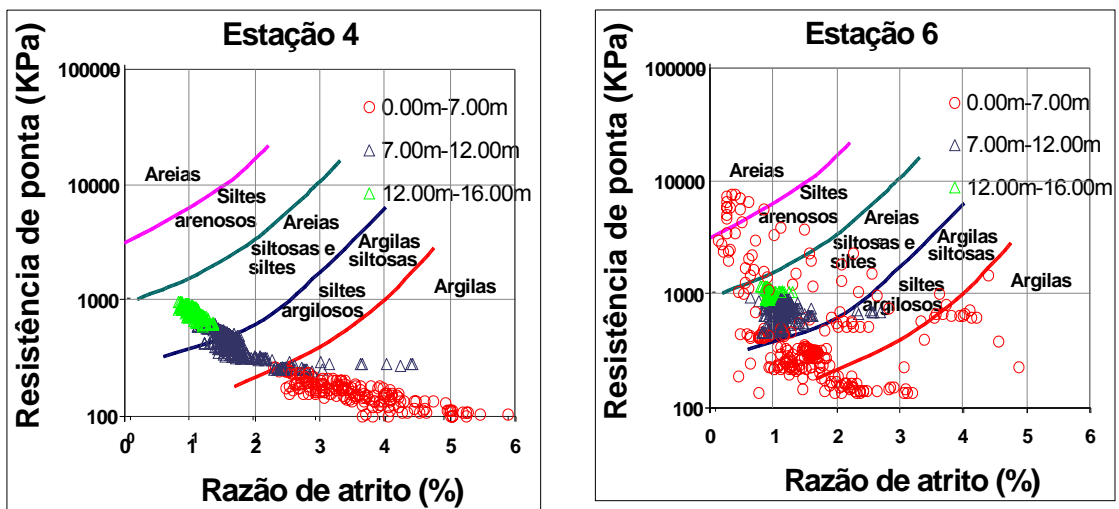


Figura 5.14: Proposta de classificação de Robertson & Campanella (1983) -estações 4 LE e 6. (ARB#3 - campanha 2005).

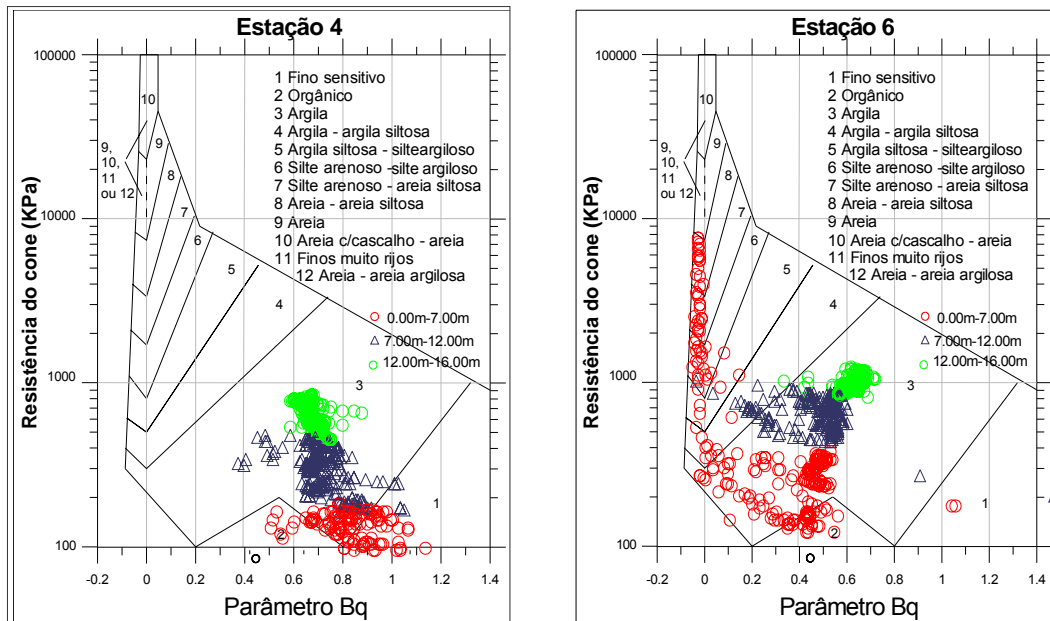


Figura 5.15: Proposta de classificação de Robertson (1986) - estações 4LE e 6 (ARB#3 - campanha 2005).

### ***Comparação entre diferentes campanhas de investigação***

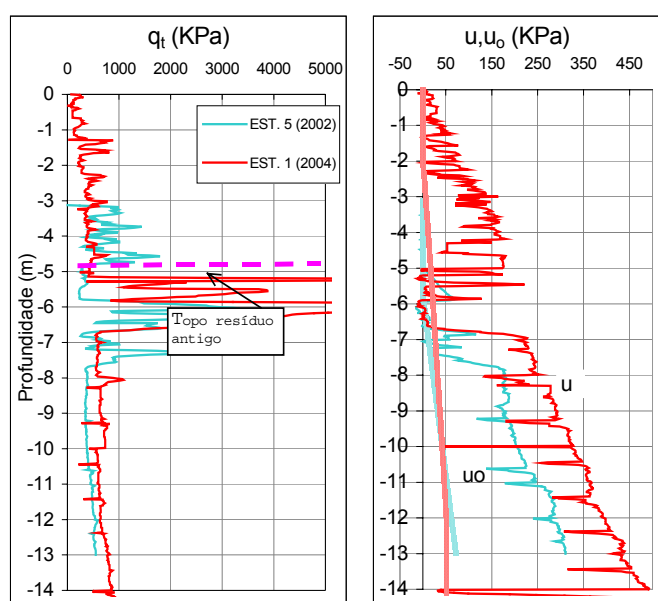
Na comparação entre ensaios é importante frisar novamente que as campanhas foram realizadas sob diferentes condições. Um croqui contendo as informações básicas quanto à localização dos ensaios foi apresentado anteriormente nas Figuras 3.4 e 3.5 no Capítulo 3, destacando-se os seguintes aspectos:

- em 1999 a ARB#2 estava há dois anos sem receber lançamento de resíduo. As investigações foram realizadas em outubro, no meio da estação seca, em locais distantes do lançamento do resíduo (pelo menos 100 m); somente a estação 4 estava situada próxima à torre de despejo central.
- em 2002 o reservatório estava sem receber resíduo há seis meses. A campanha foi realizada em julho, no final do período chuvoso, e os pontos de investigações estavam localizados em até 20m dos diques, próximos as calhas de despejo lateral.
- na campanha de 2004 o lançamento pela técnica de alteamentos a montante estava encerrada há quatro meses, sendo os ensaios realizados em julho, no final do período chuvoso. Os pontos das estações 3 e 4 foram localizados em uma distância inferior a 20m das torres centrais de despejo, a estação 7 perto de uma calha de despejo e as demais estações com distâncias superiores a 100m.
- a campanha de 2005 foi realizada na área ARB#3 no final de operação pelo método convencional e no final do período chuvoso. Nessa campanha as investigações foram localizadas distantes dos pontos de despejo do resíduo. Durante os ensaios, a superfície do resíduo na ARB# 3 encontrava-se submerso, sob lâmina d'água de altura variável, tipicamente entre 0,5m e 2,0 m acima do resíduo.

Em princípio esta comparação serve de indicativo das alterações de comportamento geradas pelo processo de adensamento do resíduo e da influência nos resultados das diferentes condições *in situ* durante a realização das campanhas. Para esta finalidade comparam-se perfis das estações de 1999 com a estação de 2002 e 2004. A campanha de 2005 foi realizada em reservatório distinto das demais campanhas, logo a comparação se deteve na avaliação de um perfil padrão representante de cada reservatório.

A variabilidade de comportamento entre os anos de 2002 e 2004 é demonstrada na Figura 5.16, na qual apresenta-se a comparação dos perfis da estação 5 de 2002 com o perfil da estação 1 de 2004, situadas em um local com disposição de material de granulometria silto-argilosa com camadas arenosas próximas à superfície do resíduo antigo. As duas campanhas foram realizadas no final do período chuvoso e estavam sem receber resíduo há alguns meses. Embora verifica-se a redução das poro pressões decorrentes do sistema de drenagem do depósito, não há variação significativa de resistência entre os ensaios.

Na comparação de resultados das campanhas de 1999, 2002 e 2004 utilizou-se a estação 2 do ano de 1999, estação 3 de 2002 e estação 6 de 2004. Nos resultados plotados na Figura 5.17 observam-se valores de resistência coincidentes, com alguns picos arenosos diferenciando os perfis. A geração de poro pressão é novamente mais acentuada na campanha de 2004 enquanto em 1999 o material apresenta uma drenagem mais acentuada. Pelo fato da campanha de 2005 ter sido realizada em reservatório distinto das demais campanhas, a comparação se deteve na avaliação do comportamento do resíduo nas diferentes áreas de deposição. A comparação é apresentada na Figura 5.18, na qual utilizaram-se os resultados da estação 6, representando um perfil típico da área ARB#2, e os resultados da estação 4 LE, como um perfil representativo da área ARB#3 característicos de áreas de deposição de materiais finos, não-drenados. Analisando os perfis das duas áreas, observa-se um comportamento semelhante, com resistência crescente com a profundidade, geração acentuada de poro pressão e uma boa eficiência da drenagem de fundo, com valores de poro pressão de equilíbrio reduzida junto ao fundo.



**Figura 5.16:** Perfil integrado de  $q_t$ ,  $u$ ,  $u_o$ .



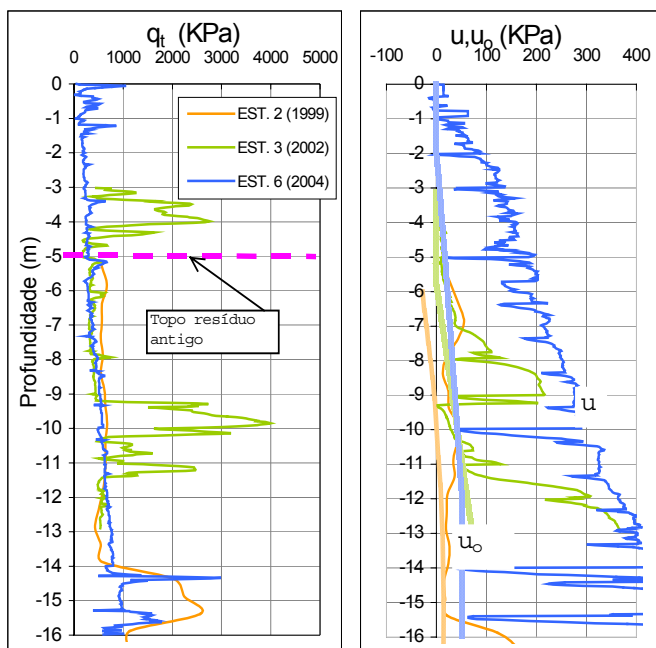


Figura 5.17: Perfil integrado de qt, u, uo.

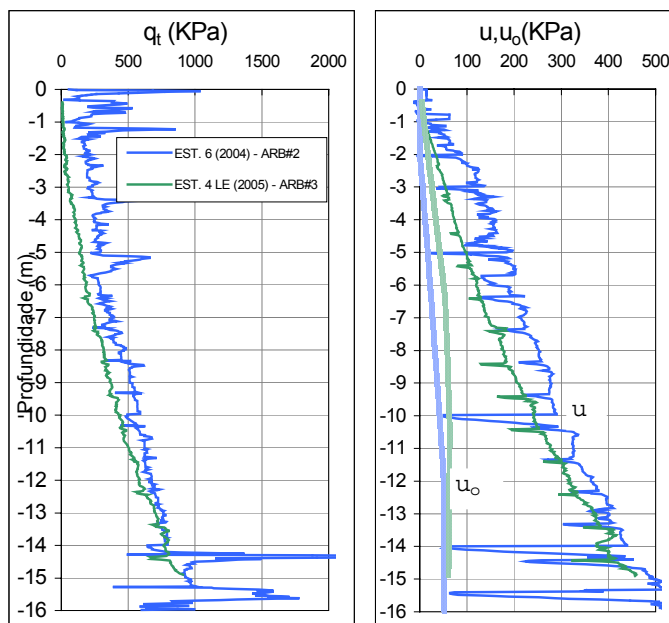


Figura 5.18: Perfil integrado de qt, u, uo.

A principal alteração de comportamento do resíduo observada nas diferentes campanhas refere-se às condições de drenagem, com valores inferiores de poro pressão identificada nas campanhas iniciais. A resistência à penetração do resíduo apresentou pouca mudança com passar do tempo. O lento processo de adensamento do resíduo e a influência nas

diferentes condições durante a realização das campanhas explicam eventuais variações. Outro ponto que pode ter influenciado nos resultados é o lançamento pelo método de alteamentos a montante. É importante destacar também que embora as estações apresentadas situam-se em pontos próximos no reservatório, não situam-se exatamente no mesmo ponto, ocasionando a comparação de materiais com caracterizações distintas.

### 5.2.2 Avaliação do processo de segregação hidráulica

A segregação hidráulica gera considerável variabilidade estrutural, alterando os parâmetros de resistência, deformabilidade e condutividade hidráulica. A forma de deposição do resíduo provoca seleção das partículas e sua conseqüente deposição em diferentes locais ao longo da trajetória do fluxo. De maneira geral, os grãos lançados hidraulicamente no reservatório tendem a se depositar nas proximidades dos pontos de descarga, sendo o processo de seleção das partículas função do tamanho dos grãos.

Assim, a realização de ensaios de piezocone na área de deposição pode representar uma ferramenta útil na avaliação do processo de segregação hidráulica. Buscando avaliar a distribuição granulométrica das partículas ao longo da área, realizaram-se comparações dos perfis de resistência de ponta ( $q_t$ ) e poro pressão gerada ( $u$ ) durante a cravação, em perfis obtidos em várias posições na área de disposição, em pontos diferenciados em relação às torres e calhas de despejo de resíduo.

A Figura 5.19 apresenta os perfis de resistência de ponta e poro pressão da estação 4, situada próxima a uma torre de despejo e da estação 6, ambas realizadas na campanha de 2004. Observando os gráficos nota-se boa drenagem e valores elevados de resistência de ponta quando decorrência de material mais arenoso, com a aproximação dos pontos de descarga dos resíduos. Já no perfil da estação 6 verifica-se baixos valores de resistência e elevada poro pressão, característicos de materiais argilosos.

Na campanha de 2005, a avaliação do processo de segregação hidráulica foi observado através da comparação dos perfis das estações 4 e 6, apresentados na Figura 5.20. A estação 6 está locada próxima a uma calha de despejo de resíduo, apresentando valores superiores de poro pressão e resistência comparada a estação 4.

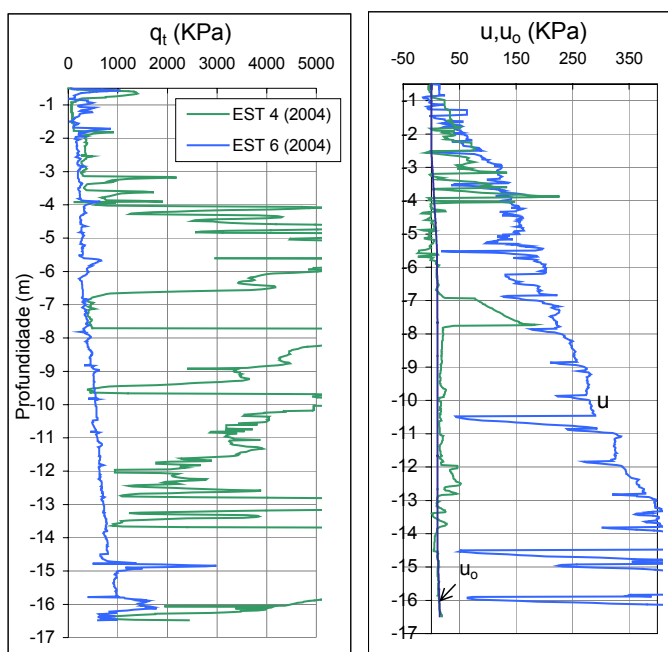


Figura 5.19: Perfil integrado de qt, u, uo- ARB#2.

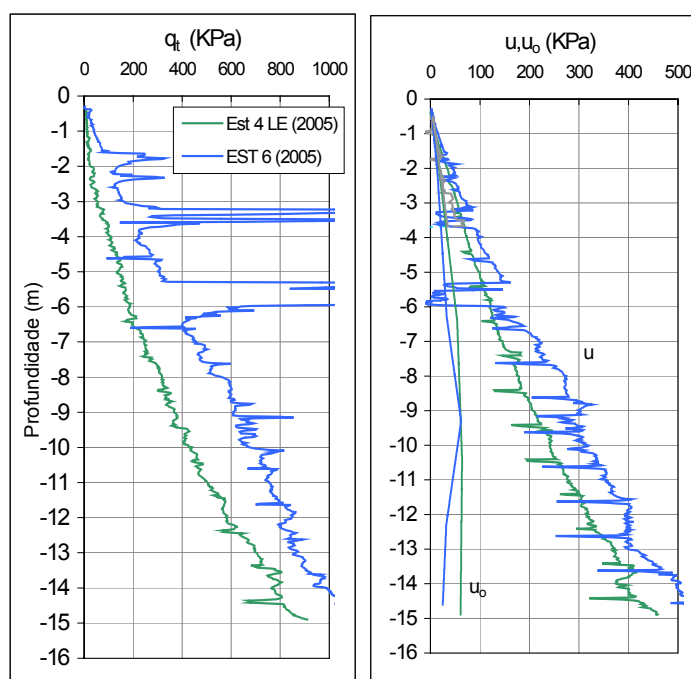


Figura 5.20: Perfil integrado de qt, u, uo - ARB#2.

### 5.2.3 Síntese dos resultados

A realização dos ensaios de piezocone nas áreas de deposição de resíduos comprovou a eficiência desta ferramenta na avaliação da composição e distribuição granulométrica no depósito. A elaboração dos perfis de resistência, poro pressões geradas e razão de atrito

possibilitaram a discretização do processo de deposição dos resíduos de bauxita, evidenciando o comportamento dos depósitos e a ocorrência de estratos heterogêneos ao longo da profundidade.

Analisando os resultados apresentados nas três campanhas de investigação geotécnica realizadas na área de disposição de resíduos ARB#2, observam-se alterações de comportamento. A campanha de 1999, com estações situadas distantes dos pontos de despejo apresentou uma composição majoritariamente silto-argilosa, com ocorrência de lentes arenosas em cotas variáveis. Na campanha de 2002, realizadas em pontos próximos as calhas de lançamento do resíduo, o material foi classificado como um silte-areno-argiloso para a camada superficial, e um silte-argilo-arenoso para as demais profundidades. Já os resultados da campanha de 2004, com estações distantes dos pontos de lançamento, com exceção da estação 3 e 4, se observou a presença de camadas homogêneas de material silto-argiloso, intercaladas a camadas compostas por materiais heterogêneos e mais resistentes. A classificação granulométrica de cada campanha apresentou resultados similares aos obtidos em laboratório em amostras superficiais e retiradas ao longo da profundidade.

Na campanha de 2005, realizada na área de disposição ARB#3, a análise conjunta dos resultados indicou picos drenantes ao longo de praticamente todo o perfil, tratando-se de um rejeito predominantemente silto-argiloso. Os resultados de laboratório realizados em amostras superficiais indicaram um material predominantemente siltoso.

A identificação de um padrão de comportamento granulométrico do resíduo de bauxita estudado nesse trabalho é bastante complexa devido a vários fatores como forma de disposição no reservatório, processo de segregação hidráulica, condições de adensamento, influência nos resultados sob diferentes condições na realização das campanhas. No geral pode se dizer que o resíduo depositado em reservatório possui uma granulometria fina, intercaladas a lentes arenosas, com considerável excesso de poro pressões ao longo da profundidade na grande maioria das estações ensaiadas.

A presença de lentes arenosas nos reservatórios pode estar relacionada basicamente a mudanças nos pontos de descarga do resíduo. Outra hipótese para justificar a ocorrência destas lentes mais resistentes seria um possível ressecamento da superfície do resíduo no período de interrupção do lançamento, formando lentes concrecionadas. Deve ser

destacada a importância da identificação destas lentes na variação das características de condutividade hidráulica e resistência do depósito, podendo interferir no fluxo gravitacional da fração líquida dos resíduos, diminuindo o tempo de sedimentação das partículas no interior do depósito e representando um fator fundamental na redução dos tempos de adensamento dos sedimentos.

O processo de segregação hidráulica é observado quando se comparam perfis de piezocone das estações situadas em locais diferenciados, em relação às calhas e torres de lançamento do resíduo. As estações próximas dos pontos de despejo indicaram uma maior concentração de partículas grossas com tendência de diminuição da fração granulométrica com o aumento da distância das torres e calhas de despejo.

A utilização das propostas de classificação desenvolvida para depósitos naturais apresentada por Robertson & Campanella (1983) que envolve a resistência de ponta e a razão de atrito apresentou uma composição granulométrica majoritariamente superior à relação encontrada pelo critério desenvolvido por Robertson (1986), que relaciona a resistência de ponta e o coeficiente de poro pressão. De maneira geral ambas propostas apresentaram ocorrências que variam de materiais argilosos a areias, sendo assim, ressalta-se que as diferentes propostas de classificação, apresentaram grande dispersão que comprometem sua aplicabilidade na avaliação do comportamento de materiais não usuais.

### 5.3 PARÂMETROS GEOTÉCNICOS

Os parâmetros geotécnicos analisados são a resistência ao cisalhamento, o coeficiente de adensamento e coeficiente de condutividade hidráulica do resíduo.

#### 5.3.1 Resistência ao cisalhamento dos resíduos

Um aspecto considerado central ao projeto de áreas de deposição de resíduos refere-se à influência da drenagem na estimativa dos parâmetros constitutivos de resíduos, em particular na previsão a resistência ao cisalhamento. Na interpretação de ensaios de piezocone em solos com permeabilidade intermediária é importante a identificação das condições de drenagem impostas ao solo durante a penetração (Schnaid, 2005). Ensaio de

piezocone só podem ser interpretados quando asseguradas condições não-drenadas (análise em termos de tensões totais) ou perfeitamente drenadas (análise em termos de tensões efetivas).

Neste capítulo, a resistência ao cisalhamento será interpretada à luz de abordagens empíricas já consagradas na prática internacional. Nestas abordagens, valores do parâmetro de poro pressão ( $B_q$ ) inferiores a 0,3 são indicativos de comportamento drenado ou parcialmente drenado do resíduo durante a penetração, enquanto que valores do parâmetro superiores a 0,3 são considerados como indicativos de comportamento não-drenado (e.g. Schnaid, 2004). Assim considera-se a ocorrência de condições drenadas apenas para o resíduo de granulometria mais arenosa, localizadas junto aos pontos de despejo e para camadas arenosas de maior espessura.

O ensaio de palheta, tradicionalmente empregado na determinação da resistência ao cisalhamento não-drenada ( $S_u$ ), foi também utilizado na investigação geotécnica, nas camadas onde o piezocone identificava solos finos e condições não-drenadas. Nestas áreas foi utilizado o equipamento do tipo A (vane borer) descrito na NBR 10905. Foram executados ensaios de palheta nas campanhas de 1999, 2002 e 2004 na ARB#2, a diversas profundidades ao longo de toda espessura do resíduo.

Valores de resistência não-drenada obtidos nos ensaios de palheta foram utilizados para calcular valores de  $N_{kt}$  necessários à interpretação dos ensaios de piezocone. A grande maioria dos valores de  $N_{kt}$  encontrado no depósito englobou a faixa entre 10 e 20, valores inferiores a 10 e superiores a 20 foram eliminados por estarem fora da faixa usualmente citada na literatura, estabelecida para solos naturais (p. ex. Lunne, Robertson e Powell, 1997). Após a eliminação dos valores extremos, determinou-se o valor representativo de  $N_{kt}$  para cada estação e valores médios para o reservatório.

No caso de ensaios do piezocone em materiais de comportamento drenado, o ângulo de atrito interno dos resíduos pode ser estimado a partir de correlações empíricas (Robertson e Campanella; 1983) ou, alternativamente, através de correlações estabelecidas com base em teorias de capacidade de carga (Sanneset e Sanden, 1988).

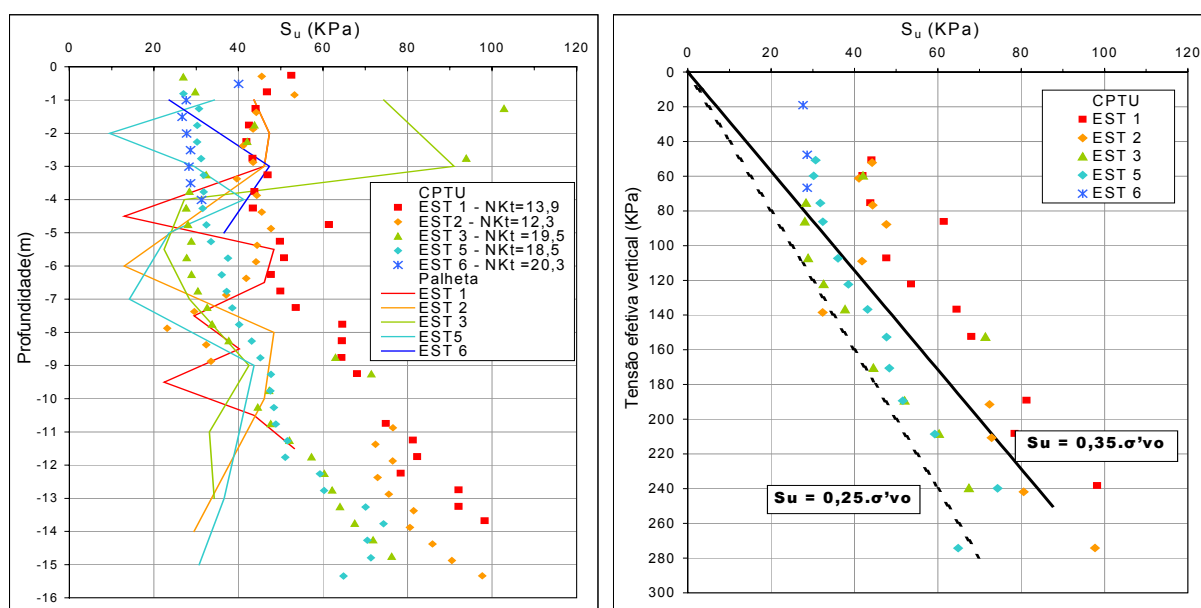
**Campanha de 1999**

Na campanha de 1999, na área de resíduos, observaram-se condições predominantemente não-drenadas característicos de uma composição majoritariamente silto-argilosa do depósito, com valores de  $B_q$  iguais ou maiores a 0,3. Nas estações 2 e 3 até 9 m de profundidade tem-se valores de  $B_q$  inferiores a 0,3, típicos de materiais silto-arenosos. Valores de  $N_{kt}$  obtidos pelos ensaios de palheta necessários à interpretação dos ensaios de piezocone variaram de 18,5 a 20,3 para as estações 3, 5 e 6; para as estações 1 e 2 os valores apresentaram-se inferiores, com  $N_{kt}$  em torno de 13.

A Figura 5.21 apresenta os resultados de resistência ao cisalhamento não-drenada obtido pelo ensaio de piezocone e palheta. Na mesma figura utilizam-se os resultados dos ensaios de piezocone para determinar a faixa de variação da resistência com a profundidade, expressa em função da tensão efetiva vertical. Observa-se nesta figura que a razão de  $S_u/\sigma'_{vo}$  varia tipicamente na faixa entre 0,25 e 0,35. A experiência de argilas identifica valores de  $S_u/\sigma'_{vo}$  de 0,25 como característicos de solos normalmente adensados, em siltes estes valores são ligeiramente superiores (na faixa medida de 0,25 a 0,35) em função do comportamento expansivo observado durante o cisalhamento.

Em geral, a resistência ao cisalhamento determinada através do piezocone para as estações 3, 5 e 6 foram inferiores aos obtidos nas estações 1 e 2, havendo clara tendência de aumento de resistência com a profundidade.

Pelo fato das estações 2 e 3 apresentarem comportamento predominantemente drenado até os 9 metros de profundidade os ensaios de piezocone foram utilizados na determinação do ângulo de atrito interno  $\phi'$ . Os resultados obtidos por correlações empíricas (Robertson e Campanella; 1983) e correlações estabelecidas com base em teorias de capacidade de carga (Sanneset, 1988). São apresentados na Tabela 5.1. Os valores apresentaram uma variação na faixa entre 23 e 30°.



**Figura 5.21:** Variação de valores de  $S_u$  com a profundidade e de  $S_u$  com  $\sigma'_{vo}$  - campanha de 1999.

**Tabela 5.1:** Determinação do ângulo de atrito interno  $\phi'$  (graus) para as estações 2 e 3 - campanha de 1999.

Estação	Prof. (m)	$\phi'$ (graus)	
		Robertson e Campanella	Senneset e outros
2	2 - 9	23 - 27°	28
3	2 - 9	25 - 30°	30

### Campanha de 2002

Na avaliação dos resultados de ensaios de campo e laboratório, verificou-se a variabilidade estratigráfica do depósito, classificado como silte-areno-argiloso na camada superficial e silte-argilo-arenoso para as demais profundidades. As estações 3, 4, 5, 6 e 7 apresentaram valores de  $B_q$  superiores a 0,3, enquanto nas estações 1 e 2 não houve excesso de poro pressão durante a cravação com valores de  $B_q$  igual a zero. Valores de  $N_{kt}$  necessários para a interpretação dos ensaios de piezocone ficaram em 12 e 13 para todas as estações ensaiadas.

A resistência ao cisalhamento não-drenada obtida pelos ensaios de piezocone e palheta é apresentada na Figura 5.22. Os valores apresentam considerável dispersão, em particular nas camadas mais arenosas nas quais observam-se picos de resistência consideravelmente

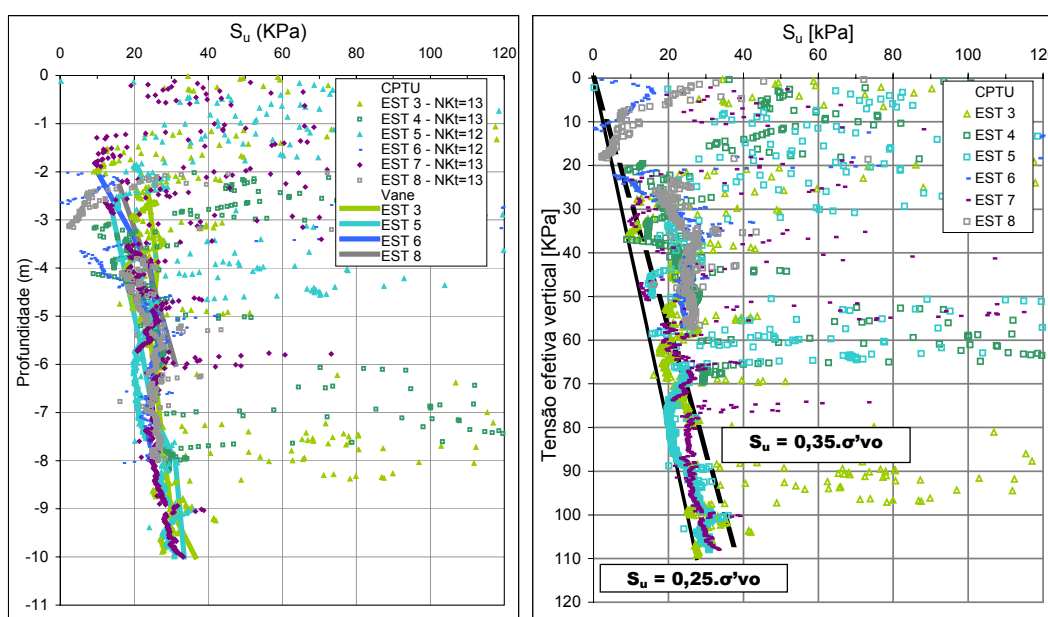


superiores aos valores registrados para condições não-drenadas. Em conformidade com a campanha de 1999, a razão de  $S_u/\sigma'_{vo}$  apresentou valores médios de 0,35, característicos de siltes normalmente adensados.

O cálculo da resistência em termos de tensões efetivas foi realizado para as estações 1 e 2, que apresentaram boa drenagem durante a penetração. A análise indicou ângulos de atrito interno variando ao longo da profundidade em uma faixa compreendida entre 28 e 38°.

**Tabela 5.2:** Determinação do ângulo de atrito interno  $\phi'$  (graus), para as estações 1 e 2 - campanha de 2002.

		$\phi'$ (graus)	
Estação	Prof. (m)	Robertson e Campanella	Senneset e outros
1	1 - 10	28 - 35°	30
2	2 - 6	30 - 38°	32

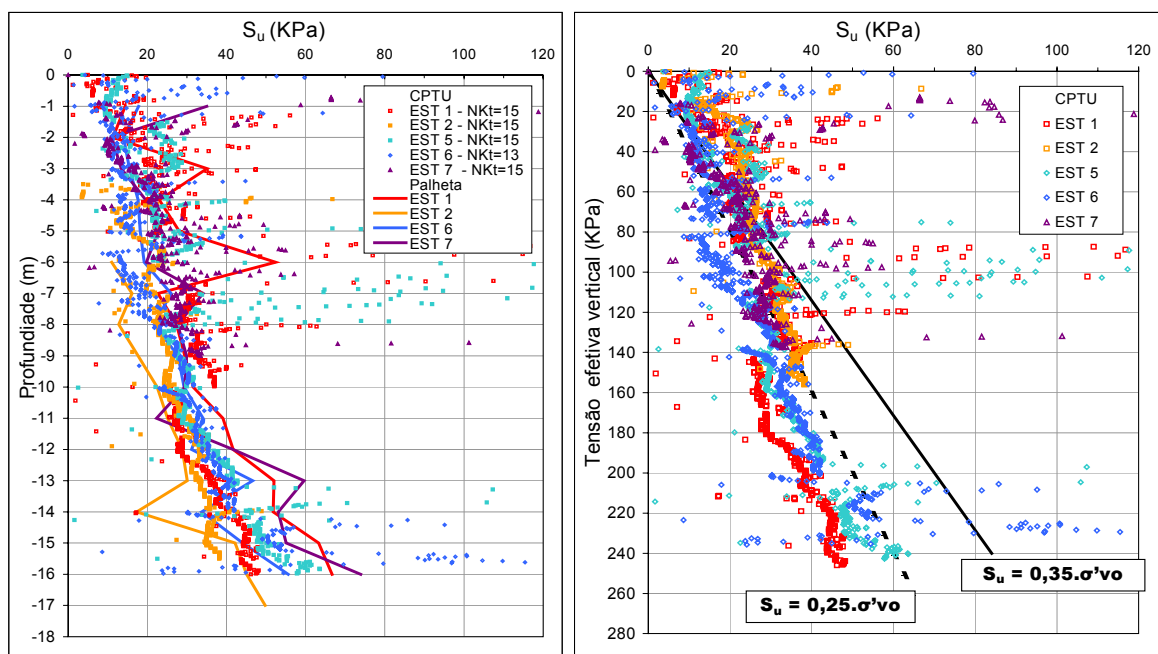


**Figura 5.22:** Variação de valores de  $S_u$  com a profundidade e de  $S_u$  com  $\sigma'_{vo}$  - campanha de 2002.

**Campanha de 2004**

Na campanha de 2004 as estações 3 e 4 apresentaram condições predominantemente não-drenadas, caracterizando um material silto-arenoso, para as demais estações o perfil do parâmetro de poro pressão ( $B_q$ ) apresentou grande variabilidade de comportamento com valores  $B_q$  superiores a 0,3 chegando a 0,8, típico de uma composição silto-argilosa e argilosa do depósito. Para a interpretação dos ensaios de piezocone utilizaram-se valores de  $N_{kt}$  iguais a 15, com exceção da estação 6 na qual foi adotado um valor de 13.

A Figura 5.23 apresenta a variação de resistência ao cisalhamento com a profundidade obtida pelos ensaios de piezocone e palheta. Observa-se tendência de aumento de resistência com a profundidade com uma clara dispersão dos valores na camada superficial. Apenas os valores encontrados para a estação 2 foram inferiores aos demais. Na mesma figura a relação  $S_u/\sigma'_{vo}$  determinada através dos resultados de piezocone apresentou valores superiores com considerável dispersão na camada superficial e no geral variação de valores entre 0,25 e 0,35 repetindo o comportamento das campanhas anteriores.



**Figura 5.23:** Variação de valores de  $S_u$  com a profundidade e de  $S_u$  com  $\sigma'_{vo}$  - campanha de 2004.

As estações 3 e 4 situadas perto das torres de lançamento do resíduo e a estação 7 após os 9 metros de profundidade apresentaram um material essencialmente arenoso, logo realizou-se o cálculo da resistência em termos de tensões efetivas. Os valores para o ângulo de atrito efetivo  $\phi'$  determinado segundo as teorias de Robertson e Campanella e de Senneset e outros, apresenta-se na Tabela 5.3. Os valores apresentaram uma variação na faixa entre 30 e 39°.

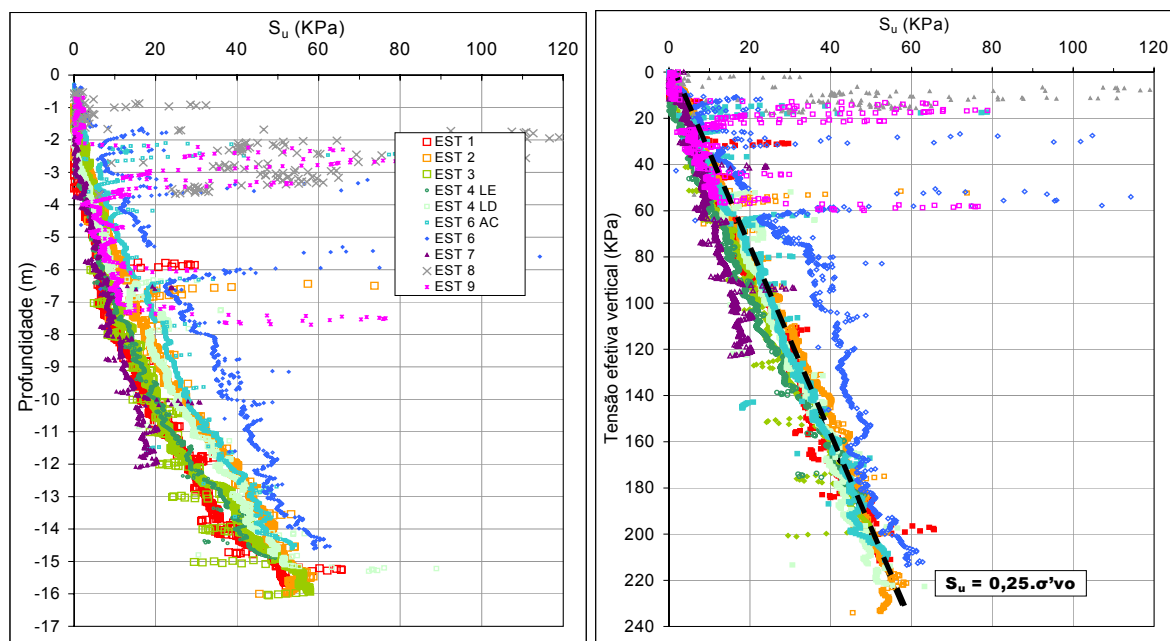
**Tabela 5.3:** Determinação do ângulo de atrito interno  $\phi'$  (graus), para as estações 3,4 e 7 - campanha de 2004.

Estação	Prof. (m)	$\phi'$ (graus)	
		Robertson e Campanella	Senneset e outros
3	4 - 16	30 - 35°	30
4	3,5 - 6	35 - 38°	39
	7 - 16	30 - 35°	30
7	9 - 16	30 - 33°	27

### **Campanha de 2005**

Na campanha de 2005, realizada na área de deposição de resíduo ARB#3, a análise conjunta dos resultados de piezocone indicou um resíduo predominantemente silto-argiloso para todas as estações. Os valores do parâmetro de poro pressão, apresentaram valores dispersos até os 4 m de profundidade e a partir daí numa faixa entre 0,3 e 0,8, com um valor médio de 0,6. Tendo em vista a falta de ensaios de palheta para a aferição do parâmetro  $N_{Kt}$ , optou-se por utilizar o valor médio de 13,5 obtidos nas campanhas anteriores.

A Figura 5.24 apresenta a variação da resistência com a profundidade, indicando uma tendência de acréscimo ligeiramente não linear. Os resultados mostram um maior crescimento de resistência para profundidades superiores a 8,0m. As camadas superficiais de resíduo apresentam baixos valores de  $S_u$ , significativamente inferiores aos obtidos em campanhas anteriores. Ainda na Figura 5.24 é apresentada a variação de  $S_u$  com a tensão efetiva vertical, onde observa-se uma relação  $S_u/\sigma'_{vo}$  da ordem de 0,25, típico de depósitos normalmente adensados.

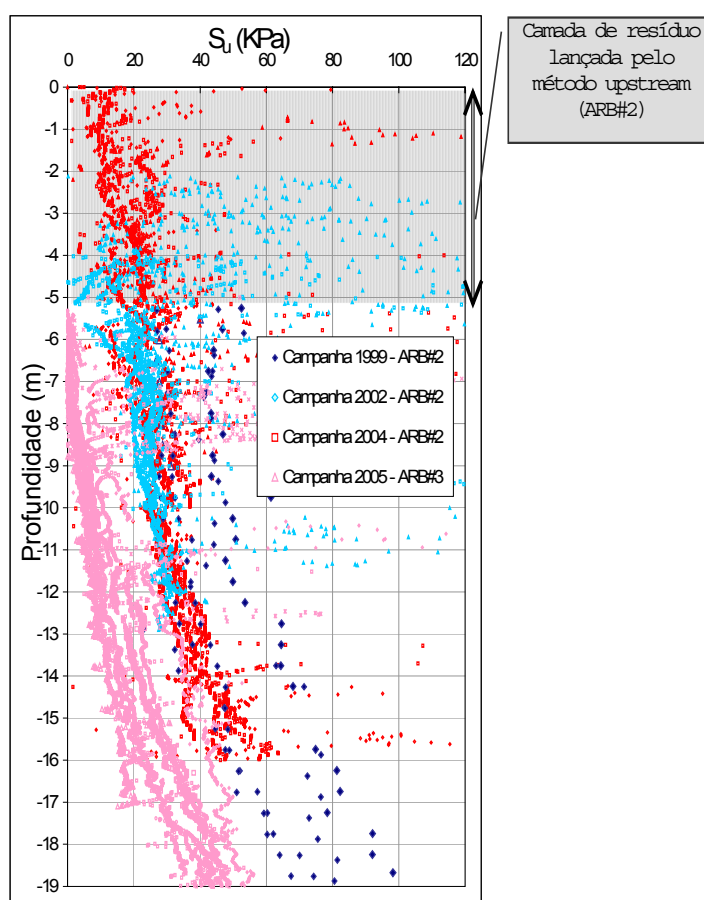


**Figura 5.24:** Variação de valores de  $S_u$  com a profundidade e de  $S_u$  com  $\sigma'_{vo}$  - campanha de 2005.

### *Comparação entre campanhas*

A Figura 5.25 compara resultados de resistência ao cisalhamento entre os anos de 1999, 2002 e 2004 referente às campanhas realizadas na área ARB#2 e o ano de 2005 na campanha realizada na área ARB#3. Na figura destaca-se a camada de resíduo lançada pelo método de alteamentos a montante, sendo que essa camada deve ser desconsiderada quando se compara à campanha de 2005.

A área ARB#2 apresentava um material mais ressecado na época de realização das campanhas, logo os valores de resistência obtidos na ARB#3 são inferiores aos obtidos na ARB#2. As campanhas de 2002 e 2004 apresentam boa concordância nos resultados, cujos valores são inferiores aos obtidos no ano de 1999.



**Figura 5.25:** Comparação da variação de valores resistência não drenada (piezocone) para áreas ARB#2 e ARB#3.

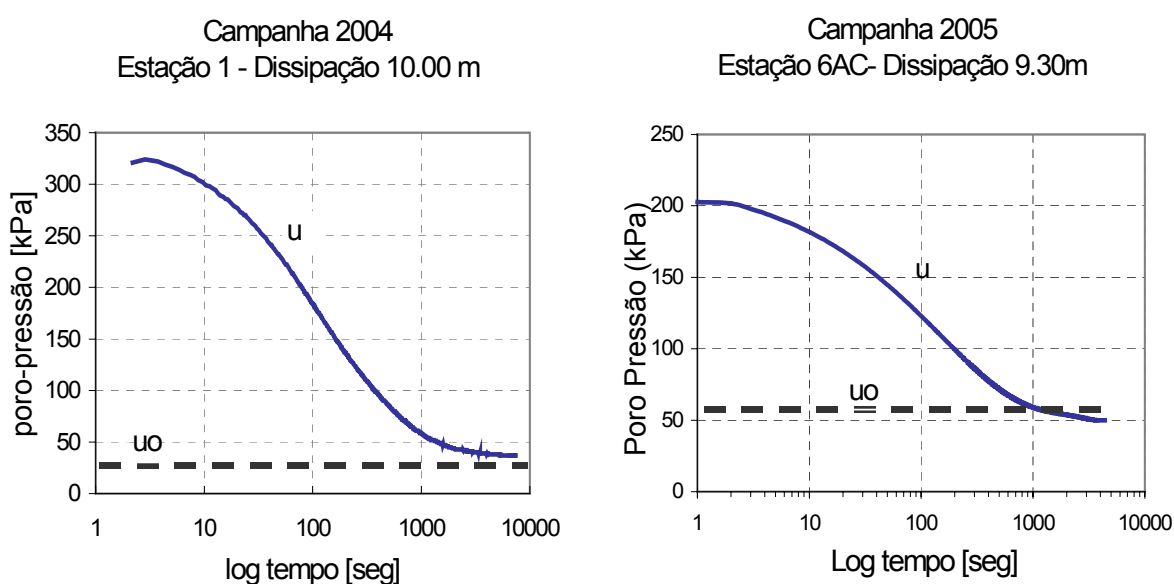
### 5.3.2 Estimativa do coeficiente de adensamento.

Ensaio de dissipação do excesso de poro pressões neutras geradas durante a cravação do piezocone foram realizados em todas as verticais ensaiadas. Ensaio de dissipação são elementos de significância na interpretação das condições geotécnicas (condições de contorno) das áreas de deposição do resíduo. Estas áreas possuem um sistema de drenagem inferior que produz uma condição de fluxo descendente durante o período de adensamento, sendo necessário a determinação precisa da posição do nível d'água ( $u_0$ ) no período de realização dos ensaios de piezocone.

Na estimativa do coeficiente de adensamento horizontal a cravação do piezocone foi interrompida até atingir-se o equilíbrio hidrostático. Os valores do coeficiente de

adensamento horizontal foram calculados segundo a metodologia proposta por Houslby & Teh (1988), com um índice de rigidez igual a 100, corrigindo-se os efeitos de pré-adensamento através de valores experimentais medidos do coeficiente  $RR/CR=0,14$  e a anisotropia de permeabilidade vertical e horizontal  $k_v/k_h=1/2$  quando da determinação do coeficiente de adensamento vertical na condição normalmente adensada (Jamiolkowsky e outros, 1985). Na seqüência analisam-se os as campanhas de 1999, 2002, 2004 e 2005 para ao final discutir o conjunto de resultados obtidos.

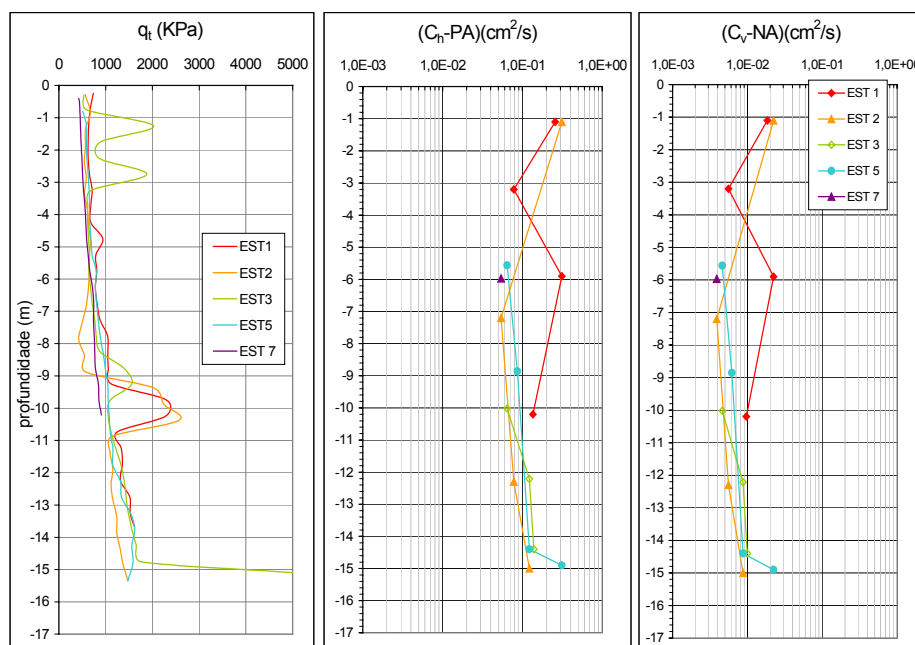
Exemplos típicos da curva de dissipação são mostrados na Figura 5.26, determinados na estação 1 na campanha de 2004 e na estação 6 AC na campanha de 2005 (comportamentos semelhantes são verificados nas campanhas de 1999 e 2002, com geração expressiva de poro pressão na cravação seguindo de rápida dissipação de poro pressão). As demais curvas de dissipação de todas as campanhas de ensaio são apresentadas no caderno técnico publicado por Bedin (2006).



**Figura 5.26:** Ensaio de dissipação da poro pressão realizado na área de deposição do resíduo- ARB#2 e ARB#3.

Na Figura 5.27 apresentam-se os valores de resistência de ponta ( $q_t$ ), coeficiente de adensamento horizontal na condição pré-adensada ( $C_h$ ) e coeficiente de adensamento vertical na condição normalmente adensada ( $C_v$ ) na campanha de 1999, na área de deposição ARB#2.

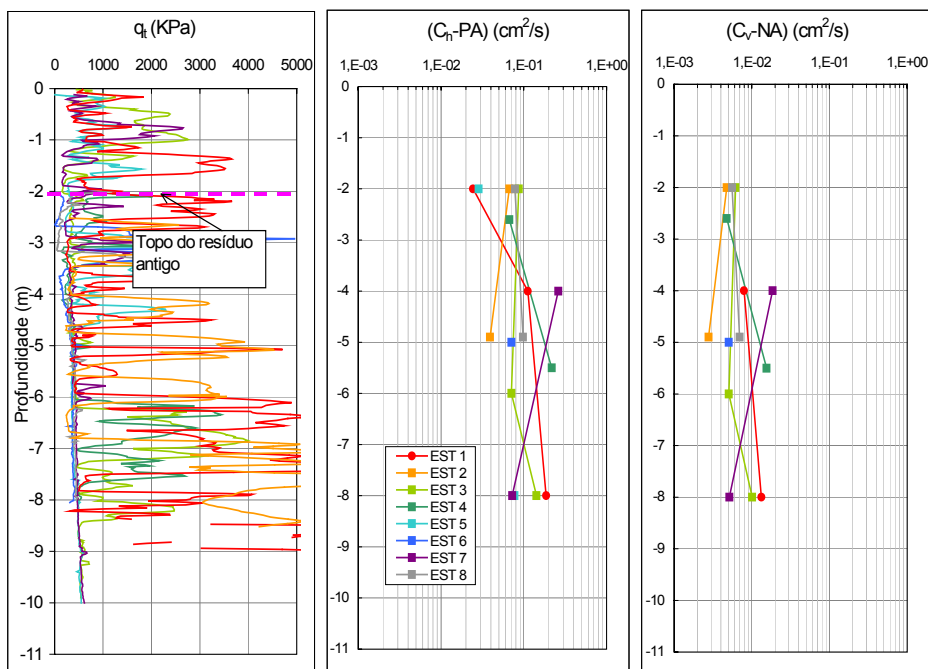
Os valores de coeficiente de adensamento vertical concentram-se na faixa entre 0,004 e 0,02  $\text{cm}^2/\text{s}$ , enquanto os valores de coeficiente de adensamento horizontal situam-se entre 0,05 e 0,3  $\text{cm}^2/\text{s}$ . Esses valores foram encontrados na região abaixo do nível d'água, observando-se uma tendência de valores mais elevados próximos à superfície do resíduo.



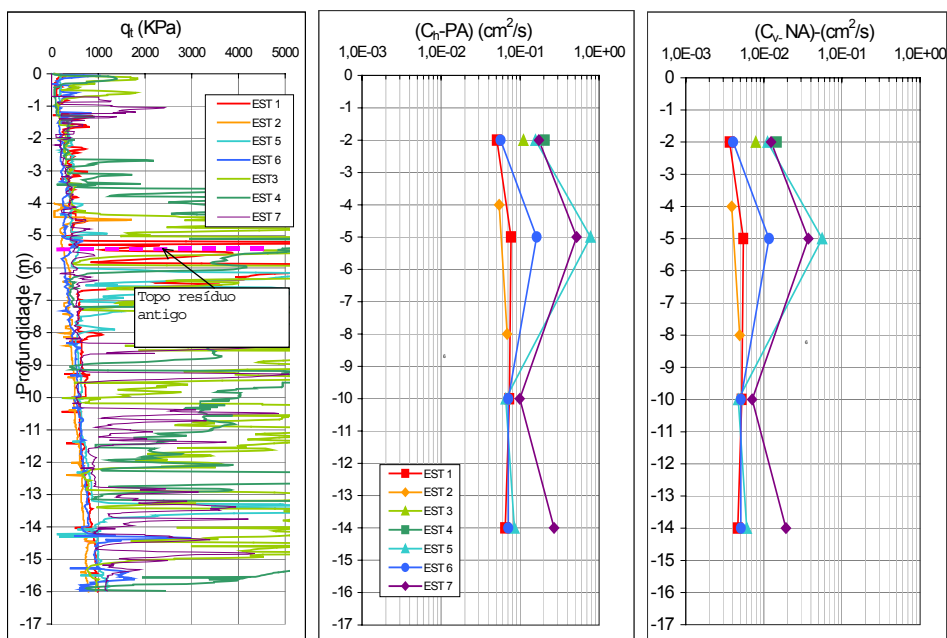
**Figura 5.27:** Variação de valores de  $q_t$ ,  $C_h$  e  $C_v$  ao longo da profundidade - campanha de 1999.

A Figura 5.28 apresenta valores obtidos de resistência e coeficiente de adensamento medidos na campanha de 2002. Os valores de coeficiente de adensamento vertical concentram-se na faixa entre 0,003 e 0,02  $\text{cm}^2/\text{s}$ ; os valores de coeficiente de adensamento horizontal concentraram-se entre 0,03 e 0,3  $\text{cm}^2/\text{s}$ . No topo do resíduo antigo observa-se uma tendência de redução nos valores obtidos.

Na campanha de 2004, realizada quando o método de lançamento do resíduo por alteamentos a montante já tinha sido encerrado. Nesta campanha os valores de coeficientes de adensamento horizontal determinados através do piezocone produziram valores na faixa entre 0,005 e 0,08 ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ) e coeficientes de adensamento vertical entre 0,003 e 0,05 ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ), como pode ser observado na Figura 5.29.



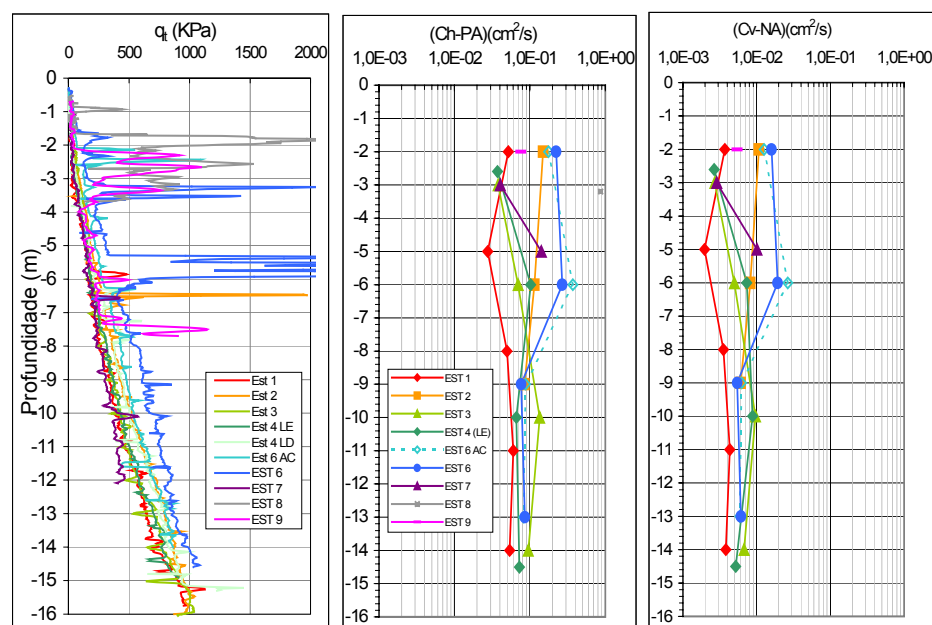
**Figura 5.28:** Variação de valores de  $q_t$ ,  $C_h$  e  $C_v$  ao longo da profundidade - campanha de 2002.



**Figura 5.29:** Variação de valores de  $q_t$ ,  $C_h$  e  $C_v$  ao longo da profundidade - campanha de 2004.



Finalmente, na Figura 5.30 apresentam-se valores obtidos para os coeficientes de adensamento vertical e horizontal da campanha de 2005, na qual observam-se valores de coeficiente de adensamento vertical na faixa entre 0,003 e 0,03  $\text{cm}^2/\text{s}$  e valores de coeficiente de adensamento horizontal entre 0,03 e 0,4  $\text{cm}^2/\text{s}$ .

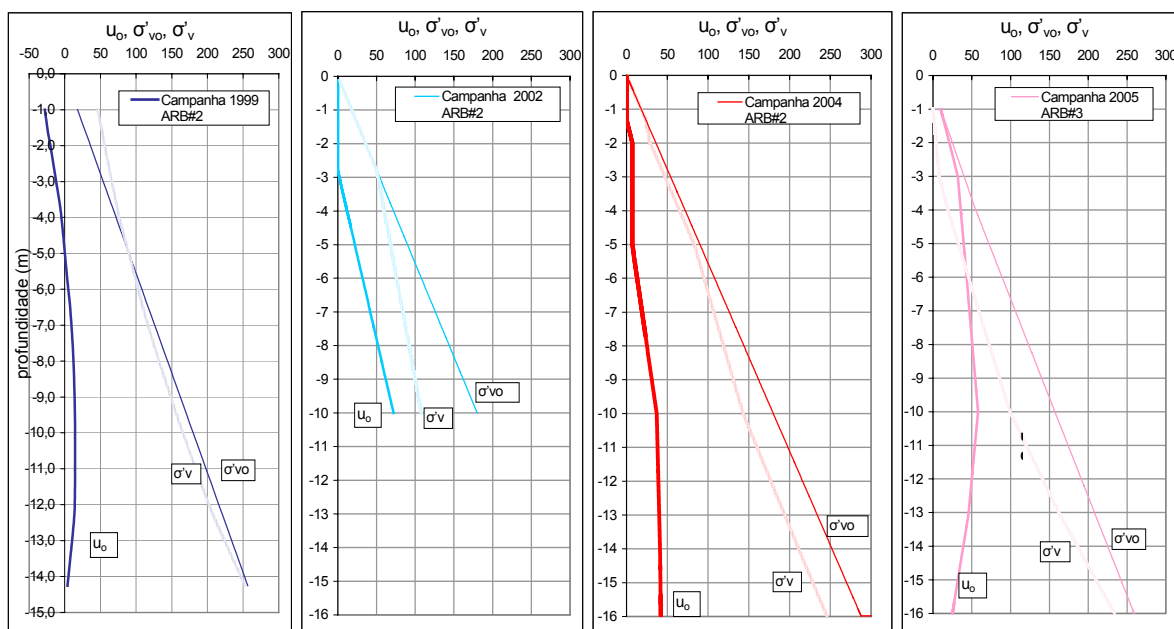


**Figura 5.30:** Variação de valores de  $q_t$ ,  $C_h$  e  $C_v$  ao longo da profundidade - campanha de 2005.

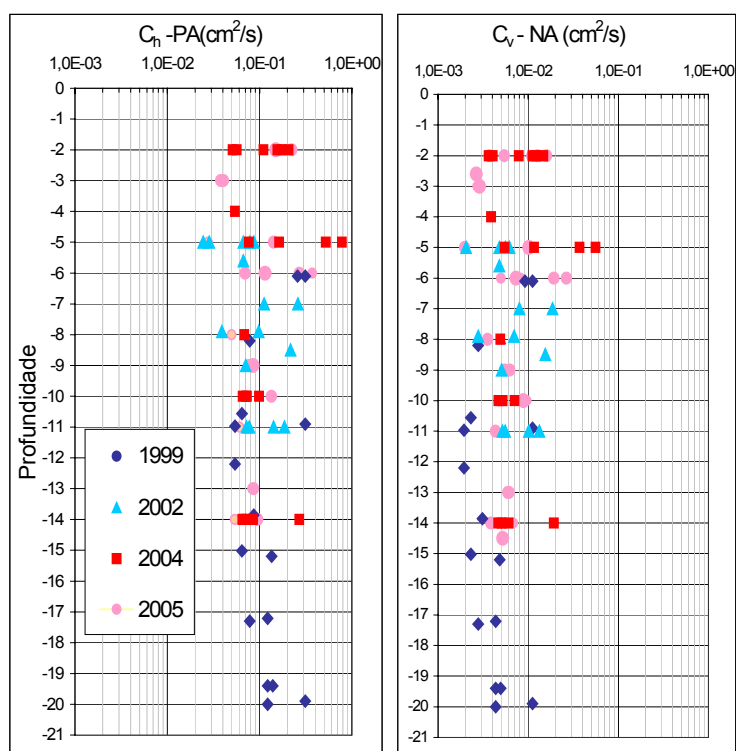
### *Comparação entre os resultados*

Como já mencionado anteriormente, as 3 campanhas na área de resíduos ARB#2 foram realizadas em diferentes condições de deposição, logo os resultados dos ensaios podem apresentar divergência de comportamento. A identificação das poro pressões de equilíbrio no interior do reservatório foi realizada através de perfurações para amostragem e complementarmente pela estabilização das poro pressões medidas na paralisação da penetração do piezocone a diferentes profundidades. A Figura 5.31 apresenta os perfis de poro pressão de equilíbrio, tensões totais e tensões efetivas das 4 campanhas de ensaios. Devido à drenagem, as pressões de equilíbrio reduzem junto às cotas de fundo enquanto na região superficial as pressões oscilam em função de processos de infiltração e evaporação. Verifica-se que nestas campanhas o nível do lençol freático varia de ano para ano: as investigações em 2002 e 2004 foram executadas logo após o final de operação e ainda no período chuvoso, enquanto em 1999 a superfície do resíduo estava exposta há algum tempo

numa condição seca. A campanha de 2005 encontrava-se com o nível d'água acima da superfície do resíduo. Verificou-se boa eficiência da drenagem de fundo, com valores de poro pressão de equilíbrio reduzido junto ao fundo do depósito.



**Figura 5.31:** Variação das poro pressões de equilíbrio, tensões totais e efetivas com a profundidade nas 4 campanhas de ensaios.



**Figura 5.32:** Variação de valores de coeficiente de adensamento - comparação das áreas ARB#2 e ARB#3

Na Figura 5.32 são apresentados os coeficientes de adensamento horizontal e vertical obtidos dos ensaios de dissipação no piezocone a diferentes profundidades para todas as campanhas realizadas na área da ARB#2 e para a campanha da área ARB#3. Embora se observe alguma dispersão entre as diferentes campanhas de investigação, os valores são em geral ligeiramente inferiores a  $0,06 \text{ cm}^2/\text{s}$  e não apresentam variação significativa com a profundidade. A Tabela 5.4 apresenta um resumo de valores dos coeficientes de adensamento obtidos em campo e em laboratório para o resíduo de bauxita. Também são apresentados valores de outros resíduos encontrados na literatura para fins de comparação.

**Tabela 5.4:** Valores médios de coeficientes adensamento obtidos em campo e laboratório e valores obtidos na literatura.

Tipo e Origem do resíduo	Tipo de ensaio	Autores	Faixa de valores ou valores médios.	
			$C_h$ (PA) $\text{cm}^2/\text{s}$	$C_v$ (NA) $\text{cm}^2/\text{s}$
(resíduo de bauxita) Campanha 1999	(CAMPO) Piezocone	Presente trabalho	$5 \times 10^{-2} - 3 \times 10^{-1}$	$4 \times 10^{-3} - 2 \times 10^{-2}$
(resíduo de bauxita) Campanha 2002	(CAMPO) Piezocone	Presente trabalho	$3 \times 10^{-2} - 3 \times 10^{-1}$	$3 \times 10^{-3} - 2 \times 10^{-2}$
(resíduo de bauxita) Campanha 2004	(CAMPO) Piezocone	Presente trabalho	$4 \times 10^{-2} - 8 \times 10^{-1}$	$3 \times 10^{-3} - 6 \times 10^{-2}$
(resíduo de bauxita) Campanha 2005	(CAMPO) Piezocone	Presente trabalho	$3 \times 10^{-2} - 4 \times 10^{-1}$	$3 \times 10^{-3} - 3 \times 10^{-2}$
(resíduo de bauxita)	(LAB) Oedometro	Presente trabalho	-	$1 \times 10^{-3} - 2 \times 10^{-3}$
(resíduo de bauxita)	(LAB) Oedometro CRD	Presente trabalho	-	$7 \times 10^{-3} - 2,1 \times 10^{-2}$
(resíduo de bauxita)	(LAB) adensamento convencional	Presente trabalho	-	$7 \times 10^{-3} - 8 \times 10^{-3}$
(resíduo de ferro)	(CAMPO) Piezocone	Albuquerque Filho (2004)	$5,2 \times 10^{-1}$	$3,75 \times 10^{-2}$
(resíduo de ouro)	(CAMPO) Piezocone	Schnaid (2004)	$7,9 \times 10^{-1}$	$2,85 \times 10^{-2}$
Silte de Stjordal	(CAMPO) Piezocone	Senneset (1988)	$8,2 \times 10^{-1}$	$2,93 \times 10^{-2}$
(resíduo de bauxita) Estados Unidos	(LAB) Oedométrico convencional	Somogyi & Gray (1977)	-	$10^{-3} - 10^{-2}$
(resíduo de bauxita) Estados Unidos	(LAB) Oedométrico convencional	Elias (1995)	-	$1,6 \times 10^{-3} - 9,5 \times 10^{-3}$
(resíduo de bauxita) brasileira	(LAB) Ensaios com tensão controlada	Stinson (1981)	-	$1 \times 10^{-3} - 7 \times 10^{-3}$
(resíduo de bauxita) australiana				$9 \times 10^{-4} - 4 \times 10^{-3}$
(resíduo de bauxita) África ocidental				$8 \times 10^{-4} - 2 \times 10^{-3}$
(resíduo de bauxita) jamaicana				$3 \times 10^{-4} - 9 \times 10^{-4}$

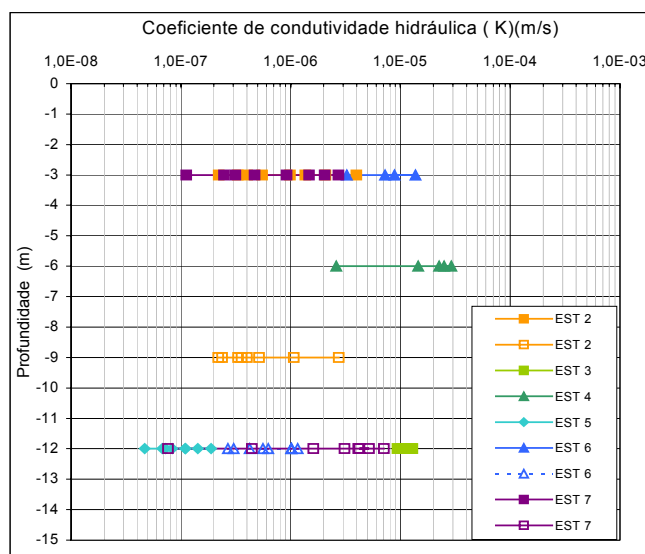
### 5.3.3 Estimativa da condutividade hidráulica

A variabilidade das características físico-químicas e mineralógicas tem efeito dominante na condutividade hidráulica e no adensamento do resíduo, e conseqüentemente em seu comportamento *in situ*. Diversas formulações podem ser utilizadas na determinação do coeficiente de condutividade hidráulica dos solos naturais. Mittal & Morgenstern (1975) propõem duas correlações simplificadas, uma baseada em valores do diâmetro efetivo do material e outra baseada no índice de vazios e na distribuição granulométrica das amostras. Blight (1994) apresenta uma formulação simplificada para estimativa do coeficiente de permeabilidade considerando apenas a distribuição granulométrica dos solos, através do diâmetro correspondente a 15% do material passante. Devido a vários fatores que podem interferir nas condições de fluxo das áreas de deposição de resíduos, há uma limitação na utilização destas formulações na identificação das características de condutividade hidráulica do depósito.

Nesse sentido, outras alternativas foram usadas para determinação do coeficiente de condutividade hidráulica. Em laboratório utiliza-se o ensaio de adensamento projetado especialmente para lamas (resultados apresentados no Capítulo 4) e em campo pode-se utilizar piezômetros e resultados de ensaios de piezocone.

Na campanha de 2004 na área ARB#2, a determinação do coeficiente de condutividade hidráulica *in situ* foi realizada através de ensaios de piezômetros do tipo Casagrande. Os ensaios de piezômetro são freqüentemente utilizados para determinação da condutividade hidráulica de solos naturais que, no caso de aplicações ambientais, possui a vantagem de monitorar a qualidade da água subterrânea. Para a campanha de 2004 foram realizados ensaios com piezômetro de 1” de diâmetro, no bulbo de 5”.

A Figura 5.33 apresenta a variação do coeficiente de condutividade hidráulica com a profundidade. Os valores do coeficiente encontrados para o resíduo mais arenoso (estações 3 e 4) variaram entre  $2 \times 10^{-6}$  m/s e  $3 \times 10^{-5}$  m/s, enquanto que para o resíduo siltoso variaram entre  $5 \times 10^{-8}$  m/s e  $2 \times 10^{-5}$  m/s.



**Figura 5.33:** Variação do coeficiente de condutividade hidráulica com a profundidade -campanha 2004.

Para avaliação dos coeficientes de condutividade hidráulica através de resultados de piezocone, torna-se necessário à determinação do coeficiente de variação volumétrica dos resíduos ( $m_v$ ), determinado através de uma correlação envolvendo um fator  $\alpha$  (Tabela 2.8) característico do depósito e a resistência de ponta média na região onde foi realizado o ensaio de dissipação. Dessa forma, a estimativa do coeficiente de condutividade hidráulica ( $k$ ) dos resíduos é estimada através das características de adensamento e compressibilidade do depósito por meio da seguinte relação:

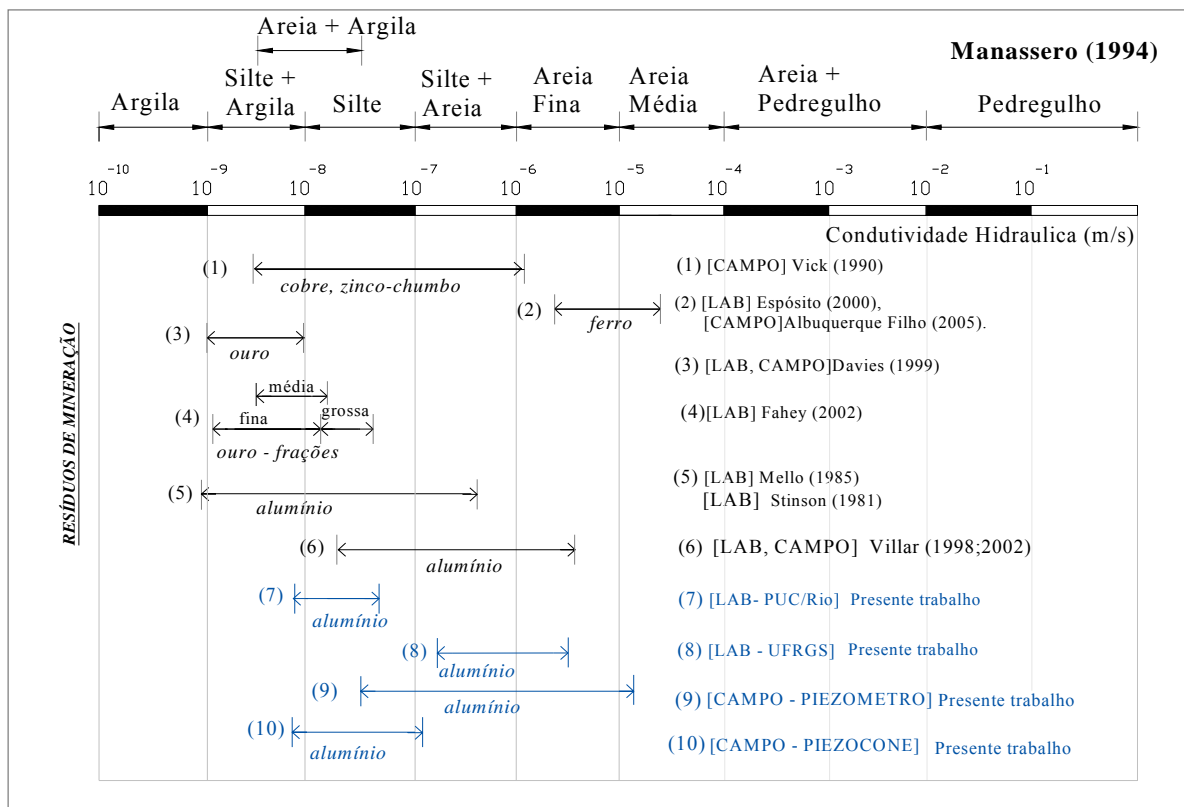
$$K = C_v \cdot m_v \cdot \gamma_w \tag{5.1}$$

A Tabela 5.5 apresenta um resumo dos valores médios dos coeficientes de adensamento vertical, coeficientes de variação volumétrica e coeficientes de condutividade hidráulica dos resíduos nas duas áreas de disposição, nas campanhas realizadas nos anos de 1999, 2002, 2004 e 2005.

**Tabela 5.5:** Valores dos coeficientes de variação volumétrica, coeficientes de adensamento e condutividade hidráulica.

Situação	Estação	$c_v$ (cm <sup>2</sup> /s) (medido)	$q_c$ (Kpa) (medido)	Fator $\alpha$ (estimado)	$m_v$ (m <sup>2</sup> /KN) (calculado)	$k$ (m/s) (calculado)
ARB#2 - Desativada (1 ano) - 1999	1	0,01399	1090,83	2,25	0,00057	8,58E-09
	2	0,01012	875,37	2	0,00069	7,42E-09
	3	0,00774	1280,39	2	0,00040	2,96E-09
	5	0,01045	1152,24	2	0,00047	4,23E-09
	7	0,0041	660,57	2	0,00076	2,93E-09
Valor médio		0,0093	1011,88	2,05	0,00058	5,22E-09
ARB#2 - Operação upstream - 2002	1	0,00766	1474,99	2,33	0,00067	4,81E-09
	3	0,00713	458,43	2	0,00184	1,15E-08
	4	0,01013	1326,81	2,5	0,00091	5,09E-09
	5	0,00352	310,05	2	0,00168	5,76E-09
	6	0,03351	196,30	2	0,00335	1,59E-07
	7	0,01859	354,29	2	0,00146	1,91E-08
	8	0,00516	387,83	2	0,00130	8,07E-09
Valor médio		0,011	854,97	2,16	0,00143	2,68E-08
ARB#2 - upstream encerrado - 2004	1	0,00474	413,75	2	0,00141	6,41E-09
	2	0,00438	404,00	2	0,00131	5,57E-09
	3	0,00785	276,00	2	0,00181	1,42E-08
	4	0,01467	331,00	2	0,00151	2,22E-08
	5	0,01941	537,25	2	0,00098	1,97E-08
	6	0,00645	376,75	2	0,00171	1,17E-08
	7	0,01896	665,75	2	0,00097	1,81E-08
Valor médio		0,0109	429,21	2	0,00138	1,40E-08
ABR#3 Operação normal em encerramento - 2005	1	0,00348	385,95	2	0,00221	7,19E-09
	2	0,00728	436,18	2	0,00220	2,01E-08
	3	0,00603	319,23	2	0,00250	1,16E-08
	4- LE	0,00601	328,59	2	0,00462	1,90E-08
	6 - AC	0,01286	537,15	2	0,00136	1,78E-08
	6	0,01169	581,01	2	0,00104	1,41E-08
	7	0,00651	102,36	2	0,00603	2,98E-08
	8	0,06195	119,28	2	0,00419	2,60E-07
	9	0,00541	207,81	2	0,00241	1,30E-08
Valor médio		0,0135	335,28	2	0,00295	4,36E-08
<b>VALOR MÉDIO FINAL</b>		<b>0,0112</b>	<b>657,84</b>	<b>2,05</b>	<b>0,00158</b>	<b>2,24E-08</b>

De maneira geral, os valores dos coeficientes de condutividade hidráulica obtidos através dos resultados de piezocone, atestaram a baixa permeabilidade dos depósitos formados pela disposição hidráulica dos resíduos de bauxita. A ordem de grandeza obtida varia na faixa entre  $8,6 \times 10^{-9}$  m/s e  $1,6 \times 10^{-7}$  m/s, característico de materiais com partículas no tamanho silte-arenoso, silte e silte-argiloso (e.g. Manassero, 1994).



**Figura 5.34:** Valores de condutividade hidráulica para resíduos de mineração.

Os valores do coeficiente de permeabilidade *in situ*, obtidos através dos piezômetros e dos ensaios de piezocone foram plotados na Figura 5.34 em conjuntos com os valores obtidos nos ensaios de laboratório em oedômetro e permeâmetro apresentados no Capítulo 4. Na mesma figura também são apresentadas faixas de valores de coeficientes de condutividade hidráulica para diversos tipos de resíduos de mineração apresentados na literatura. Observa-se na figura a variabilidade das medidas, com a predominância de valores na faixa de condutividade hidráulica intermediária correspondente a materiais siltosos. Os valores medidos e estimados no presente trabalho apresentaram também grande variabilidade, com resultados de laboratório (PUC) e de piezocone na faixa entre 10<sup>-9</sup> e 10<sup>-7</sup> m/s e valores de piezômetros e laboratório (UFRGS) indicando maior permeabilidade entre 10<sup>-5</sup> e 10<sup>-7</sup> m/s. Diferenças importantes foram observadas entre resultados de ensaios de laboratório realizados na PUC e na UFRGS. Na UFRGS os valores indicam solos mais permeáveis na faixa de silte-arenoso, corroborando as medidas de permeabilidade *in situ*.

## 5.4 COMENTÁRIOS FINAIS

A investigação geotécnica baseada em ensaios de campo e laboratório possibilitou uma avaliação das características do depósito, bem como a estimativa de propriedades de comportamento do resíduo.

A interpretação dos resultados deve, no entanto, ser realizada com critério e julgamento, uma vez que as abordagens empíricas já consagradas na prática internacional foram estabelecidas em materiais com características físicas, granulométricas e mineralógicas definidas. A estratificação acentuada destes depósitos dificulta a interpretação dos resultados e o estabelecimento de condições de contorno que favoreçam uma análise racional de propriedades de depósitos de resíduos.

Novas metodologias baseadas na análise da velocidade de penetração do piezocone associadas ao coeficiente de adensamento nos resíduos de mineração serão ainda discutidas no capítulo subsequente, dando-se especial atenção aos possíveis efeitos de drenagem parcial durante o processo de penetração da sonda penetrométrica.



## 6 EFEITOS DE DRENAGEM PARCIAL

### 6.1 INTRODUÇÃO

Os resíduos de mineração possuem condutividade hidráulica intermediária e comportamento distinto dos materiais usualmente encontrados em depósitos naturais, conforme discutido ao longo desta dissertação. A condutividade hidráulica está freqüentemente dentro da assim chamada faixa de condutividade hidráulica intermediária, que varia entre  $10^{-8}$  m/s e  $10^{-5}$  m/s. Esse comportamento parcialmente drenado durante o cisalhamento pode ocorrer em uma variedade de granulometria, de partículas com tamanho de areias, siltes e argilas (Figura 5.34).

Dificuldades são encontradas na interpretação de ensaios *in situ* diante da possível ocorrência de drenagem parcial durante a penetração, correspondendo a uma trajetória de tensões intermediária às condições drenada e não-drenada, introduzindo incertezas na estimativa de parâmetros constitutivos. A influência da drenagem na estimativa destes parâmetros é, portanto um aspecto considerado central ao projeto de áreas de deposição de resíduos.

O objetivo deste capítulo consiste em discutir e propor métodos de interpretação de ensaios *in situ* em resíduos siltosos baseado na normalização dos resultados, visando à identificação das condições de drenagem impostas ao solo durante a penetração do piezocone. Essas abordagens serão comparadas com pesquisas apresentadas na literatura.

### 6.2 AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE DRENAGEM

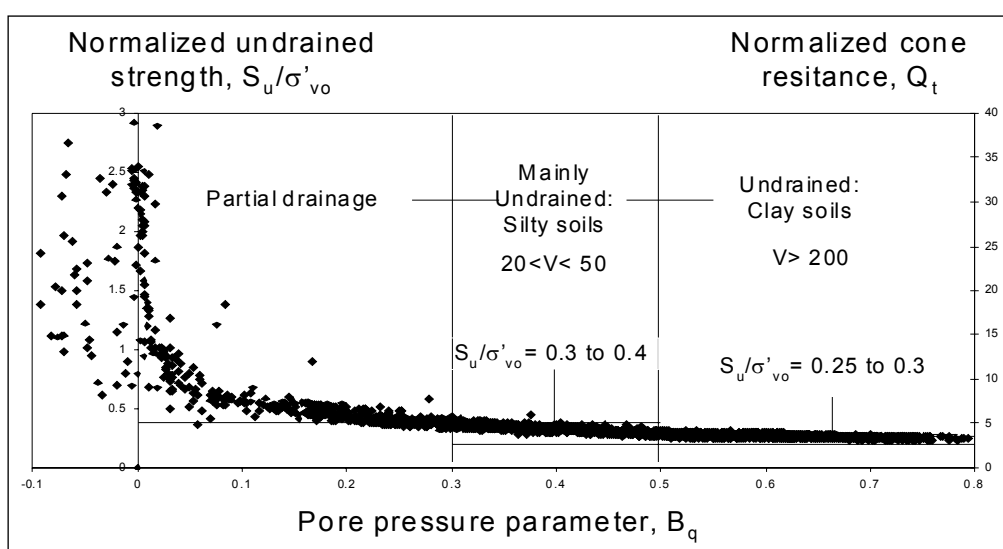
O desafio para quem concebe um programa de investigação em solos siltosos, com base em ensaios de campo, reside em antecipar as condições de drenagem do ensaio, evitando drenagem parcial durante a penetração (e.g. Schnaid et al, 2004).

Hight *et al.*, (1994) propõem a relação entre o parâmetro de poro pressão ( $B_q$ ) e a resistência do cone normalizada ( $q_t - \sigma_{vo} / \sigma'_{vo}$ ) na interpretação de resultados de piezocone com o objetivo

de identificar situações distintas de condições completamente não drenadas. Através das análises o autor sugere que a penetração é não-drenada para valores de  $B_q$  superiores a 0.5.

Uma adaptação da proposta de Hight *et al.*, (1994), realizada por Schnaid *et al.*, (2004), é mostrada na Figura 6.1. Dados de ensaios de piezocone em um depósito natural de silte são expressos em termos da normalização da resistência não drenada ( $S_u/\sigma'_{vo}$ ), normalização da resistência à penetração do piezocone ( $q_t - \sigma_{vo}/\sigma'_{vo}$ ) e parâmetro de poro pressão  $B_q$ . O depósito em estudo possui um coeficiente de adensamento ( $C_v$ ) entre 0,007 a 0,023  $\text{cm}^2/\text{s}$ , assumindo-se um fator de  $N_{kt}$  de 15 para calcular a resistência não drenada do piezocone (e.g. Lunne *et al.*, 1997). Observa-se neste espaço que camadas argilosas correspondem a valores de  $S_u/\sigma'_{vo}$  da ordem de 0,25 e  $B_q$  superior 0,5, característico de condições não-drenadas. Valores de  $B_q$  entre 0,3 e 0,5 resultaram em  $S_u/\sigma'_{vo}$  na faixa de 0,3 e 0,4 que, segundo os autores, correspondem a condições não-drenadas em solos siltosos. Para valores de  $B_q$  menores que 0,3 os valores de resistência são muito superiores àqueles referentes a condições não drenadas e sugere, neste caso, a ocorrência de drenagem parcial.

Este mesmo espaço proposto por Schnaid *et al* (2004) foi usado para analisar as condições de drenagem dos resíduos de bauxita, material de estudo nessa dissertação. As Figuras 6.2 a 6.5 mostram os resultados obtidos nas 4 campanhas de ensaio das áreas de deposição ARB#2 e ARB#3. As áreas de resíduo possuem um coeficiente de adensamento ( $C_v$ ) entre 0,003 e 0,06 e  $N_{Kt}$  variando de estação para estação, com valor médio de 13,5.



**Figura 6.1:** Condições de drenagem de um depósito de silte, adaptado de Schnaid *et al* (2004).

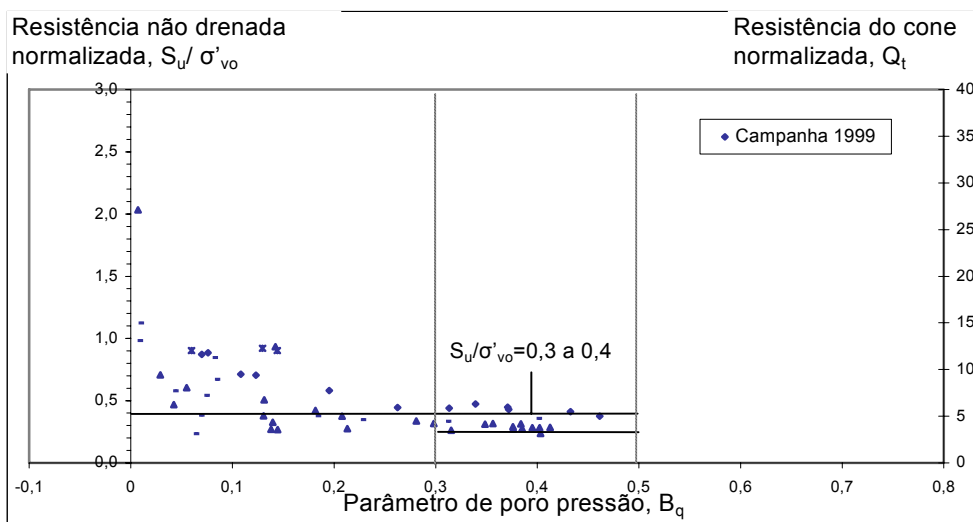


Figura 6.2: Condições de drenagem – área ABR#2.

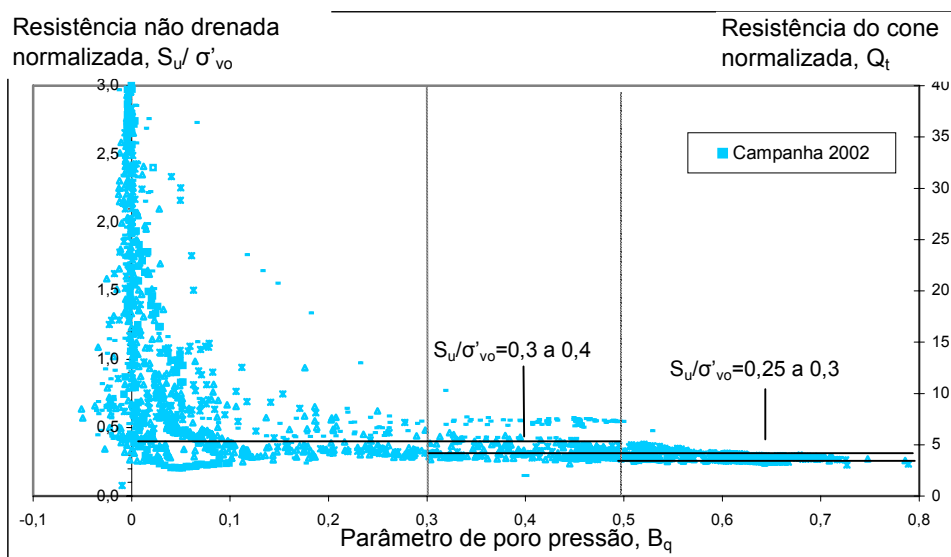


Figura 6.3: Condições de drenagem – área ARB#2.

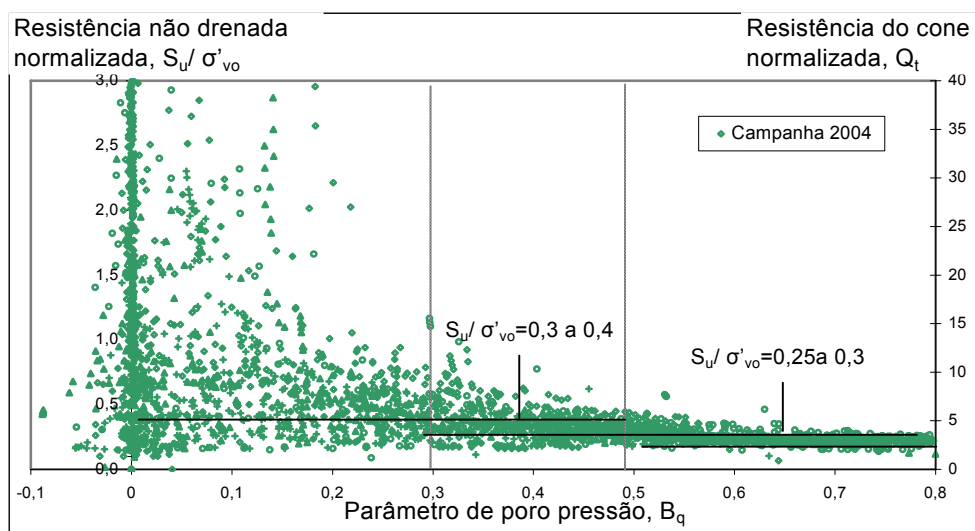
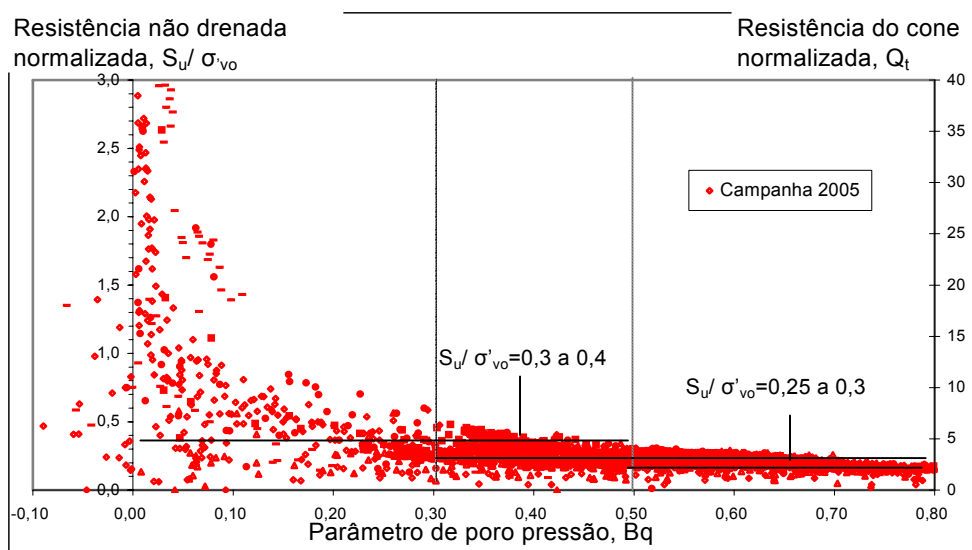


Figura 6.4: Condições de drenagem – área ARB#2.



**Figura 6.5:** condições de drenagem – área ARB#3.

Na análise das Figuras 6.2 a 6.5, observa-se a redução de  $S_u/\sigma'_{vo}$  com o aumento de  $B_q$ . Para valores de  $B_q$  superiores a 0,5,  $S_u/\sigma'_{vo}$  situa-se em torno de 0,25, refletindo condições não drenadas associada a materiais argilosos. Para valores de  $B_q$  entre 0,3 e 0,5,  $S_u/\sigma'_{vo}$  situa-se entre 0,3 e 0,4, que segundo a literatura representaria uma condição não drenada típica de materiais siltosos e enquanto  $B_q$  inferior a 0,3 refletiria uma condição de drenagem parcial. Este padrão de comportamento é semelhante aquele discutido por Schnaid et al (2004).

Esta abordagem possibilita a identificação, embora qualitativa, das condições de drenagem, indicando que nas camadas correspondentes a  $B_q$  inferior a 0,3 os ensaios de piezocone pelas teorias usuais não podem ser utilizados na estimativa de parâmetros constitutivos do solo, pois ocorre drenagem parcial durante a penetração. Esta abordagem não permite, no entanto, antecipar as condições de drenagem previamente à cravação do piezocone, motivo pelo quais outras metodologias serão investigadas.

### 6.2.1 Metodologias

Pesquisas sistemáticas vêm sendo desenvolvidas com a finalidade de validar a interpretação de resultados de ensaios de campo em solos com permeabilidade intermediária. As novas metodologias propostas neste trabalho baseam-se especialmente em três estudos de casos, a saber.

1. Ensaio de Palheta em resíduos de minério de ouro e resíduos de indústrias de fertilizantes publicados por Blight (1968);
2. Ensaio de Piezocone em depósito de argila apresentados por Randolph e Hope (2004);
3. Ensaio de Piezocone em resíduos de bauxita, referente ao presente trabalho.

Blight (1968) apresenta um conceito definido como fator tempo (T) para ensaios de palheta, expresso em função do diâmetro da palheta (d), coeficiente de adensamento ( $C_v$ ) e tempo de rotação (t):

$$T = \frac{C_v \cdot t}{d^2} \quad (6.1)$$

Nesta abordagem o fator tempo é relacionado ao grau de drenagem medido através do torque a diferentes taxas de rotação da palheta. No trabalho original, Blight define a condição drenada como  $V_1$  (ensaio mais lento), a condição não-drenada como  $V_o$  (ensaio rápido e grau de adensamento zero) e condições intermediárias  $V$ . Logo o grau de drenagem é expresso como:

$$U = \frac{(V - V_o)}{(V_1 - V_o)} \quad (6.2)$$

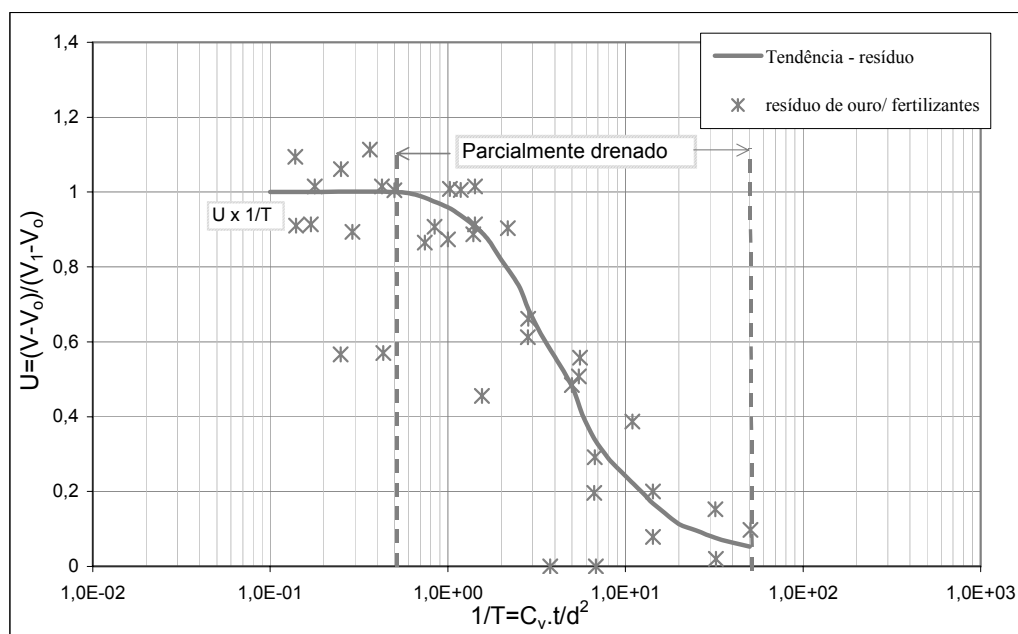
Os materiais usados na investigação foram: 1) resíduos de minério de ouro, com uma composição granulométrica entre 50 e 95% passante na peneira 0,06mm, coeficiente de condutividade hidráulica de  $9,66 \times 10^{-9}$  m/s e um coeficiente de adensamento vertical  $C_v = 0,1178 \text{ cm}^2/\text{s}$ ; 2) produto de rejeito de uma indústria de fertilizantes, com granulometria semelhante ao material 1, coeficiente de condutividade hidráulica de  $1,93 \times 10^{-7}$  m/s e coeficiente de adensamento vertical  $C_v = 0,191 \text{ cm}^2/\text{s}$ . Ambos os materiais foram depositados hidráulicamente em áreas de 50 a 200 acres em extensão.

A primeira parte da pesquisa realizada por Blight, se deteve em avaliar a influência das poro pressões gerada durante a inserção do Palheta. Os resultados mostraram que o tempo requerido para a dissipação das poro pressões geradas entre a inserção e o começo do cisalhamento tem uma influência muito pequena nas medidas de ruptura do torque. A segunda e principal etapa da pesquisa se deteve em avaliar as condições de dissipação das poro

pressões gerada com tempos distintos na aplicação do torque, e também o efeito escala do equipamento de palheta. Para essa aferição foram usados três equipamentos de palheta, classificados segundo o tamanho. Para o material 1, equipamentos de (30x60mm), (45x90mm) e (60x120mm), e para o material 2, equipamento de (30x60mm). O autor observou que a drenagem ocorre mais rápido para palhetas menores, pois quanto maior a palheta maior volume de solo envolvido no cisalhamento e maior o tempo requerido para atingir-se um determinado grau de drenagem.

A Figura 6.6 mostra os resultados obtidos no espaço ( $U \times 1/T$ ), no qual uma única curva é utilizada para representar os dois materiais. Optou-se por representar o eixo das abscissas por  $1/T$ , para uma posterior comparação com as demais pesquisas que serão relatadas.

Apesar da dispersão é possível avaliar as condições de drenagem durante os ensaios de palheta. A relação ( $U \times 1/T$ ) obtida nos resíduos indica que condições drenadas ocorrem para valores de  $1/T$  inferiores a  $5 \times 10^{-1}$ , enquanto condições não-drenadas ocorrem para valores superiores a  $5 \times 10^{+1}$ . Os ensaios nos quais há ocorrência de drenagem parcial situam-se na faixa intermediária entre as condições drenadas e não drenadas.



**Figura 6.6:** Curva de drenagem empírica obtida por ensaios de palheta em resíduos. (adaptados de Blight, 1968)

Uma relação semelhante à proposta de Blight (1968) foi apresentada por House *et al.*, (2001) e mais tarde por Randolph e Hope, (2004). Esta relação é definida em função da taxa de

penetração do cone ( $v$ ), diâmetro de sonda ( $d$ ) e coeficiente de adensamento ( $C_v$ ), expressa na forma adimensional como:

$$V = \frac{v \cdot d}{C_v} \quad (6.3)$$

A velocidade adimensional ( $V$ ) é relacionada à resistência normalizada do cone  $q_c/q_{c\tilde{n}}$ , onde o valor adotado de  $q_{c\tilde{n}}$  é associado a relação  $\Delta u/u_0$  variável (ensaios rápidos); em contraste  $q_{cdr}$  é atingido assegurando-se que não haja excesso de poro pressões geradas durante a cravação (ensaios lentos) e finalmente  $q_c$  seria a condição intermediária. Analisando a proposta de Blight (1968) e a adaptação da proposta de Randolph (2004), verifica-se que  $V$  é igual  $1/T$ .

Nos estudos utilizou-se uma argila normalmente adensada com coeficiente de adensamento vertical  $C_v = 8,24 \times 10^{-4}$  cm<sup>2</sup>/s. A análise foi realizada com piezocone de 10mm de diâmetro (78,5mm<sup>2</sup> de área) e razões de penetração variando entre 0,005mm/s e 3mm/s. As diferentes velocidades de penetração objetivaram demonstrar a transição entre as faixas drenada, parcialmente drenada e não drenada. O parâmetro adimensionalizado de velocidade  $V$ , anteriormente descrito por House (2001), foi utilizado na identificação das condições de drenagem. Randolph e Hope (2004) apresentaram os resultados no espaço velocidade adimensional  $V$  e resistência normalizada do piezocone ( $q_c/q_{c\tilde{n}}$ ). Nesta dissertação estes resultados são utilizados de maneira semelhante, porém, adaptando-se para o espaço equivalente ao proposto por Blight, plotando à velocidade adimensional  $V$  em relação ao grau de drenagem ( $U$ ) expresso como:

$$U = \frac{(q_c - q_{c\tilde{n}})}{(q_{cdr} - q_{c\tilde{n}})} \quad (6.4)$$

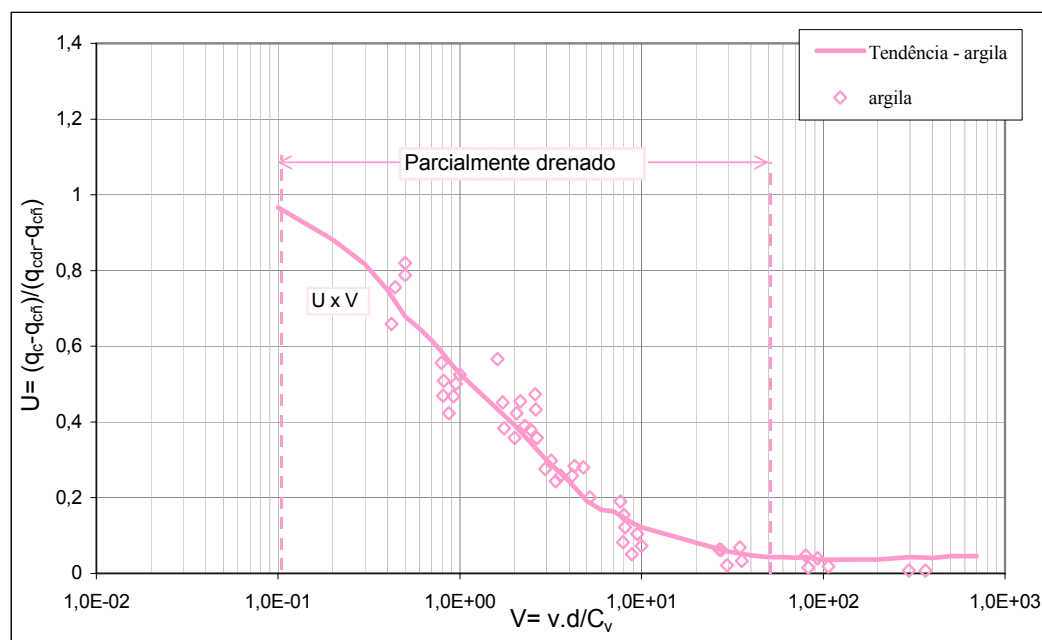
Em algumas campanhas pode ser difícil determinar com precisão a diferença entre ( $q_{dr} = n \cdot q_{c\tilde{n}}$ ), devido à variação de velocidades de penetração (ou rotação) necessárias à estimativa de  $V$ . Sugere-se, nestes casos re-escrever a equação 6.4 em função da razão entre as condições drenadas e não-drenadas ( $n$ ) como:

$$U = \frac{\left( \frac{q_c}{q_{c\tilde{n}}} - 1 \right)}{(n - 1)} \quad (6.5)$$

e adotar um valor de  $n$  para cada depósito. Alguns estudos experimentais e numéricos em argilas auxiliam na avaliação de  $n$ . Randolph e Hope (2004) apresentam um valor de 3,77 para a razão entre as condições drenadas e não-drenadas, valor este adaptado de pesquisas não públicas de Watson e Suemasa (2000). Análises numéricas apresentadas por Schnaid (2005) reproduzem o mesmo padrão de variação observado experimentalmente, indicando que a razão  $q_c/q_{cdr}$  varia entre 1 (trajetória drenada) e 0,3 (trajetória não-drenada). Na presente dissertação adota-se como uma primeira estimativa o valor de 3 para os casos nos quais a razão entre  $q_c/q_{cn}$  não é determinada com precisão.

Com base nas definições apresentadas nas equações 6.4 e 6.5, os estudos de casos analisados ao longo desse trabalho foram re-interpretados. A Figura 6.7 apresenta a relação velocidade adimensional ( $V$ ) *versus* grau de drenagem ( $U$ ), obtido para a argila ensaiada por Randolph e Hope (2004) com ensaios de piezocone a diferentes taxas de penetração.

A relação encontrada para os ensaios de piezocone realizados na argila indicou que condições drenadas ocorrem para valores de  $V$  inferiores a  $1 \times 10^{-1}$ , enquanto condições não-drenadas ocorrem para valores de  $V$  superiores a  $5 \times 10^{+1}$ . A faixa intermediária entre as condições drenadas e não drenadas corresponde a ensaios nos quais há ocorrência de drenagem parcial.



**Figura 6.7:** Avaliação das condições de drenagem pelo ensaio de piezocone em argila. (adaptados de Randolph e Hope, 2004).



### 6.2.2 Resíduos de bauxita

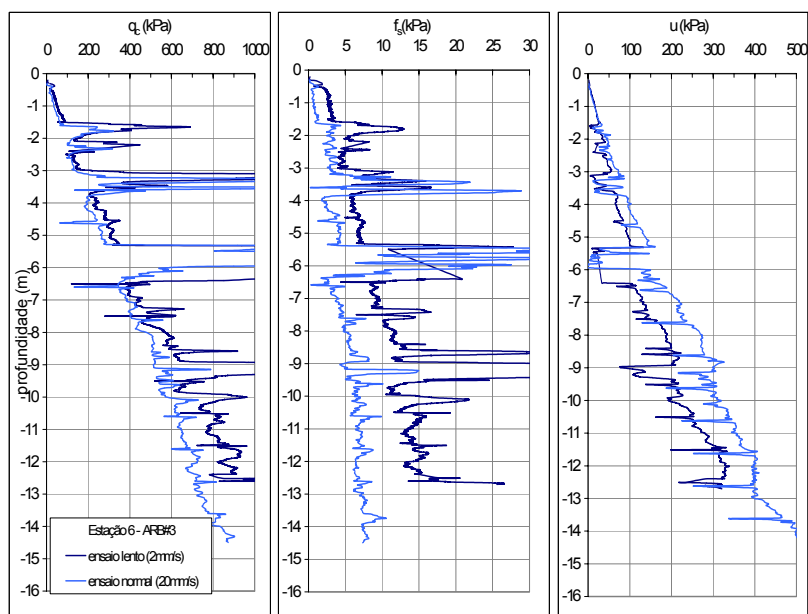
Os resíduos de bauxita, objeto do presente trabalho, são característicos de materiais de permeabilidade intermediária. Com a finalidade de avaliar as condições de drenagem, ensaios de piezocone foram realizados com velocidades padrão (20mm/s) e velocidades inferiores ao padrão (2mm/s), nas estações 6 e 6 AC da área ARB#3.

As Figuras 6.8 e 6.9 apresentam uma comparação dos perfis obtidos de resistência de ponta ( $q_c$ ), atrito lateral ( $f_s$ ) e poro pressão gerada ( $u$ ) para as diferentes velocidades de cravação. Observa-se nos ensaios realizados com velocidades de 2mm/s resistências superiores e valores de poro pressões inferiores àqueles registrados na penetração à velocidade padrão de 20mm/s.

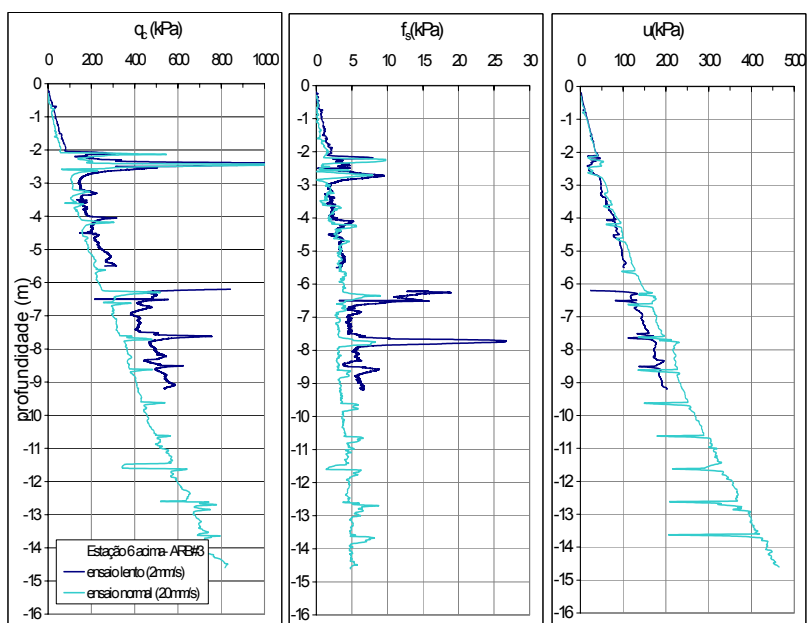
Os valores de resistência à penetração são acompanhados de inúmeros ensaios de dissipação de poro pressão que possibilitam a medida dos coeficientes de adensamento nas diferentes profundidades. Os valores de  $C_h$  (ou  $C_v$ ) apresentam grande variabilidade de medidas que indicam a presença de um depósito estratificado composto de camadas de materiais de granulometria argilosa, alternados a camadas siltosas e arenosas, produzidas pelo processo de disposição dos resíduos. Este conjunto de ensaios fornece uma oportunidade singular para determinação da curva característica de drenagem, pois, ao contrário das experiências anteriormente discutidas, este resíduo é predominantemente heterogêneo.

Neste caso não é recomendável adotar um único valor do coeficiente de adensamento para todo o depósito, mas utilizar os valores pontuais medidos a cada profundidade. A curva característica de drenagem deverá, portanto, refletir o comportamento médio das diferentes granulometrias, adotando-se a hipótese de que a curva característica de drenagem é controlada pela mineralogia e pouco influenciada pela granulometria do material.

Com os valores obtidos nos ensaios realizados com velocidade padrão (20mm/s) e lentos (2mm/s) é possível calcular a velocidade adimensional ( $V$ ) pela correlação de Randolph e Hope e relacionar ao grau de drenagem ( $U$ ), (equação 6.4). Adota-se no cálculo de  $V$ : diâmetro do piezocone igual a 3,57cm, a velocidade referente à penetração e valores de coeficiente de adensamento  $C_v$  representativos de cada composição granulométrica encontrada nas duas áreas de disposição do resíduo.



**Figura 6.8:** Comparação dos resultados, diferentes velocidades de cravação do piezocone - estação 6.



**Figura 6.9:** Comparação dos resultados para diferentes velocidades de cravação do piezocone - estação 6 acima.

Os resultados apresentados pelo piezocone no resíduo de bauxita foram plotados na Figura 6.10, em conjunto com os resultados obtidos na argila (Rondolph e Hope, 2004) e nos dois tipos de resíduos (Blight, 1968) agora representados por curvas características de drenagem independentes para os resíduos de ouro e fertilizante. As respostas obtidas na velocidade de 20mm/s no resíduo argiloso ( $B_q > 0,3$  e  $C_v$  entre 0,003 e 0,01  $\text{cm}^2/\text{s}$ ), correspondem à faixa de

V entre  $1 \times 10^{+2}$  e  $3,6 \times 10^{+3}$  e para o resíduo siltoso ( $B_q < 0,3$  e  $C_v$  entre 0,01 e 0,06  $\text{cm}^2/\text{s}$ ), valores de V situam-se entre  $9 \times 10^{+1}$  e  $7 \times 10^{+2}$ , representando condições não-drenadas para os ensaios. No resíduo de granulometria arenosa não foi possível à realização de ensaios de dissipação (velocidade muito rápida, em torno de segundos), sendo assim, utilizaram-se valores representativos de  $C_v$  entre 0,24 e 1,7  $\text{cm}^2/\text{s}$  extraídos de pesquisas realizadas por Davis (1999) em depósitos arenosos em Sullivan no Irã. Os valores calculados de V para o resíduo arenoso situaram-se entre  $4 \times 10^{+0}$  e  $3 \times 10^{+1}$  e representam trajetórias parcialmente drenadas.

Os resultados obtidos com velocidades de 2mm/s no material argiloso correspondem aos valores de V entre  $5 \times 10^{+1}$  e  $2 \times 10^{+2}$ . Para o material siltoso, V situou-se entre  $2 \times 10^{+1}$  e  $6 \times 10^{+1}$ , correspondendo a valores entre as faixas não-drenada e parcialmente drenada. Condições drenadas ocorrem para valores de V inferiores a unidade, enquanto condições não-drenadas ocorrem para valores de V superiores a  $7 \times 10^{+1}$ . A faixa intermediária corresponde a ensaios nos quais há ocorrência de drenagem parcial.

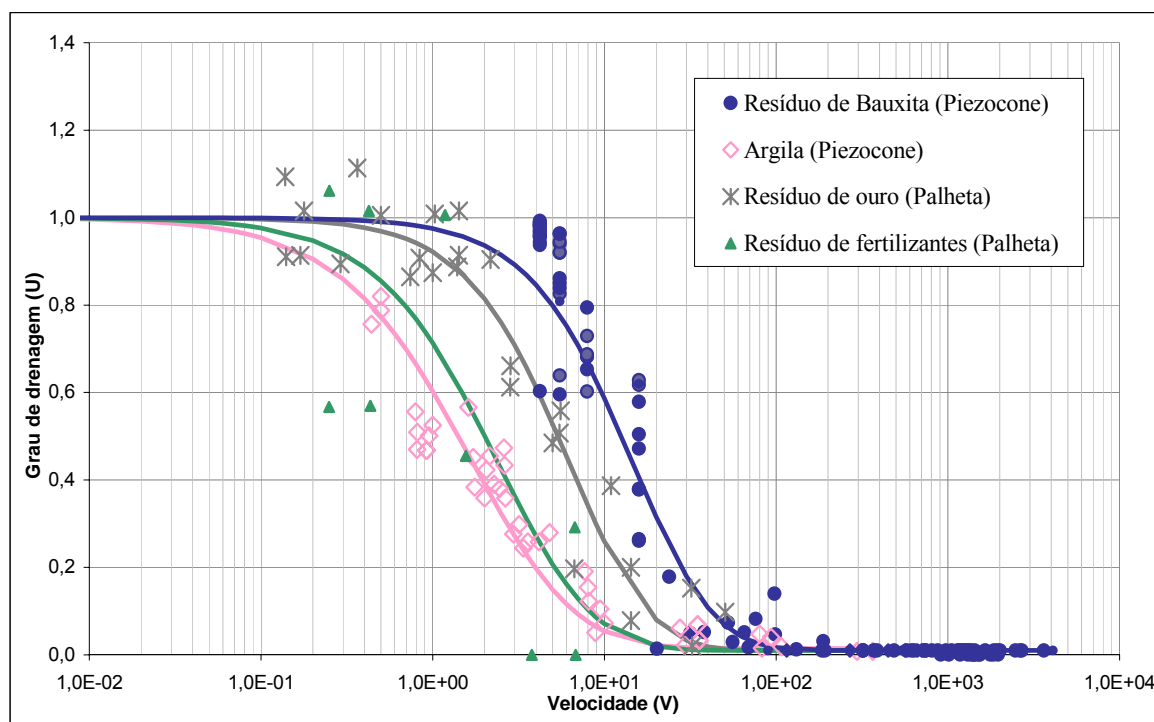
Para traçar a curva característica de drenagem de cada geomaterial foi usada a equação 6.6 (e.g. Schnaid *et al*, 2004). Os dados foram expressos através da função:

$$U = a + (1 - a) \frac{1}{\cosh(b.V^c)} \quad (6.6)$$

onde **a**, **b** e **c** são parâmetros de ajuste da curva dos diferentes geomateriais. Os parâmetros representativos dos materiais estudados são listados na Tabela 6.1. Os parâmetros **a** e **c** são praticamente constantes, enquanto o parâmetro **b** varia consideravelmente em função das propriedades de cada material.

**Tabela 6.1:** Sumário dos parâmetros das curvas

Parâmetros da Equação			
	a	b	c
Resíduos de bauxita - piezocone	0,05	0,12	0,8
Argila -piezocone	0,05	1,5	0,5
Resíduos de ouro - palheta	0,05	0,28	0,7
Resíduos de fertilizante - palheta	0,05	0,8	0,6



**Figura 6.10:** Avaliação das condições de drenagem

### 6.3 COMENTÁRIOS FINAIS

A metodologia necessária à interpretação de ensaios de piezocone em materiais de resíduo é discutida nesta dissertação, dando-se especial atenção aos possíveis efeitos de drenagem parcial durante o processo de penetração da sonda penetrométrica. Na interpretação de ensaios de piezocone em solos com permeabilidade intermediária é importante a identificação das condições de drenagem impostas ao solo durante a penetração (e.g. Schnaid, 2005). Uma vez identificadas as condições de drenagem, pode-se calcular os parâmetros que definem o comportamento mecânico do material.

Embora o estudo realizado analisou apenas quatro tipos de resíduos, sendo três destes apresentados em pesquisas anteriores propostas na literatura, algumas conclusões são discutidas:

- A velocidade de dissipação pode ser expressa em função de velocidade adimensional  $V$ . Considerando que diferentes curvas características são obtidas para cada material, esta pode estar relacionada à sua mineralogia e, portanto aos parâmetros constituintes que o representam.
- Sugere-se cautela na interpretação de resultados de ensaios realizados para velocidades adimensionais ( $V$ ) entre as faixas drenadas e não-drenadas, pois nesta faixa ocorre drenagem parcial e os resultados não podem ser interpretados nem em termos de tensões totais nem de tensões efetivas.
- Recomenda-se ainda a adoção de velocidades de penetração distintas do padrão internacional em solos siltosos, visando controlar as condições de drenagem geradas durante a realização do ensaio, impondo trajetórias de tensões totalmente drenadas ou totalmente não-drenadas, a depender das características de permeabilidade dos resíduos.

Finalmente, destaca-se a necessidade de pesquisas complementares para a velocidade das metodologias propostas. Em especial, sugere-se a realização de análises numéricas, combinando-se expansão de cavidade a fluxo associado, para verificar a sensibilidade da forma da curva característica de drenagem em função dos parâmetros constitutivos do modelo.

## 7 CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho consiste em avançar no campo pesquisas relativas à disposição de resíduos provenientes de indústrias de mineração. A proposta básica foi à interpretação de ensaios de piezocone avaliando a aplicabilidade do ensaio na caracterização de um resíduo industrial de bauxita. Buscou-se realizar análises da composição e da distribuição dos resíduos ao longo da profundidade, em diferentes pontos do maciço e do reservatório, através da identificação do processo de segregação hidráulica dos resíduos e da conseqüente formação de estratos heterogêneos no depósito.

Especial atenção foi dada às condições de drenagem durante a penetração do piezocone, buscando estabelecer metodologias de interpretação de ensaios *in situ* em solos siltosos, baseados na normalização de resultados, uma vez que o resíduo é composto de partículas predominantemente siltosas e apresentam permeabilidade intermediária. As etapas que compõem a pesquisa resultaram em informações úteis à prática de engenharia, sendo as principais conclusões citadas a seguir.

A identificação de um padrão de comportamento granulométrico do resíduo se mostrou bastante complexo. A forma de deposição do resíduo provocou seleção das partículas, pois os grãos lançados hidráulicamente no reservatório tendem a se depositar nas proximidades dos pontos de descarga, havendo um processo de seleção das partículas que é função do tamanho dos grãos. De maneira geral, os resultados obtidos nos ensaios de piezocone mostraram-se concordantes à caracterização granulométrica realizada em laboratório nas amostras coletadas ao longo dos perfis de sondagens. Na avaliação dos resultados observou-se um material areno-siltoso ou silto-arenoso nas estações situadas próximas dos pontos de despejo enquanto que no restante do reservatório tem-se um material essencialmente silto-argiloso, intercalado a lentes arenosas. A presença dessas lentes arenosas nos reservatórios pode estar relacionada basicamente a mudanças nos pontos de descarga do resíduo. Outra hipótese para justificar a ocorrência destas lentes mais resistentes seria um possível ressecamento da superfície do resíduo no período de interrupção do lançamento, formando lentes concrecionadas.

A posição das estações em relação ao ponto de lançamento do resíduo foi também o principal fator na variabilidade dos resultados dos índices físicos obtidos em laboratório em amostras coletadas ao longo dos perfis de sondagens. As estações mais próximas dos pontos de lançamento apresentaram uma caracterização diferente das demais, com valores inferiores de índice de vazios, umidade e valores superiores do peso específico natural. Em geral, observou-se pequena variação dos valores ao longo da profundidade do resíduo.

Com relação à análise física mineralógica, o que se constatou é que o resíduo estudado é constituído em sua maior parte por quatro elementos básicos: ferro, alumínio, silício e o titânio. Em menor quantidade aparece o cálcio e o sódio, estes oriundos do beneficiamento com soda cáustica, no processamento para obtenção do alumínio. Os grãos apresentaram-se relativamente homogêneos, arredondados e com tendência à floculação. As diferenças de comportamento do resíduo em relação ao fluido de saturação (água ou soda cáustica), é objeto de estudo no laboratório de Ensaio Geotécnicos e Geoambientais (LEGG) da UFRGS.

A variabilidade espacial das características do resíduo e a presença de drenagem no fundo do reservatório exige cuidado na identificação das poro pressões de equilíbrio. Ensaio de dissipação de piezocone foram realizados para tempos suficientemente longos de forma a identificar a posição do nível d'água a cada profundidade. Os valores encontrados foram comparados às medidas piezométricas e, em todas as posições ensaiadas, os valores foram consistentes e demonstraram uma tendência e redução de excesso de poro pressão com a profundidade, coerente com a drenagem de fundo. Na região superficial as pressões oscilaram em função de processos de infiltração e evaporação. Algumas estações, por estarem situadas próximas aos pontos de despejo, representadas por um material arenoso, apresentaram camadas em que as poro pressões geradas são próximas à poro pressão de equilíbrio.

Utilizando abordagens empíricas estabelecidas para materiais sedimentares, estimou-se a resistência ao cisalhamento do resíduo. Nas análises observou-se variação nos resultados obtidos nas diferentes áreas de disposição, com identificação de valores superiores na área ARB#2, evidenciando o aumento de resistência com o tempo relacionado ao adensamento e ressecamento do resíduo. Em geral os valores de resistência obtidos para o resíduo de bauxita compreenderam uma faixa entre 10 e 80KPa. Valores de  $S_u / \sigma'_{vo}$  entre 0,25 e 0,35 foram encontrados para as 4 campanhas de ensaios, representativo de um material siltoso normalmente adensado.

Valores de coeficientes de adensamento horizontal e vertical foram obtidos através dos ensaios de dissipação no piezocone. Embora tenha-se observado alguma dispersão entre as diferentes campanhas de investigação, os valores são em geral ligeiramente inferiores a 0,06 cm<sup>2</sup>/s e não apresentam variação significativa com a profundidade. Quanto à drenabilidade do resíduo, a estimativa da condutividade hidráulica foi realizada através de resultados de ensaios de piezocone e piezômetro e resultados de ensaios de laboratório em equipamentos convencionais e equipamentos projetados especialmente para lamas. Observou-se nos resultados variabilidade nas medidas, com a predominância de valores na faixa de condutividade hidráulica intermediária correspondente a materiais siltosos. Os resultados de laboratório (PUC) e de piezocone ficaram na faixa entre 10<sup>-9</sup> e 10<sup>-7</sup> m/s e valores de piezômetros e laboratório (UFRGS) indicaram maior permeabilidade entre 10<sup>-5</sup> e 10<sup>-7</sup> m/s. Diferenças importantes foram observadas entre resultados de ensaios de laboratório realizados na PUC e na UFRGS, sendo que essas diferenças podem estar relacionadas tanto as amostras coletadas em diferentes locais e épocas do ano quanto aos diferentes equipamentos utilizados nos ensaios. Apesar das causas indicadas às diferenças são expressivas.

A investigação geotécnica baseada em ensaios de campo e laboratório possibilitou uma avaliação das características do depósito, bem como a estimativa de propriedades de comportamento do resíduo. Deve-se considerar que a interpretação dos resultados foi realizada através de abordagens empíricas estabelecidas em materiais com características físicas, granulométricas e mineralógicas definidas. A estratificação acentuada destes depósitos dificultou a interpretação dos resultados e o estabelecimento de condições de contorno que favoreçam uma estimativa racional de propriedades de depósitos de resíduos.

Em decorrência destes fatos, métodos de interpretação de ensaios *in situ* em resíduos siltosos foram discutidos, estes baseados na análise da velocidade de penetração do piezocone associada ao coeficiente de adensamento dos resíduos, visando à identificação das condições de drenagem impostas ao solo durante a penetração do piezocone. Através das análises realizadas, algumas conclusões referentes a estas abordagens podem ser discutidas: a velocidade de dissipação pode ser expressa em função de velocidade adimensional V, considerando que diferentes curvas características são obtidas para cada material, sendo que estas diferenças podem estar relacionadas às propriedades de cada material. Com a determinação de curvas características torna-se possível a identificação do tempo de duração de ensaios de forma a representar uma resistência cisalhante completamente drenada ou



completamente não-drenada. Sugere-se cautela na interpretação de resultados de ensaios realizados na faixa de velocidade adimensional ( $V$ ) entre o drenado e não drenado pois nesta faixa não é possível determinar propriedades de comportamento.

Para finalizar, pôde-se concluir que, embora estudos estejam sendo desenvolvidos para avaliação do comportamento geotécnico dos resíduos de mineração, a completa caracterização geotécnica dos resíduos ainda representa um desafio para a mecânica dos solos. Nesse sentido, a implementação de uma metodologia de investigação em resíduos através de ensaios de piezocone (CPTU) demonstrou grande potencial de aplicação em áreas de mineração. Entretanto, deve-se destacar que a principal limitação desta metodologia de investigação residiu na limitação de algumas formulações e inexistência de correlações especificamente desenvolvidas para estes materiais.

## SUGETÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

- Buscar uma melhor definição dos procedimentos de caracterização de resíduos, especialmente para materiais que possuem um fluído intersticial com contaminante.
- Necessidade de pesquisas complementares em solos siltosos, reforçando as metodologias propostas no presente trabalho, baseadas na normalização dos resultados, visando a identificação das condições de drenagem impostas ao solo durante a penetração do piezocone.
- Necessidade de implementação de modelos numéricos para definição de novas técnicas de interpretação do comportamento dos resíduos de mineração associando-se a expansão de cavidade a fluxo associado.

## 8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABRÃO, P, C. Sobre a deposição de rejeitos de mineração no Brasil - In SIMP. BARRAGENS REJEITO E RESIDUOS INDUSTRIAIS E DE MINERAÇÃO, Anais....., V1, p. 2 – 9, 1987.
2. AGUIAR, A, B. O emprego do permeâmetro de Guelph na determinação da permeabilidade do solo, de camadas de lixo e sua cobertura - COPPE, Rio de Janeiro, p. 63, 2001.
3. ALBUQUERQUE FILHO, L.H. & GOMES, R.C. – Avaliação do Comportamento Geotécnico de Barragens de Rejeito de Minério de Ferro Através de Ensaio de Piezocone. Solos e Rochas, S. Paulo, 28, Vol 2, 189-203, 2005.
4. ANJOS, F. V & SILVA, J. B. - As Usinas de Produção de Alumínio da ALCAN no Brasil: Parte 1: Processo Bayer para a Produção de Alumina. Parte 2: O Processo Eletrolítico Para a Produção de Alumínio - Public. da ALCAN Alumínio do Brasil, 1983.
5. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13028: Elaboração de projeto de disposição de rejeitos de beneficiamento, em barramento, em mineração. Rio de Janeiro, 1993.
6. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12069: Ensaio de penetração de cone in situ (CPT) – Método do ensaio. São Paulo, 1991.
7. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12007: Ensaio de adensamento unidimensional. São Paulo, 1990.
8. 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.
9. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: Solo – Análise granulométrica. São Paulo, 1984.
10. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9820: Coleta de amostras indeformadas de solo em furos de sondagem. São Paulo, 1987.

11. BLIGHT, G.E. "A Note on Field Vane Testing of Silty Soils", Can. Geotech. J., 5(3), p. 142- 149, 1968.
12. Costa Filho, L.M e Gomes, R.C – Ensaio de Palheta e Piezocone em Depósitos de Resíduos Desativado – Seminário Brasileiro de Investigações de Campo/ SEFE, vol.3, ABMS/ ABEF, p 209-217, 2000.
13. CEDERGREEN, H.R. Seepage, drainage and flow nets. John Wiley & Sons, New York, 1977.
14. DANZIGER, F.A.B.; SCHNAID,F. - Ensaio de Piezocone: Procedimentos, recomendações e interpretação - In: Seminário Brasileiro de Investigação de Campo, BIC, 2000, São Paulo. Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia, SEFE IV: ABMS, 2000, Vol 3, p.1 – 51, 2000.
15. DE CAMPOS, T. M. P.– Geotecnia e Meio Ambiente: Relato do Estado da Arte. In VIII COBRAMSEF, Anais... Porto Alegre, p. 123 – 157, 1986.
16. FAHEY, M., NEWSON, T.A. & FUJIYASU, Y. Engineering with tailings.Proceedings of the Fourth International Congress on Environmental Geotechnics, Rio de Janeiro, V.2, p. 947-973, 2002.
17. IGNATIUS, S. G. & PINTO, C. S. Aspectos do Comportamento de um Solo em Presença de Efluente Químico a Base de Soda Cáustica – In II REGEO, Proc...Rio de Janeiro, p. 233 – 241, 1991.
18. JAMIOLKOWSKY M., LADD, C.C., GERMAINE, J.T. & LANCELLOTTA, R. - New developments of field and laboratory testing of soils. XI ICSMFE, San Francisco, V 1, p.57-153, 1985.
19. LAMBE, T.W. & WHITMAN, R.V. Soil mechanics. New York: John Wiley & Sons, USA. 553 p, 1979.
20. LANCELLOTTA, R. In situ investigations. In: Geotechnical Engineering. Balkema, Rotterdam, 436 p, 1995.
21. LUNNE, T.; ROBERTSON, P.K. & POWELL, J.J.M. Cone penetration testing in geotechnical practice, Blackie Academic & Professional, 312 p, 1997.

22. MARTIN, T.E., & MCROBERTS, E.C. Tailings and Mine Waste '99, Proceedings of the Sixth International Conference on Tailings and Mine Waste '99, Fort Collins, Colorado, USA, ISBN 90 5809 025 6, Rotterdam/Brookfield, p. 287-302, 1999.
23. MEDINA, J.CASTRO, F. J. Utilização de Rejeitos Na Construção de Pavimentos; Possibilidades Futuras. In: Anais Simpósio Sobre Barragens Rejeitos e Disposição Resíduos Ind. e de Mineração. Anais. Rio de Janeiro, RJ. 1987.
24. MELLO, L. G. & SILVEIRA, A. A. Leis de Compressibilidade e Permeabilidade de Rejeitos Brasileiros. In II REGEO, Anais... V1: p.67 – 76, 1991.
25. MITCHELL, J.K. & GARDNER, W.S. In situ measurement of volume change characteristics. State of the art report, Proceedings of the Conference on In Situ Measurement of Soil Properties, North Carolina State University, Raleigh. 1975.
26. RANDOLPH, M.F. Characterization of Soft Sediments for Offshore Applications, 2nd Int. Conf. on Site charact. Milpress, Porto, V1: p.209-233, 2004.
27. 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.
28. ROBERTSON, A. MACG., LLYOD, T., AND ROBINS, M. Residue Disposal at Sadiola Hill Gold Mine: Stability Evaluation by Field Testing. In Proceedings of the International Mining Conference, Johannesburg, SA, 2003.
29. SANTOS, P. S. - Ciência e Tecnologia das Argilas - V1, 2a ed., Ed. Edgard Blücher Ltda. 1989.
30. SANTOS, AC.B., ALVES, M.C.M., CASTRO, FJ.C.O.-A Tentative of Reducing the Volume of Dredged Mud for Disposing Propose; Anais do 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitaria e Ambiental, Joao Pessoa, Brasil, COD:312, ID:274. 16-21 de setembro de 2001.
31. SCHNAID, F.; LEHANE, B.M. & FAHEY. M. In Situ Test Characterization of Unusual Geomateriais, Keynote Lecture; Proceedings of the 2nd Int. Conf. on Site charact. Milpress, Porto, V1:p.49-74, 2004.

32. SCHNAID, F. Geo-Characterization and Properties of Natural Soils by In Situ Tests. Proceedings ISC-2 on Geotechnical and Geophysical Site Characterization, V1: p.3-47, 2005.
33. SCHNAID, F. Ensaios de Campo e suas aplicações na engenharia de fundações. São Paulo: Oficina de Textos, 189p, 2000.
34. SCHNEIDER, J.A.; LAHANE, B.M. & SCHNAID, F. Evaluation of Piezocone Pore Pressure Response in Normally Consolidated and Overconsolidated Clayey. Forthcoming paper. Velocidade adimensional, 2005.
35. SOMOGYI, F. & GRAY, D. - Engineering Properties Affecting Disposal of Red Muds. In CONF. ON GEOTECHNICAL PRACTICE FOR DISPOSAL OF SOLID WASTES MATERIALS, Proc... ASCE, Michigan, p. 1-22, 1977.
36. SOUZAPINTO, C. Curso básico de mecânica dos solos. 2ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2002.
37. SPANNENBERG, M.G. Caracterização Geotécnica de um Depósito de Argila Mole da Baixada Fluminense. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.183p, 2003.
38. STINSON, J. M. – Correlation of red mud consolidation with its soil properties. In LIGHT METALS, 110TH AIME ANNUAL MEETING, Proc... Chicago, Illinois. 1981.
39. VICK, S.G. Planning, Design and Analysis of Tailings Dams. John Wiley & Sons, Inc., 369 p, 1983.
40. VILLAR, L. F. S. Análise do comportamento de resíduos industriais de bauxita: desenvolvimento de facilidades experimentais de campo e de laboratório. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 1990. 225p.
41. VILLAR, L.H.A. Estudo do Adensamento e Ressecamento de Resíduos de Mineração e Processamento de Bauxita. Tese de doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.461p, 2002.

# *CADERNO TÉCNICO*

**INTERPRETAÇÃO DE ENSAIOS DE  
PIEZOCONE EM RESÍDUOS DE BAUXITA**

## **CADERNO TÉCNICO - 1/06**

***Assunto***

**RESULTADOS DA INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA – ENSAIOS DE PIEZOCONES**

***Finalidade***

***Caderno técnico – Dissertação de mestrado***

***Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS***

***Local***

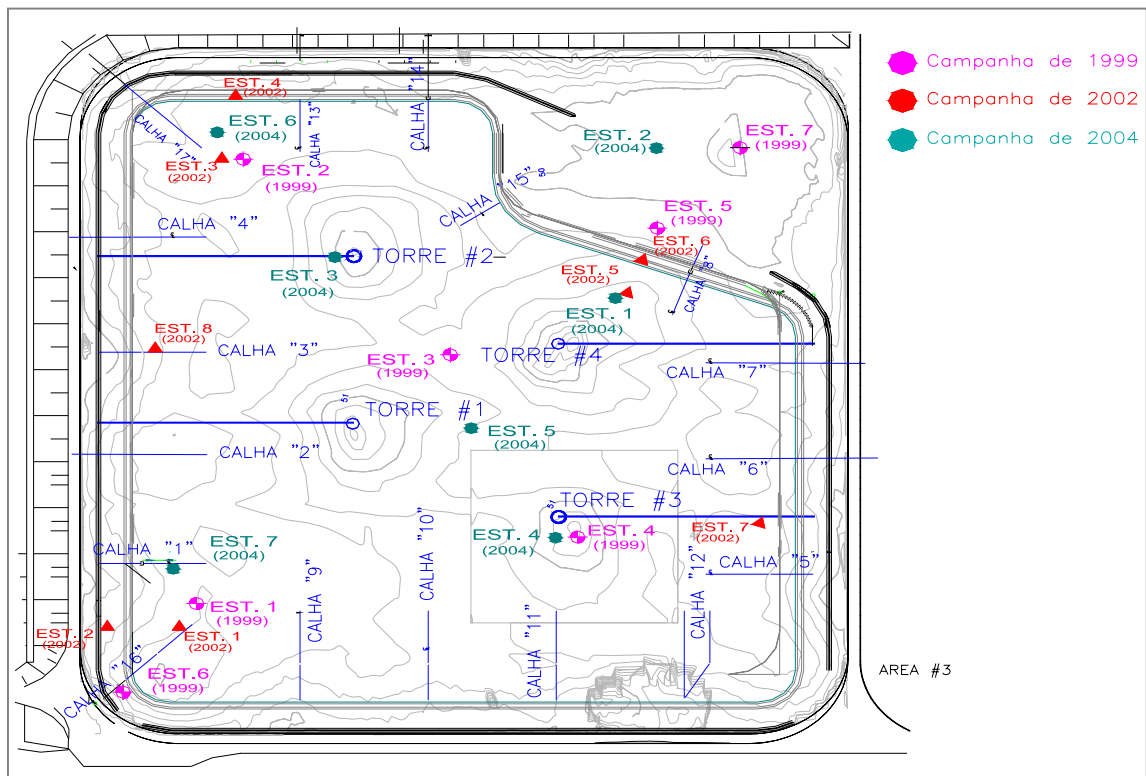
Área de deposição de resíduos ARB#2 e ARB#3 da estação de tratamento da ALUMAR, no Município de São Luiz – MA

### **1. APRESENTAÇÃO**

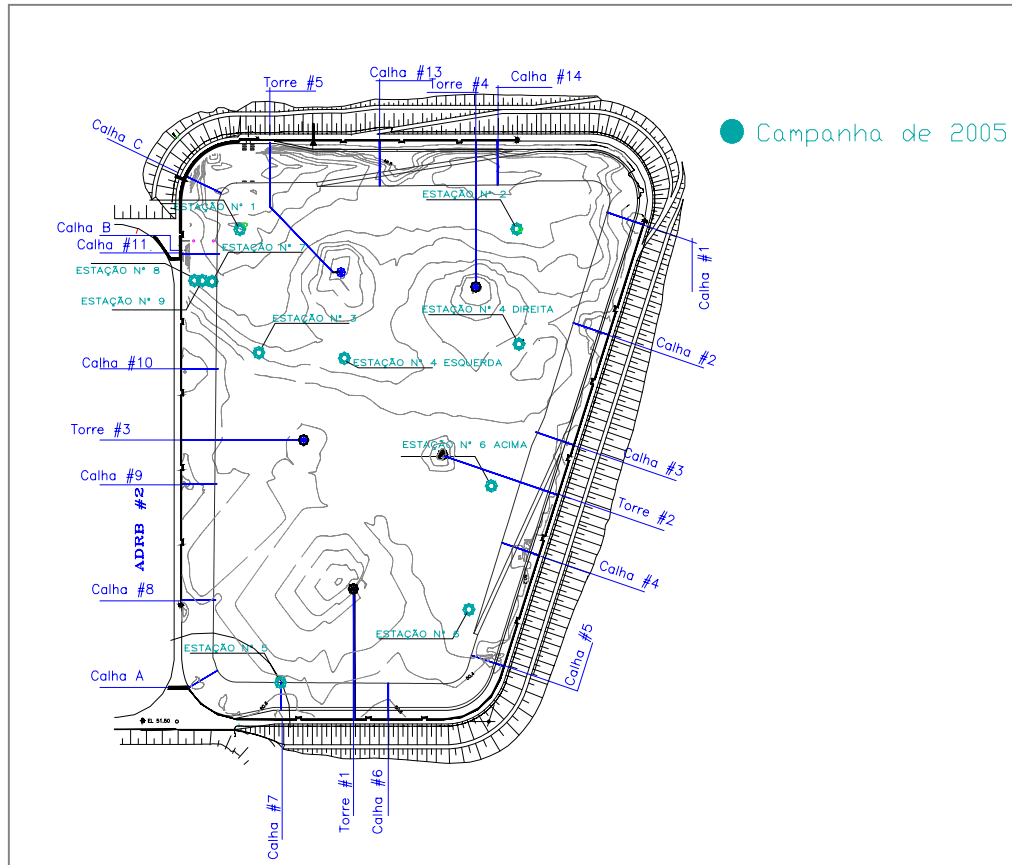
Neste caderno são apresentados resultados dos ensaios de piezocone, assim como resultados das propostas de classificação (Robertson & Campanella, 1983) e (Robertson, 1986), utilizados na elaboração da dissertação de mestrado.

A dissertação propôs a interpretação de ensaios de piezocone avaliando a aplicabilidade do ensaio na caracterização de um resíduo industrial de bauxita. Outra finalidade foi a avaliação da composição e a distribuição dos resíduos ao longo da profundidade, em diferentes pontos do maciço e do reservatório das áreas. O programa experimental envolveu a reinterpretação de resultados de quatro campanhas de investigações geotécnicas em duas áreas de disposição do resíduo, envolvendo ensaios de campo (piezocone, palheta e piezometro) e laboratório realizado por empresas privadas contratadas pela proprietária da obra e universidade (UFRGS).

Foram realizados perfis de piezocone ao longo de duas áreas ARB#2 e ARB#3 em campanhas desenvolvidas nos anos de 1999, 2002, 2004 e 2005. A Figura 01 e 02 apresenta os croquis da localização destes furos de sondagem.



**Figura 01:** Localização dos furos de sondagem na ARB#2



**Figura 02:** Localização dos furos de sondagem na ARB#3



Os resultados dos ensaios de piezocone são apresentados no **Anexo I**, onde são encontrados para cada campanha e cada estação os seguintes gráficos:

Figura 1:  $q_t$  versus Profundidade;  
 $u$  e  $u_o$  versus profundidade;  
 $B_q$  versus profundidade;  
 $R_f$  versus profundidade;

Figura 2:  $q_t$  versus Profundidade;  
 $S_u$  versus profundidade;  
 $S_u / \sigma'_{vo}$  versus profundidade;  
 $C_v$  versus profundidade;

No **Anexo II** são apresentados os ensaios de dissipação. Para cada estação plotou-se a variação da poro pressão ao longo do logaritmo do tempo. No **Anexo III** são apresentados os resultados propostas de classificação (Robertson & Campanella, 1983) e (Robertson, 1986) e no **Anexo IV** é apresentada o perfil indicativo do nível de água e do nível do resíduo.

## 1.1 DEFINIÇÕES DAS COTAS

Na caracterização dos depósitos é necessário comparar os resultados das diferentes campanhas, realizadas em anos distintos. O critério adotado para a sobreposição dos ensaios é subjetivo, pois com o alteamento do reservatório as cotas de superfície são variáveis. Para evitar contrariedades nas comparações considerou-se a cota máxima de elevação de cada campanha como a cota de referências (cota zero), sendo todos os ensaios plotados em relação a esta referência. (Anexo IV).

## 1.2 – CONSIDERAÇÕES DE INTERPRETAÇÃO

Para a interpretação dos ensaios de piezocone tem-se a necessidade de se adotar valores de  $N_{kt}$  e o valores do peso específico natural variando conforme a profundidade.

Valores médios do peso específico foi adotado para cada ARB, devido a dispersão encontrada ao plotar todos os resultados de forma conjunta. Na ARB#2 o valor de peso específico adotado foi de  $18 \text{ kN/m}^3$ , para a ARB#3 adotou-se o valor de  $15 \text{ kN/m}^3$  para a profundidade variando do início do resíduo até a 3,0 m, e de  $17 \text{ kN/m}^3$  para as profundidades de 3,0 m até o final da sondagem.

Na determinação da resistência não drenada do resíduo adotou-se um valor médio  $N_{kt}$  de 19 para as estações 3, 5 e 6 e 13 para as estações 1 e 2 referentes a campanha de 1999, para a campanha de 2002 valores de  $N_{kt}$  ficaram entre 12 e 13 e para a campanha de 2004 adotou-se  $N_{kt}$  iguais a 15. Tendo em vista a falta de ensaios de palheta para a aferição do parâmetro  $N_{kt}$  para a campanha de 2005 na ARB#3 optou-se por utilizar o valor médio de 13,5 obtidos nas campanhas anteriores.

## 2. DESCRIÇÃO BÁSICA DO ENSAIO DE PIEZOCONE

Os ensaios de piezocone foram realizados com equipamentos padrão e procedimentos recomendados pela Norma Brasileira de Ensaio de Cone (MB-3406).

No presente programa de ensaios foi utilizada uma ponteira elétrica cravada no terreno através de um sistema hidráulico de cravação. As células de medição são instrumentadas com “strain-gauges” que, acopladas 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 pressões neutras geradas durante a cravação do elemento cônico no terreno. No caso do piezocone, um sensor de medição de pressões, também a base de “strain-gauges” é posicionado junto à face lateral da luva para o registro das pressões.

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.

Previamente à realização dos ensaios em campo, as células de carga e pressão foram calibradas em uma prensa hidráulica no laboratório do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS.

### **3. MEDIDAS DE ENSAIO**

Neste item são apresentadas as medidas realizadas com o piezocone, correções adotadas e parâmetros necessários à identificação do estrato investigado.

#### **3.1 RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO**

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 às pressões neutras atuantes no espaço compreendido entre a ponta cônica e a luva de atrito. As médias registradas de  $q_c$  são corrigidas para obtenção de valores de  $q_t$ , segundo a expressão (Jamolkowsky et al, 1985):

$$q_t = q_c + k_c (1 - a) U_{m\acute{a}x} \quad (1)$$

sendo  $k_c$  e  $a$  fatores dependentes das poro pressões medidas e da geometria do cone, determinados em procedimentos correntes de calibração.

#### **3.2 ATRITO LATERAL $f_s$**

O atrito lateral ao longo de uma luva de 150 cm<sup>2</sup> é registrado de maneira contínua durante a cravação, analogamente à resistência de ponta. Os valores de atrito lateral medido, juntamente

com a resistência de ponta, permitem calcular a razão de atrito  $R_f$ , parâmetro útil para identificação de comportamento das camadas atravessadas.

### 3.3 PORO PRESSÃO

Um dos propósitos principais do ensaio é medir a poro pressão gerada durante a cravação, objetivando auxiliar na estimativa de comportamento das diferentes camadas de solo.

Um elemento poroso, localizado na parte cilíndrica imediatamente acima da parte cônica da ponteira, permite a medição das poro pressões mediante um transdutor de pressão de diafragma.

### 3.4 RELAÇÃO DE ATRITO $R_f$

A Relação de atrito  $R_f$  corresponde à razão entre o atrito lateral e a resistência de ponta do cone, em percentagem:

$$R_f = (f_s / q_c) * 100 \quad [2]$$

Esta relação é utilizada para determinar o tipo de solo ensaiado.

Adicionalmente, a identificação do perfil de subsolo pode ser feita através do parâmetro de poro pressão  $B_q$  (Senneset & Janbu, 1984):

$$B_q = \Delta U / (q_t - \sigma_{vo}) \quad [3]$$

### 3.5 ENSAIOS DE DISSIPACÃO

Ensaio de dissipação do excesso de pressões neutras geradas durante a cravação do piezocone no solo podem ser utilizados para obtenção de estimativas do coeficiente de adensamento horizontal  $C_h$ . O ensaio consiste basicamente em interromper a cravação do

piezocone até atingir-se a dissipação total do excesso de poro pressões. Durante esse período, monitora-se a dissipação.

O cálculo dos coeficientes de adensamento deve fazer uso das informações constantes nos ensaios de dissipação. A posição do lençol freático ( $u_o$ ) no ponto é calculada a partir da poro pressão de equilíbrio medida.

Conhecidos  $u$  e  $u_o$  pode-se estimar  $C_h$  através das proposições de Houlsby & Teh (1988).

Os resultados dos ensaios de dissipação aparecem no Anexo II.

Salienta-se que para os cálculos de  $C_h$ , utilizando a metodologia proposta por Houslby & Teh (1988), foi utilizado um índice de rigidez ( $I_r$ ) igual a 100. Esse valor (médio dentro da faixa de variação apresentada pelos autores do método entre 50 e 500) é puramente tentativo, devendo-se aferir mediante ensaios específicos apropriados. Conforme Baligh e Levadoux (1986), os valores de  $C_h$  determinados pelo piezocone correspondem ao domínio sobre-adensado. O cálculo do coeficiente de adensamento na condição NA pode ser realizado a partir da metodologia proposta por Jamiolkowsky e outros (1985), para o qual é necessário conhecer a relação RR/CR (entre índices de compressão e recompressão) do material. Finalmente, o coeficiente de adensamento vertical pode ser calculado a partir de valores da relação de permeabilidades ( $k_v/k_h$ ).

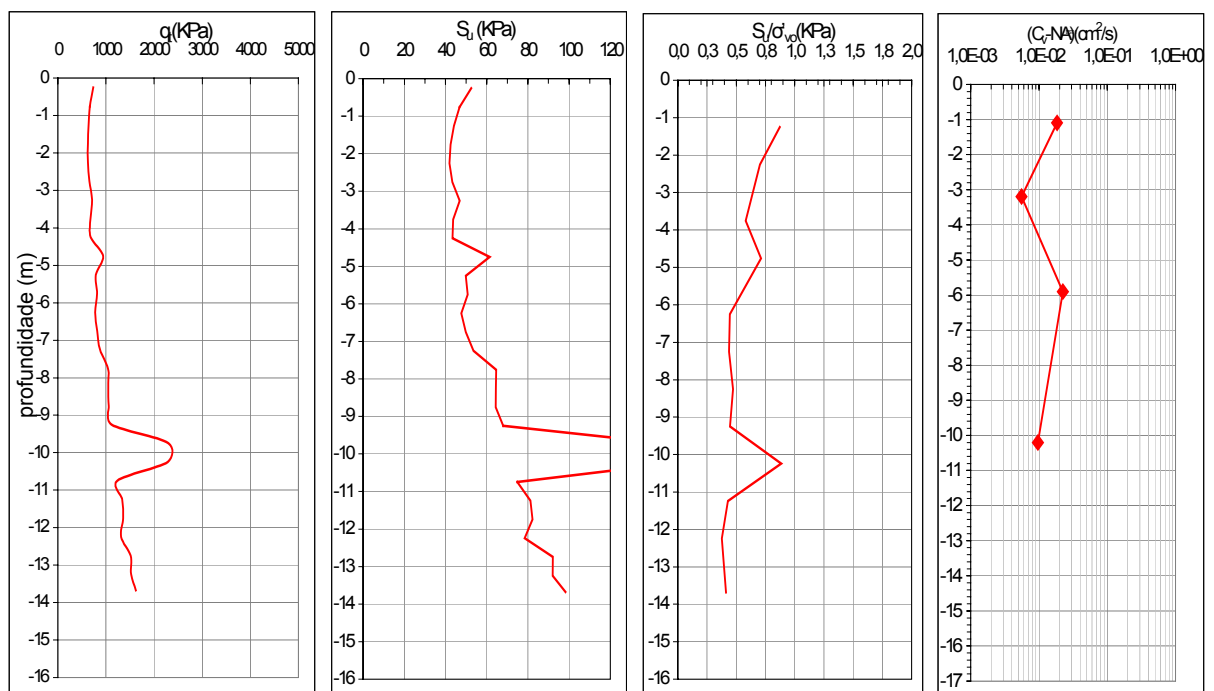
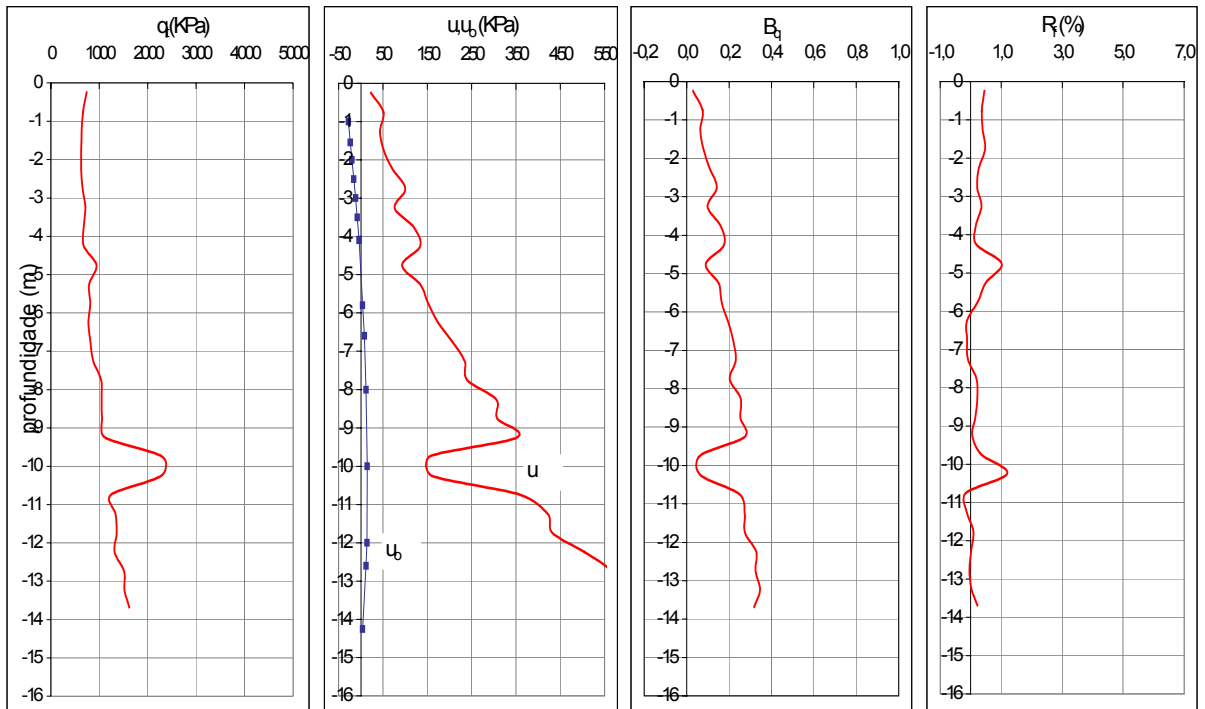
## ANEXO I

# RESULTADOS DE ENSAIOS DE PIEZOCONE

# Área - ARB#2

## Ensaio de CPTU - Campanha de 1999

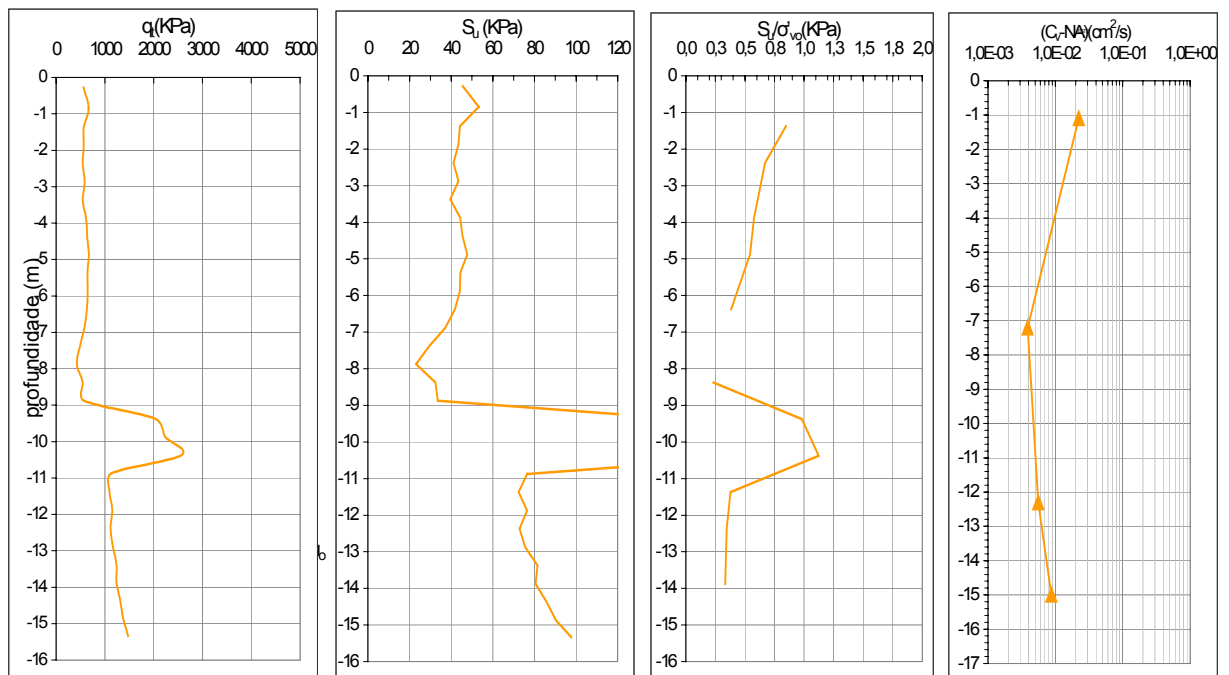
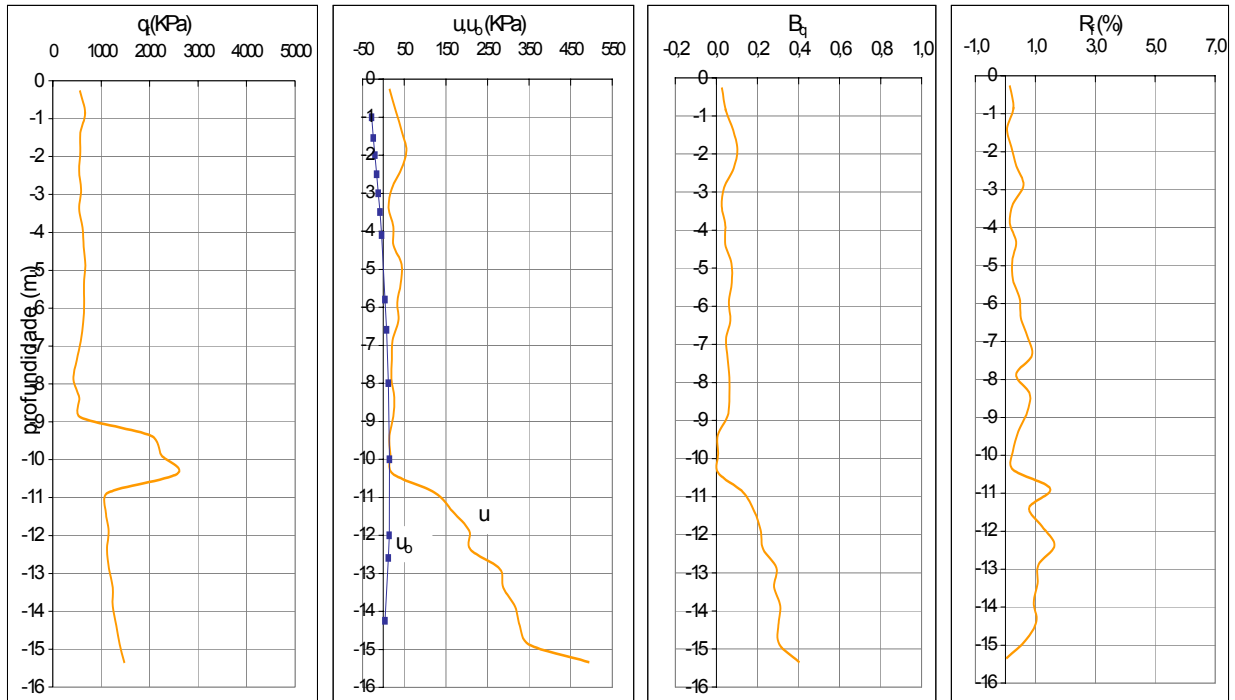
- Estação 1



# Área - ARB#2

## Ensaio de CPTU - Campanha de 1999

- Estação 2

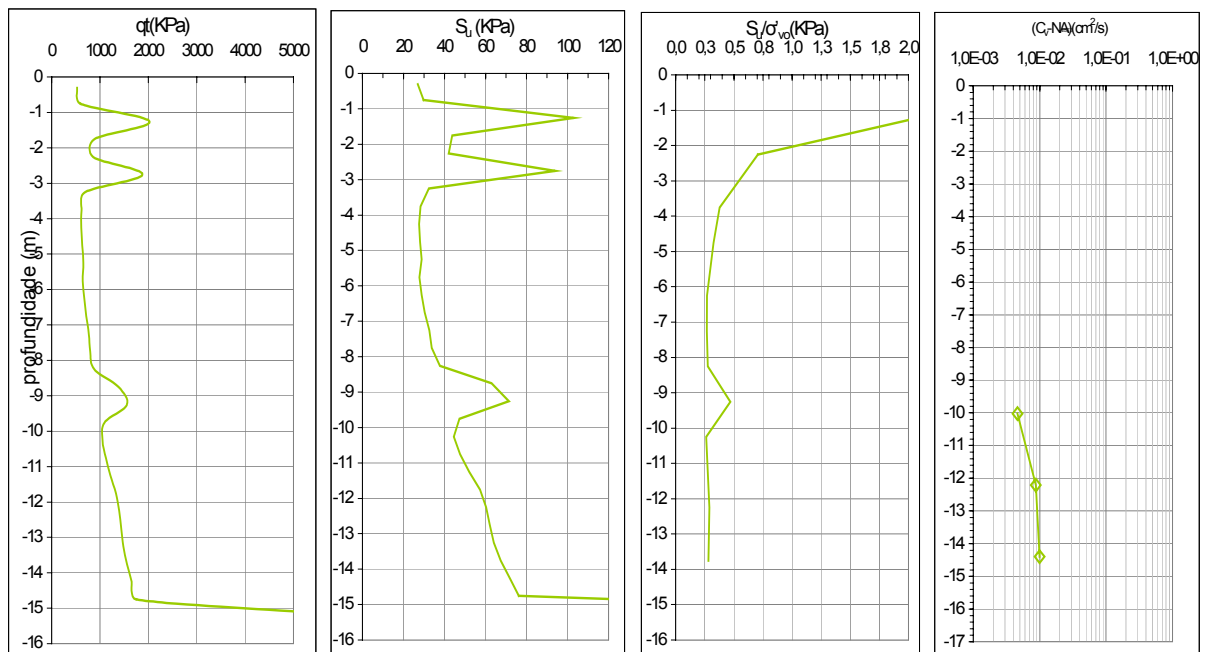
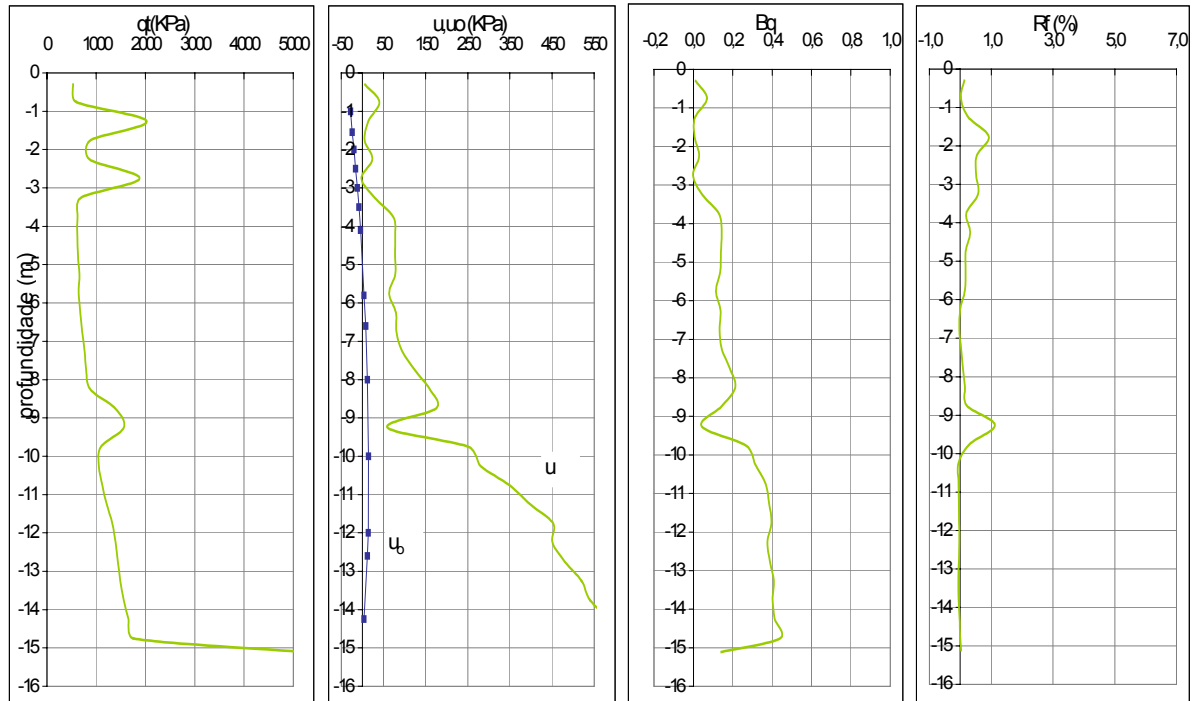




# Área - ARB#2

## Ensaio de CPTU - Campanha de 1999

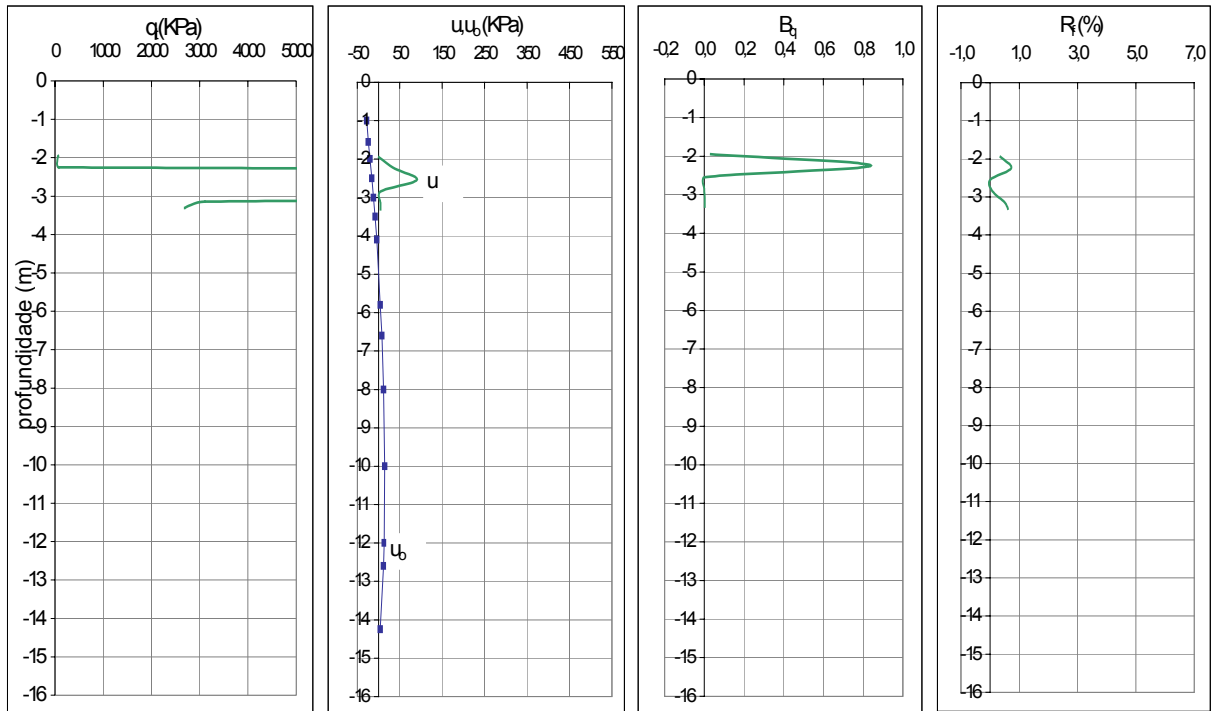
- Estação 3



# Área - ARB#2

## Ensaio de CPTU - Campanha de 1999

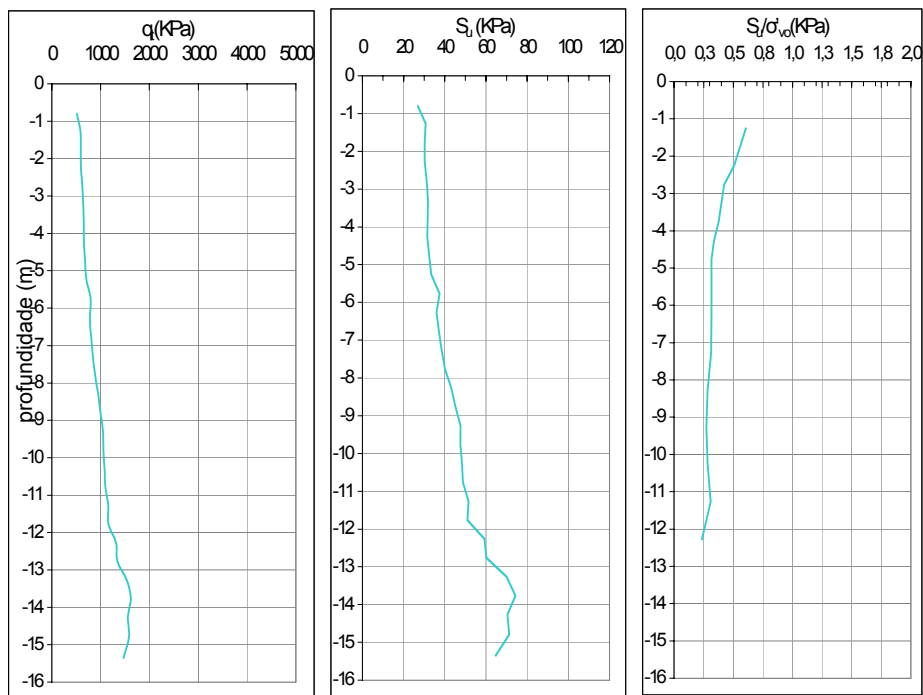
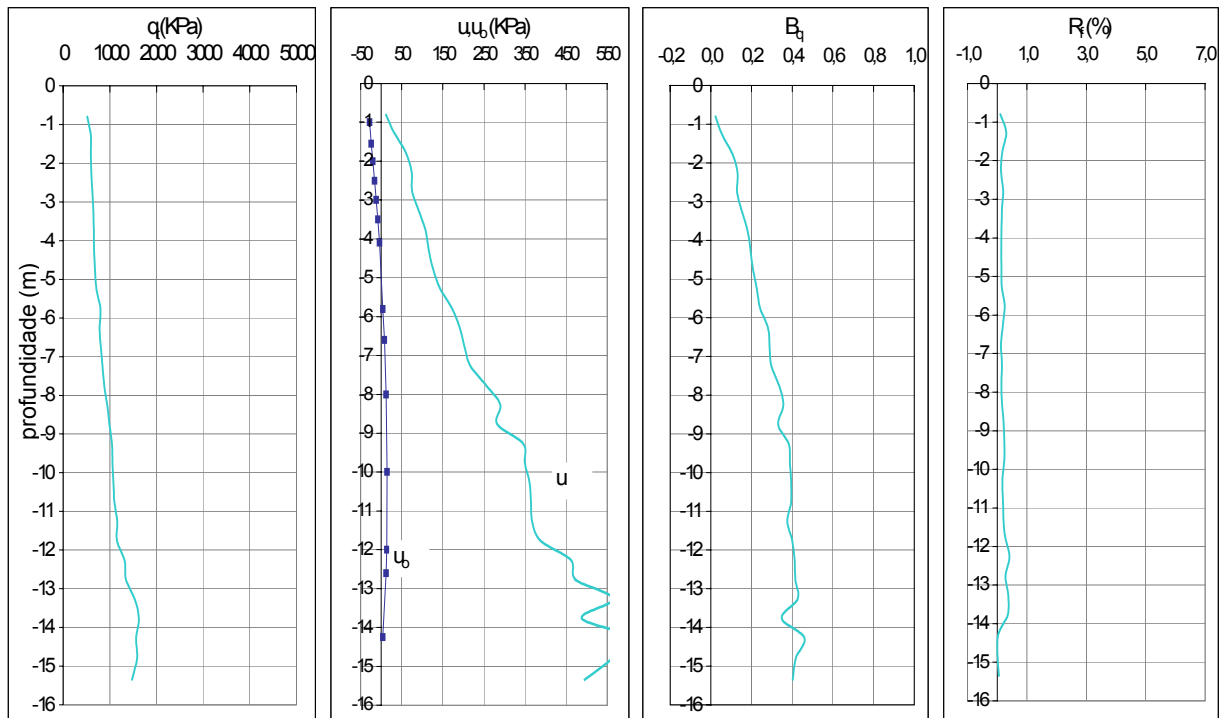
- Estação 4



# Área - ARB#2

## Ensaio de CPTU - Campanha de 1999

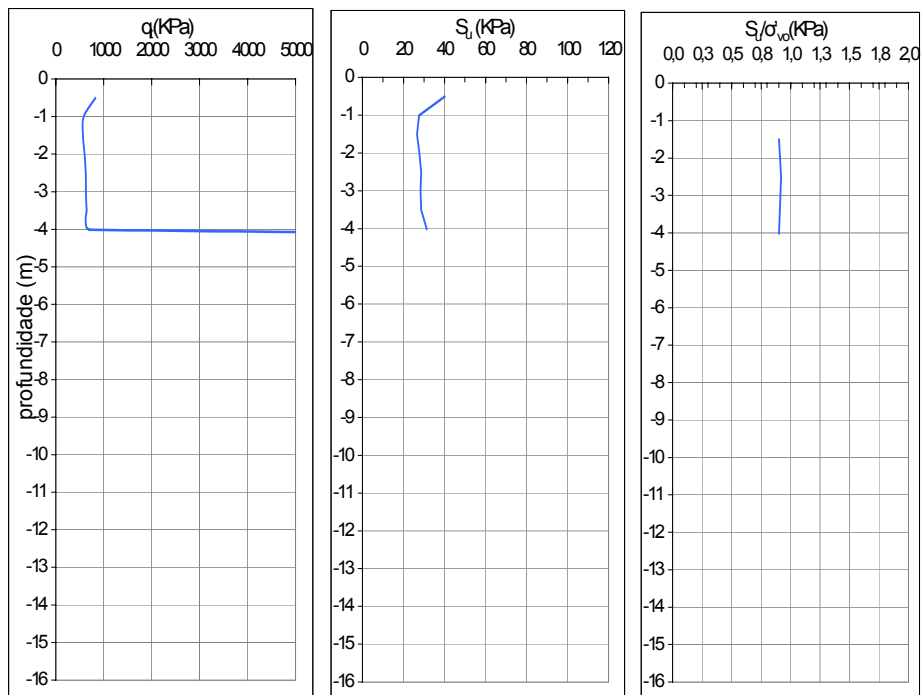
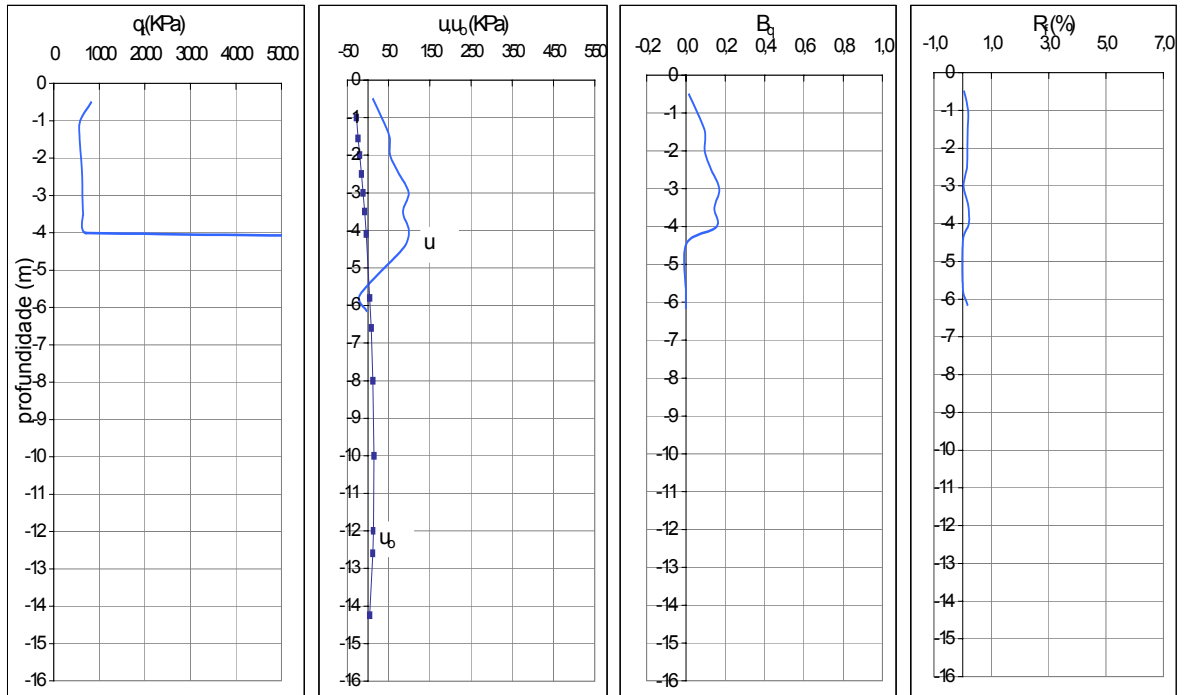
- Estação 5



# Área - ARB#2

## Ensaio de CPTU - Campanha de 1999

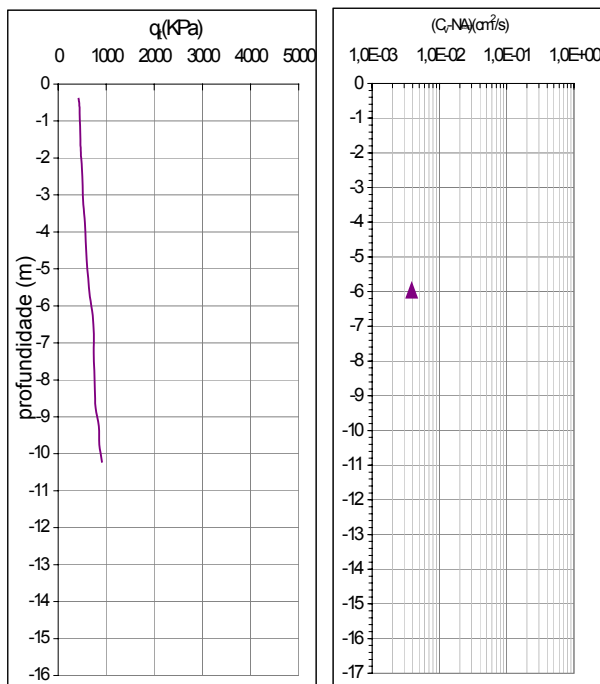
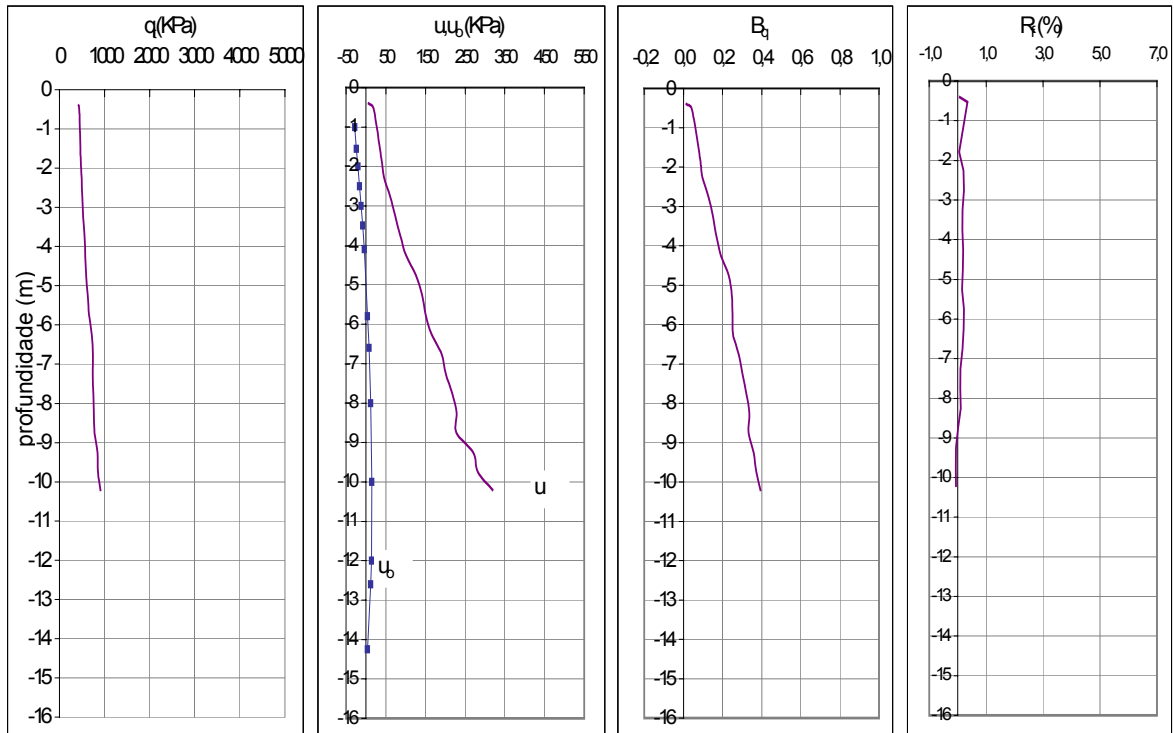
- Estação 6



# Área - ARB#2

## Ensaio de CPTU - Campanha de 1999

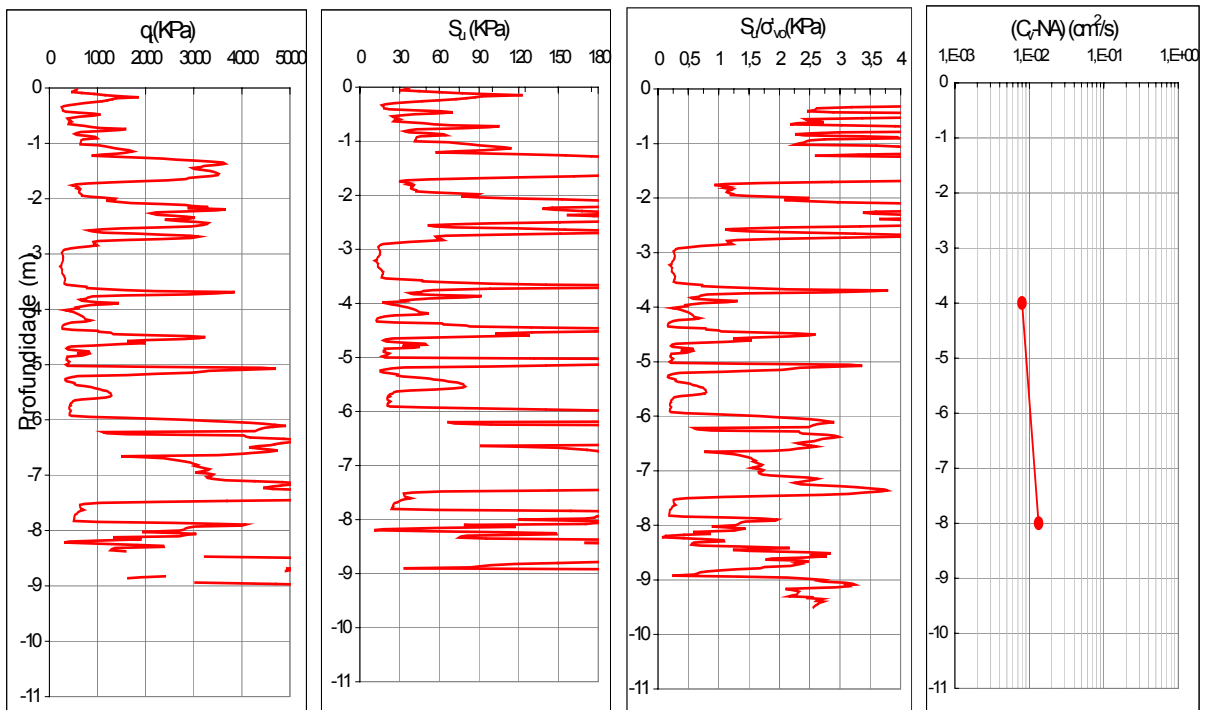
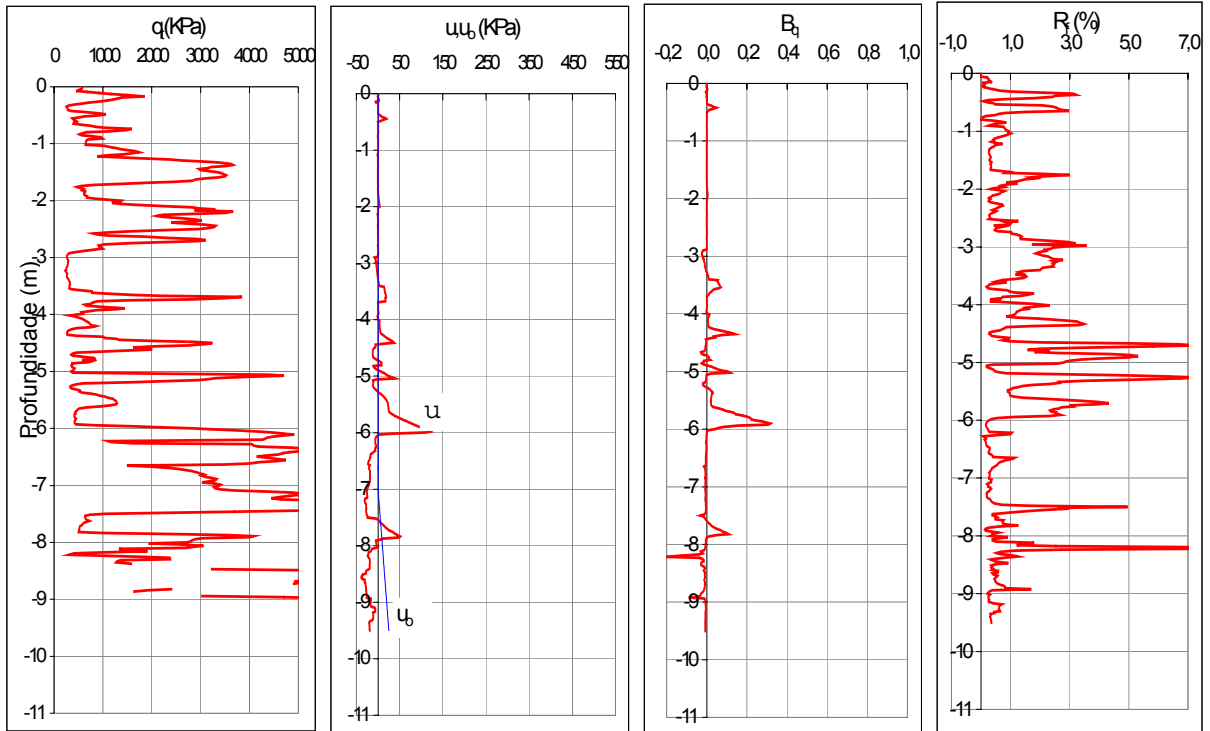
- Estação 7



# Área - ARB#2

## Ensaio de CPTU - Campanha de 2002

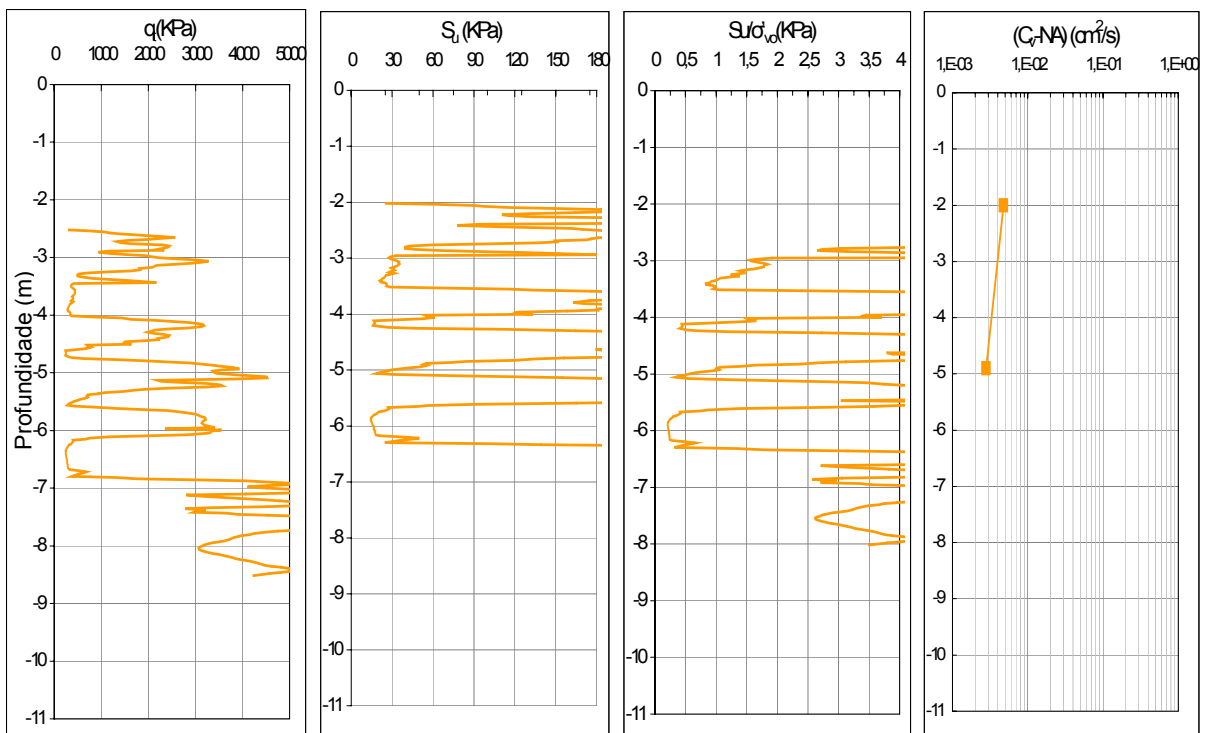
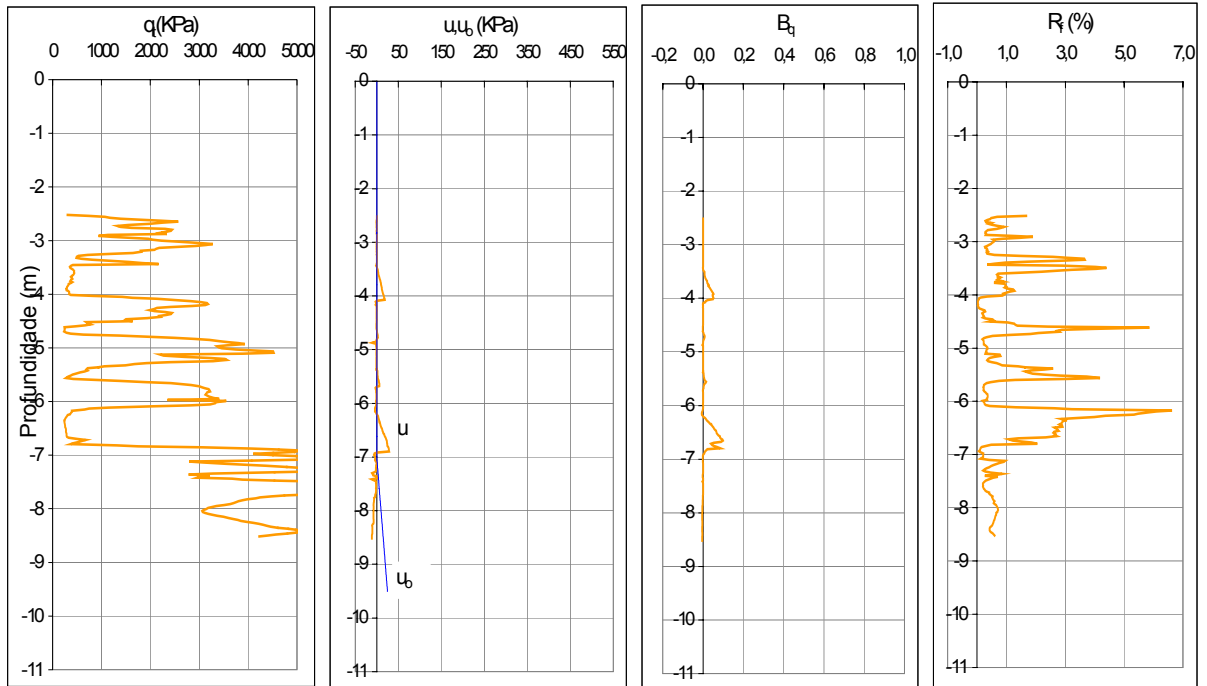
- Estação 1



# Área - ARB#2

## Ensaio de CPTU - Campanha de 2002

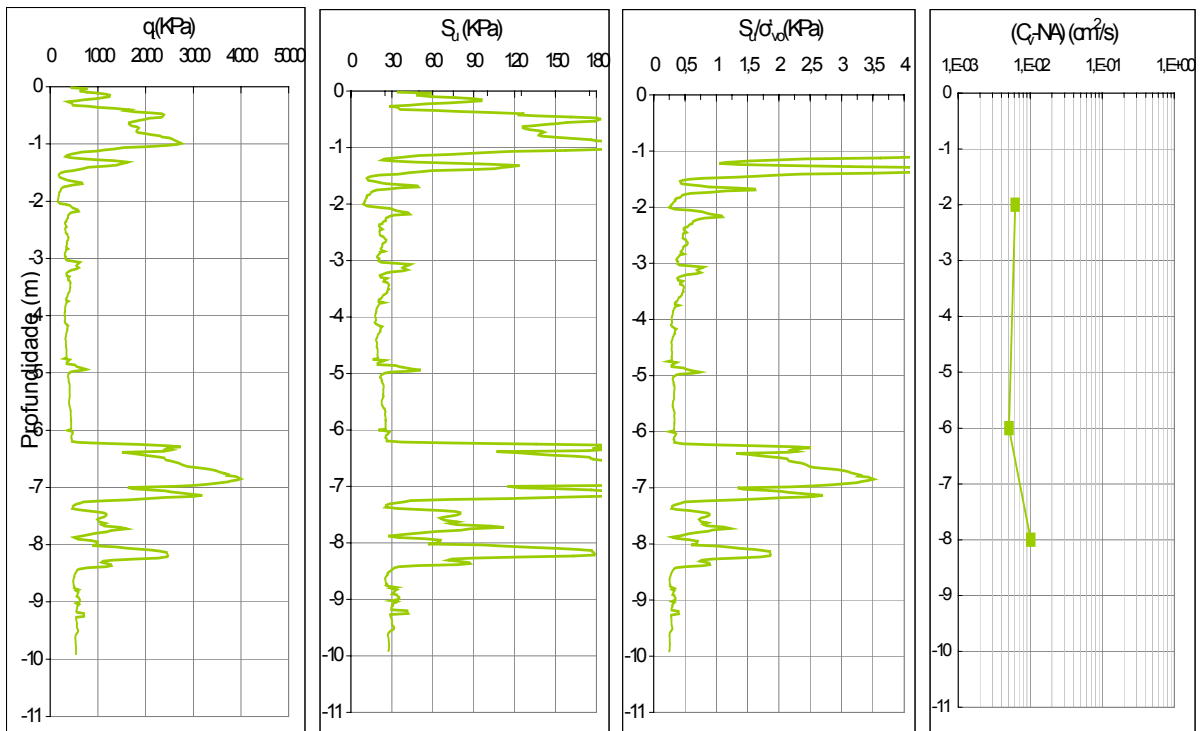
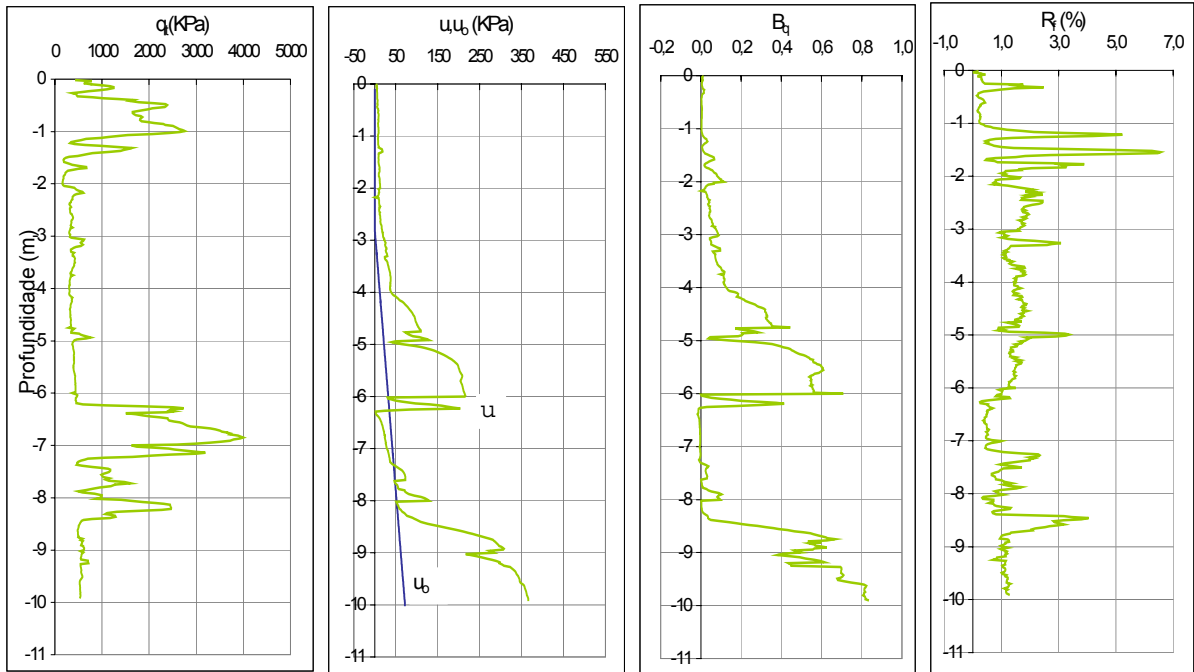
- Estação 2



# Área - ARB#2

## Ensaio de CPTU - Campanha de 2002

- Estação 3

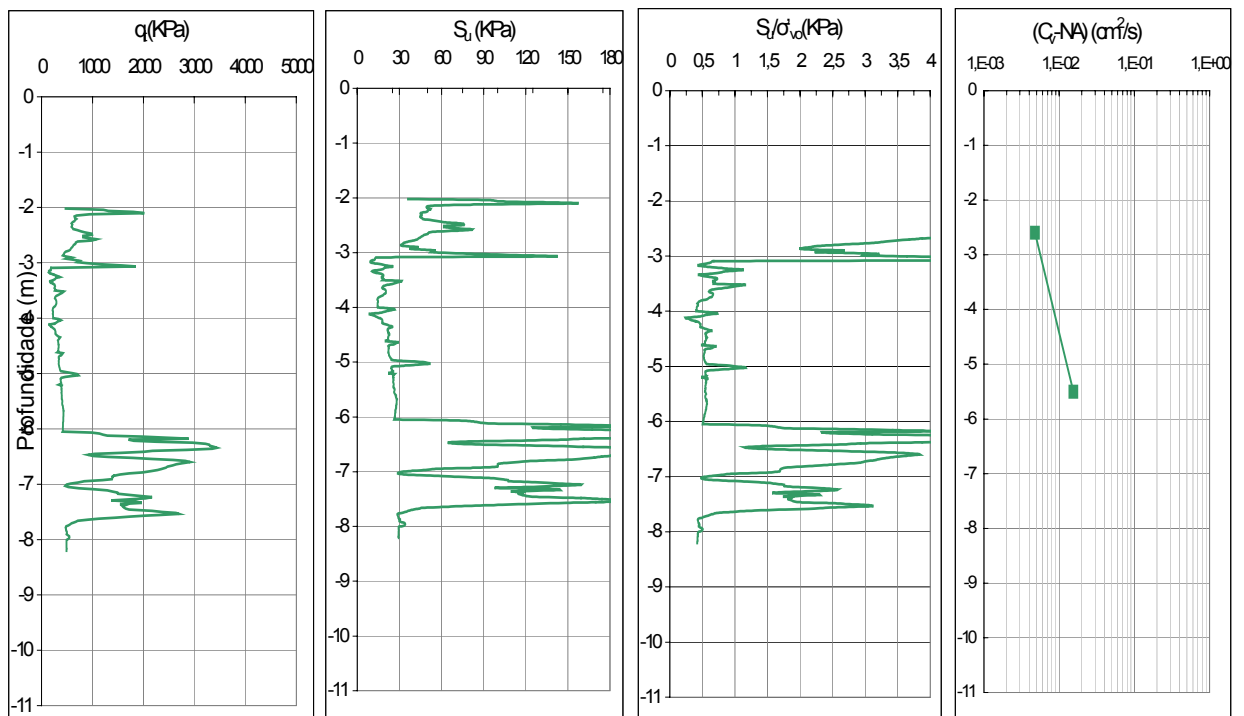
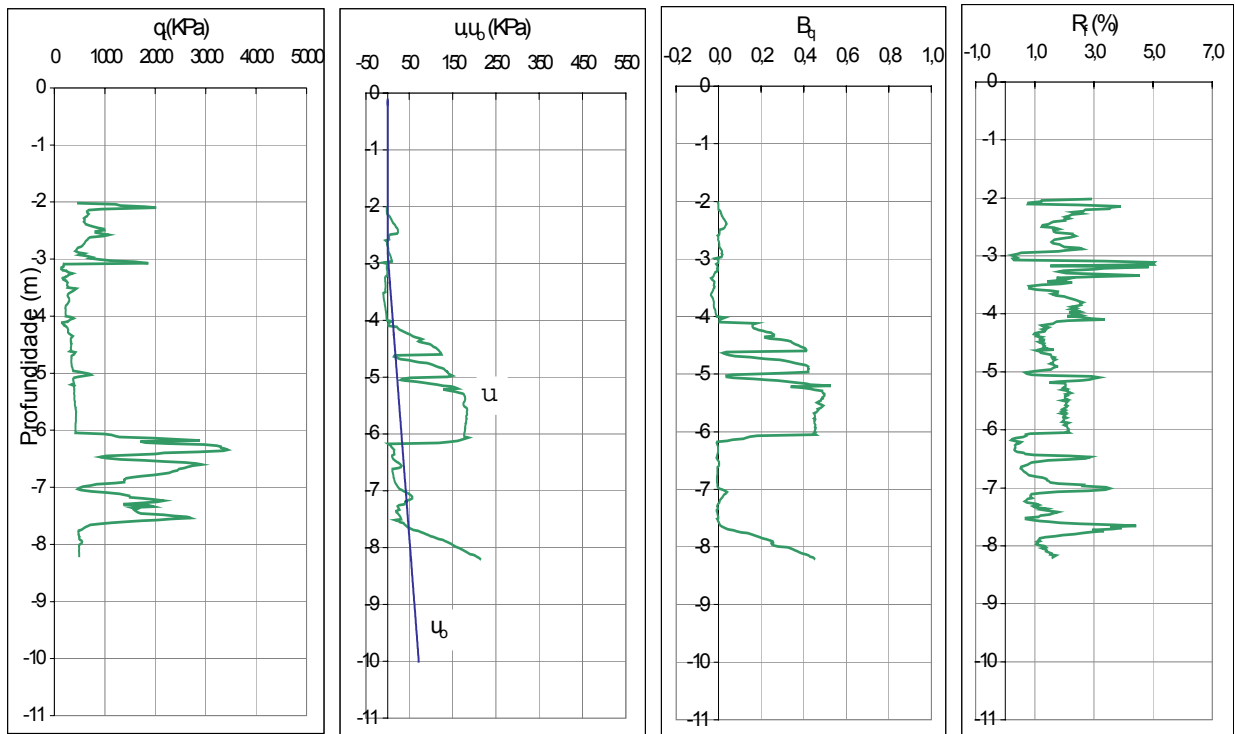




# Área - ARB#2

## Ensaio de CPTU - Campanha de 2002

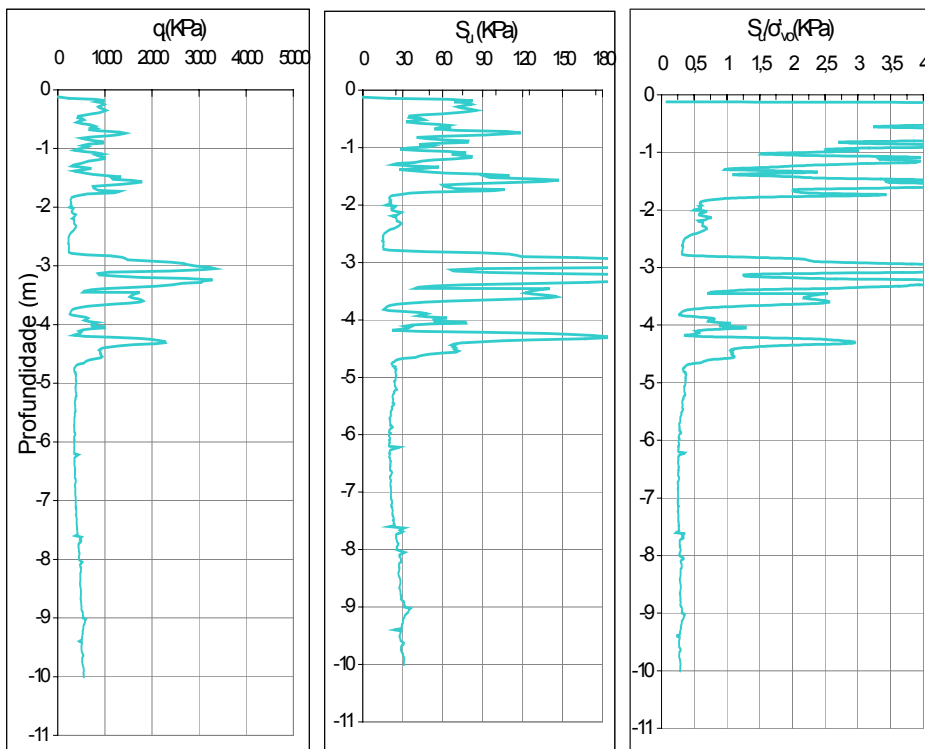
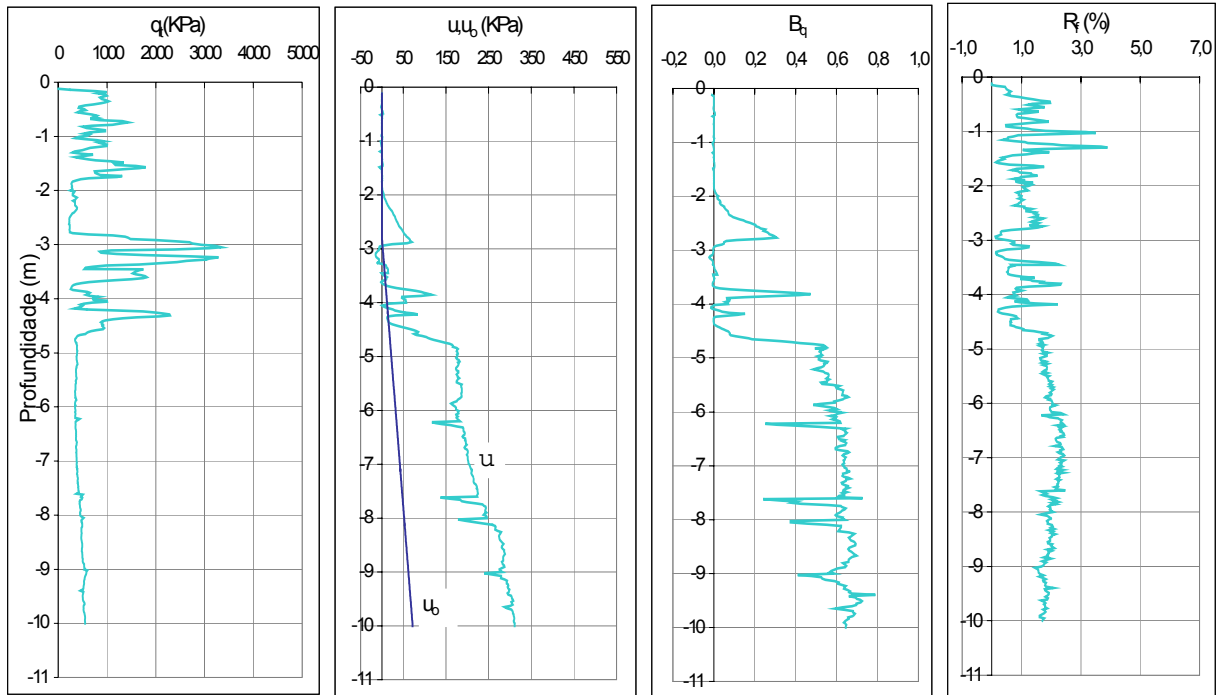
- Estação 4



# Área - ARB#2

## Ensaio de CPTU - Campanha de 2002

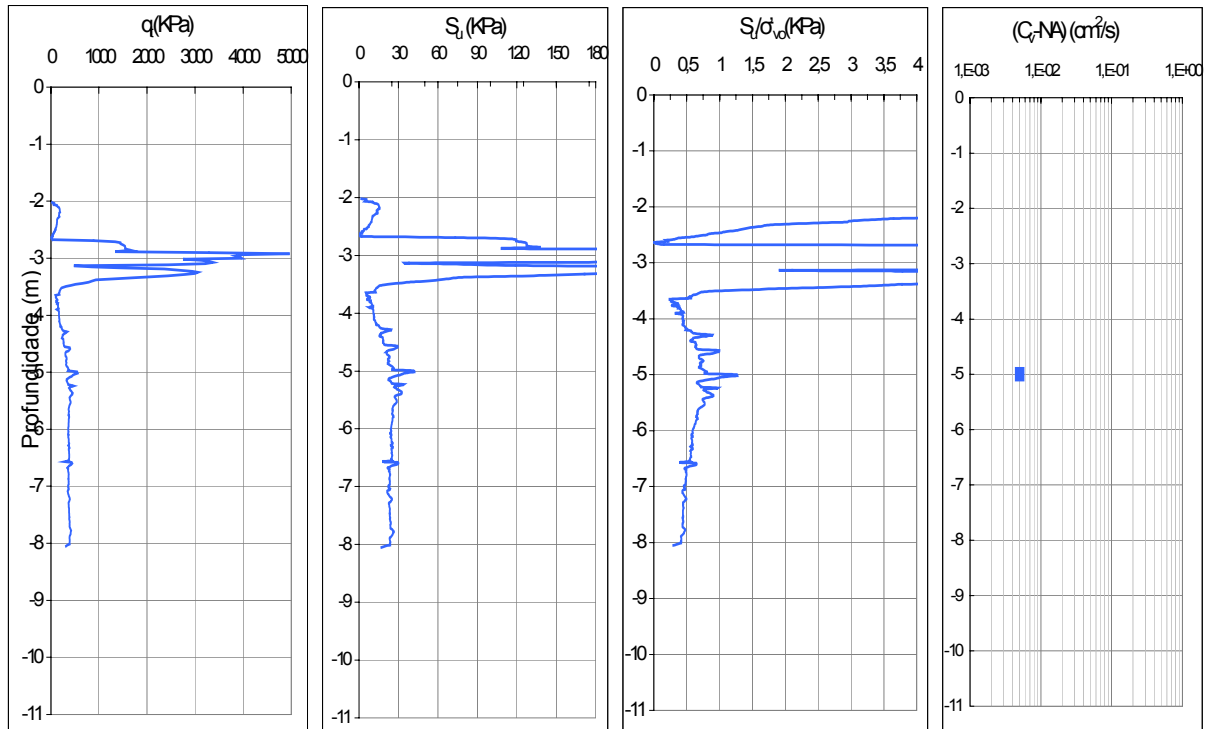
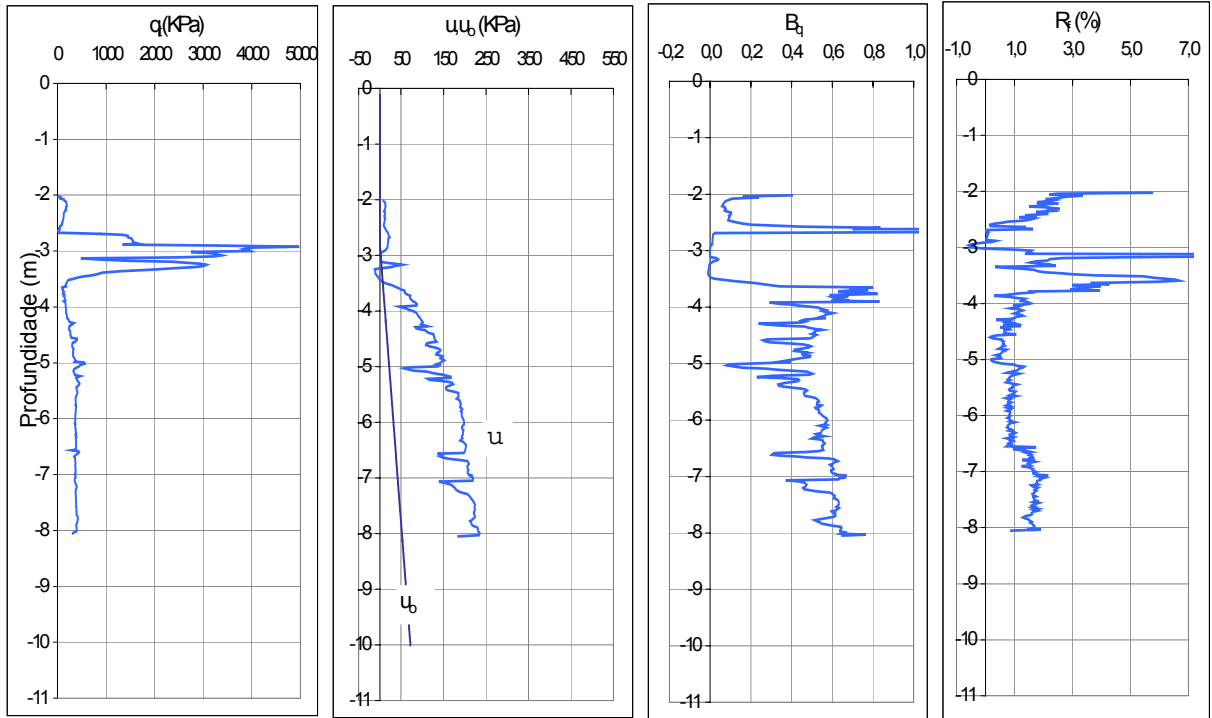
- Estação 5



# Área - ARB#2

## Ensaio de CPTU - Campanha de 2002

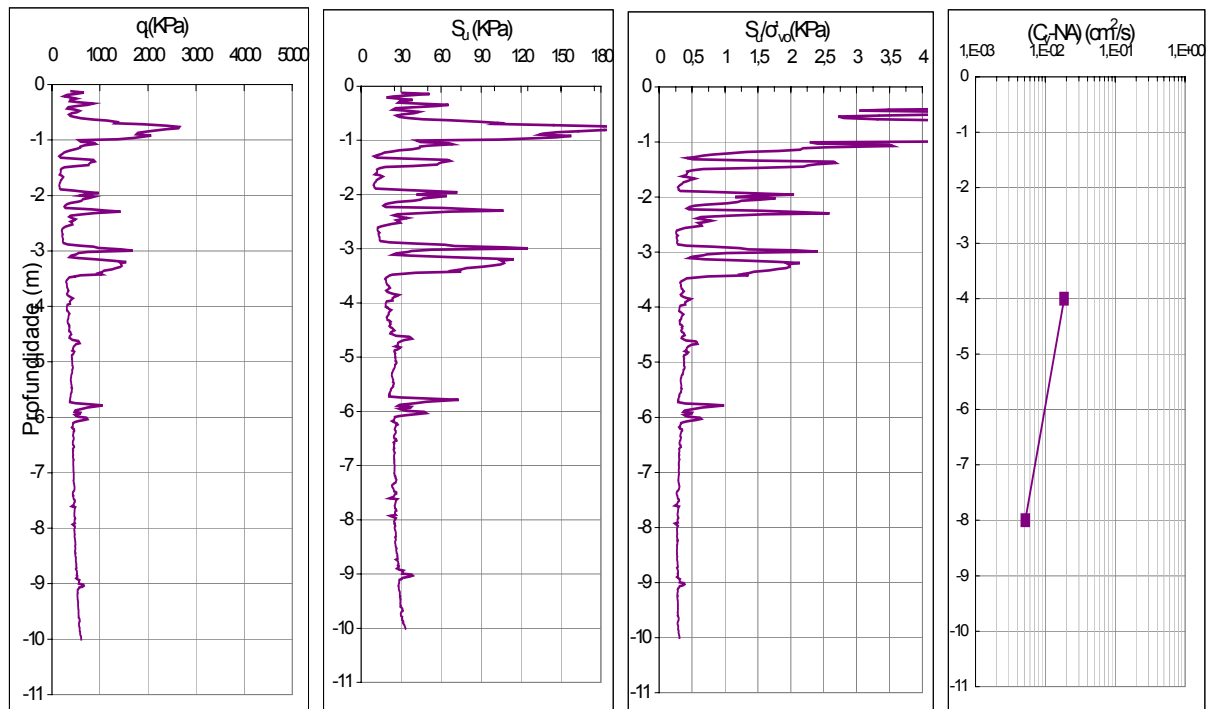
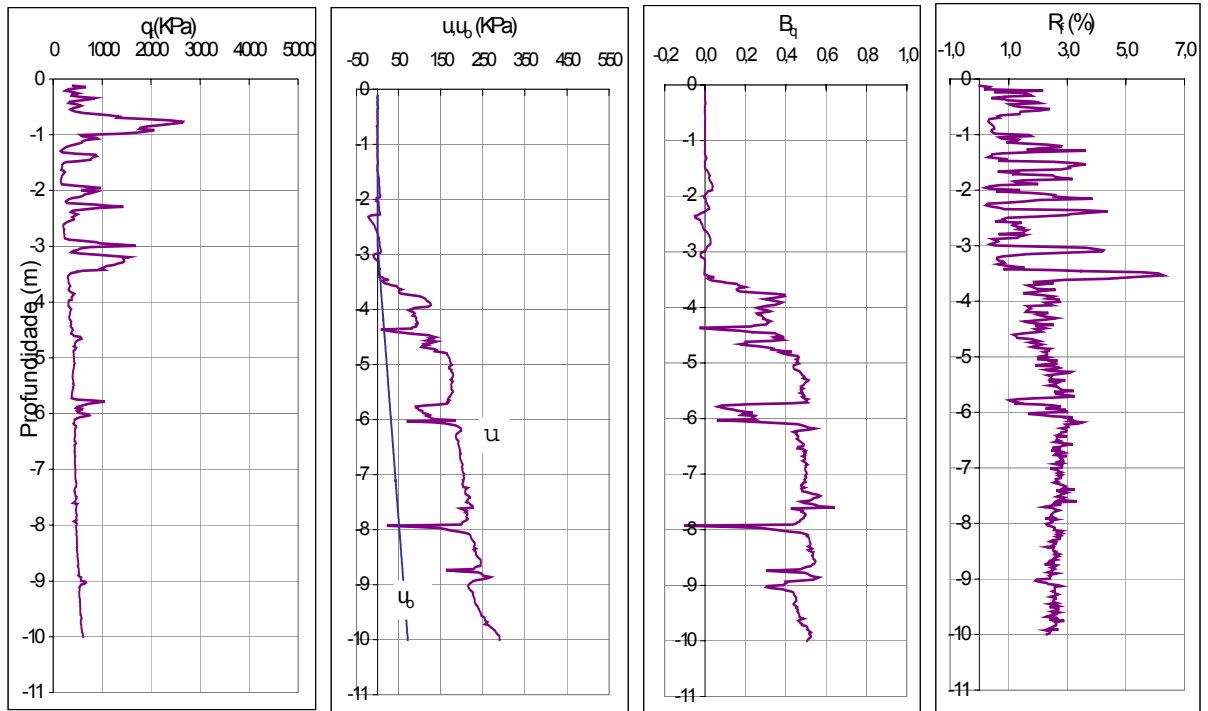
- Estação 6



# Área - ARB#2

## Ensaio de CPTU - Campanha de 2002

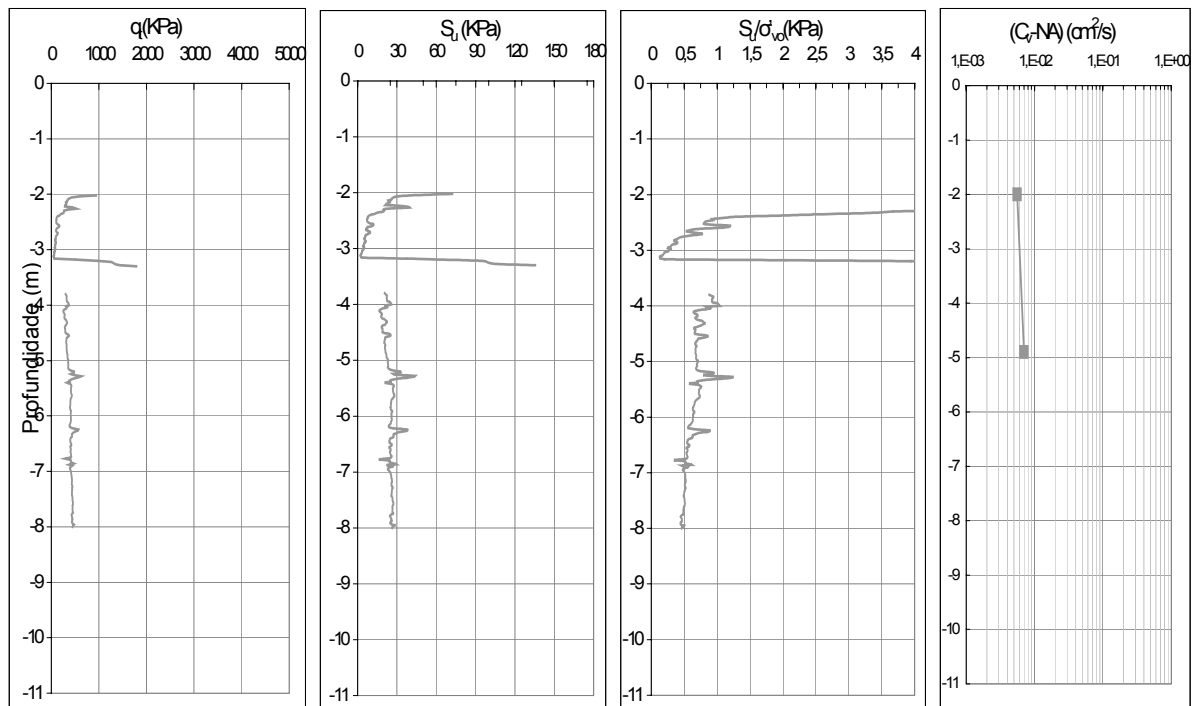
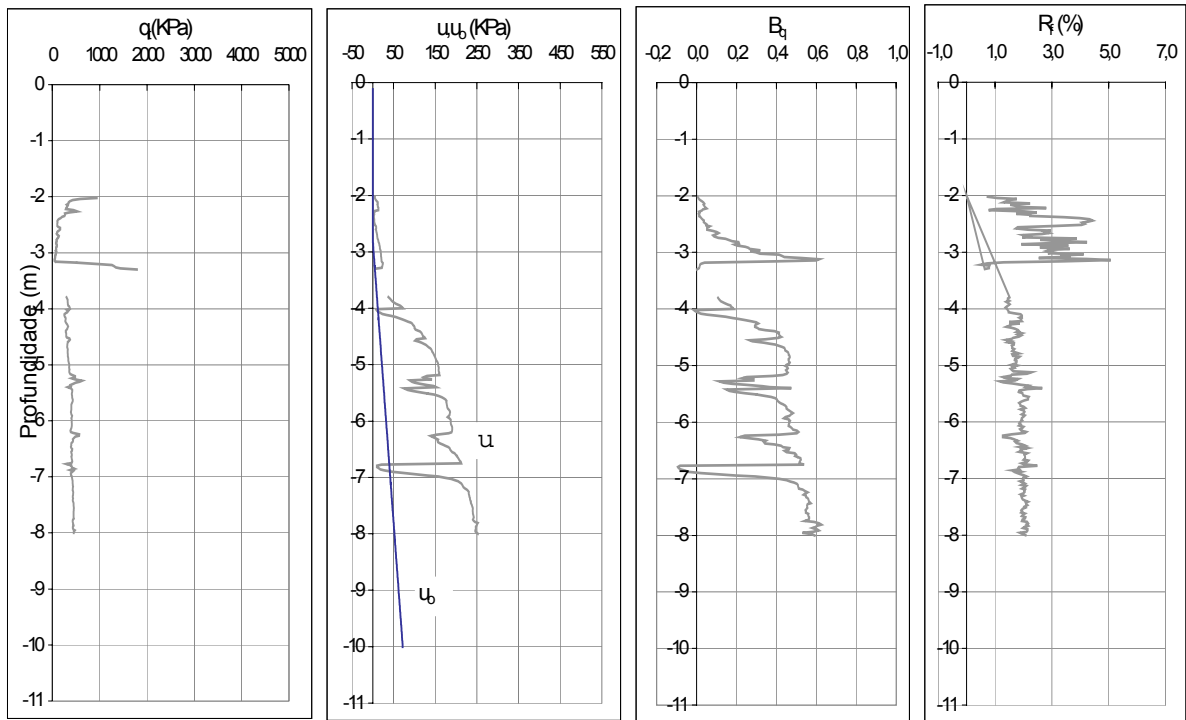
- Estação 7



# Área - ARB#2

## Ensaio de CPTU - Campanha de 2002

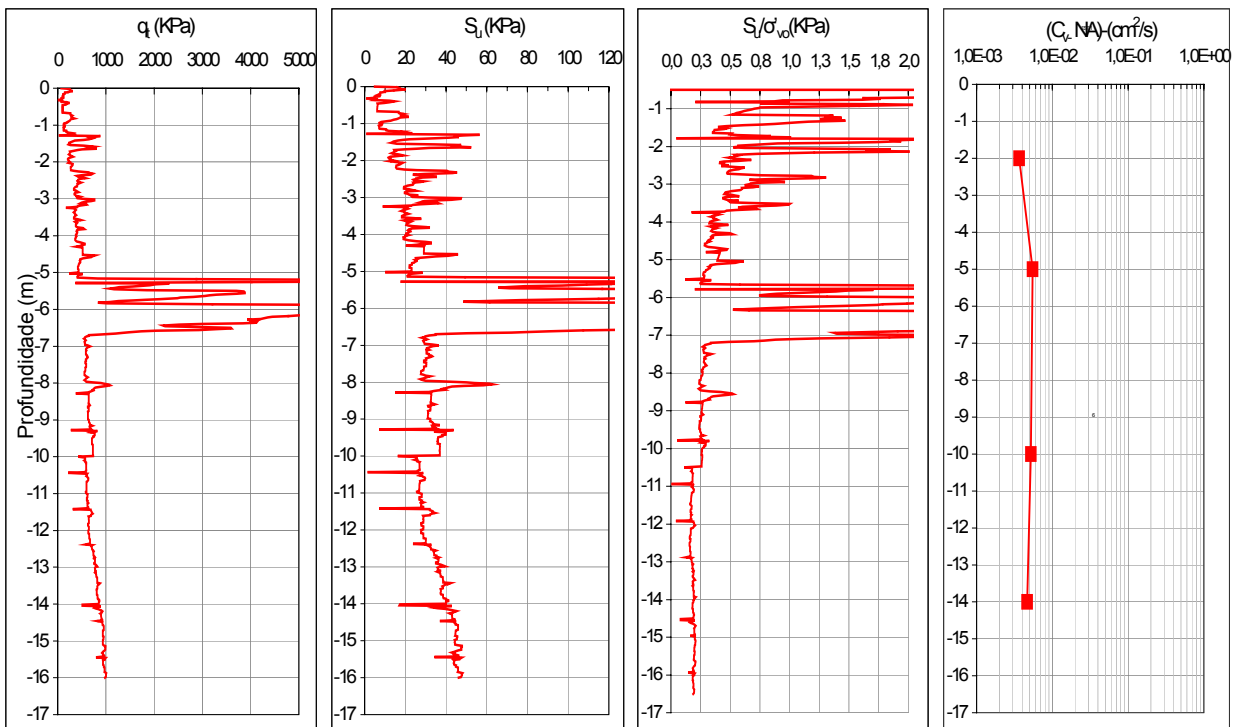
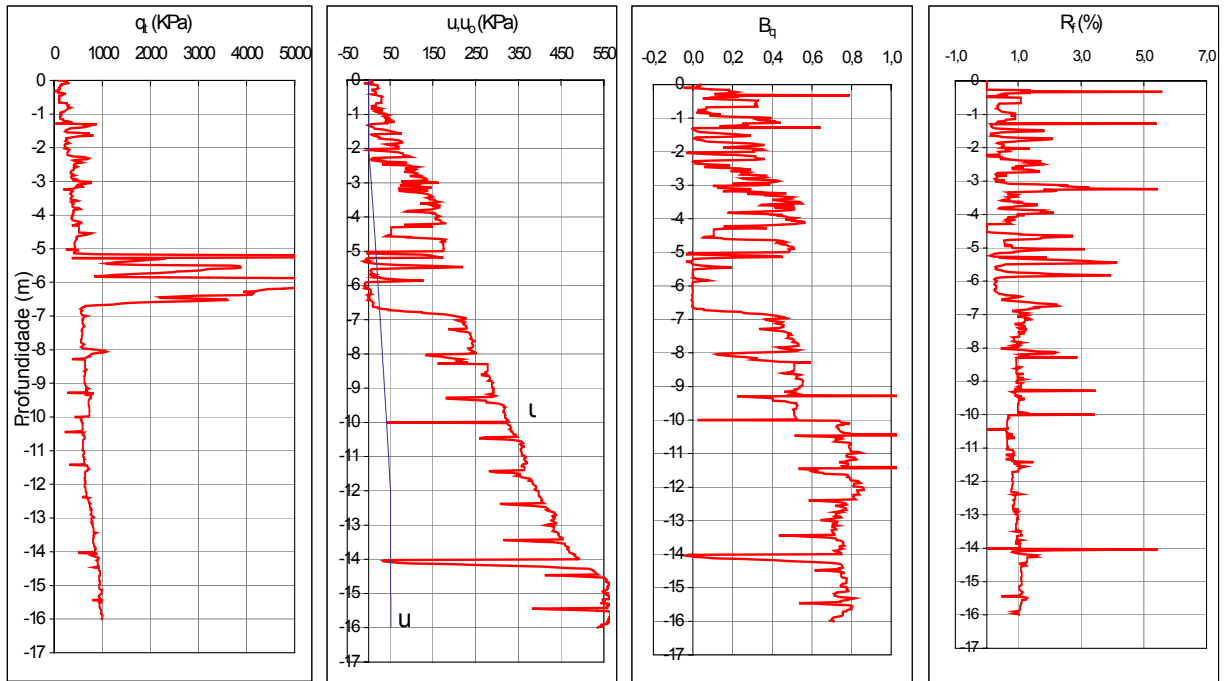
- Estação 8



# Área - ARB#2

## Ensaio de CPTU - Campanha de 2004

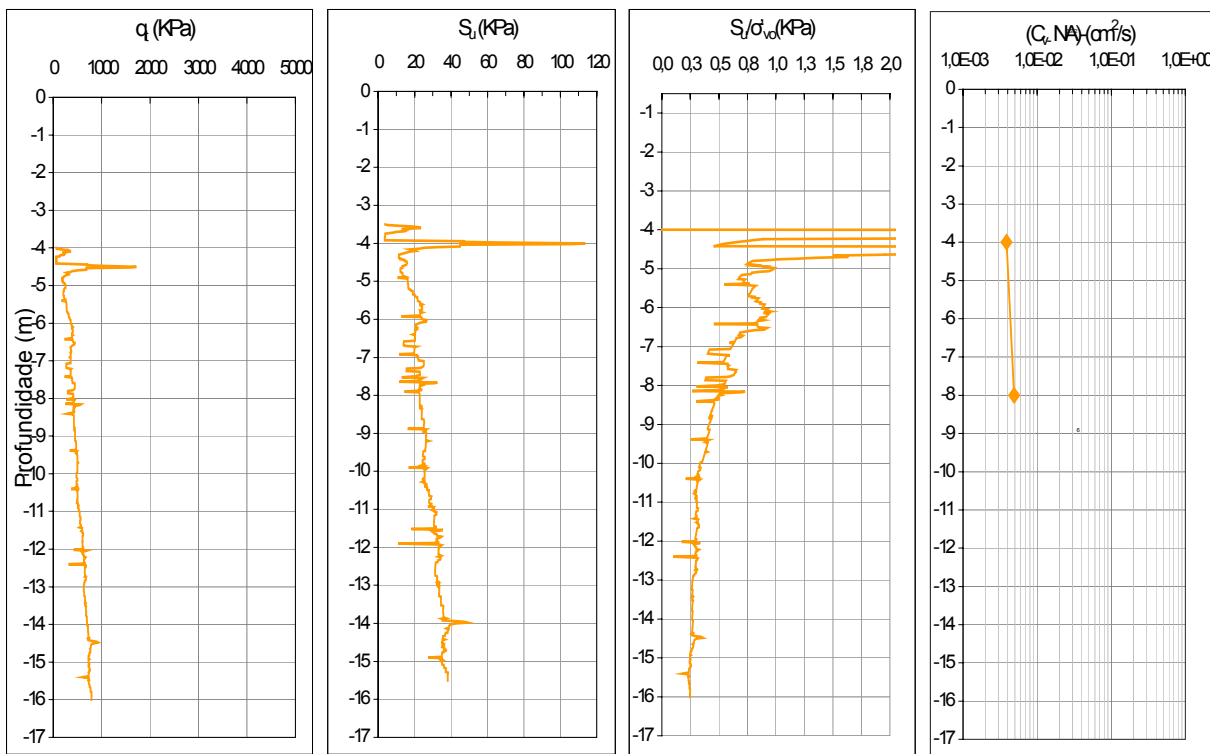
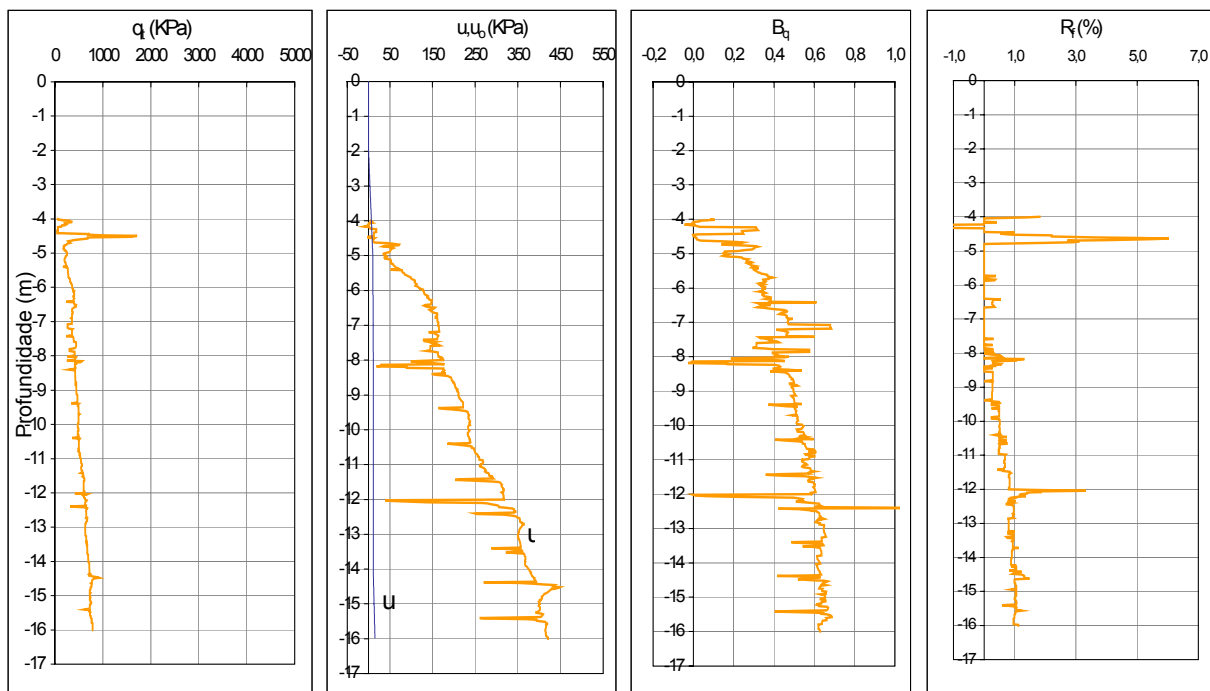
- Estação 1



# Área - ARB#2

## Ensaio de CPTU - Campanha de 2004

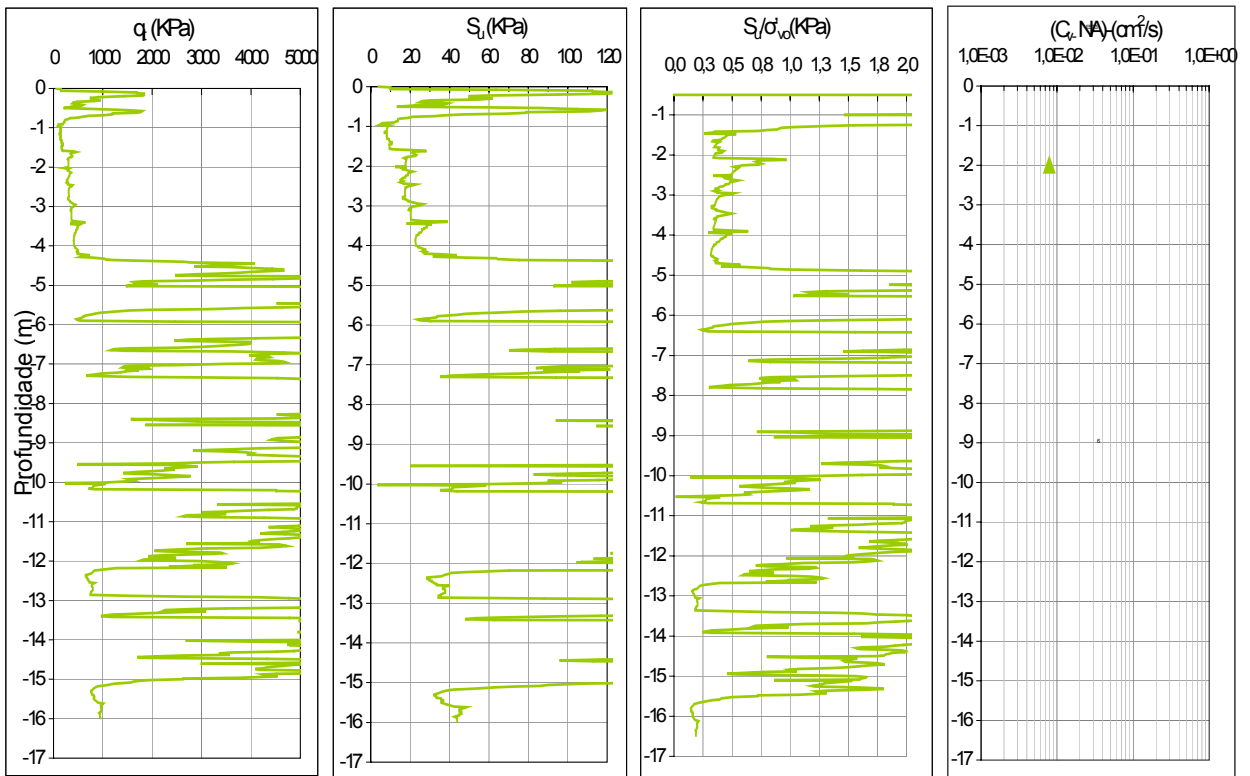
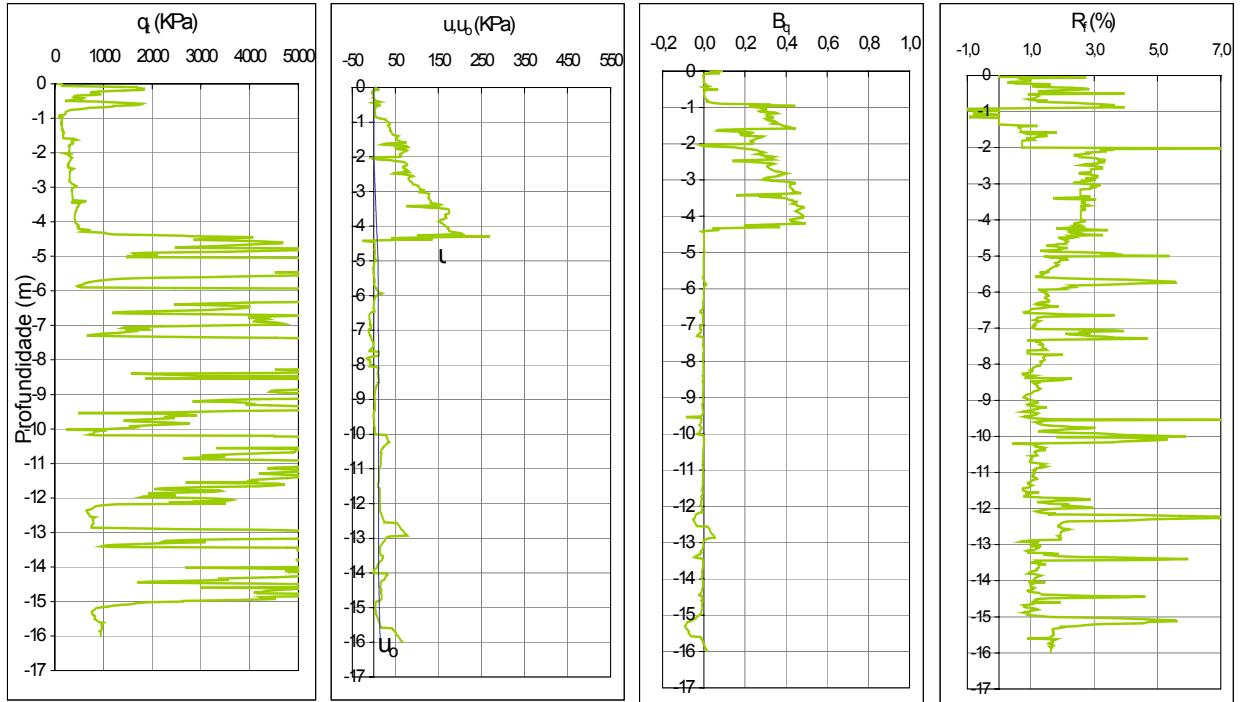
- Estação 2



# Área - ARB#2

## Ensaio de CPTU - Campanha de 2004

- Estação 3

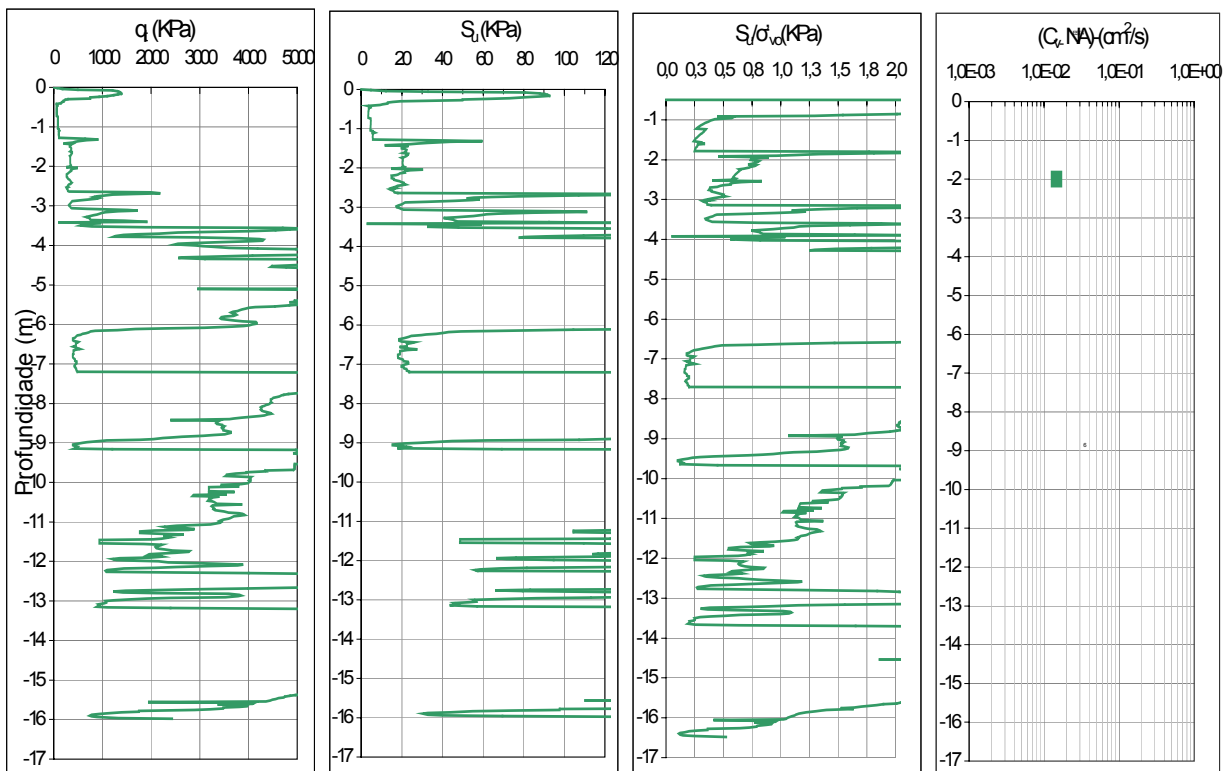
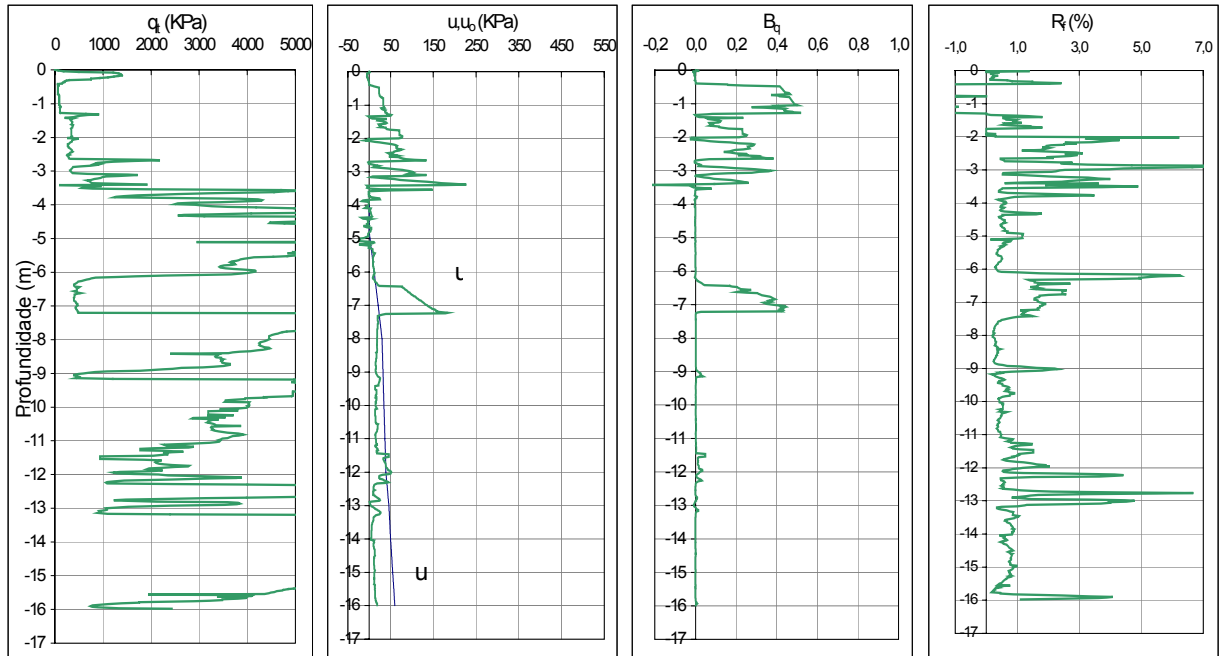




# Área - ARB#2

## Ensaio de CPTU - Campanha de 2004

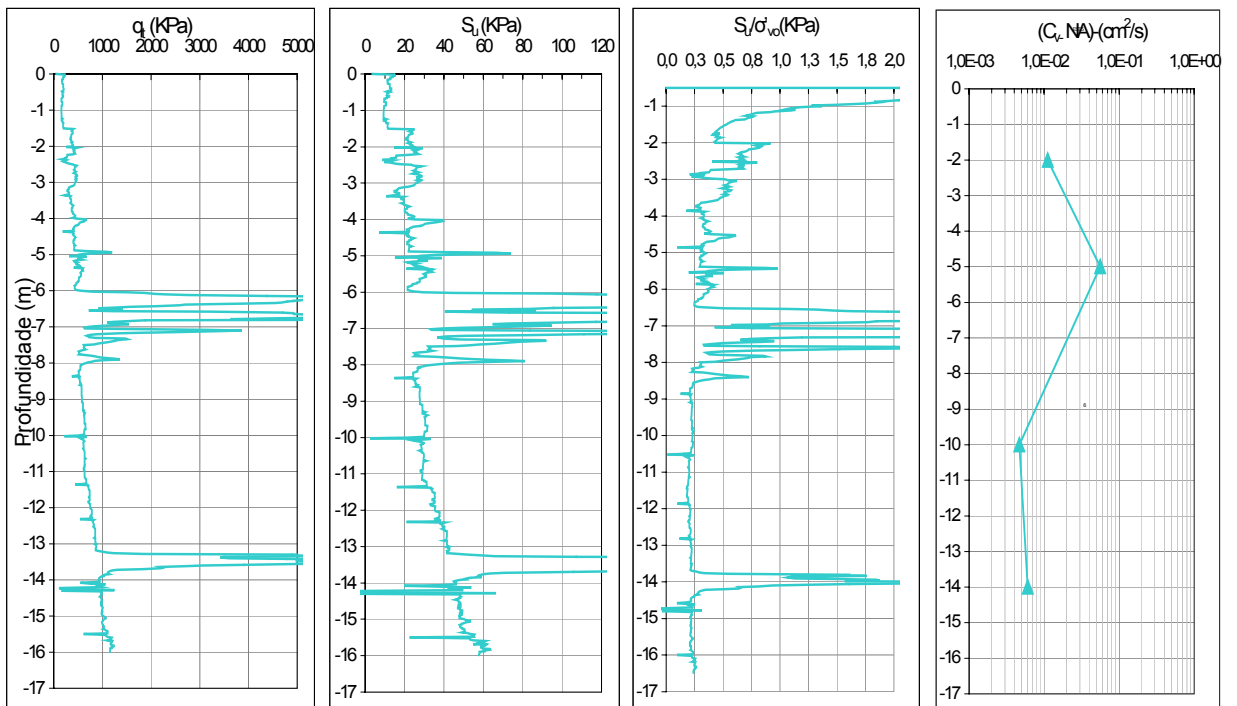
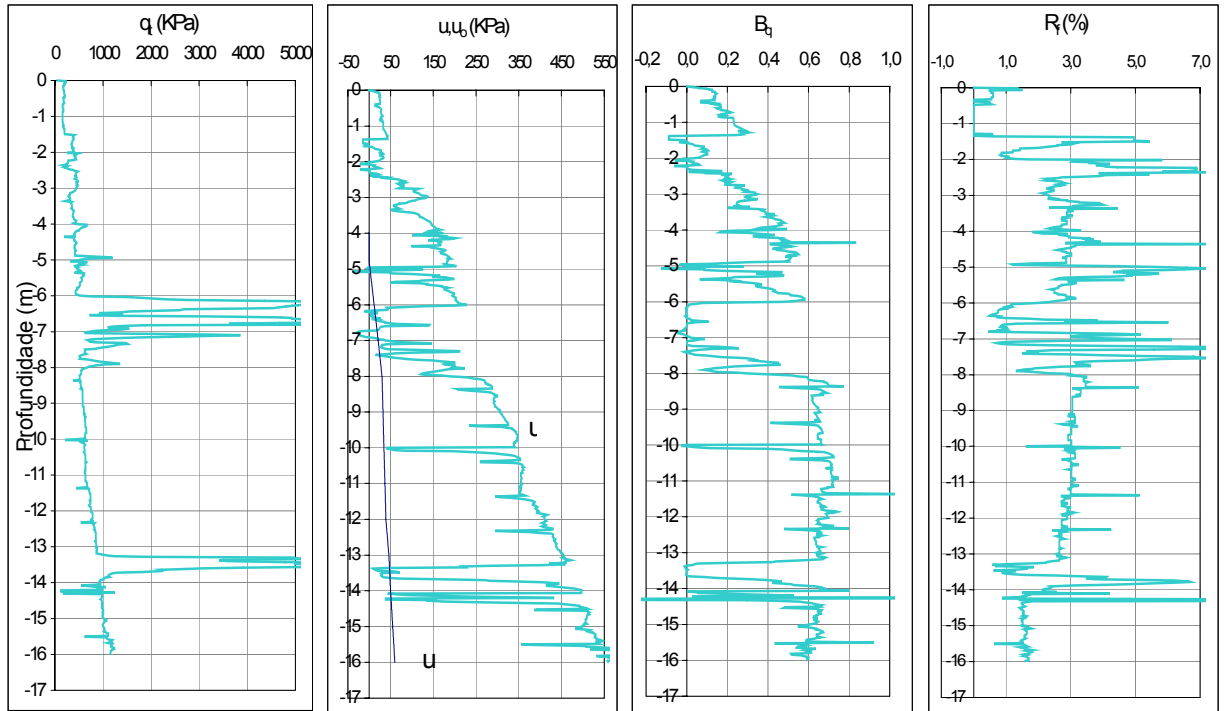
- Estação 4



# Área - ARB#2

## Ensaio de CPTU - Campanha de 2004

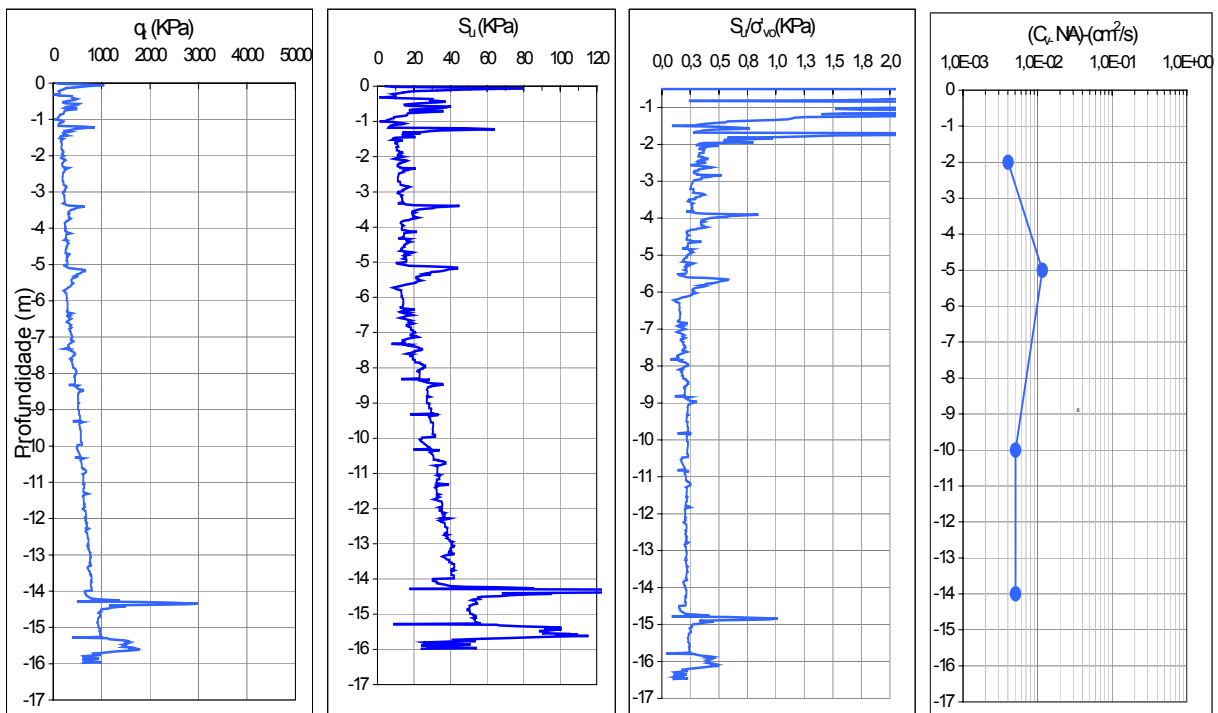
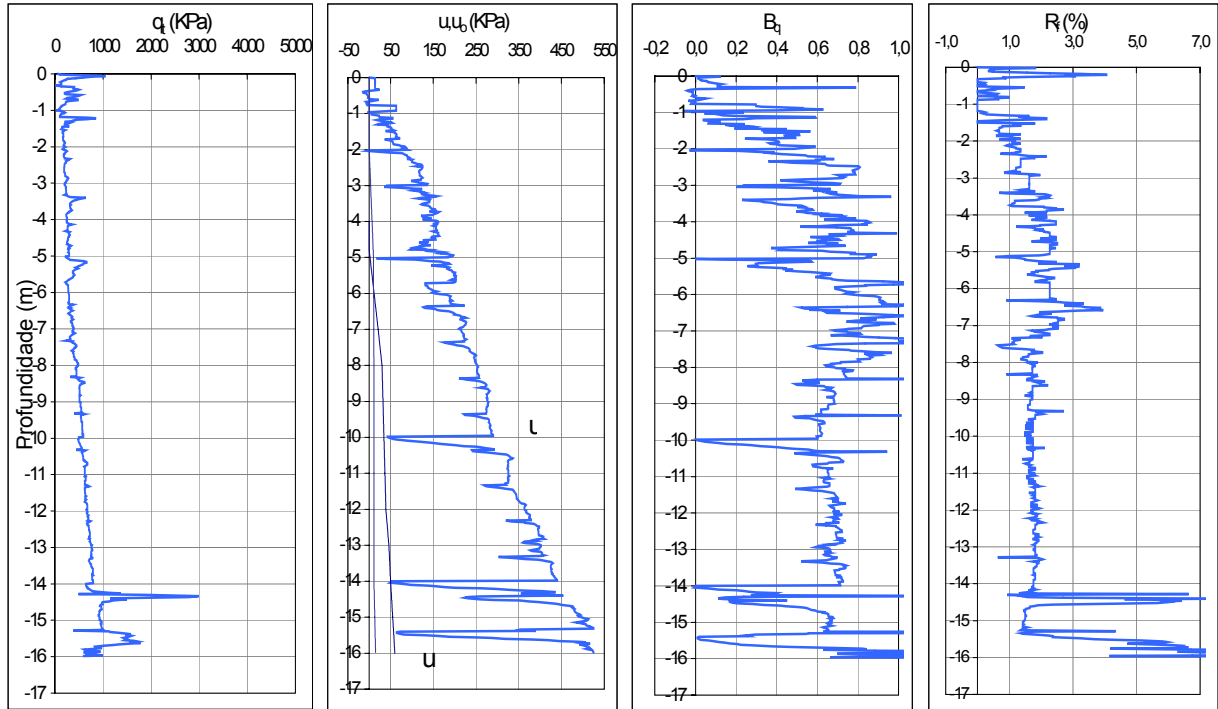
- Estação 5



# Área - ARB#2

## Ensaio de CPTU - Campanha de 2004

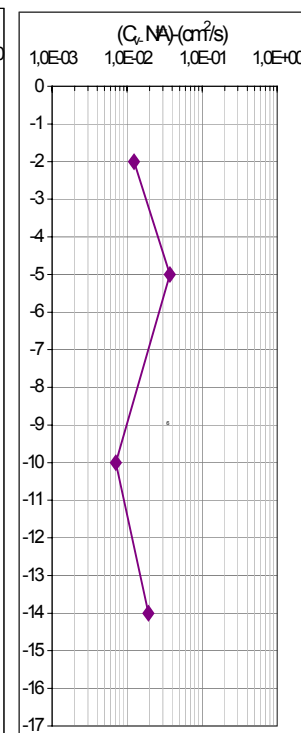
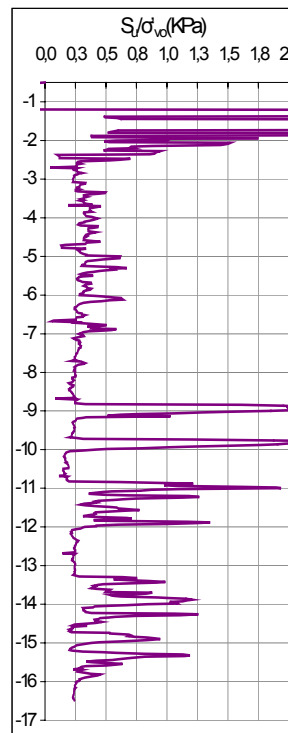
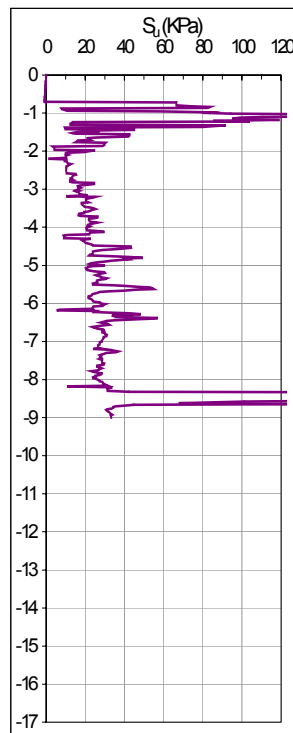
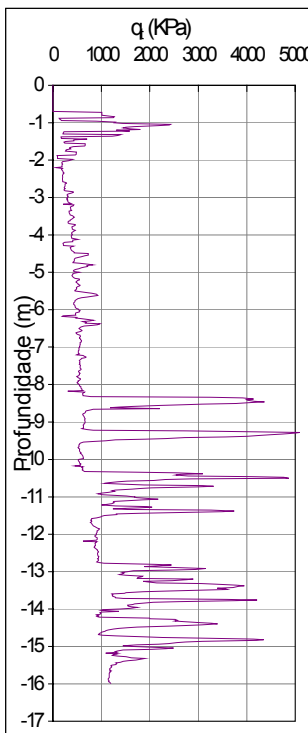
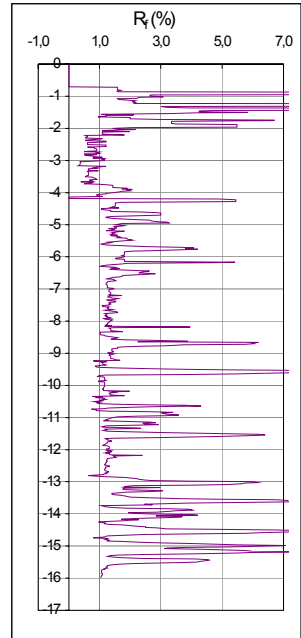
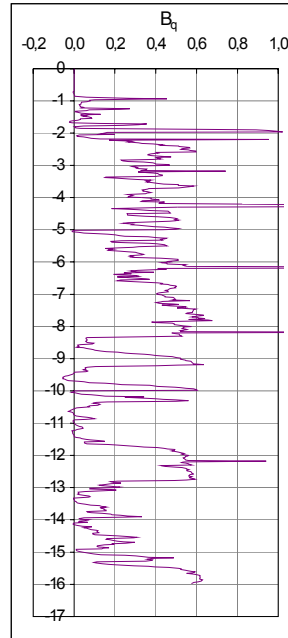
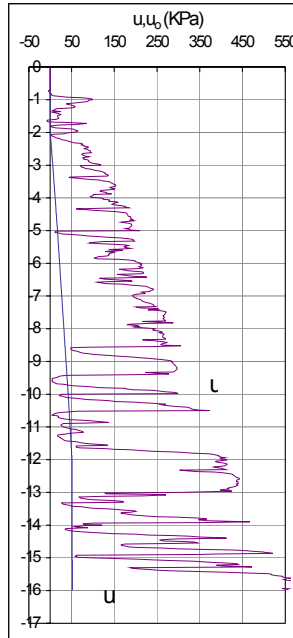
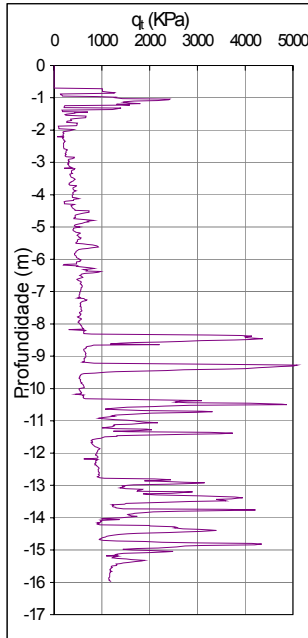
- Estação 6



# Área - ARB#2

## Ensaio de CPTU - Campanha de 2004

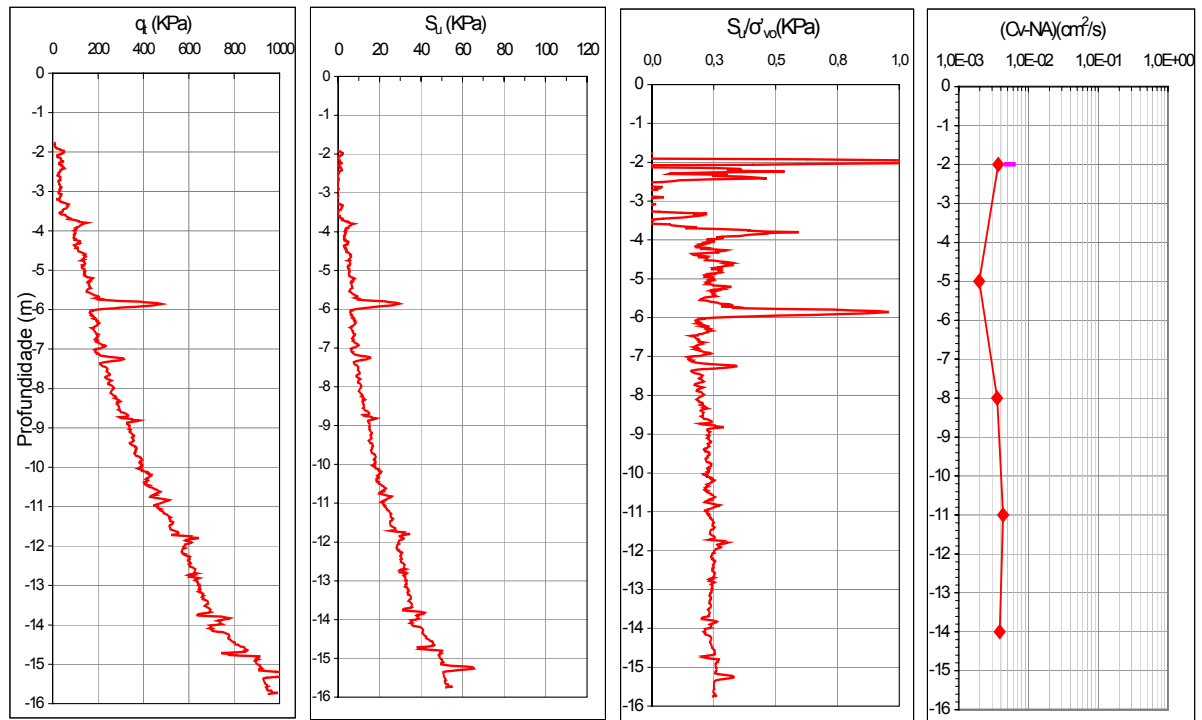
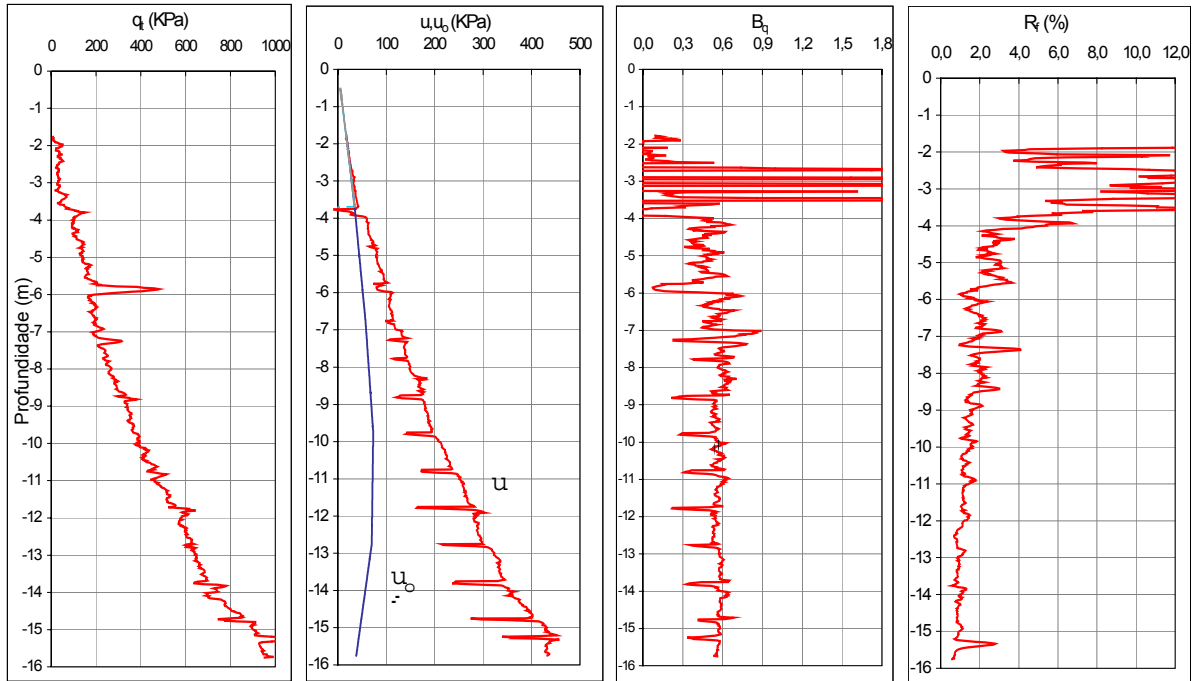
- Estação 7



# Área - ARB#3

## Ensaio de CPTU - Campanha de 2005

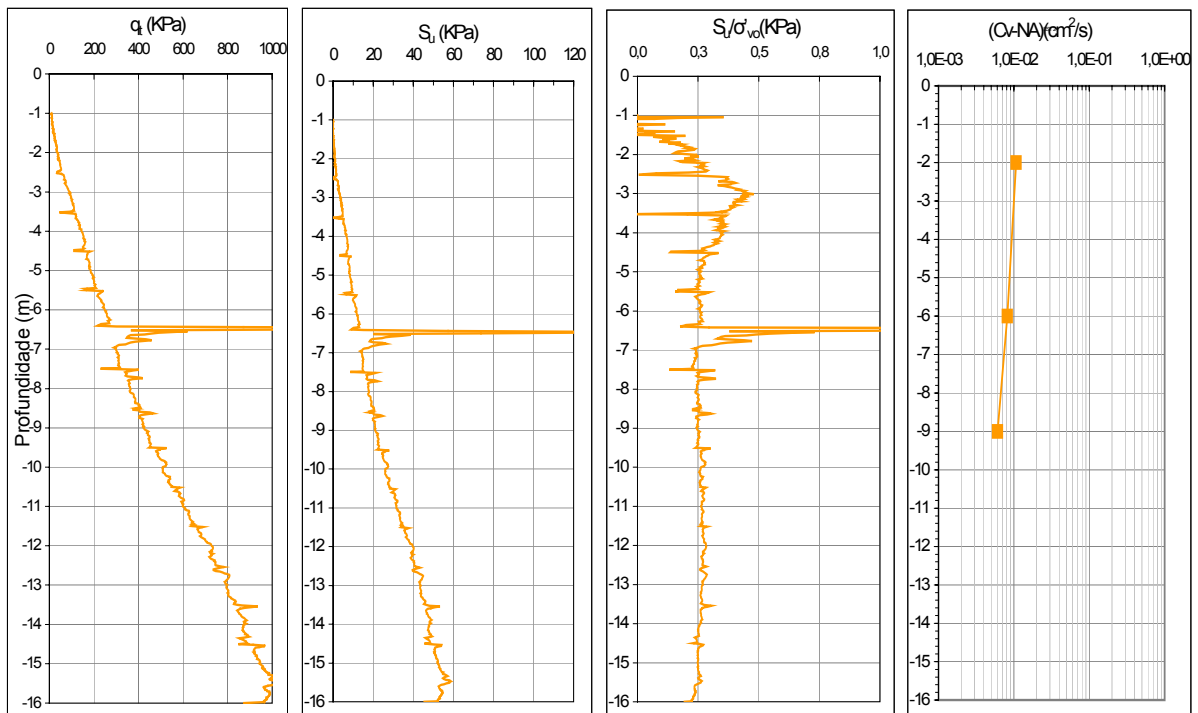
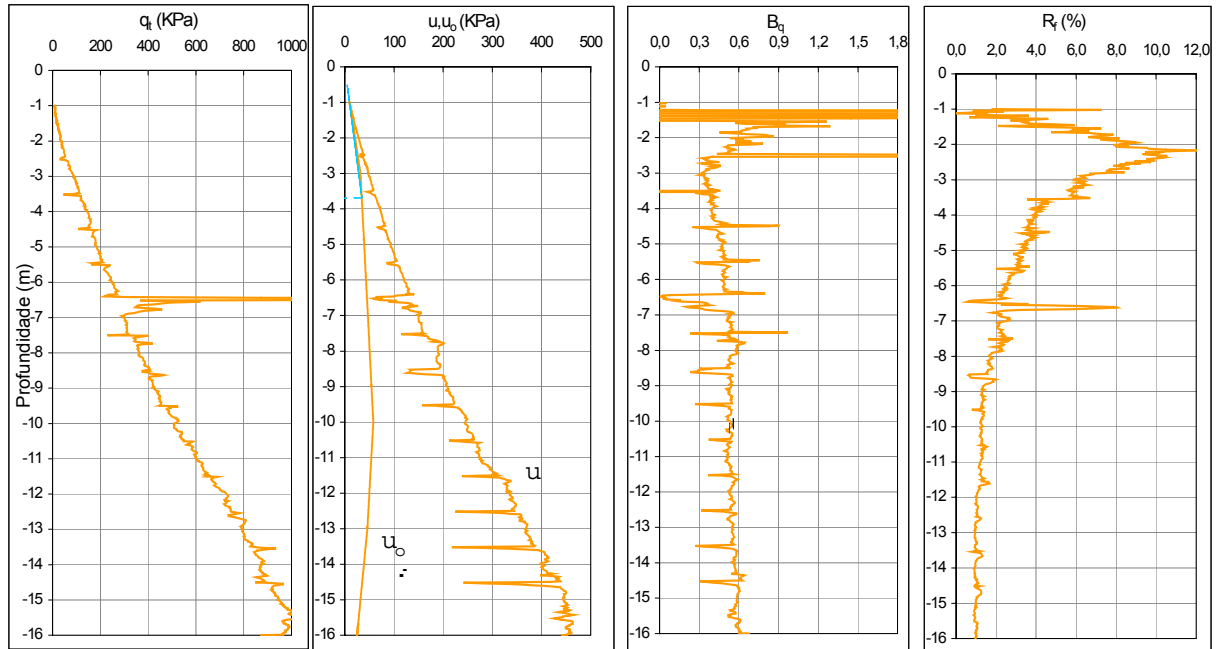
- Estação 1



# Área - ARB#3

## Ensaio de CPTU - Campanha de 2005

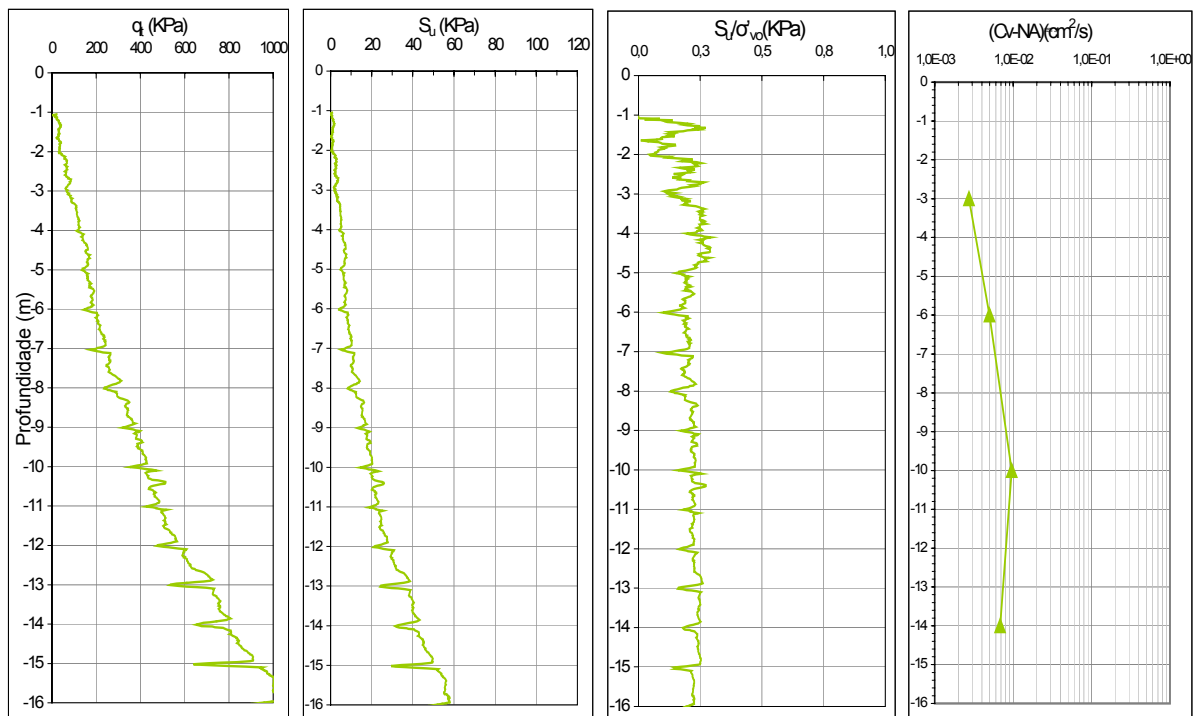
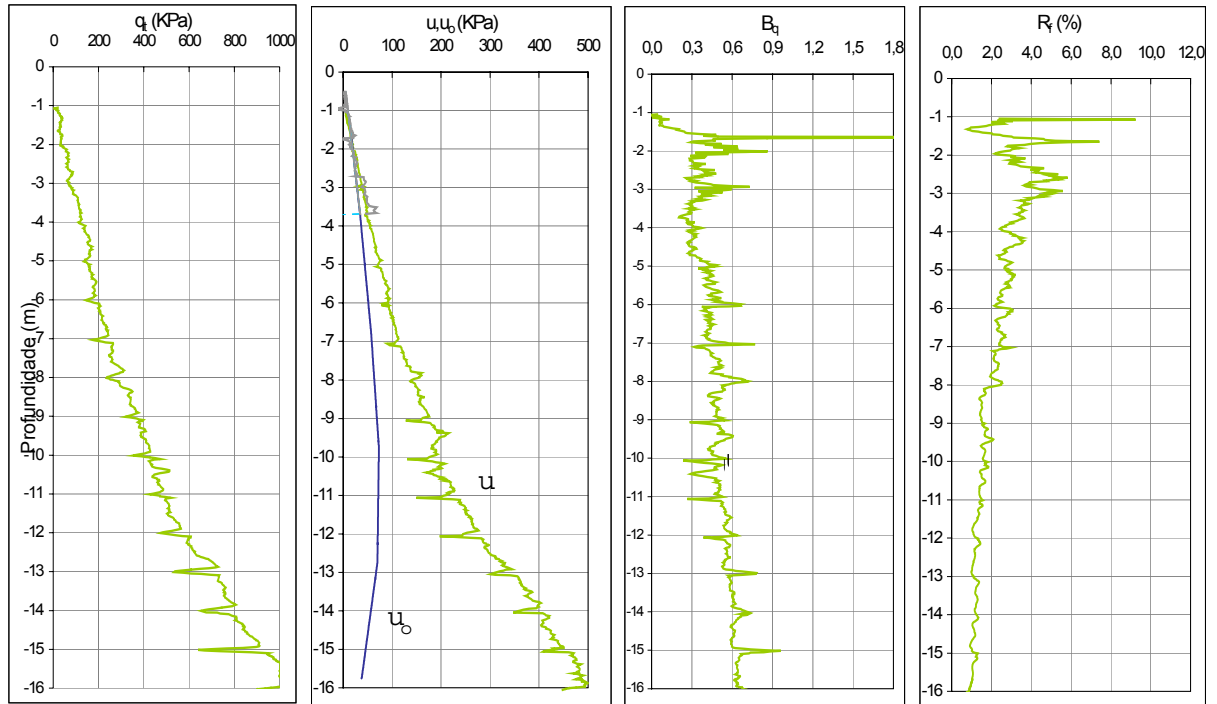
- Estação 2



# Área - ARB#3

## Ensaio de CPTU - Campanha de 2005

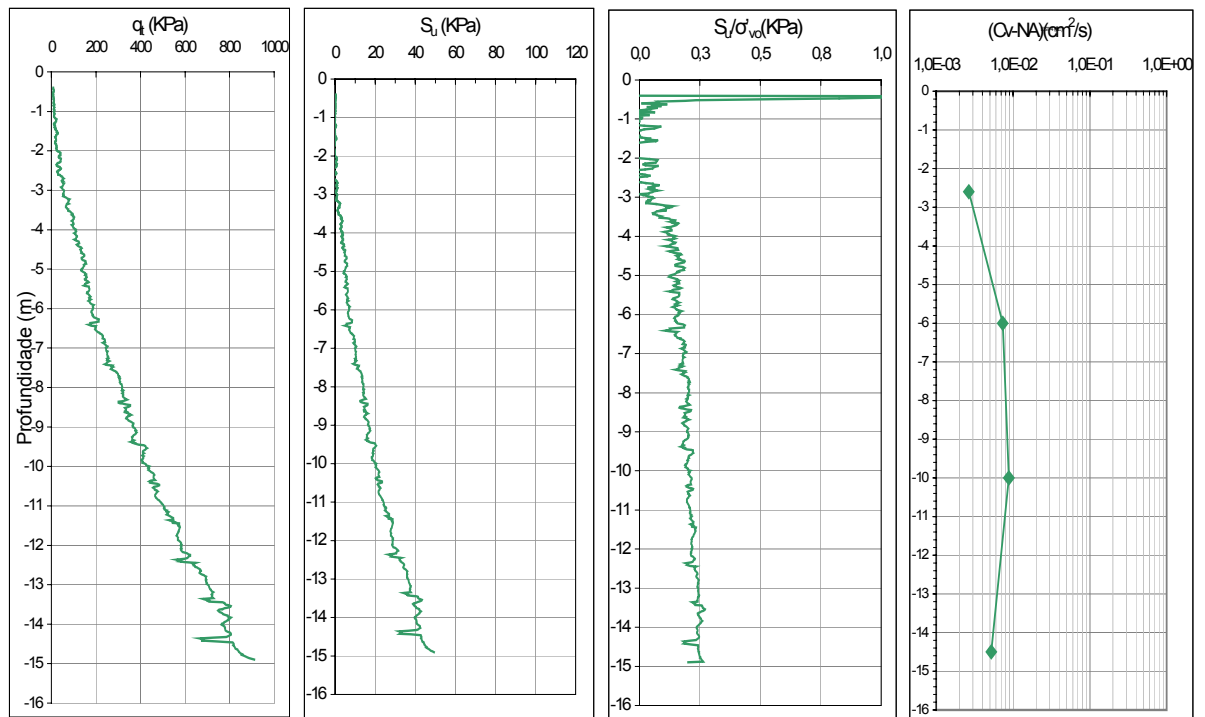
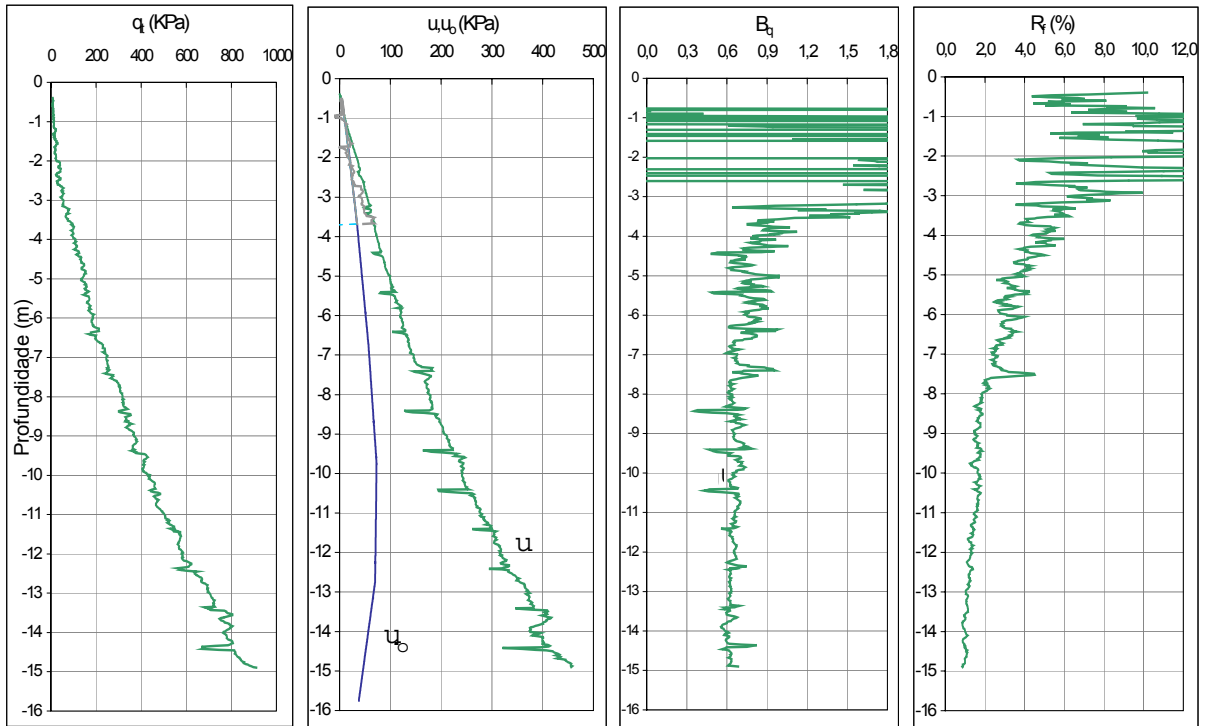
- Estação 3



# Área - ARB#3

## Ensaio de CPTU - Campanha de 2005

- Estação 4 LE

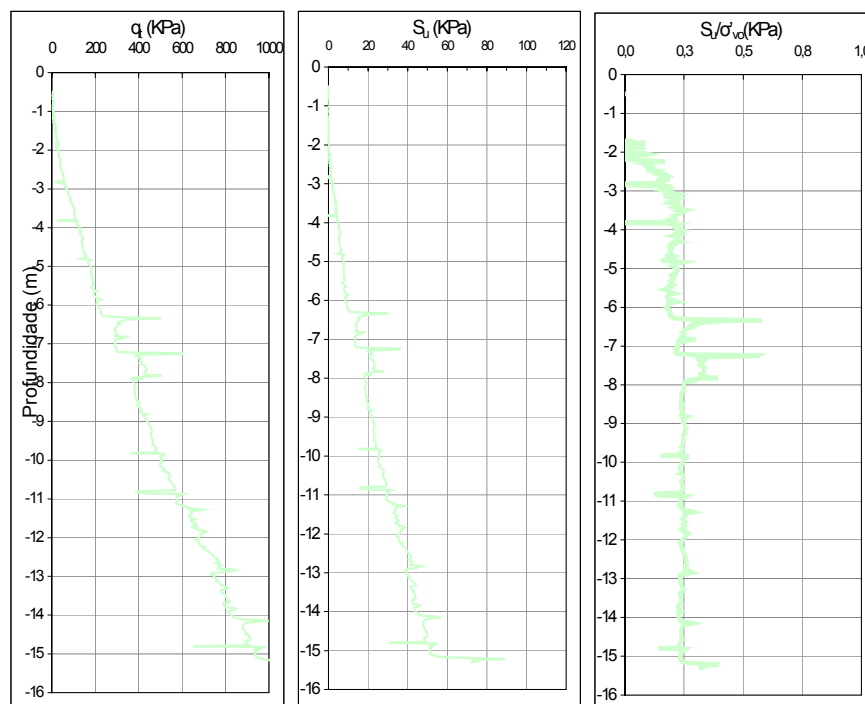
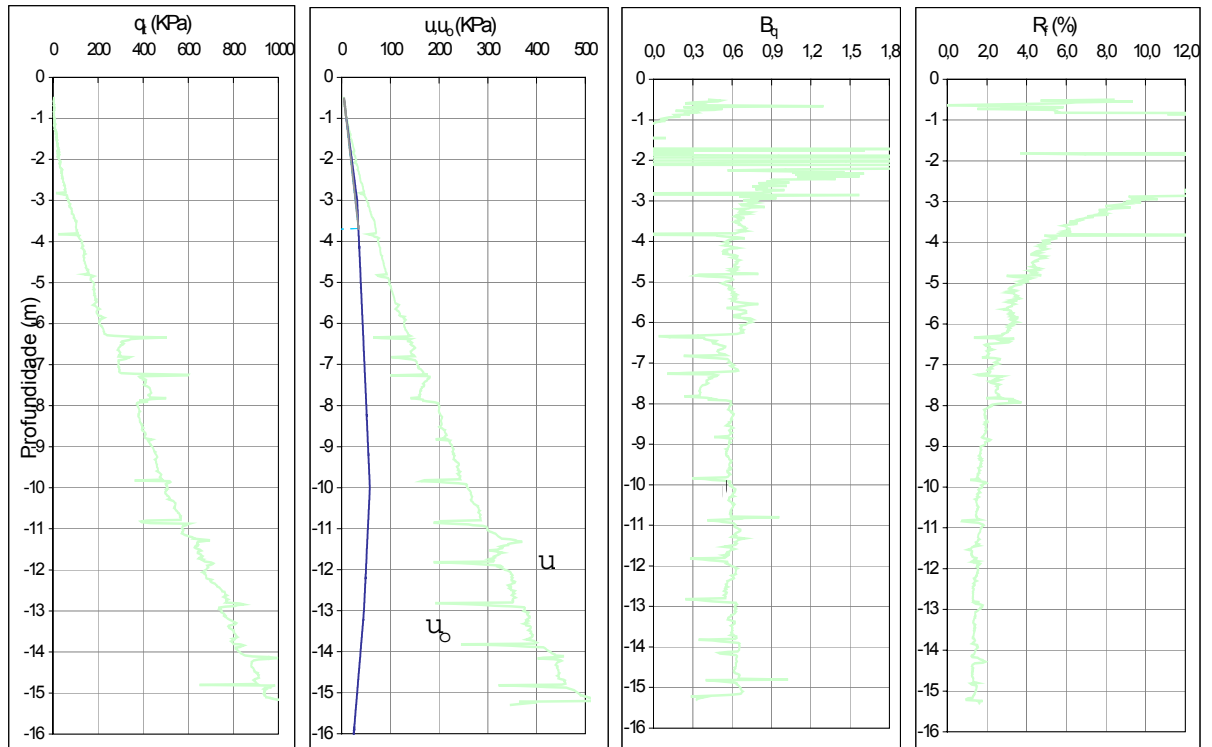




# Área - ARB#3

## Ensaio de CPTU - Campanha de 2005

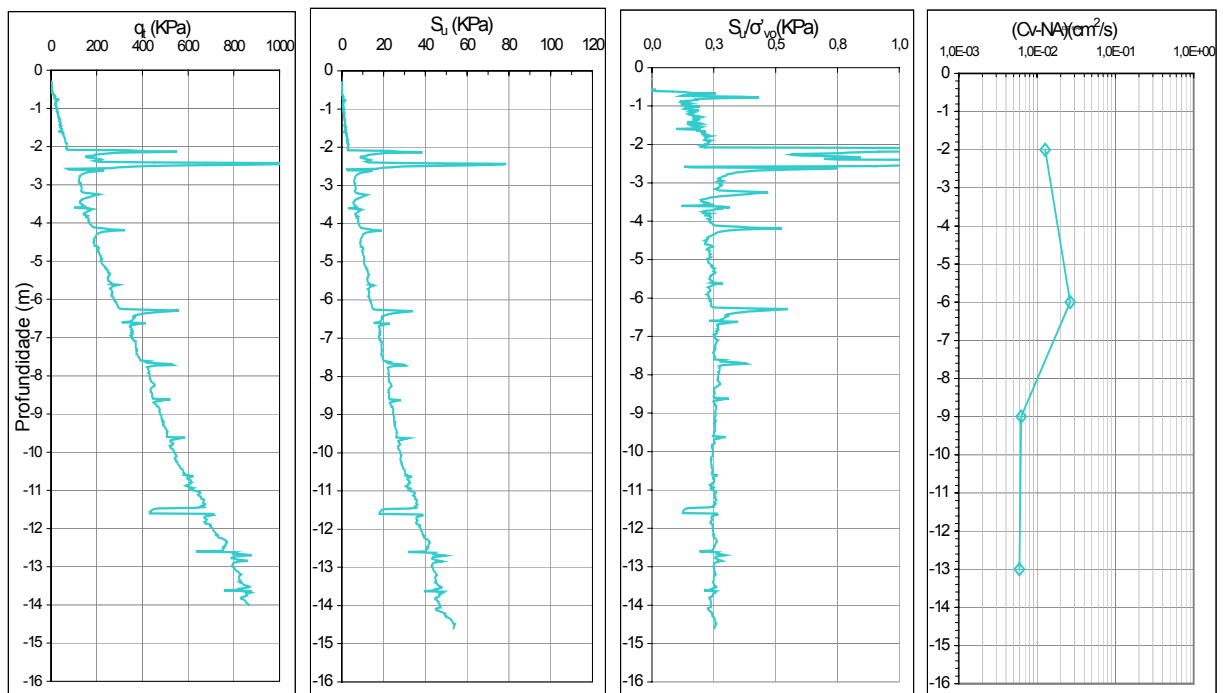
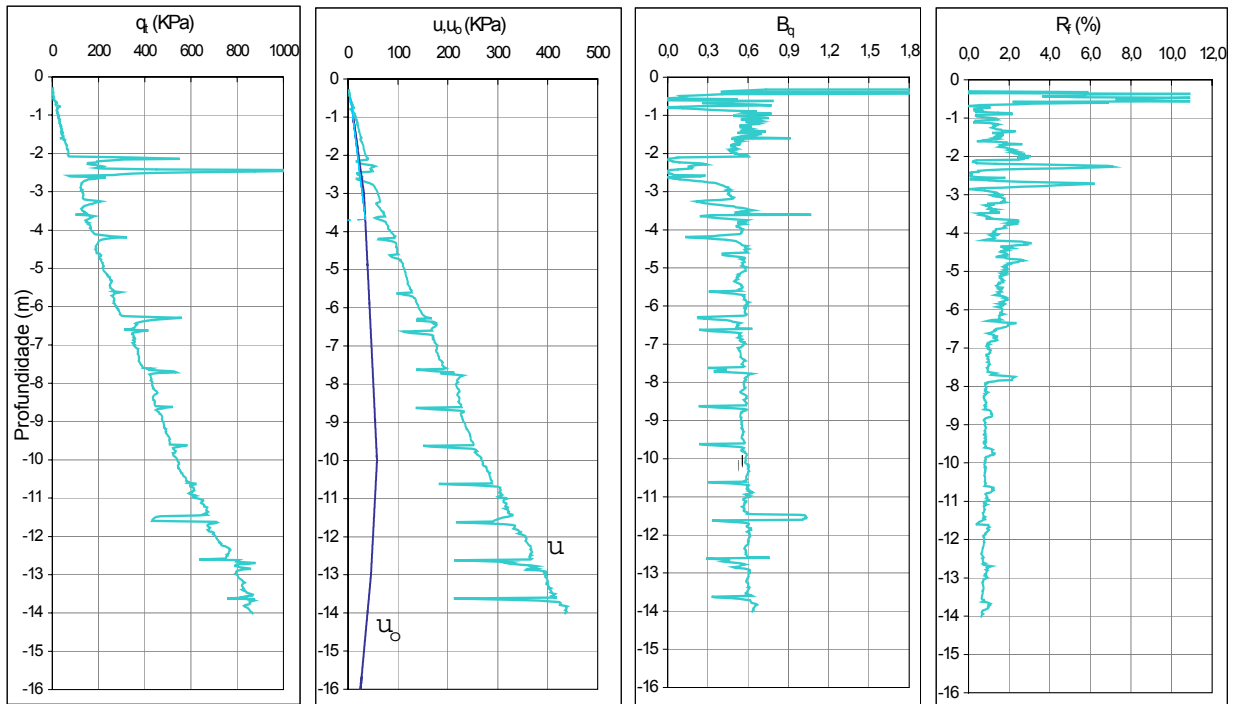
- Estação 4 LD



# Área - ARB#3

## Ensaio de CPTU - Campanha de 2005

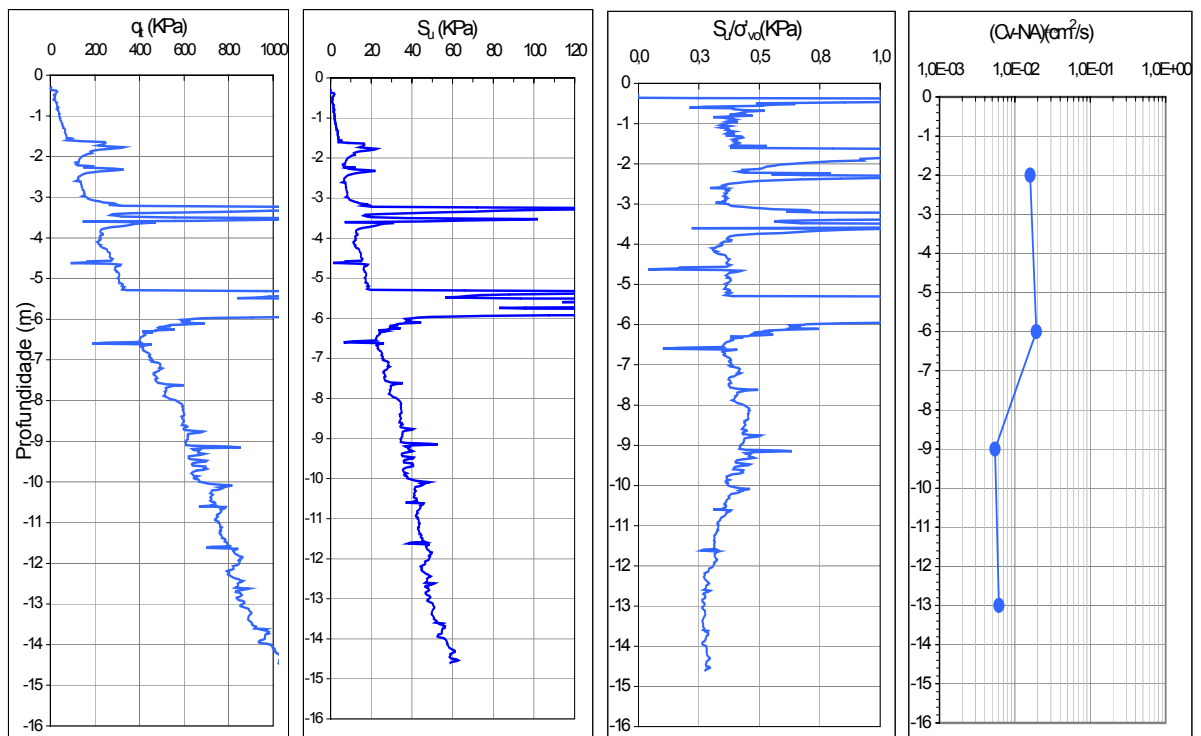
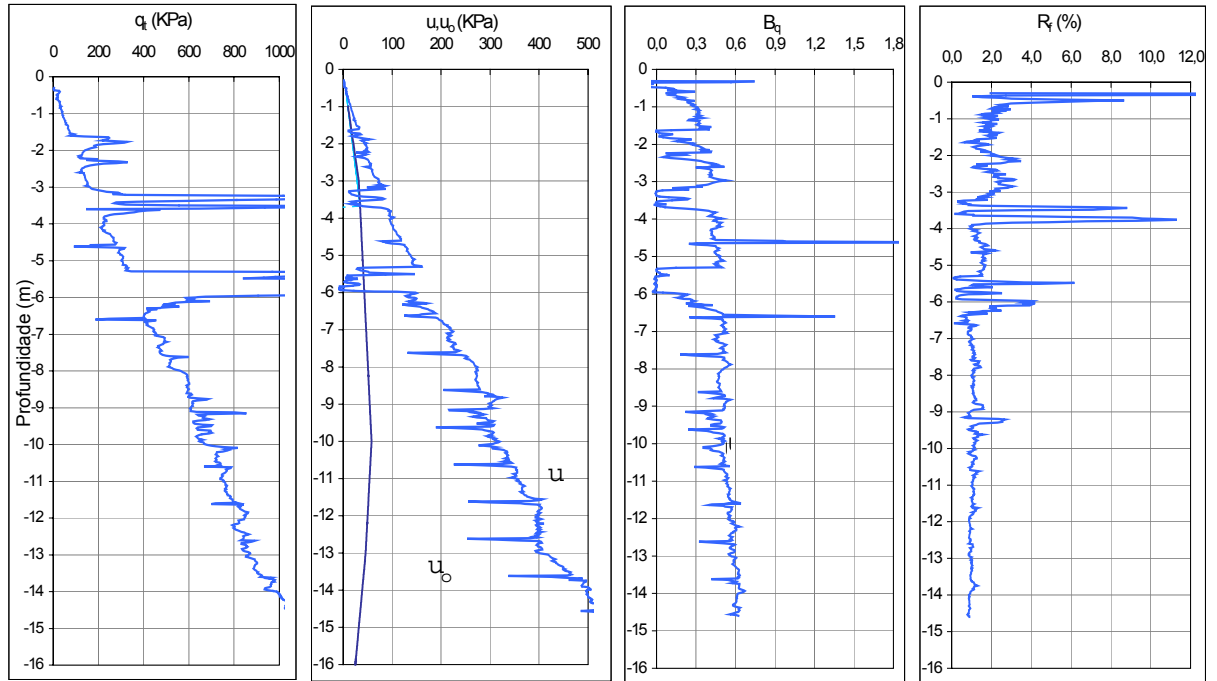
- Estação 6 AC



# Área - ARB#3

## Ensaio de CPTU - Campanha de 2005

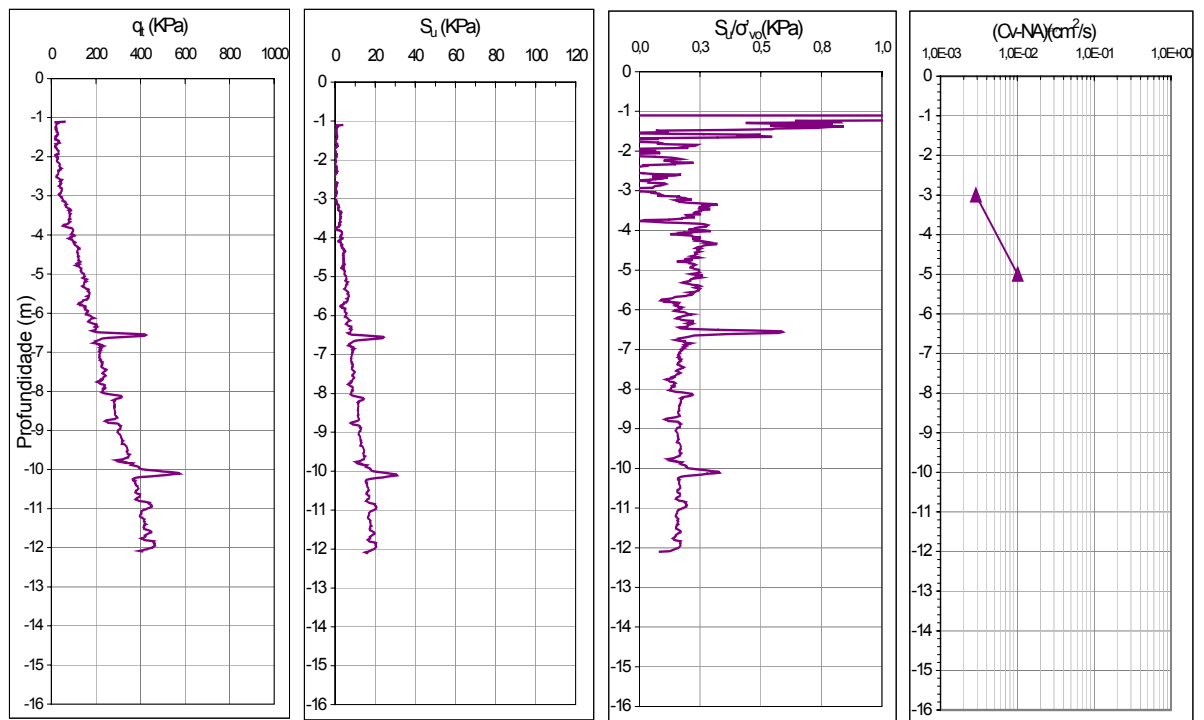
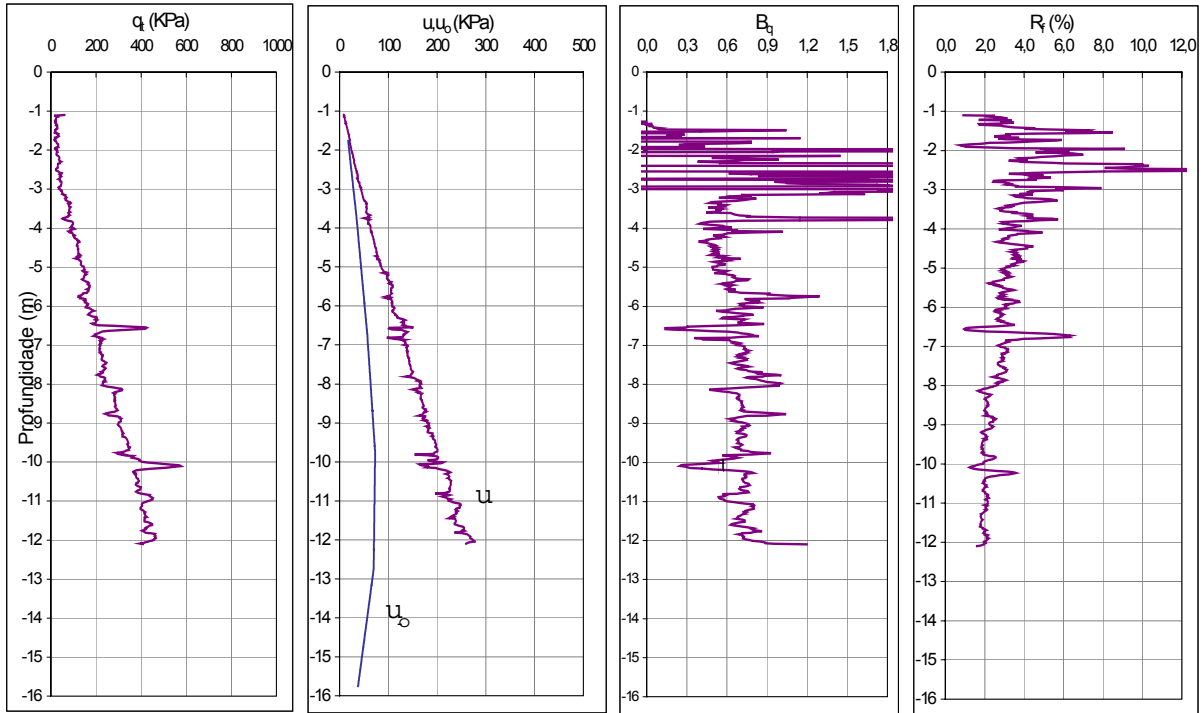
- Estação 6



# Área - ARB#3

## Ensaio de CPTU - Campanha de 2005

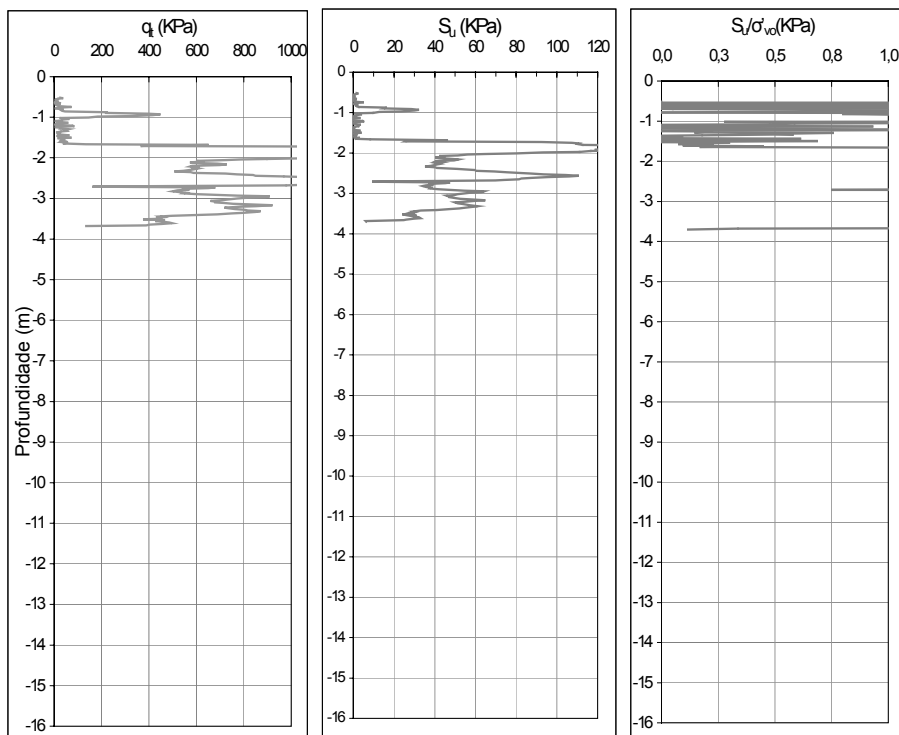
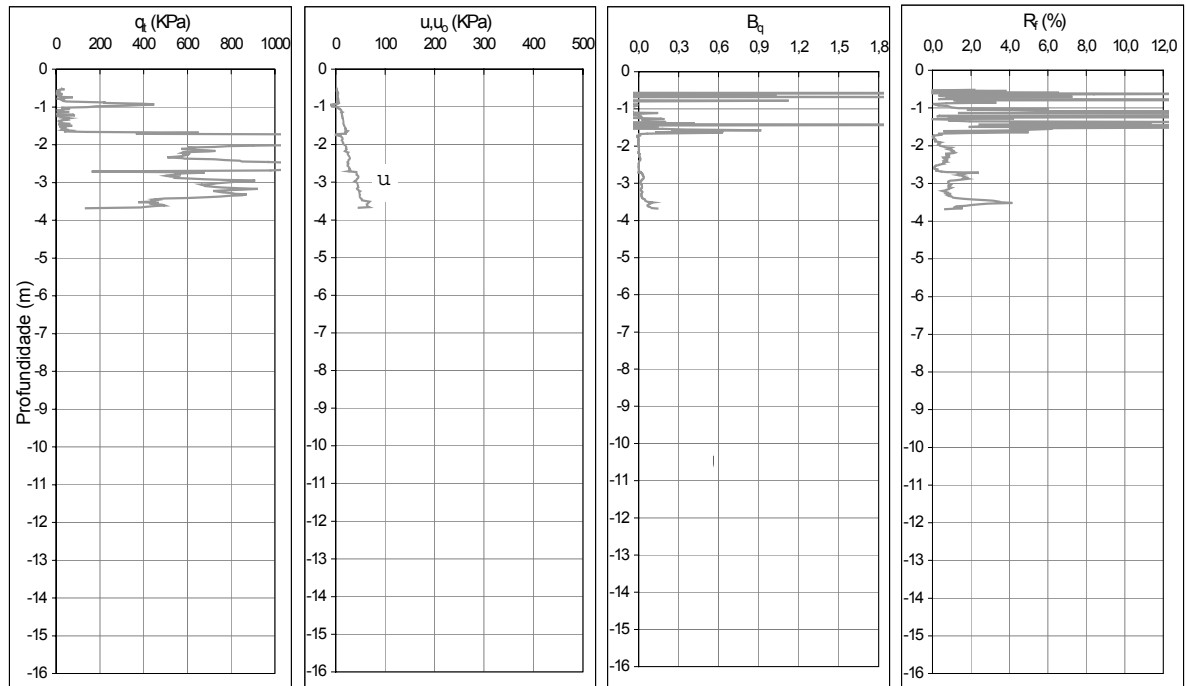
- Estação 7



# Área - ARB#3

## Ensaio de CPTU - Campanha de 2005

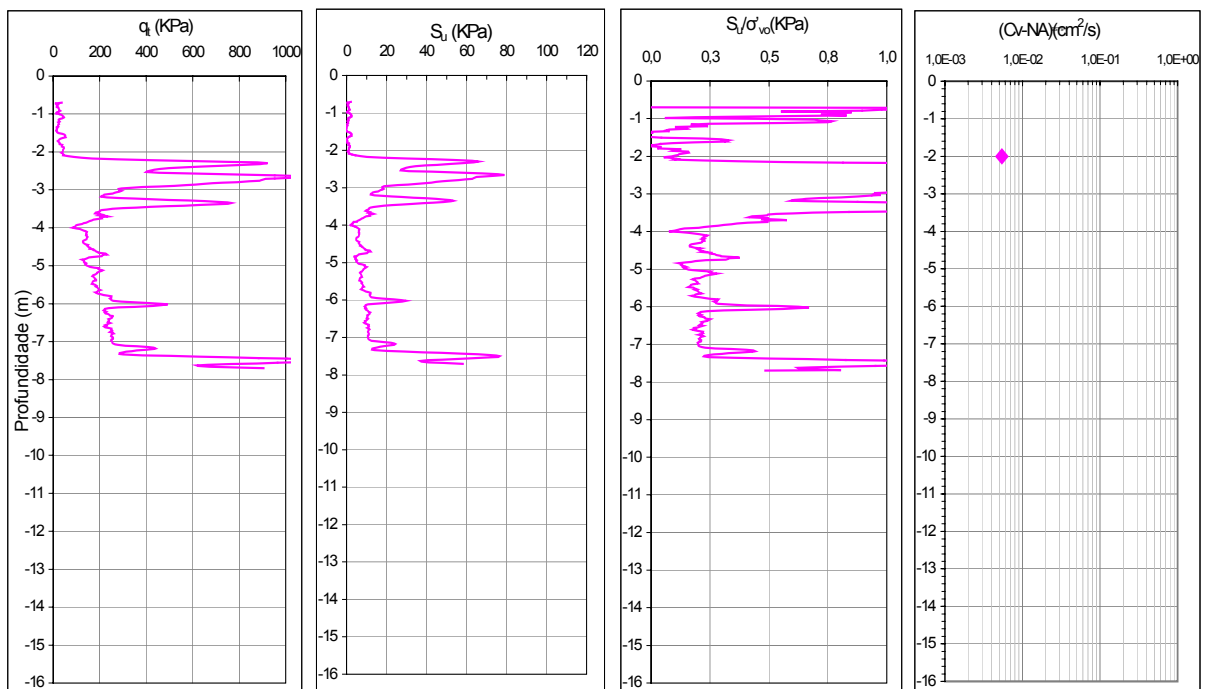
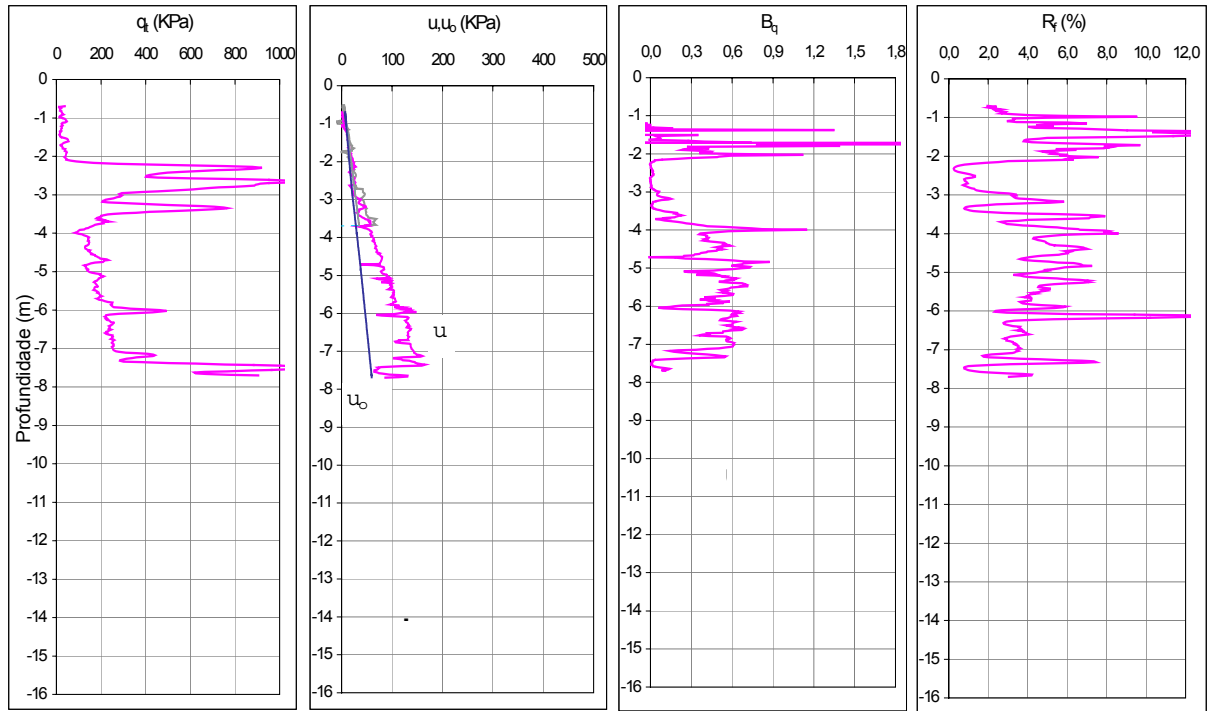
- Estação 8



# Área - ARB#3

## Ensaio de CPTU - Campanha de 2005

- Estação 9



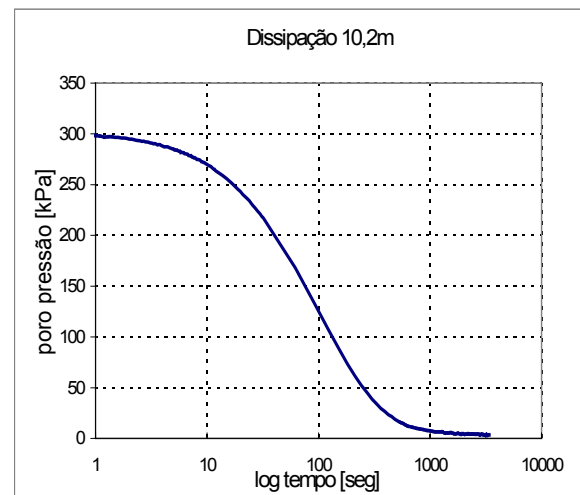
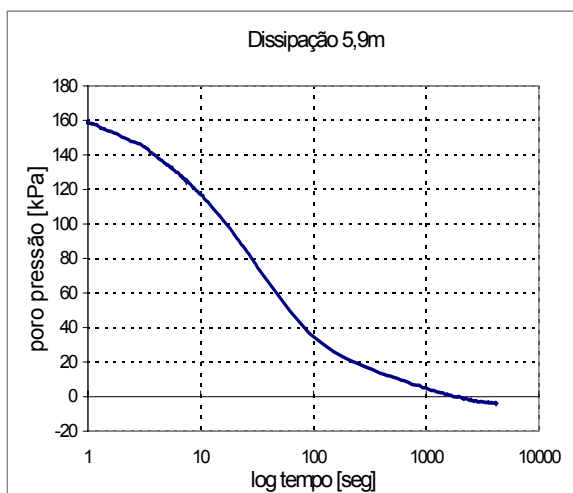
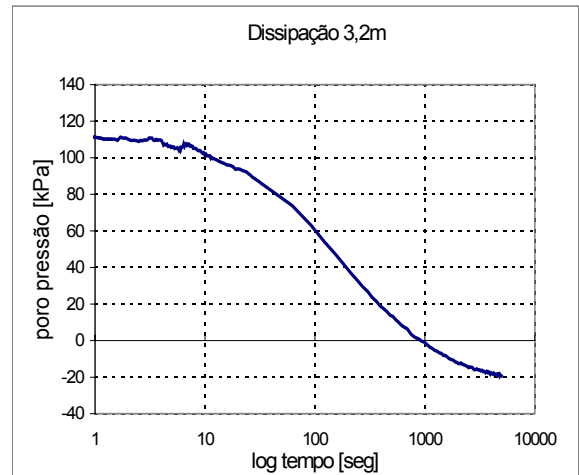
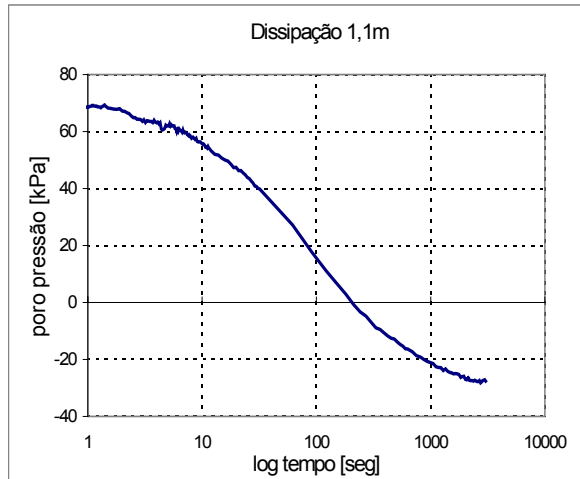
## ANEXO II

# RESULTADOS DE ENSAIOS DE DISSIPACÃO

## Área - ARB#2

### Ensaio de Dissipação -CPTU - Campanha de 1999

- Estação 1

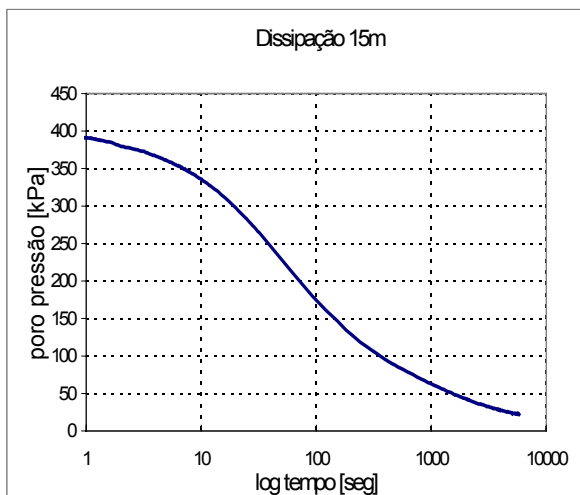
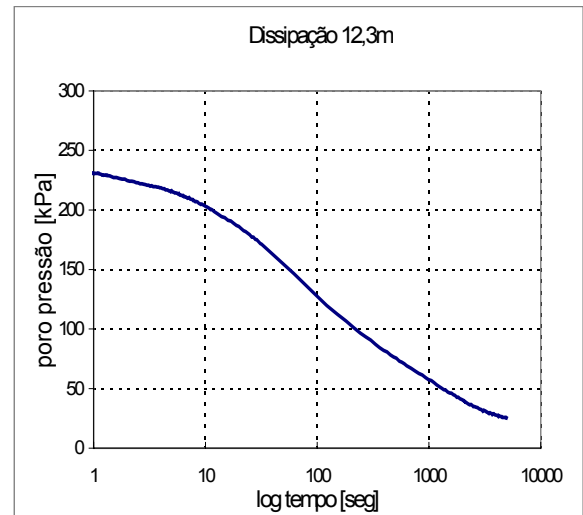
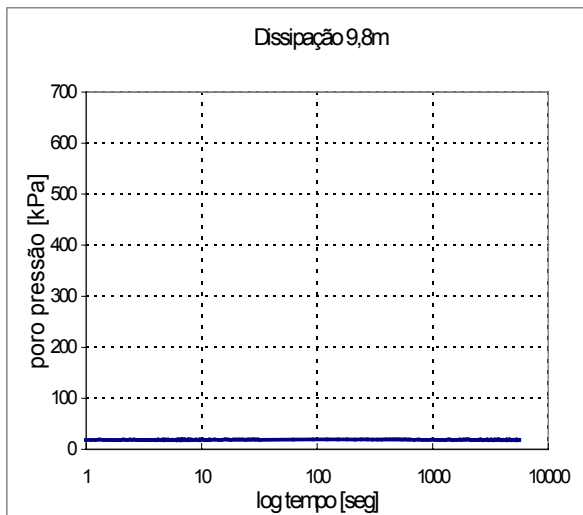
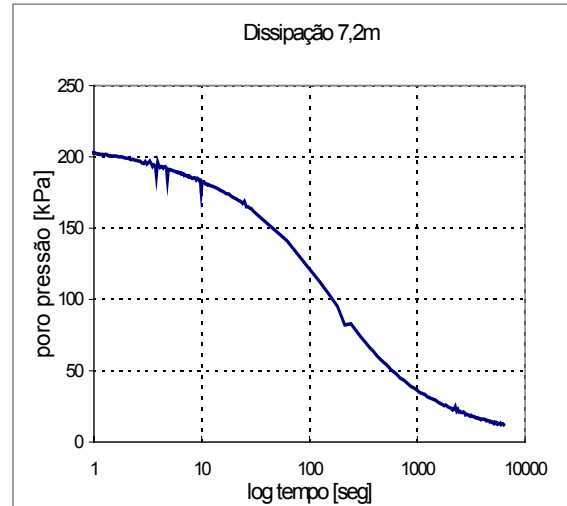
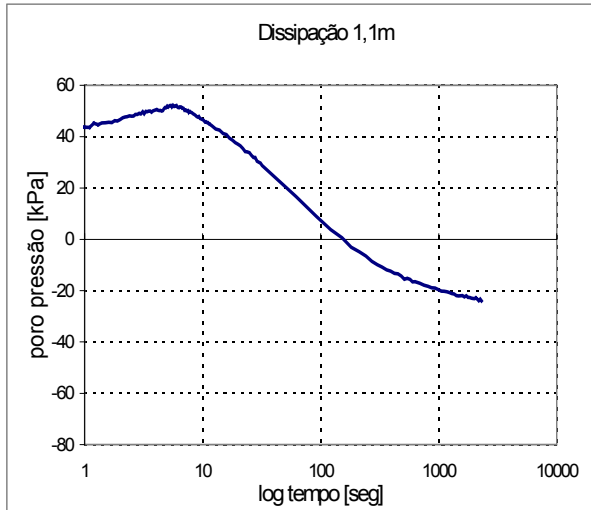




## Área - ARB#2

### Ensaio de Dissipação -CPTU - Campanha de 1999

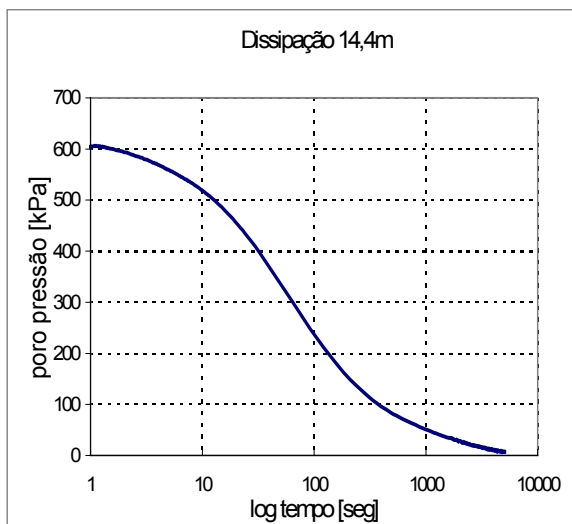
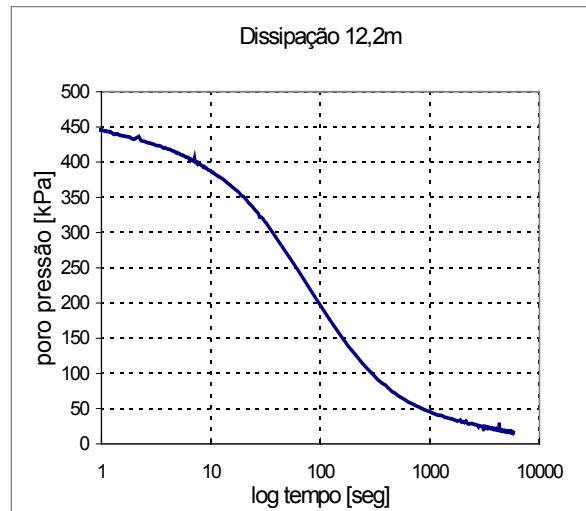
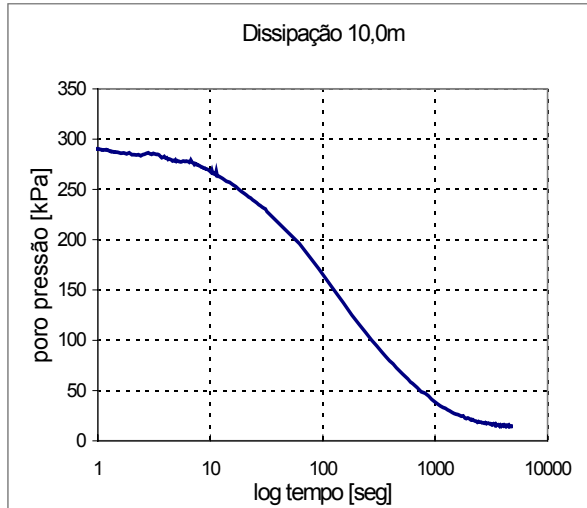
- Estação 2



## Área - ARB#2

### Ensaio de Dissipação -CPTU - Campanha de 1999

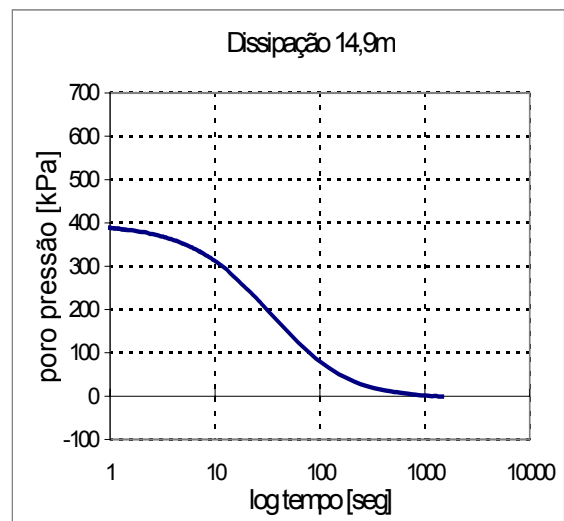
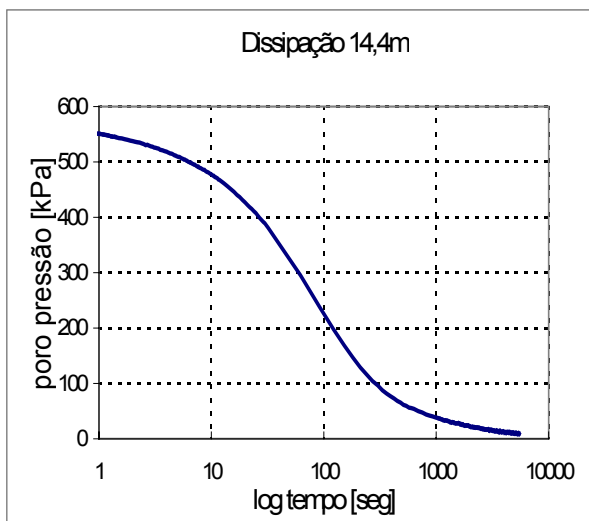
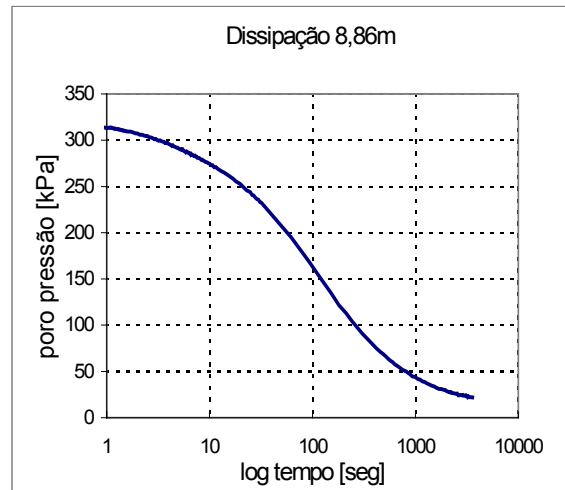
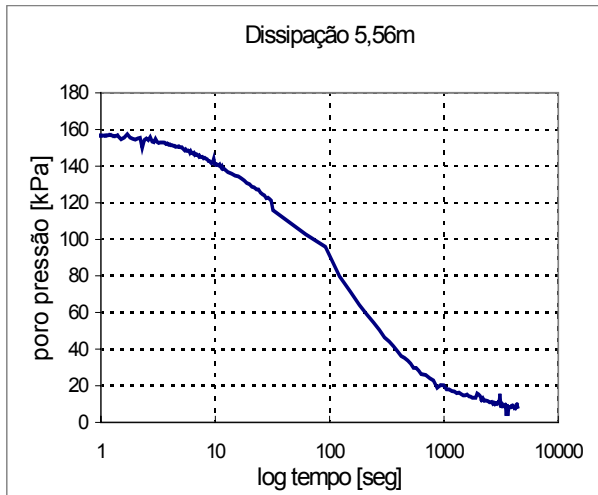
- Estação 3



## Área - ARB#2

### Ensaio de Dissipação -CPTU - Campanha de 1999

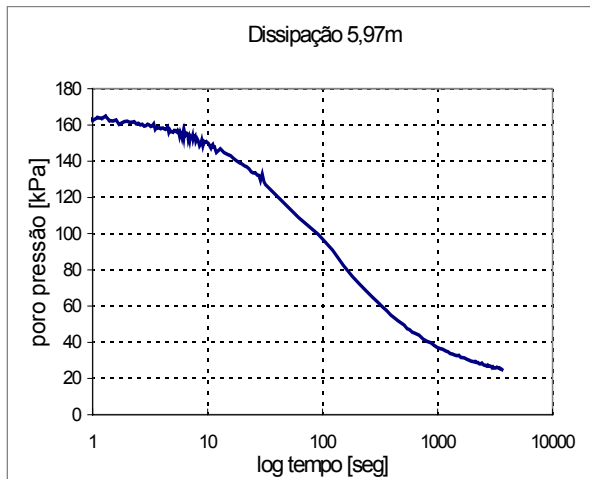
- Estação 5



## Área - ARB#2

### Ensaio de Dissipação -CPTU - Campanha de 1999

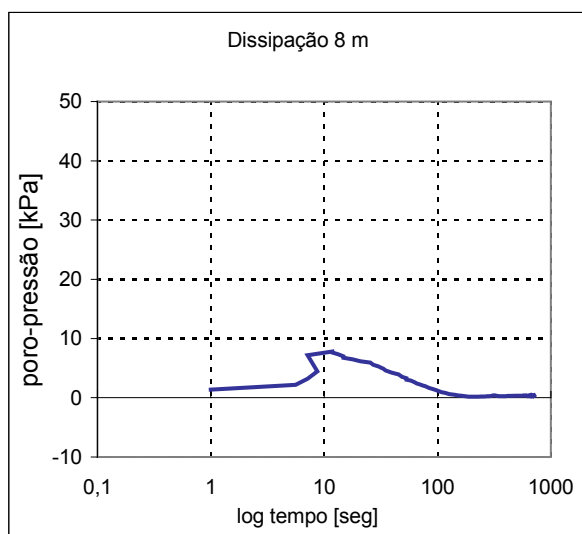
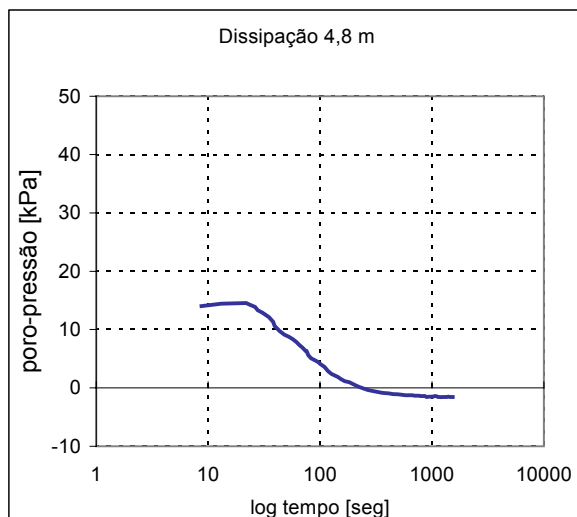
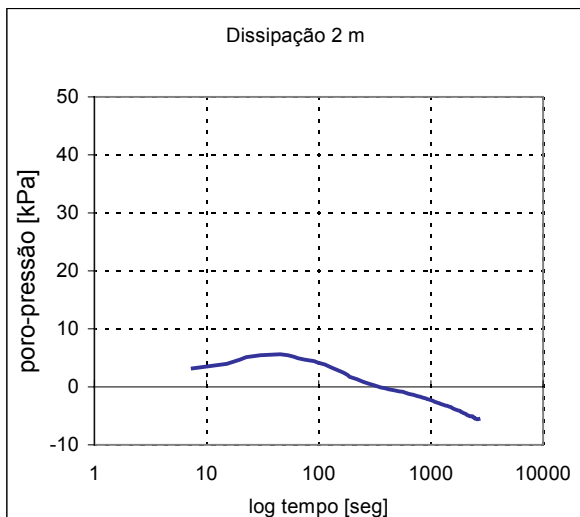
- Estação 7



## Área - ARB#2

### Ensaio de Dissipação -CPTU - Campanha de 2002

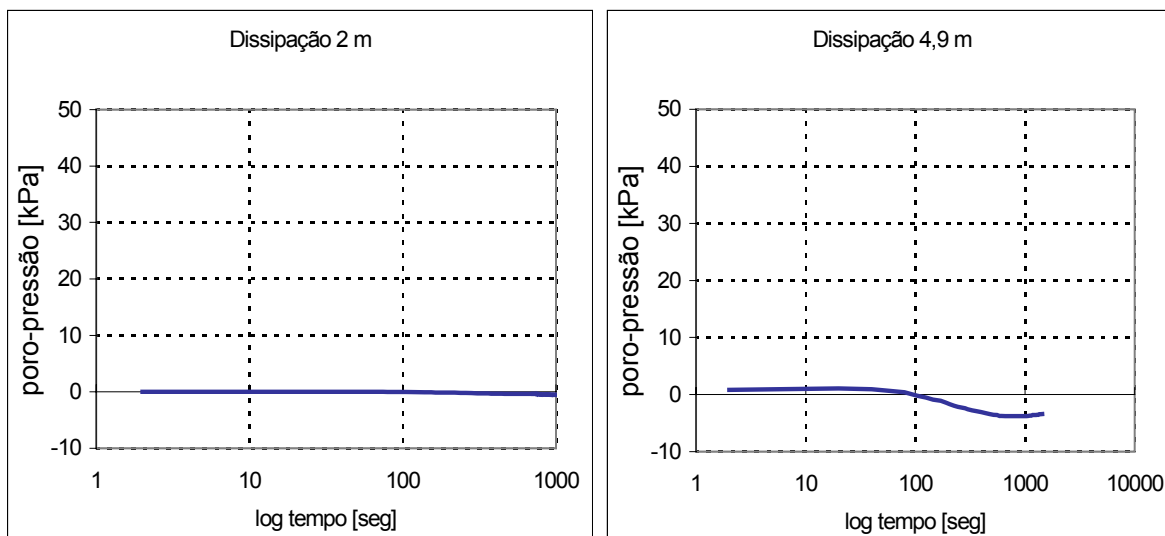
- Estação 1



## Área - ARB#2

### Ensaio de Dissipação -CPTU - Campanha de 2002

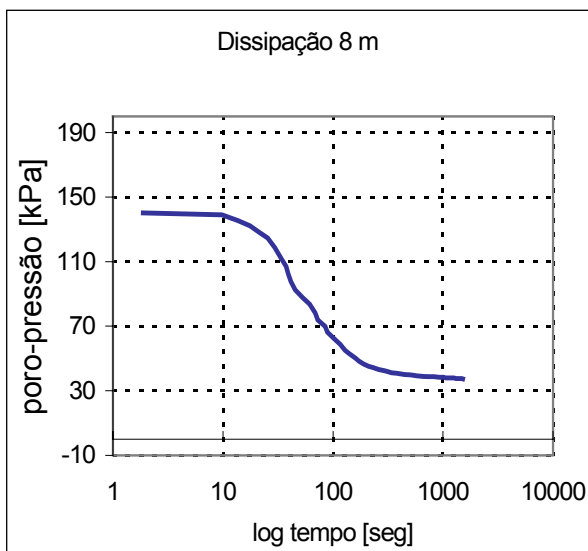
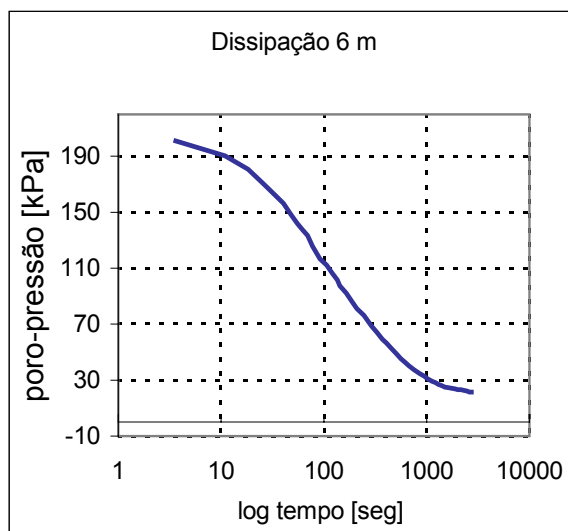
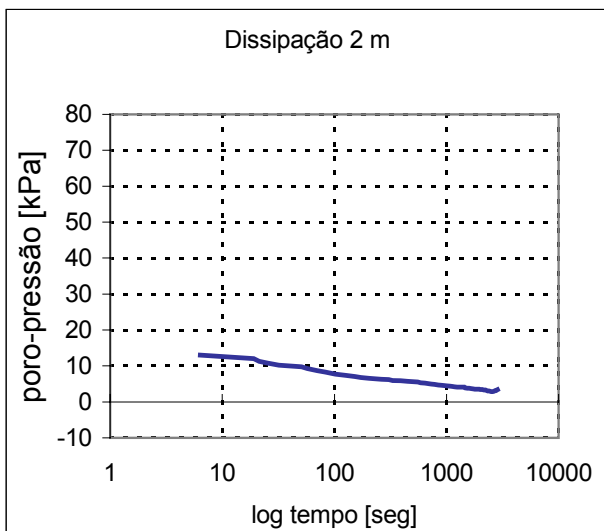
- Estação 2



## Área - ARB#2

### Ensaio de Dissipação -CPTU - Campanha de 2002

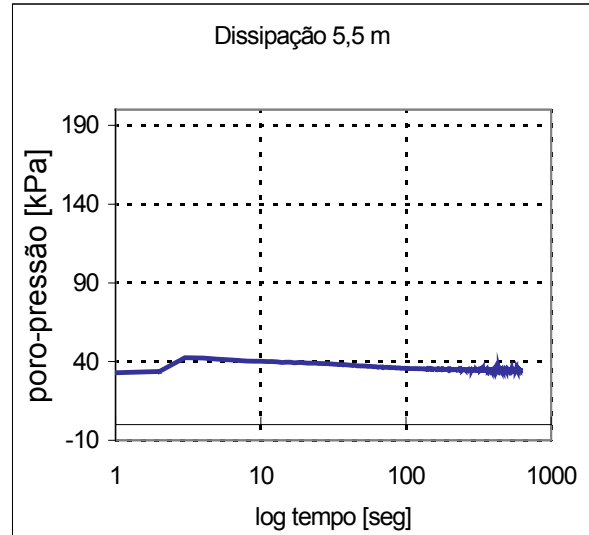
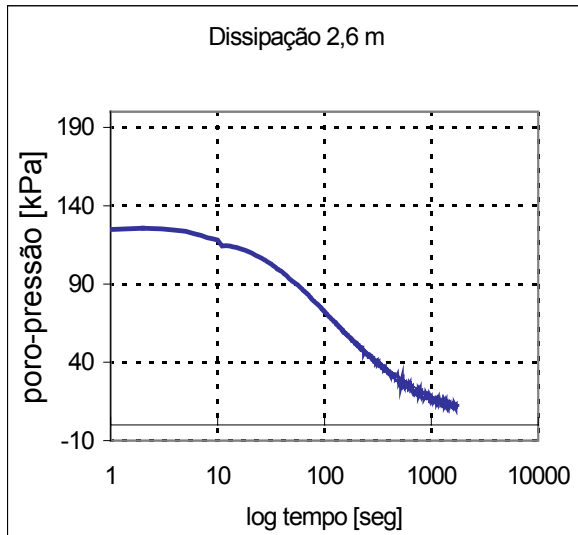
- Estação 3



## Área - ARB#2

### Ensaio de Dissipação -CPTU - Campanha de 2002

- Estação 4

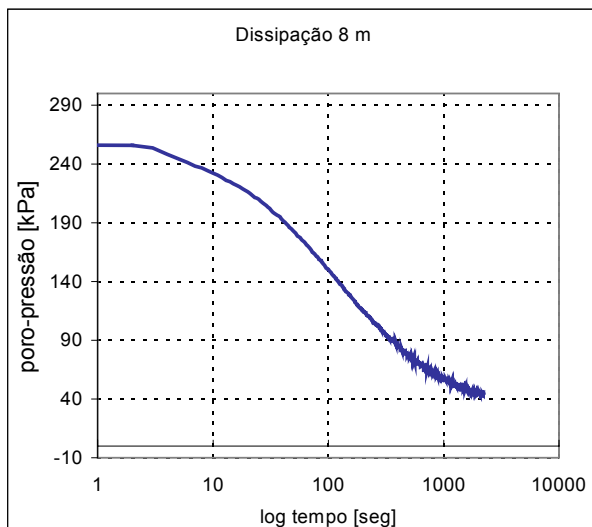
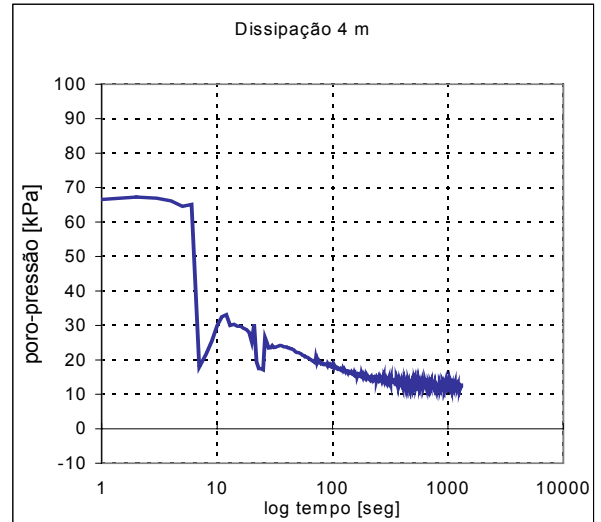
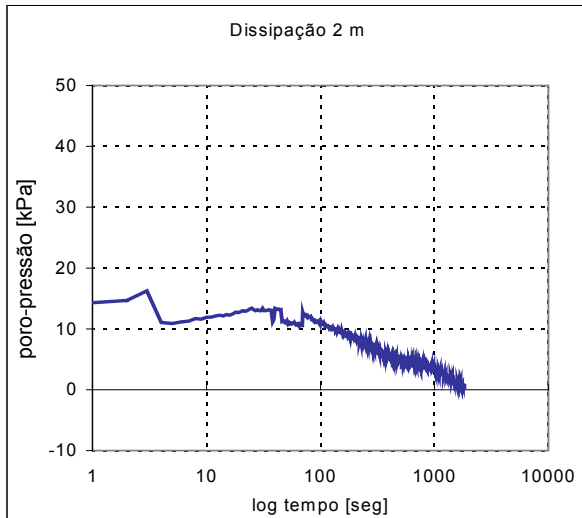




## Área - ARB#2

### Ensaio de Dissipação -CPTU - Campanha de 2002

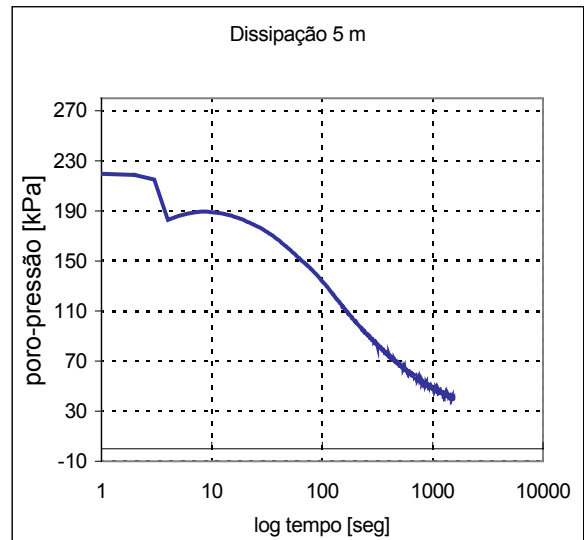
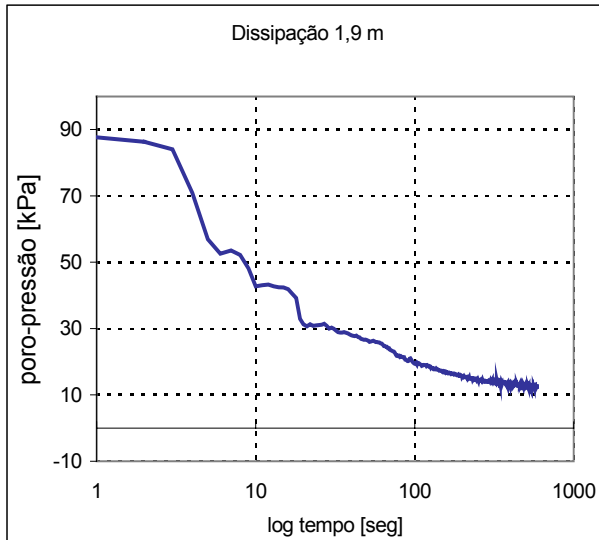
- Estação 5



## Área - ARB#2

### Ensaio de Dissipação -CPTU - Campanha de 2002

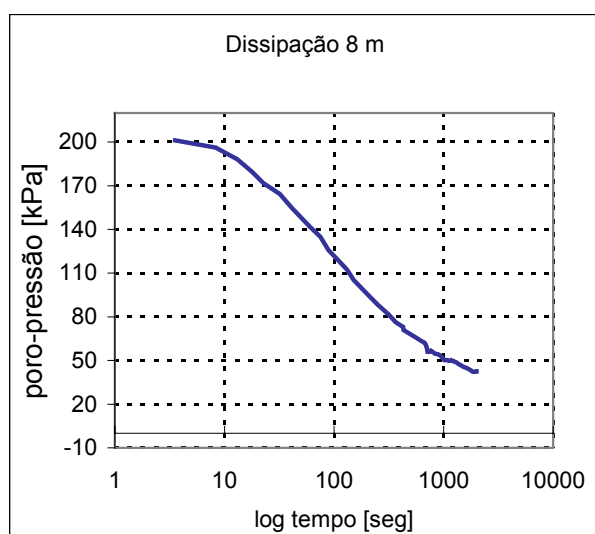
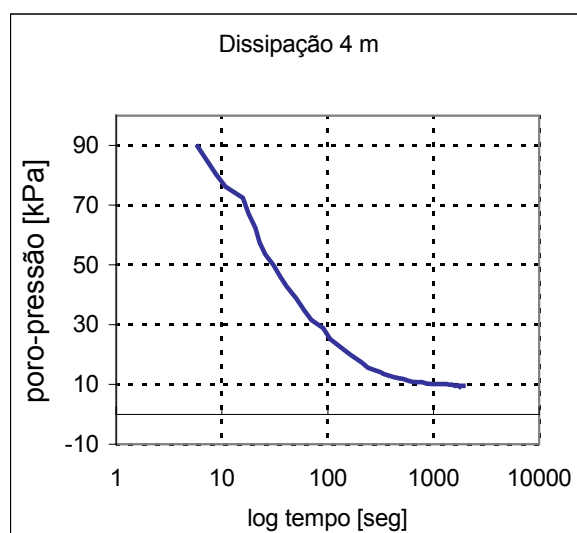
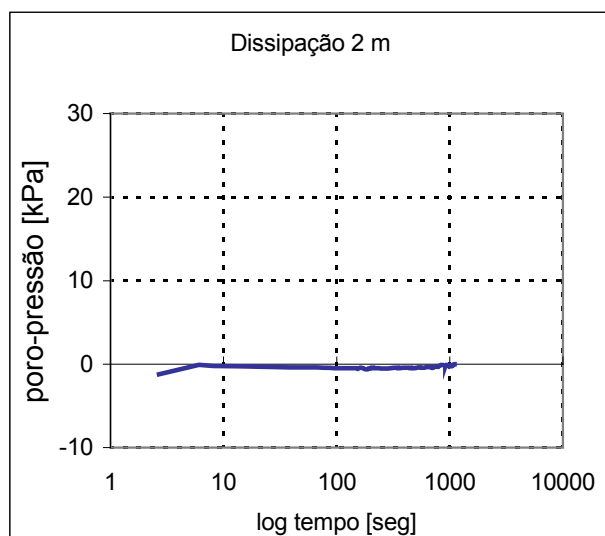
- Estação 6



## Área - ARB#2

### Ensaio de Dissipação -CPTU - Campanha de 2002

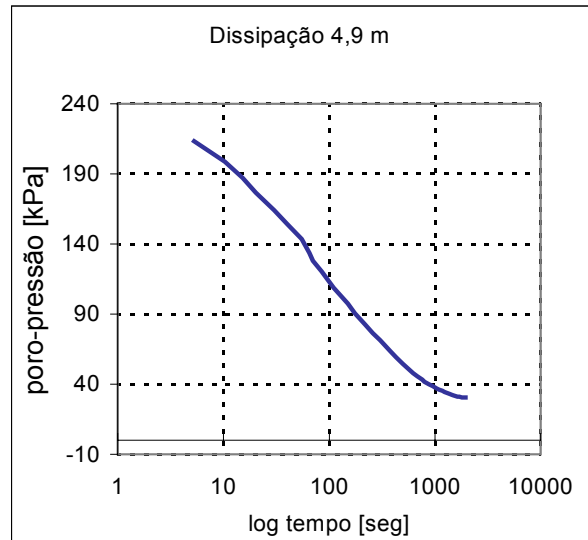
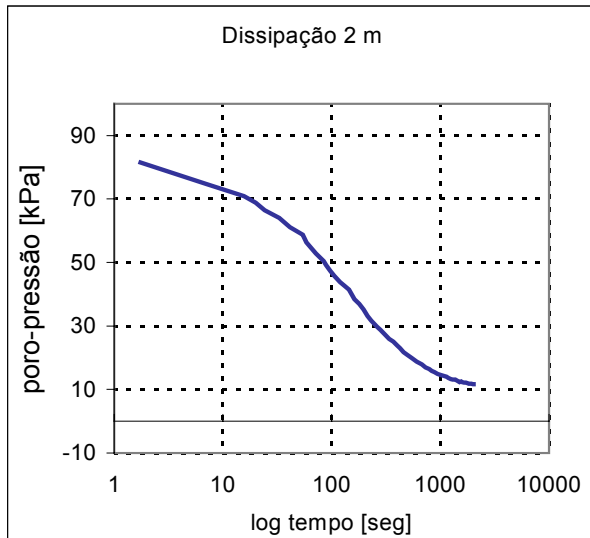
- Estação 7



## Área - ARB#2

### Ensaio de Dissipação -CPTU - Campanha de 2002

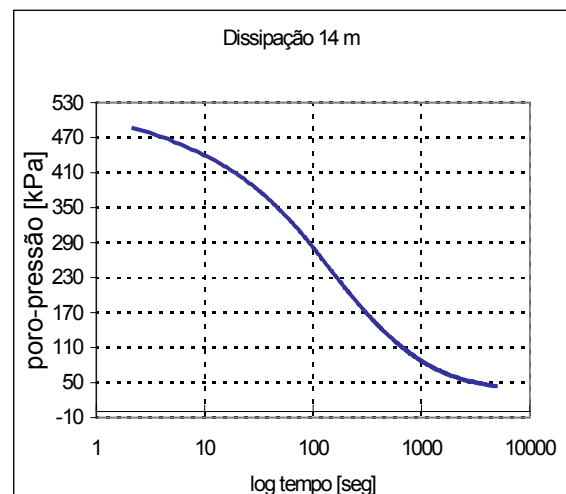
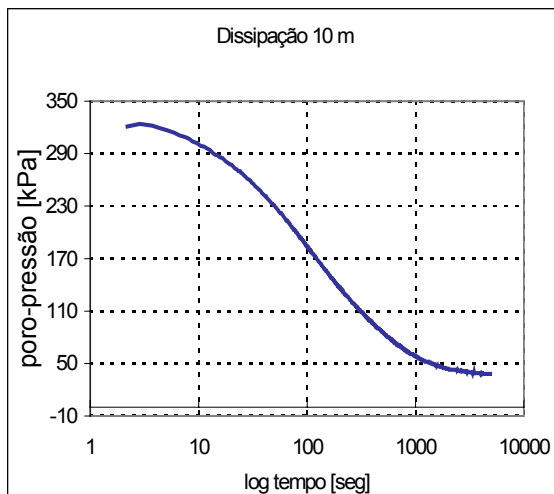
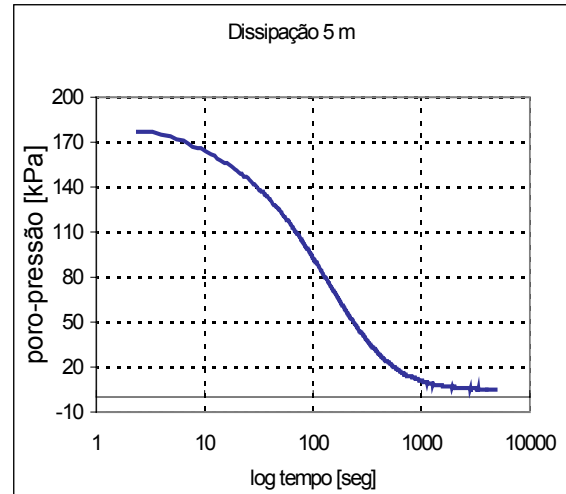
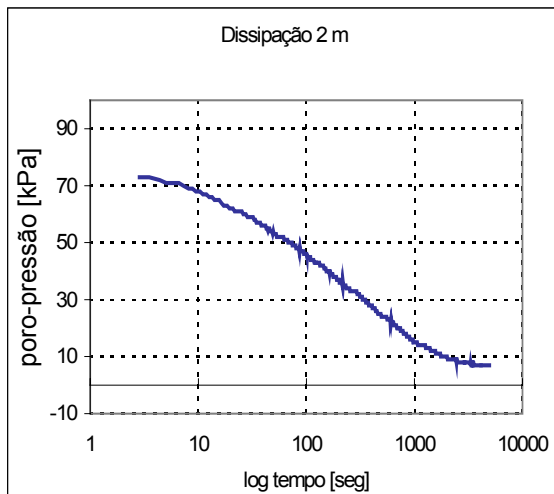
- Estação 8



## Área - ARB#2

### Ensaio de Dissipação -CPTU - Campanha de 2004

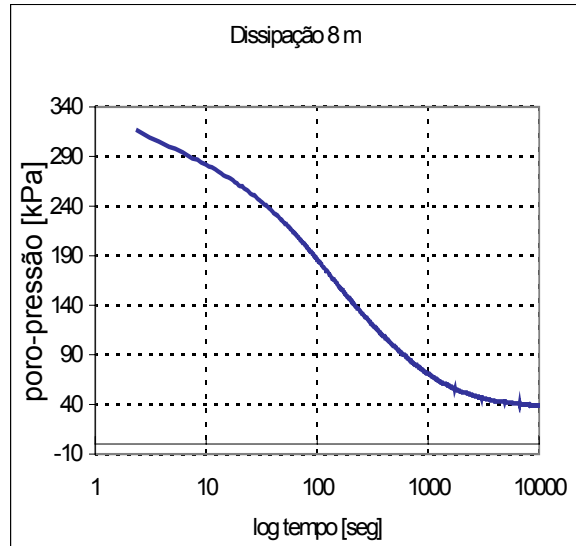
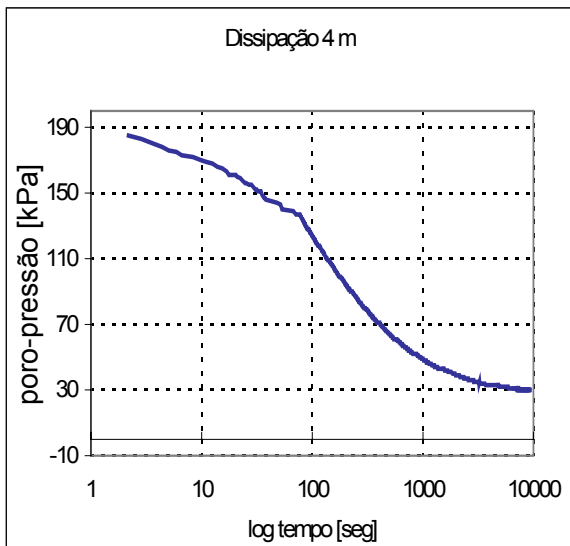
- Estação 1



## Área - ARB#2

### Ensaio de Dissipação -CPTU - Campanha de 2004

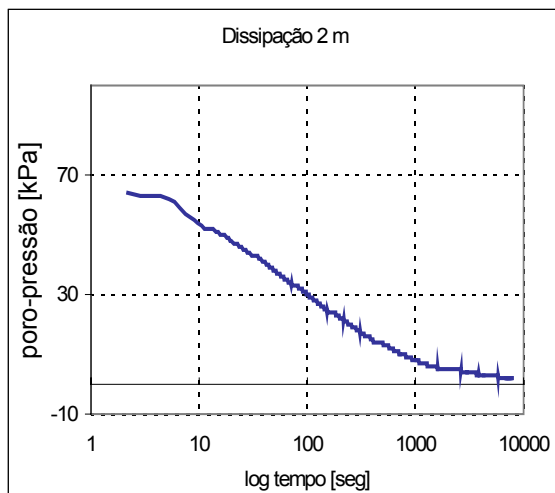
- Estação 2



## Área - ARB#2

### Ensaio de Dissipação -CPTU - Campanha de 2004

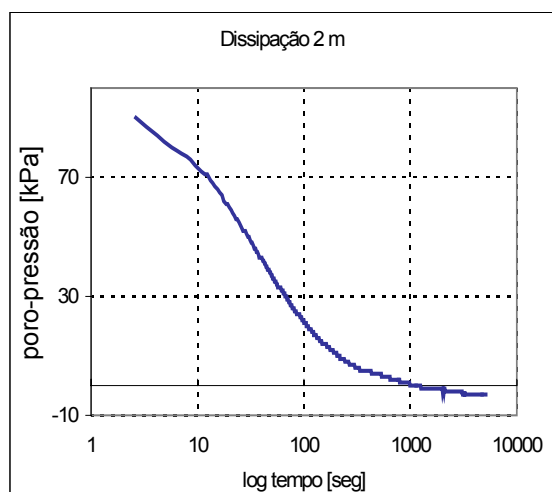
- Estação3



## Área - ARB#2

### Ensaio de Dissipação -CPTU - Campanha de 2004

- Estação4

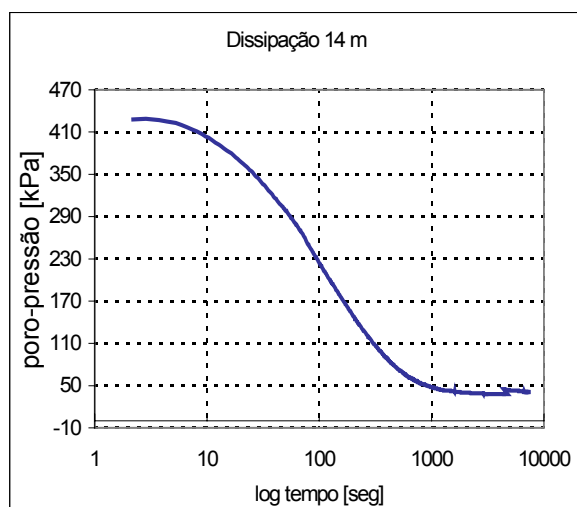
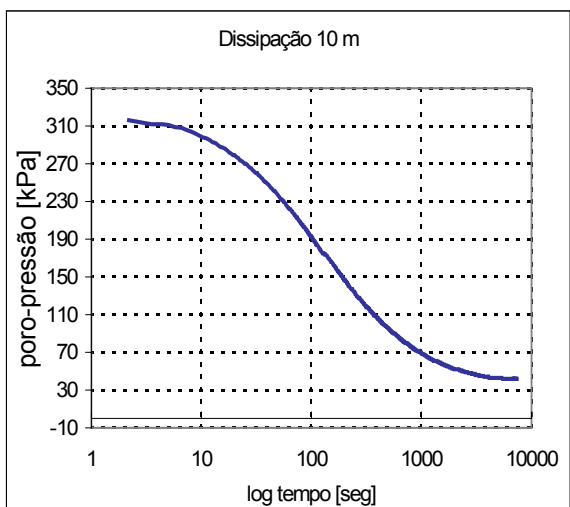
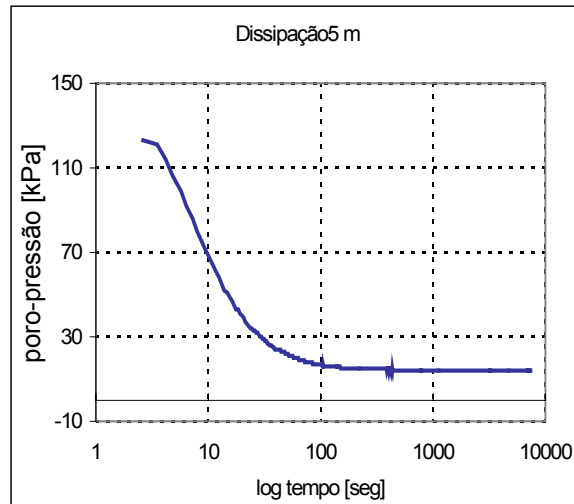
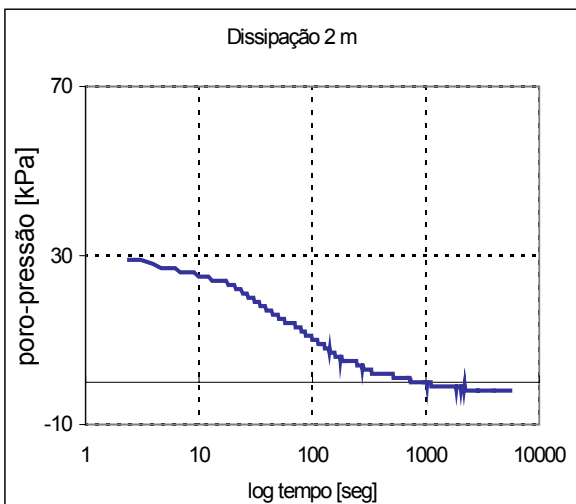




## Área - ARB#2

### Ensaio de Dissipação -CPTU - Campanha de 2004

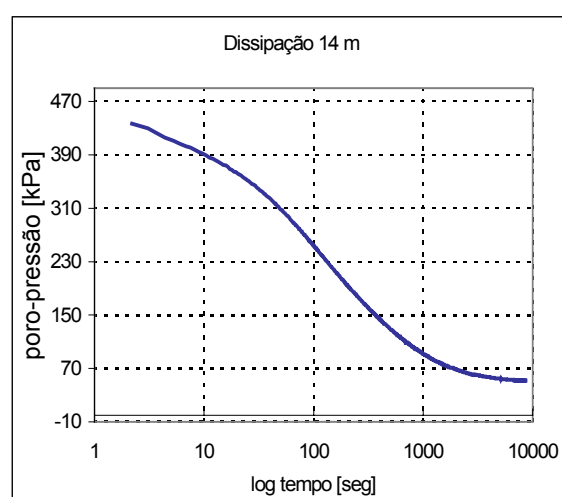
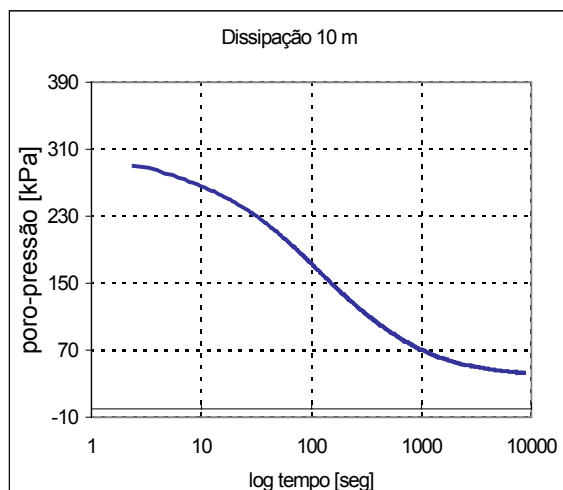
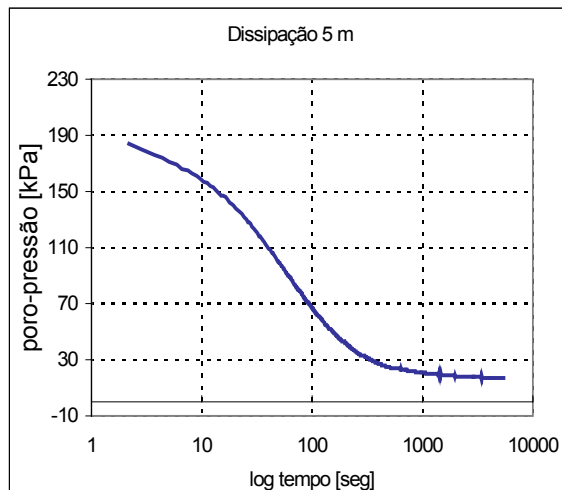
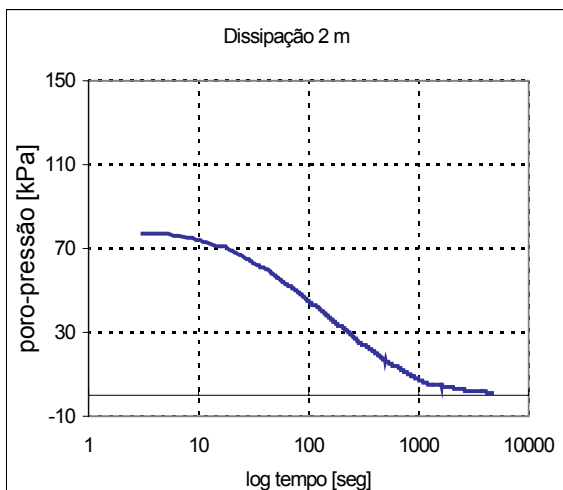
- Estação 5



## Área - ARB#2

### Ensaio de Dissipação -CPTU - Campanha de 2004

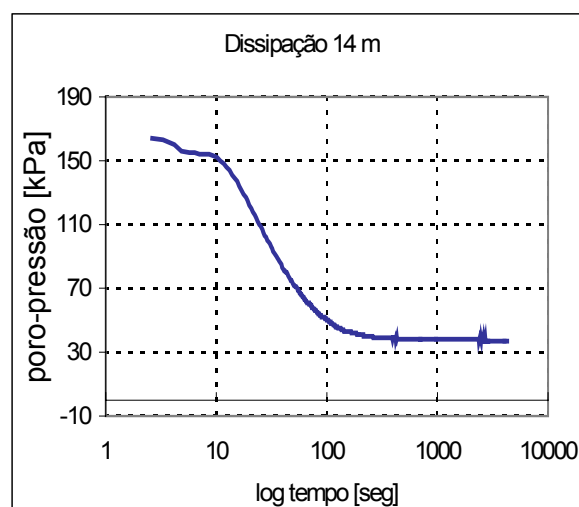
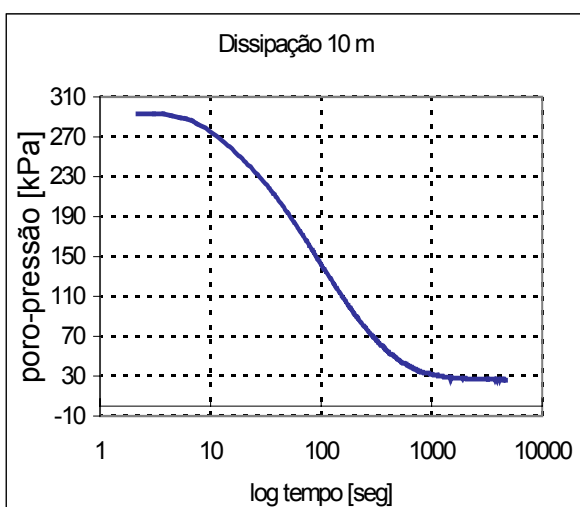
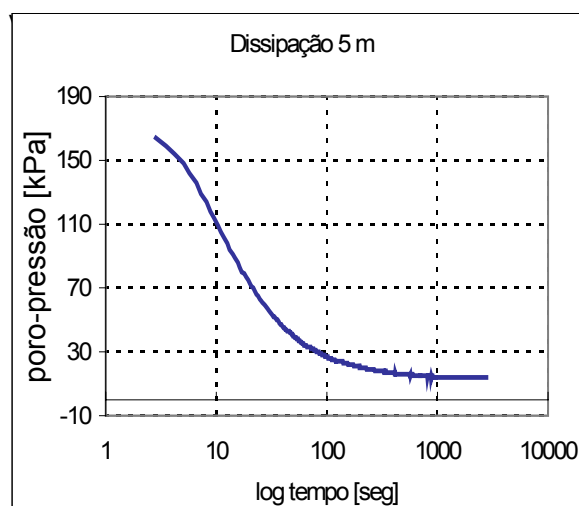
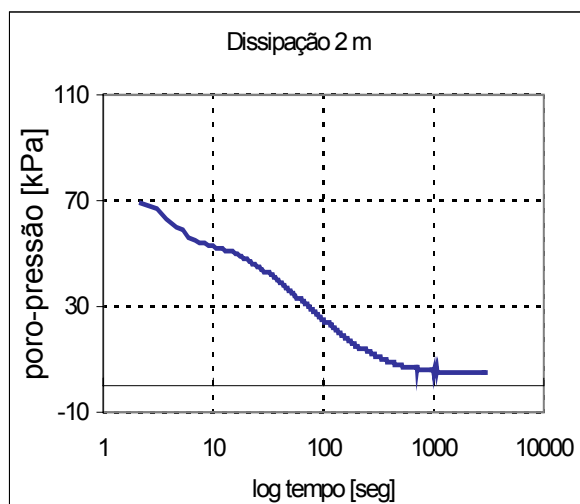
- Estação 6



## Área - ARB#2

### Ensaio de Dissipação -CPTU - Campanha de 2004

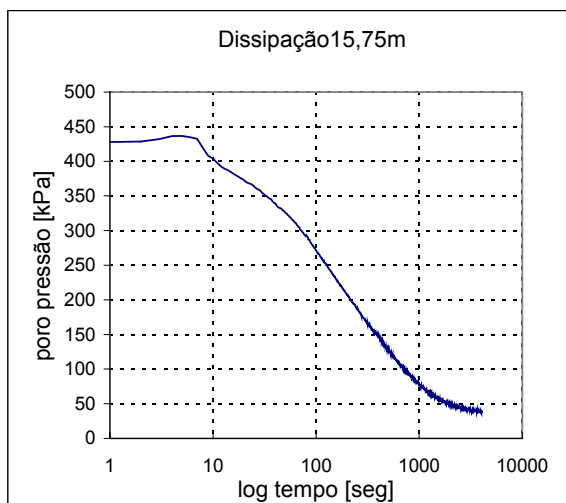
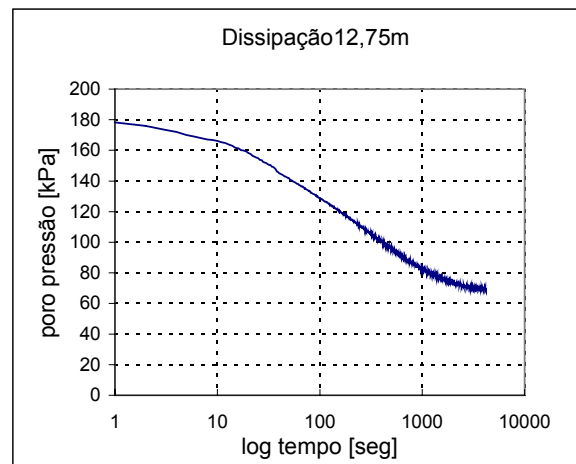
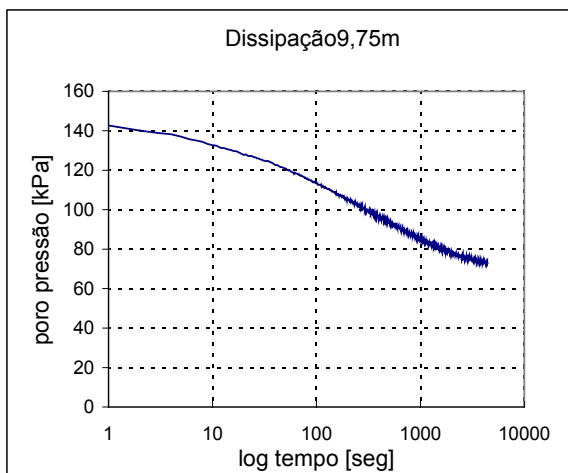
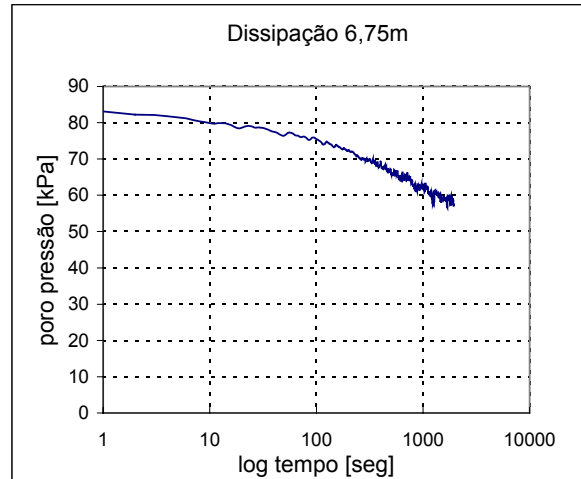
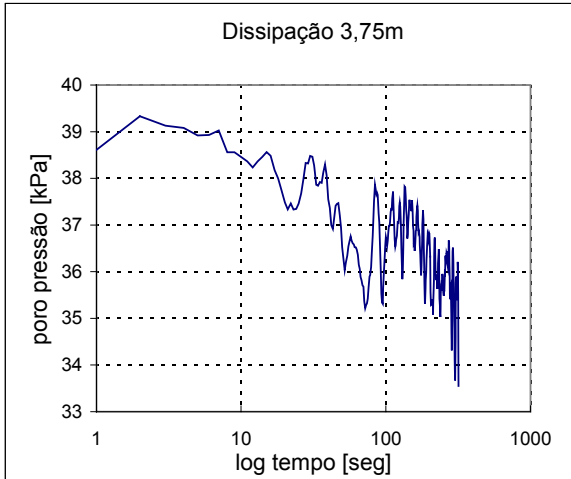
- Estação 7



# Área - ARB#3

## Ensaio de Dissipação -CPTU - Campanha de 2005

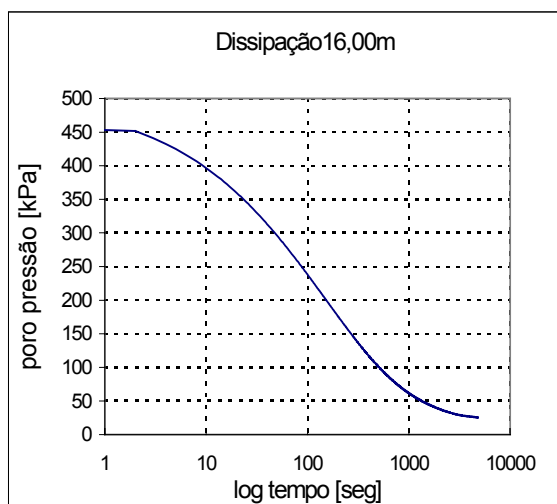
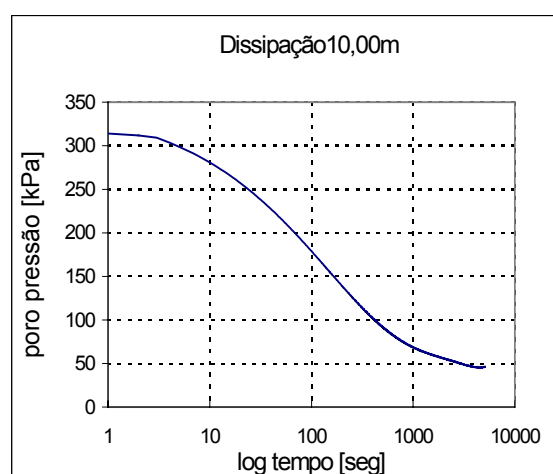
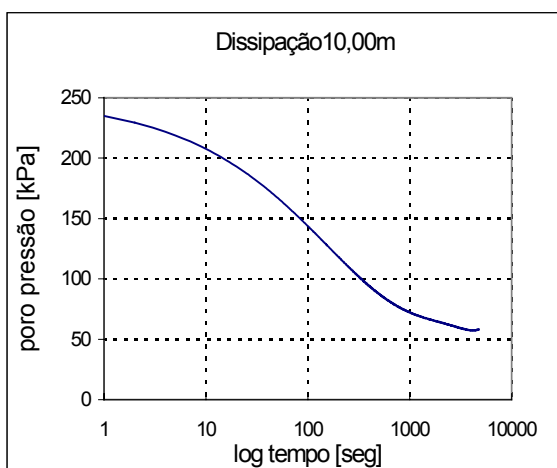
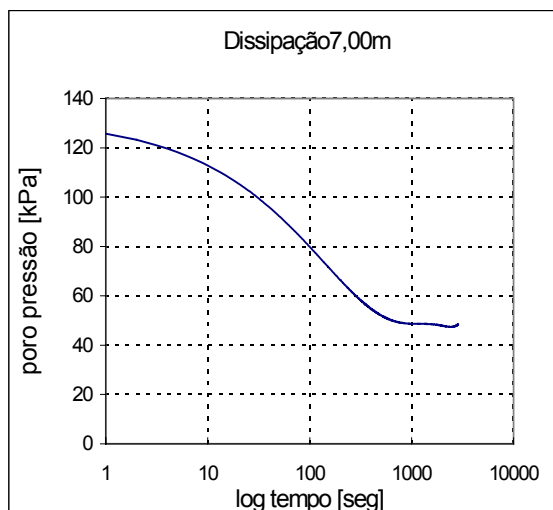
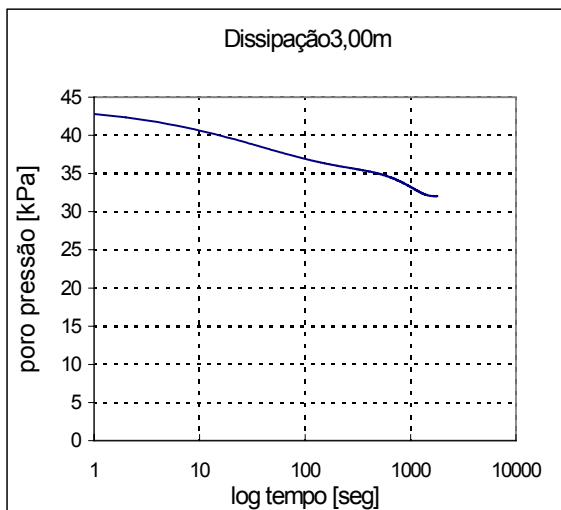
- Estação 1



# Área - ARB#3

## Ensaio de Dissipação -CPTU - Campanha de 2005

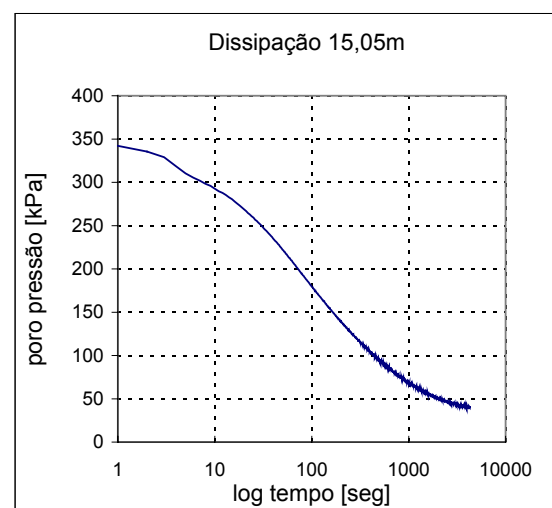
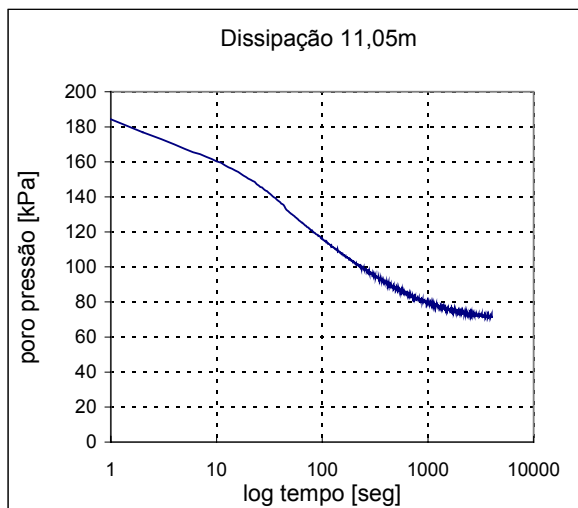
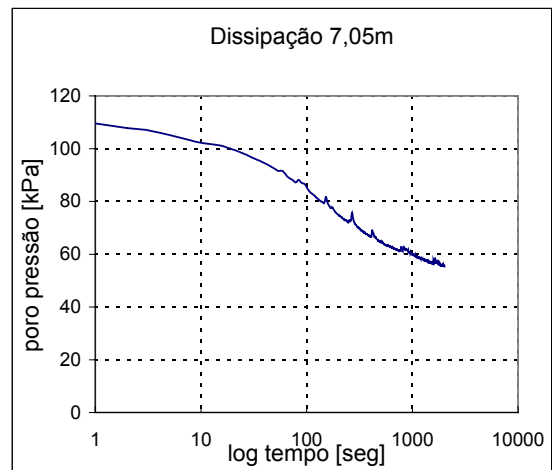
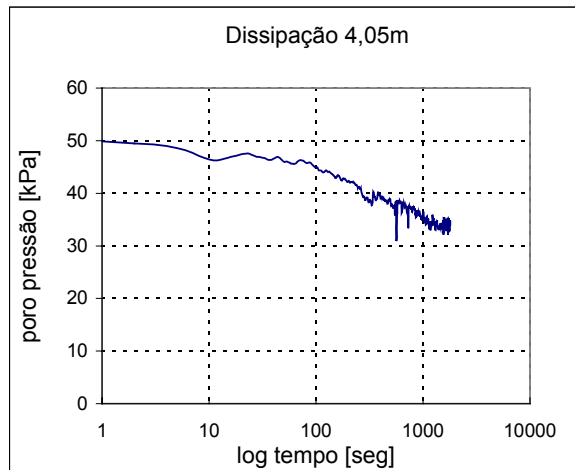
- Estação 2



# Área - ARB#3

## Ensaio de Dissipação -CPTU - Campanha de 2005

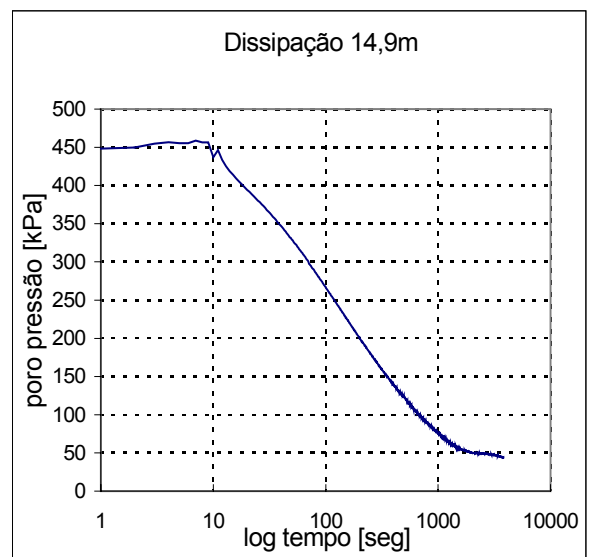
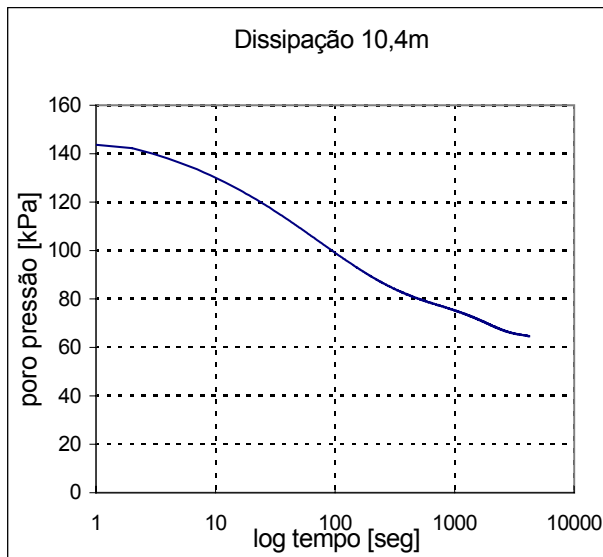
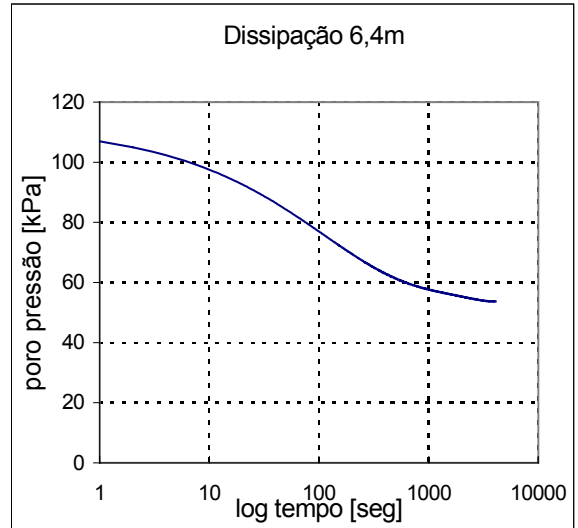
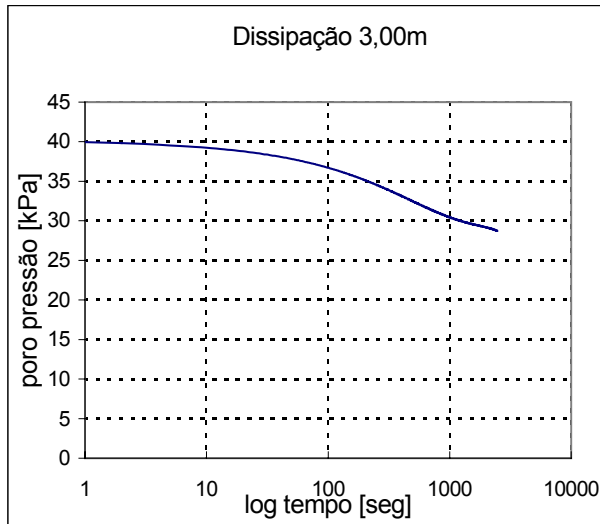
- Estação 3



## Área - ARB#3

### Ensaio de Dissipação -CPTU - Campanha de 2005

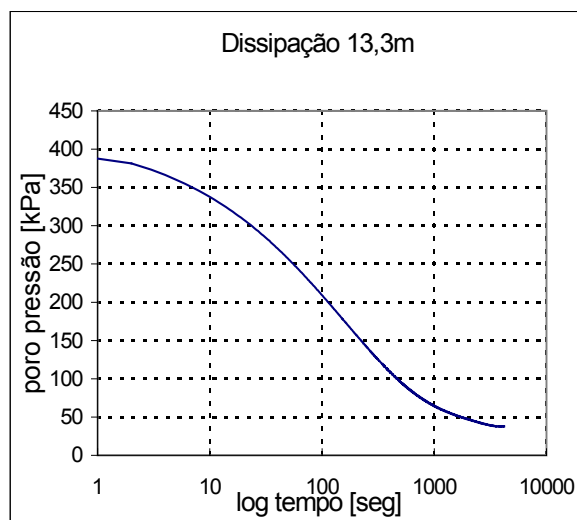
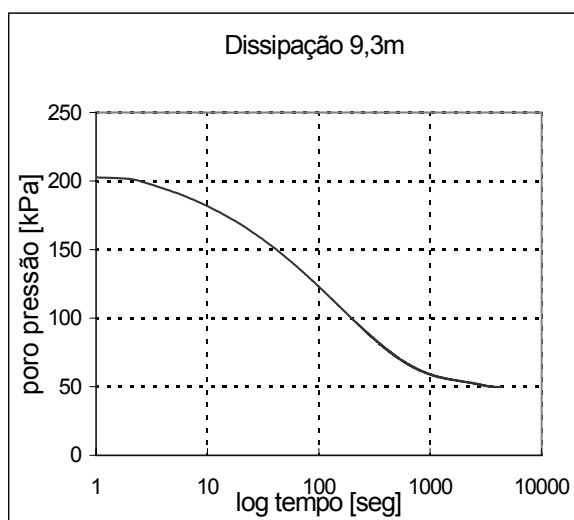
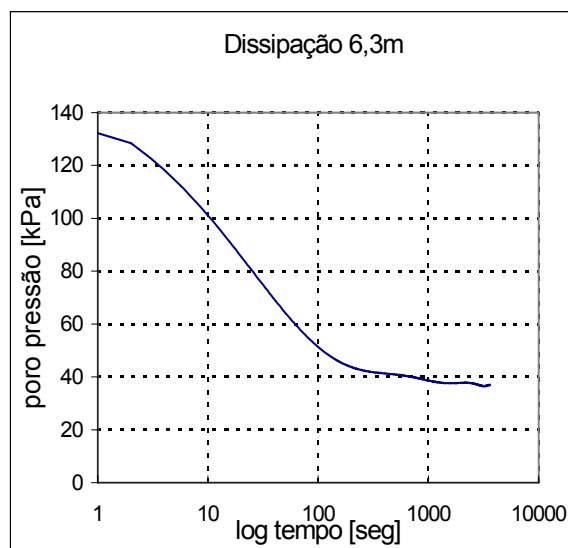
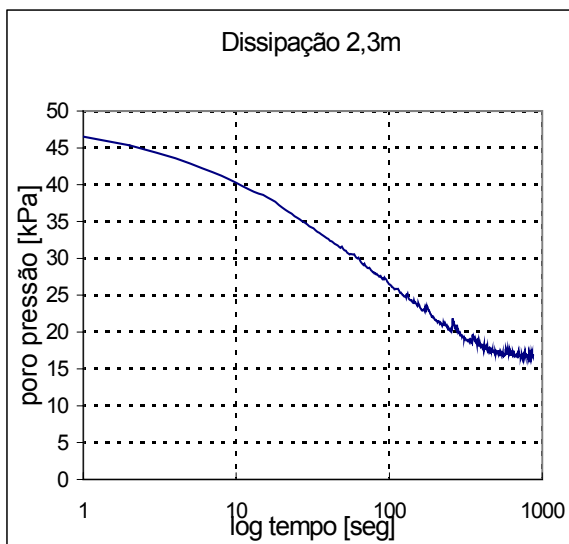
- Estação 4LE



## Área - ARB#3

### Ensaio de Dissipação -CPTU - Campanha de 2005

- Estação 6AC

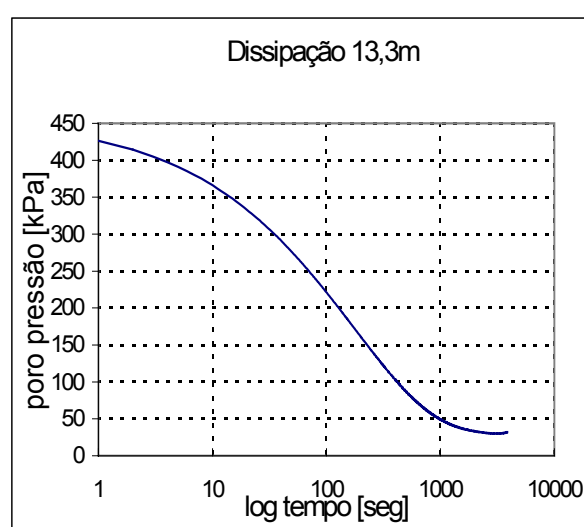
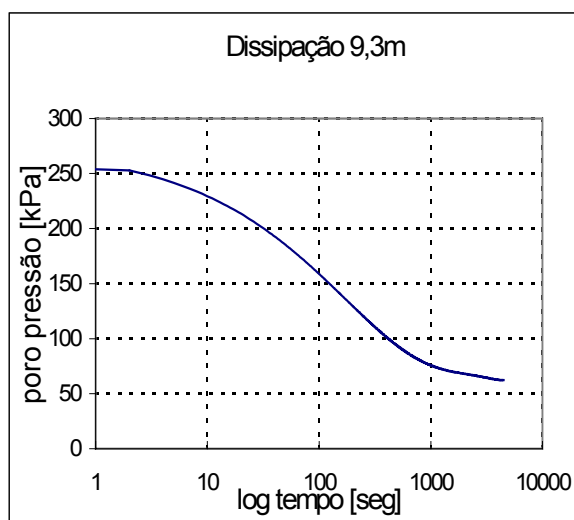
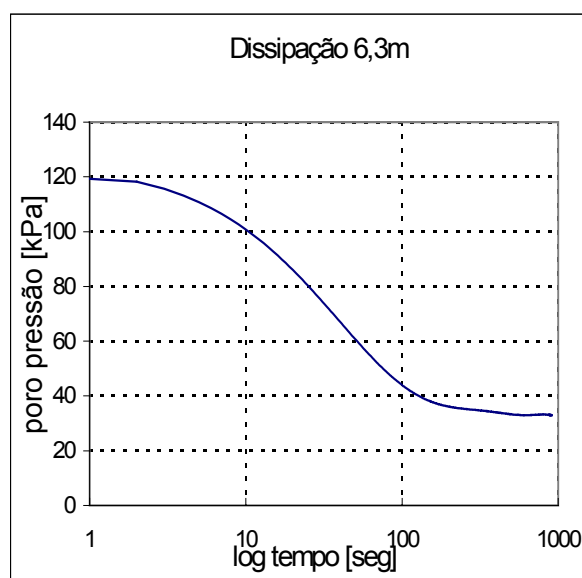
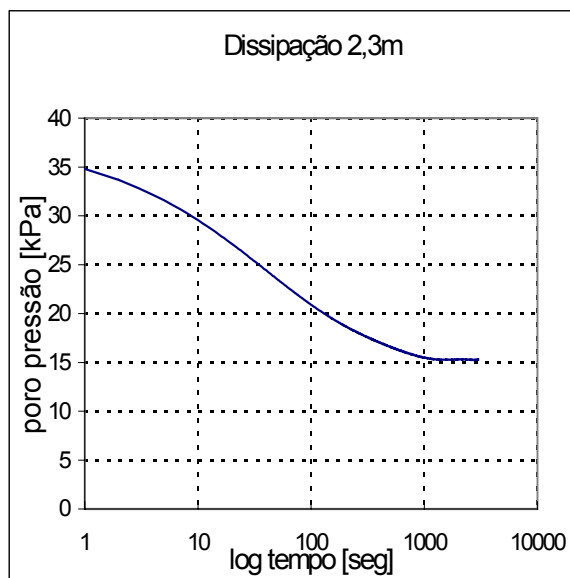




## Área - ARB#3

### Ensaio de Dissipação -CPTU - Campanha de 2005

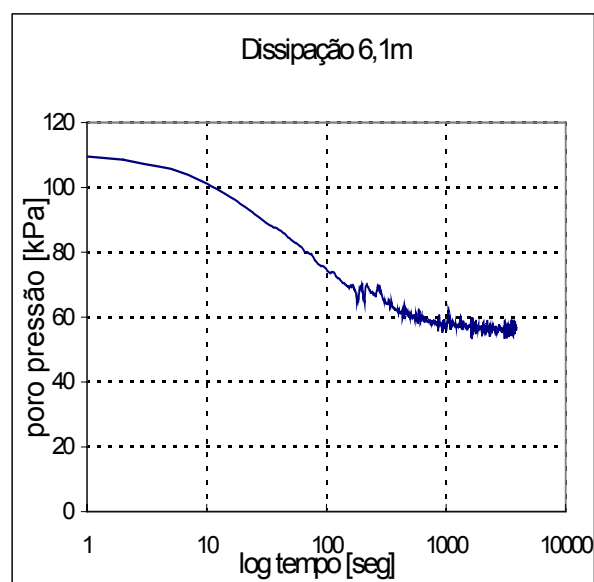
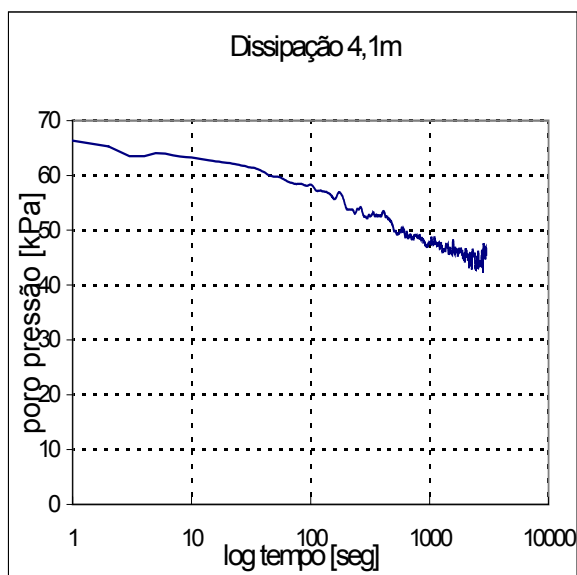
- Estação 6



## Área - ARB#3

### Ensaio de Dissipação -CPTU - Campanha de 2005

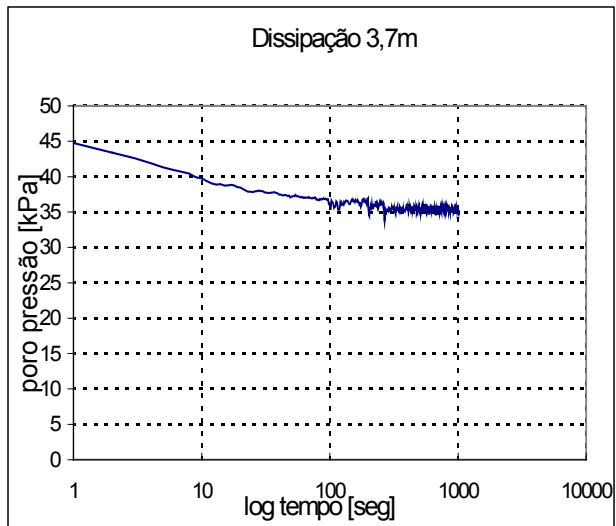
- Estação 7



## Área - ARB#3

### Ensaio de Dissipação -CPTU - Campanha de 2005

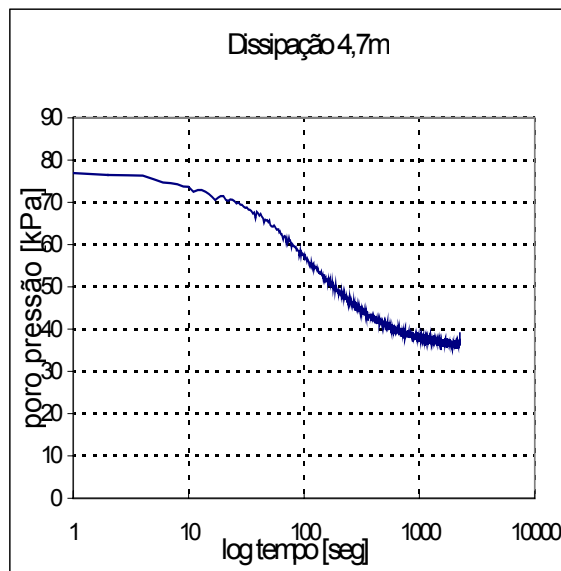
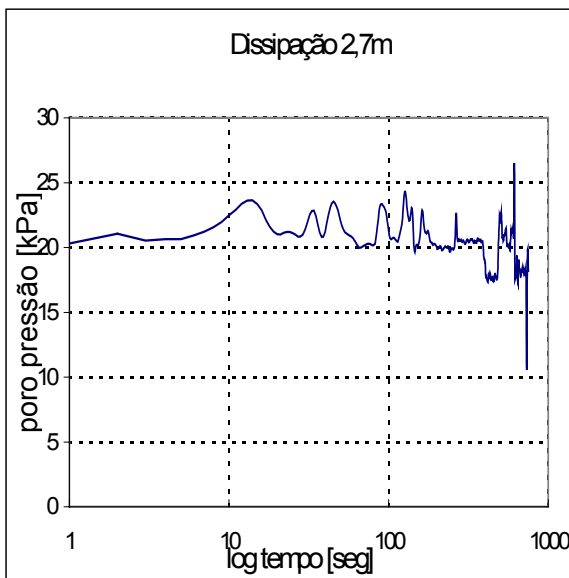
- Estação 8



## Área - ARB#3

### Ensaio de Dissipação -CPTU - Campanha de 2005

- Estação 9



## ANEXO III

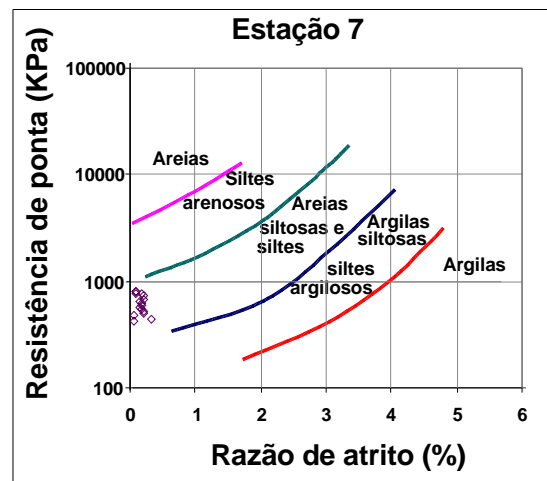
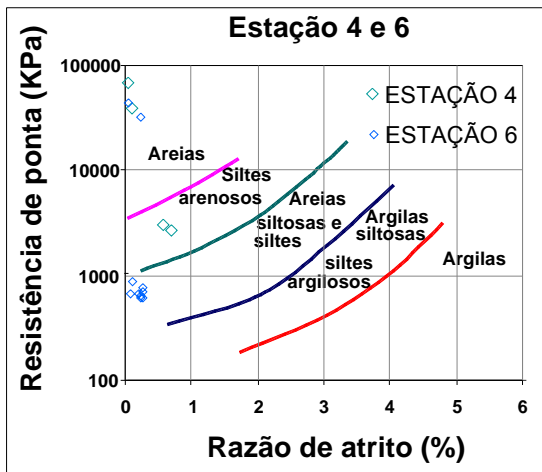
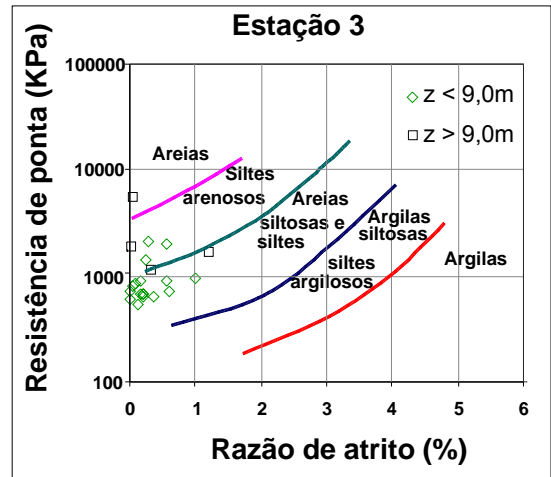
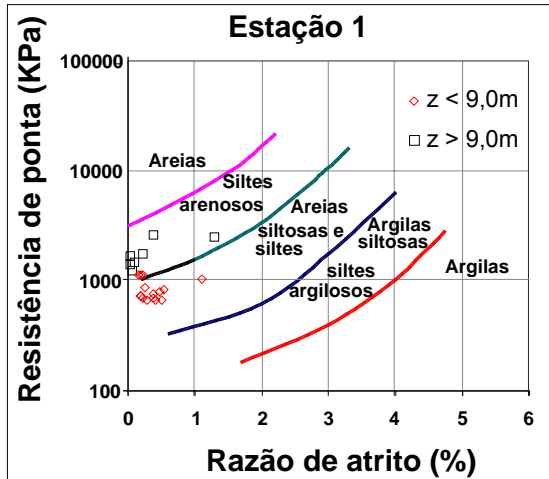
### RESULTADOS DAS PROPOSTAS DE CLASSIFICAÇÃO:

- (ROBERTSON & CAMPANELLA, 1983)
- (ROBERTSON, 1986)

## Área - ARB#2

Propostas de classificação -CPTU - Campanha de 1999

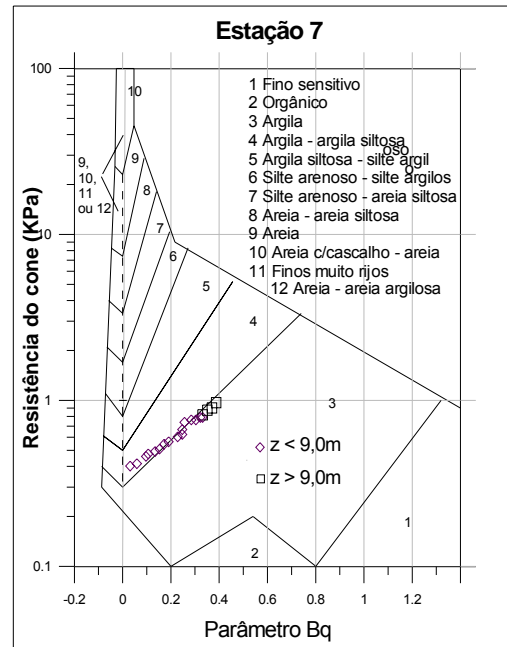
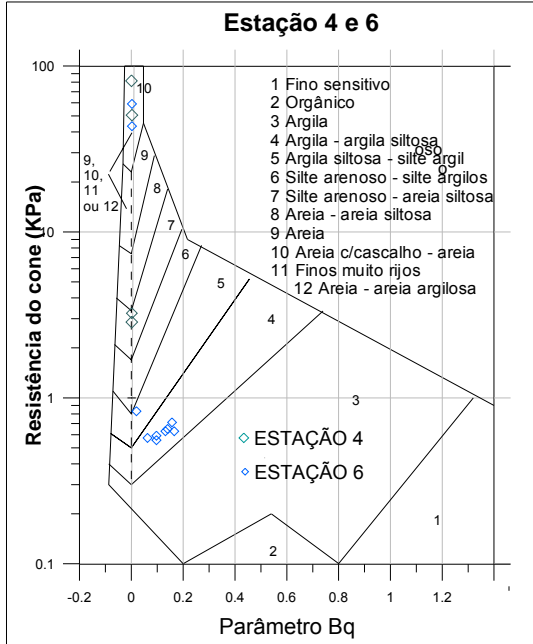
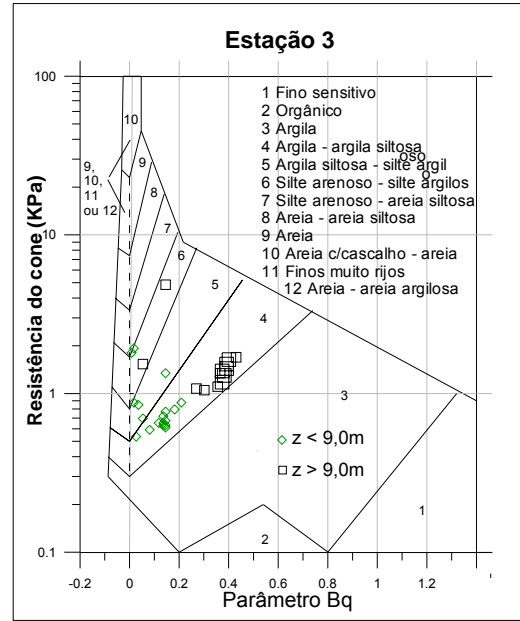
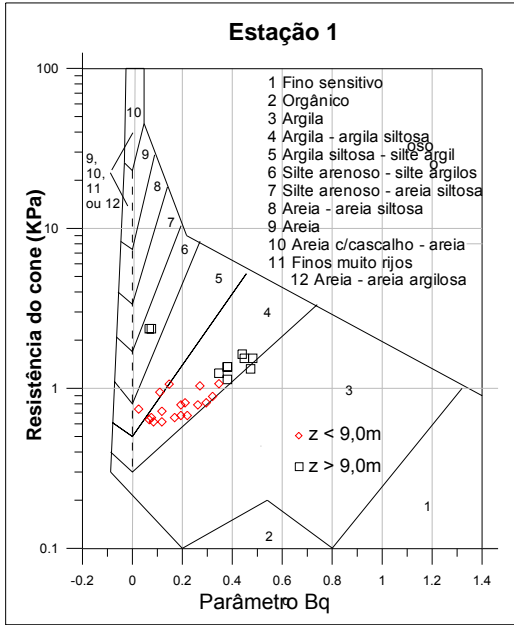
- (ROBERTSON & CAMPANELLA, 1983)



# Área - ARB#2

Propostas de classificação -CPTU - Campanha de 1999

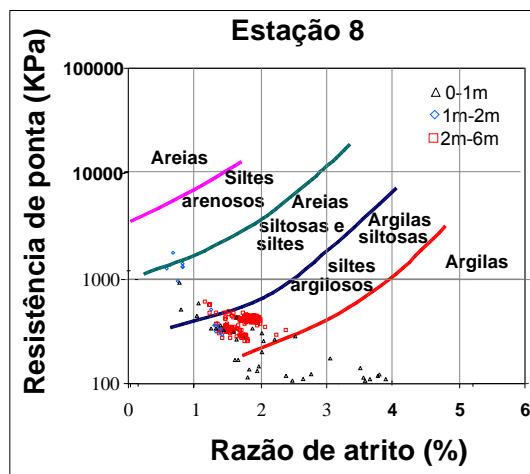
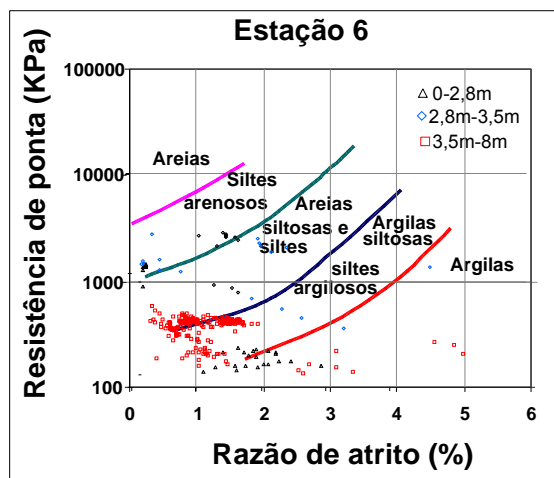
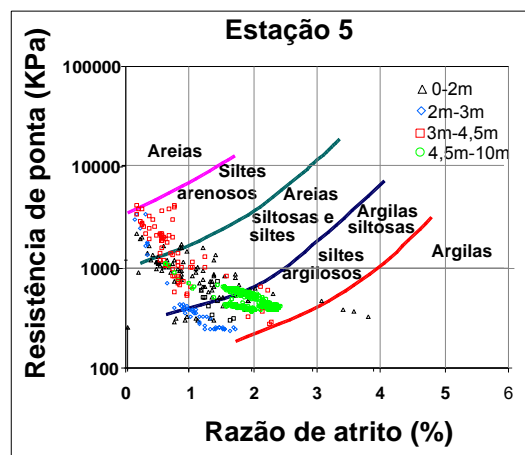
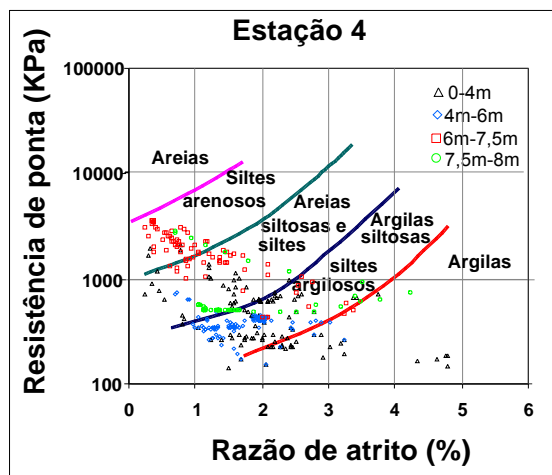
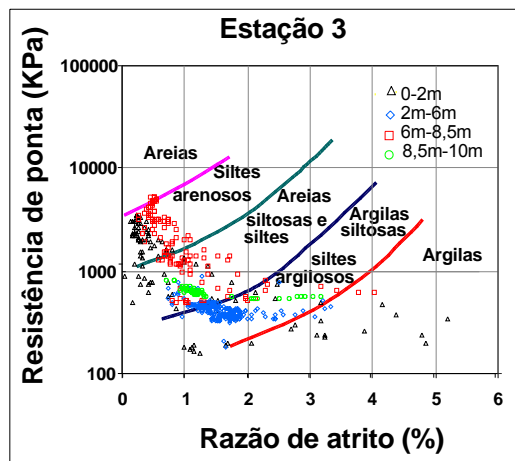
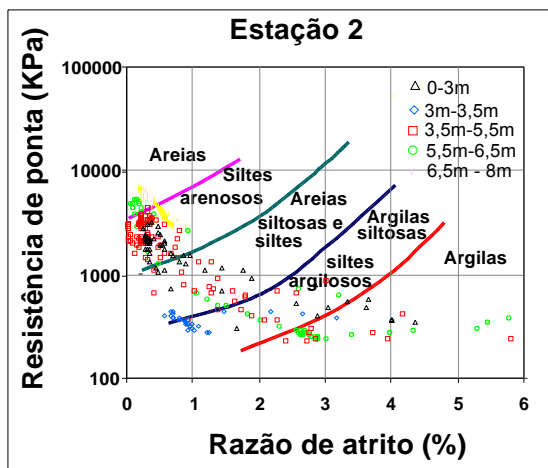
- (ROBERTSON, 1986)



# Área - ARB#2

Propostas de classificação -CPTU - Campanha de 2002

▪ (ROBERTSON & CAMPANELLA, 1983)

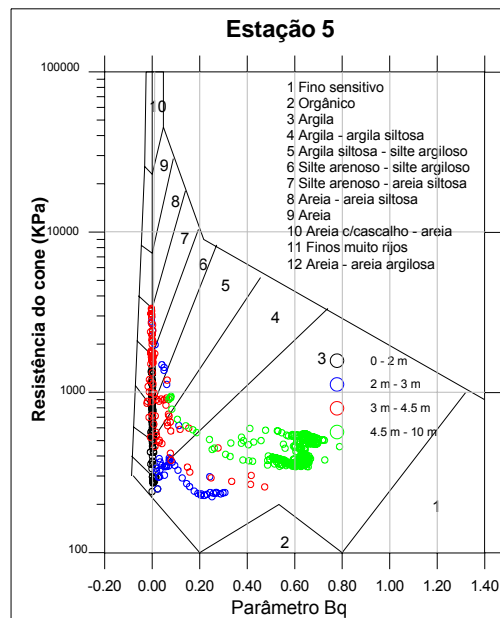
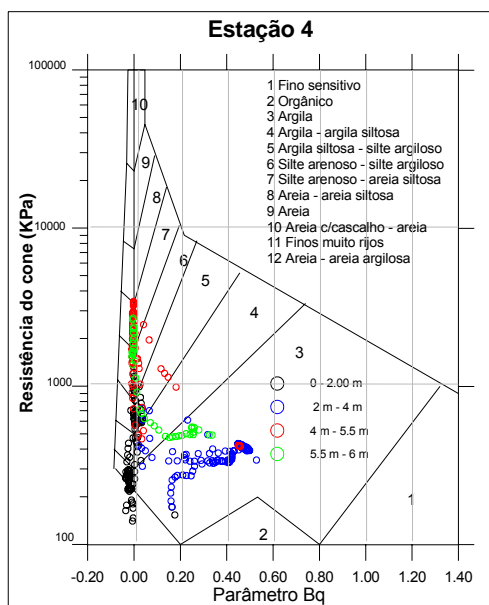
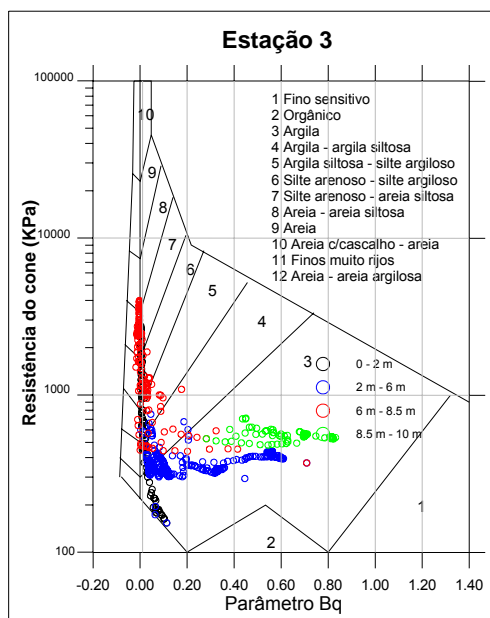
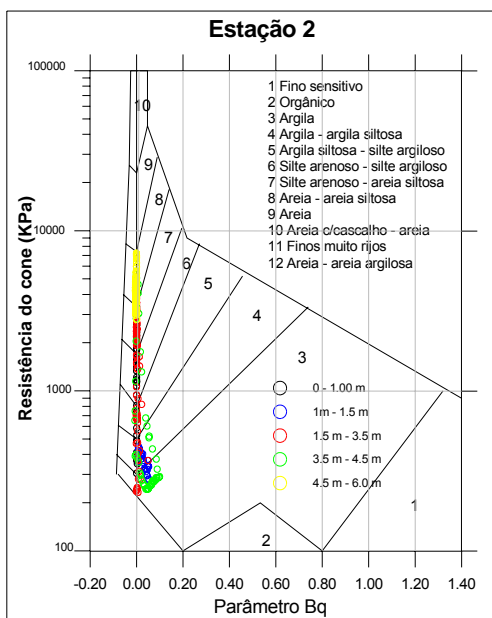


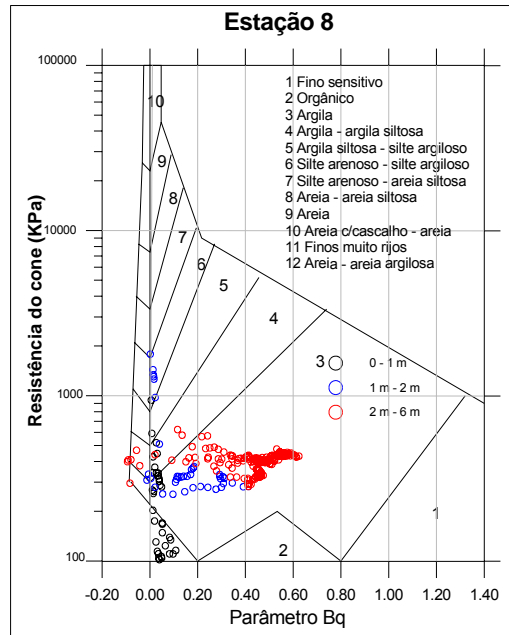
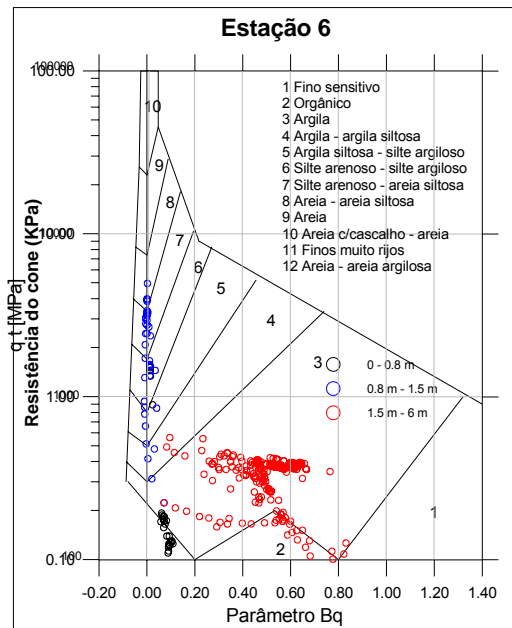


# Área - ARB#2

Propostas de classificação -CPTU - Campanha de 2002

▪ (ROBERTSON, 1986)

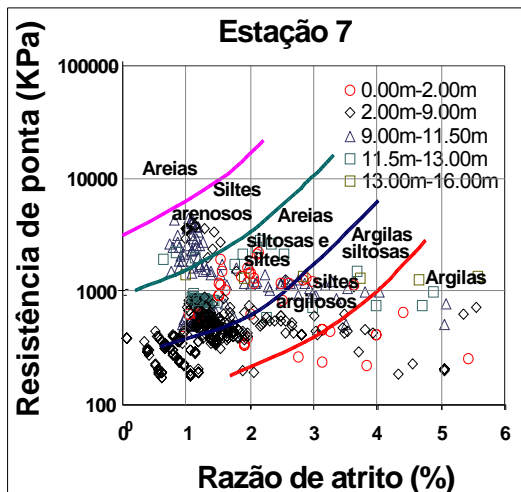
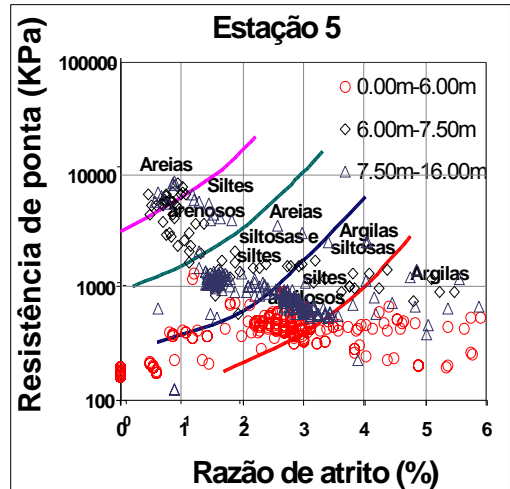
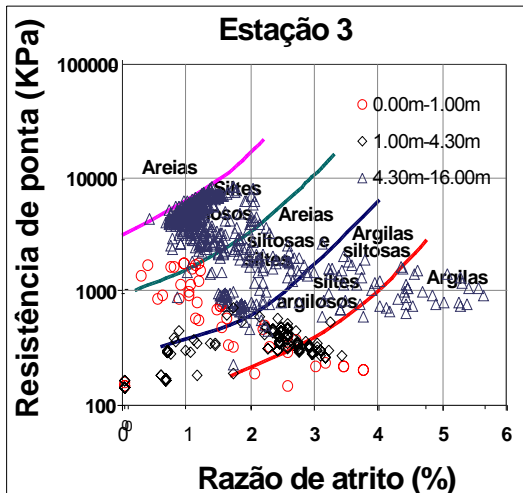
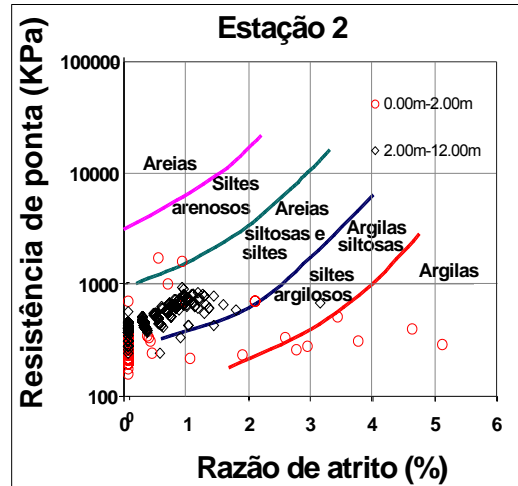
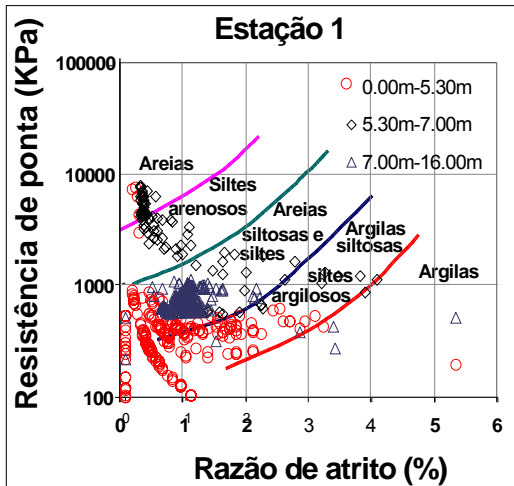




## Área - ARB#2

Propostas de classificação -CPTU - Campanha de 2004

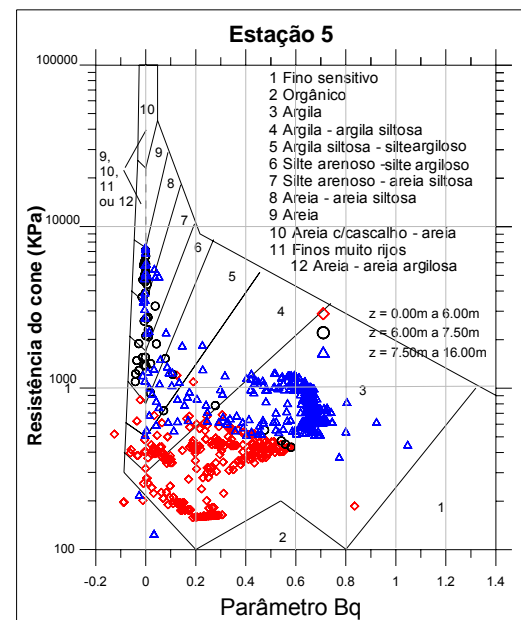
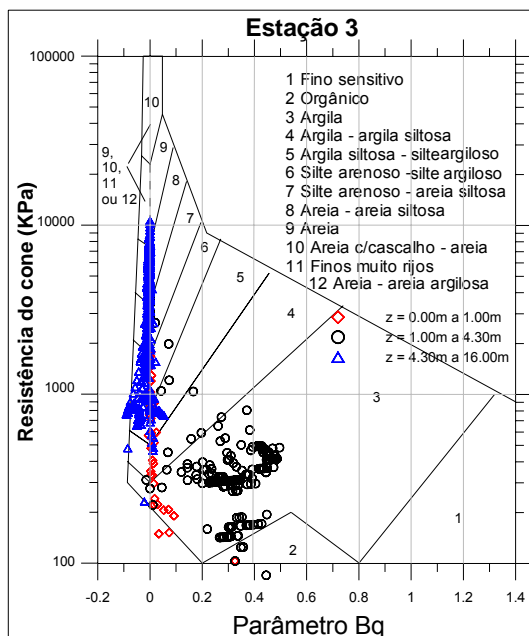
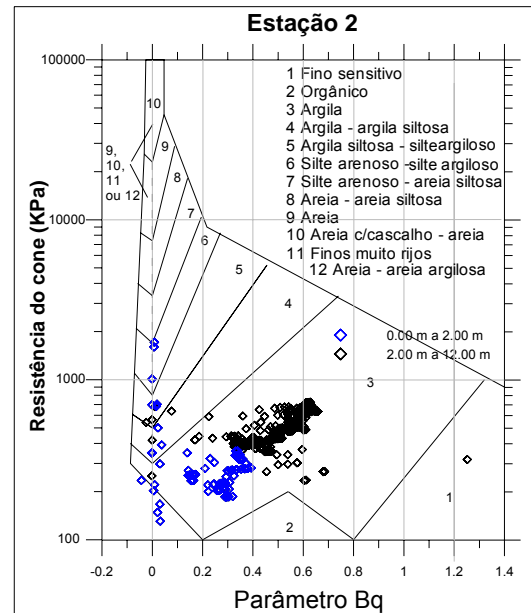
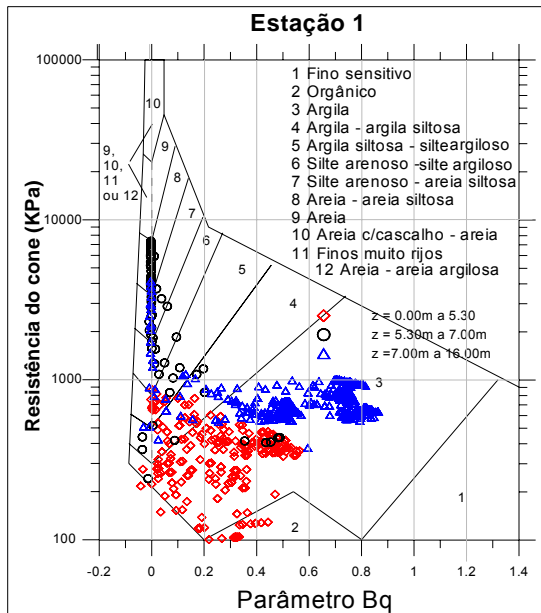
- (ROBERTSON & CAMPANELLA, 1983)

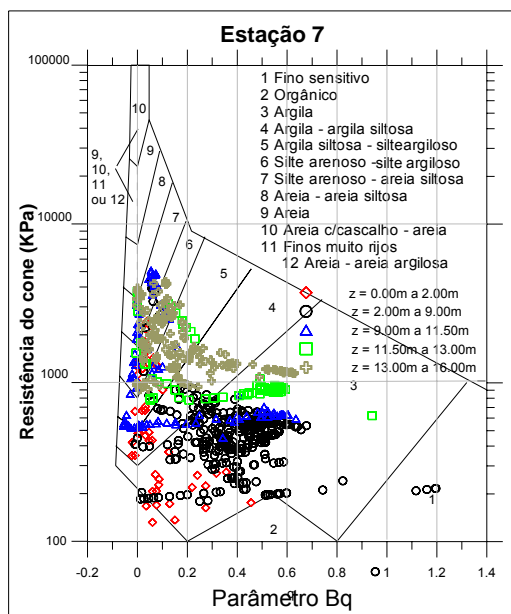


# Área - ARB#2

Propostas de classificação -CPTU - Campanha de 2004

▪ (ROBERTSON, 1986)

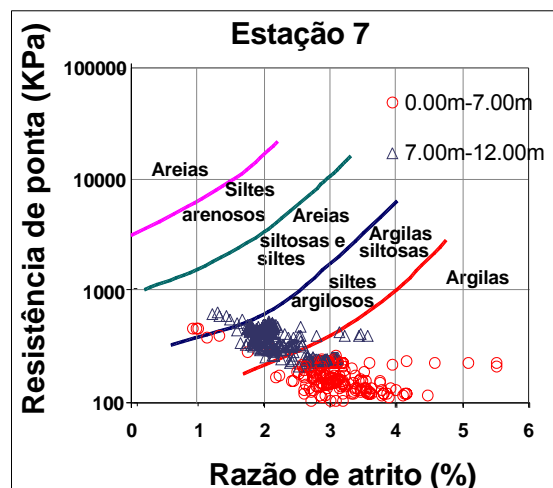
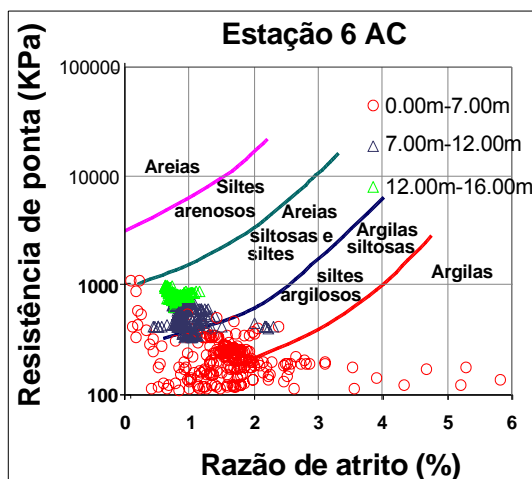
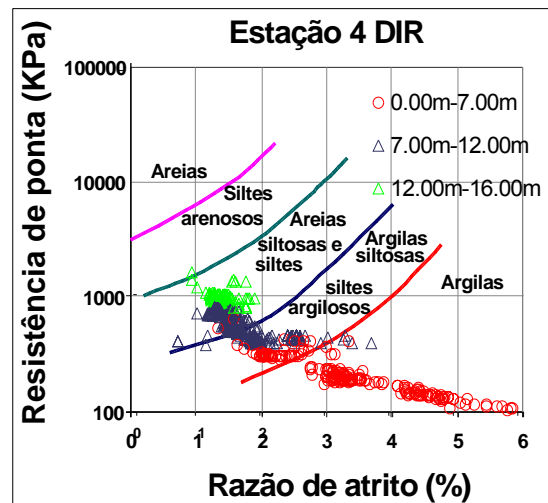
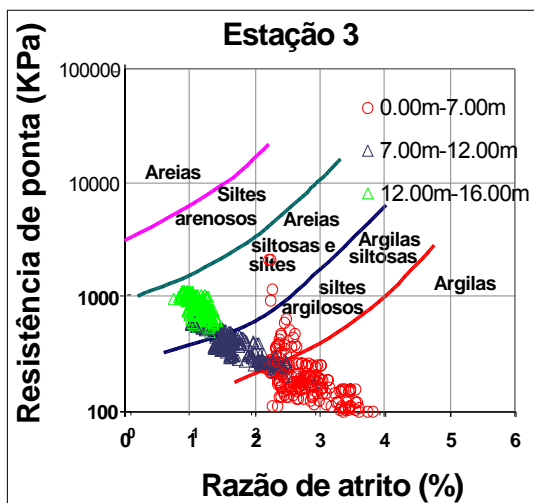
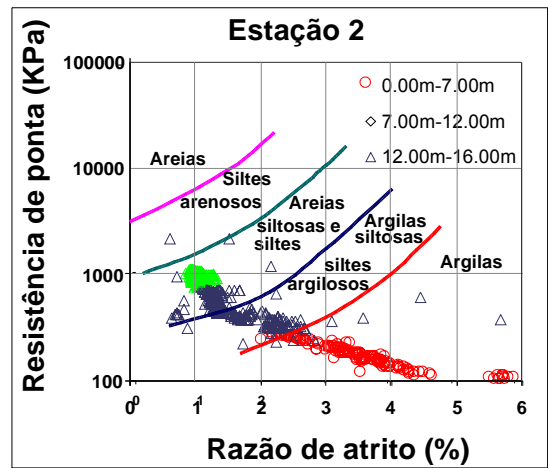
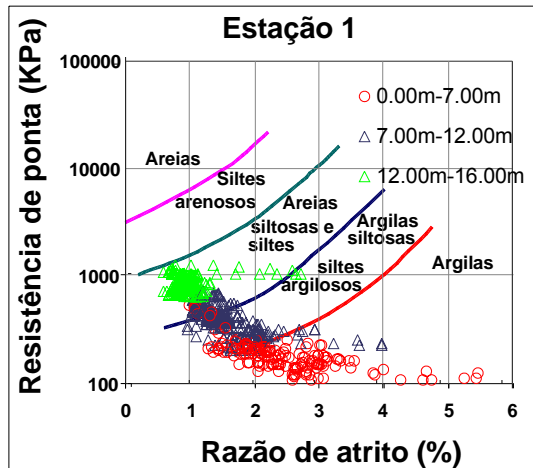


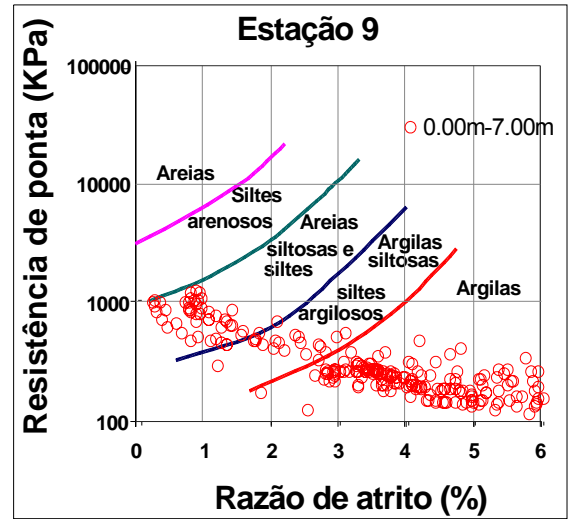
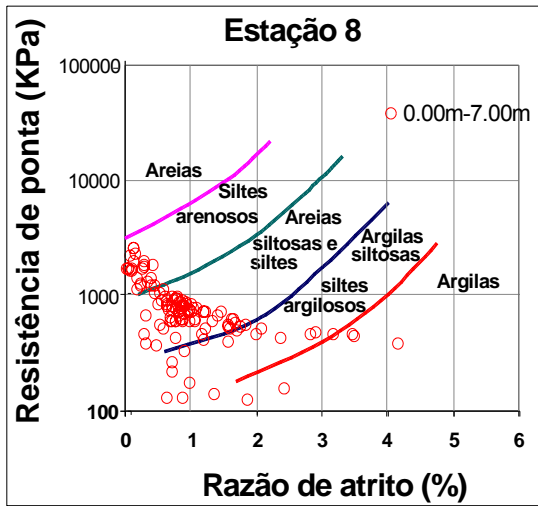


# Área - ARB#3

Propostas de classificação -CPTU - Campanha de 2005

▪ (ROBERTSON & CAMPANELLA, 1983)

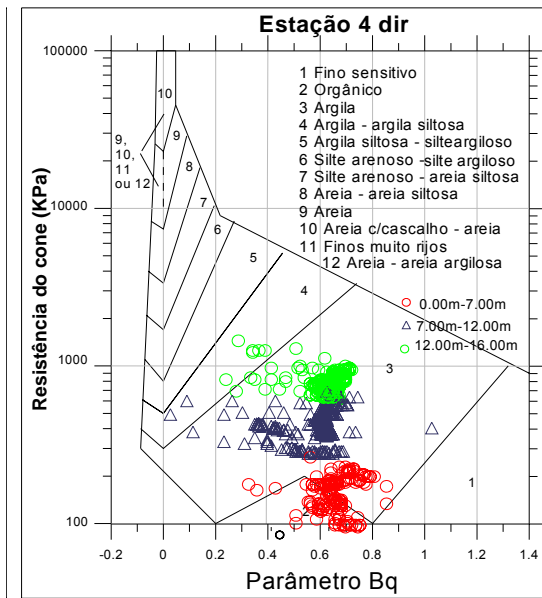
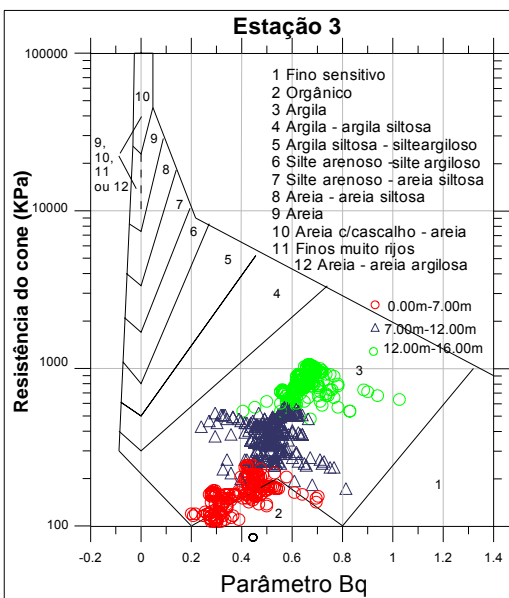
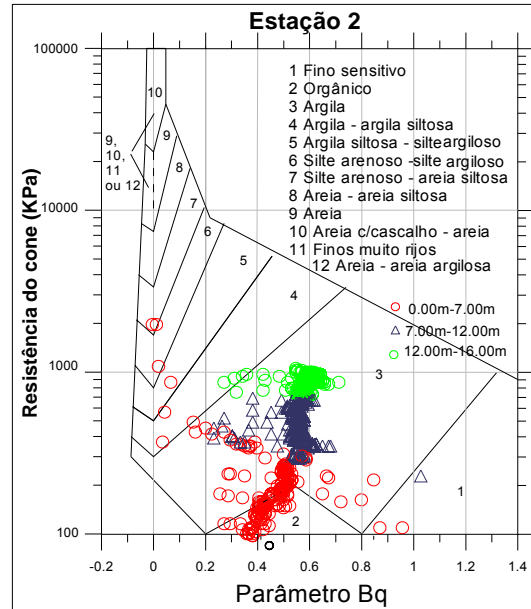
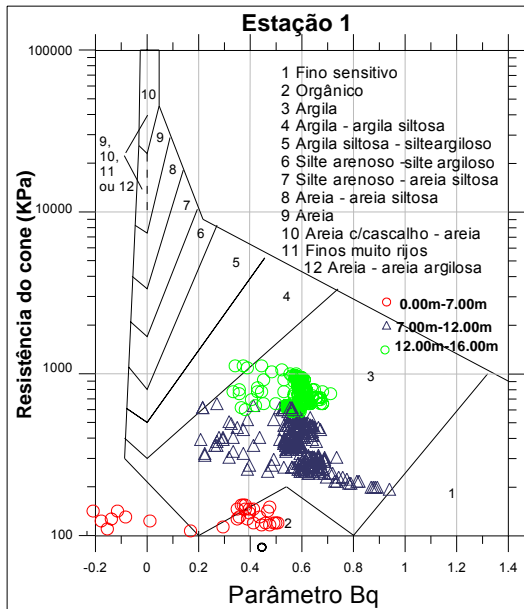




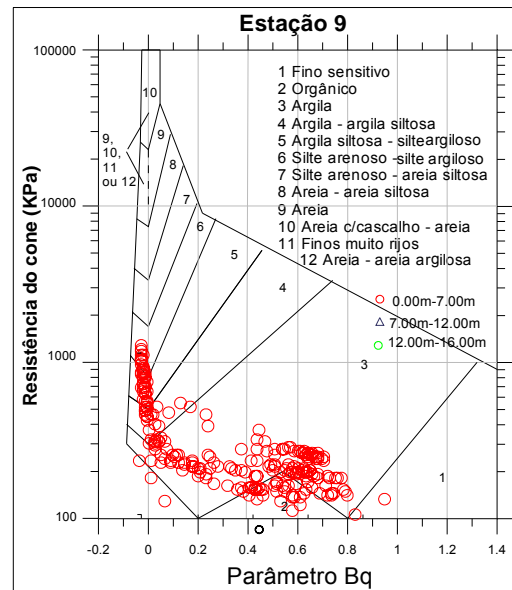
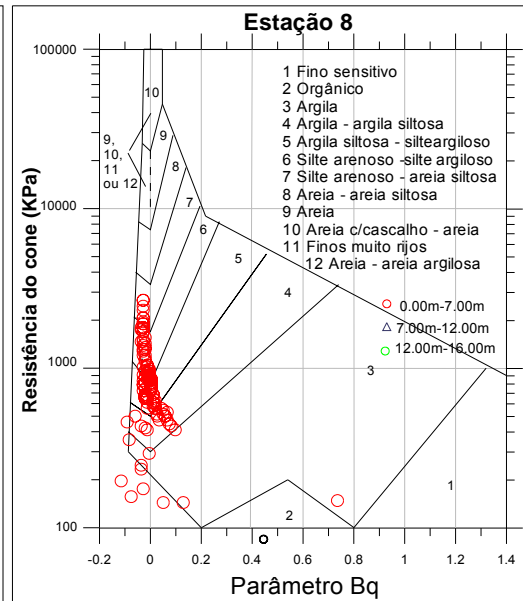
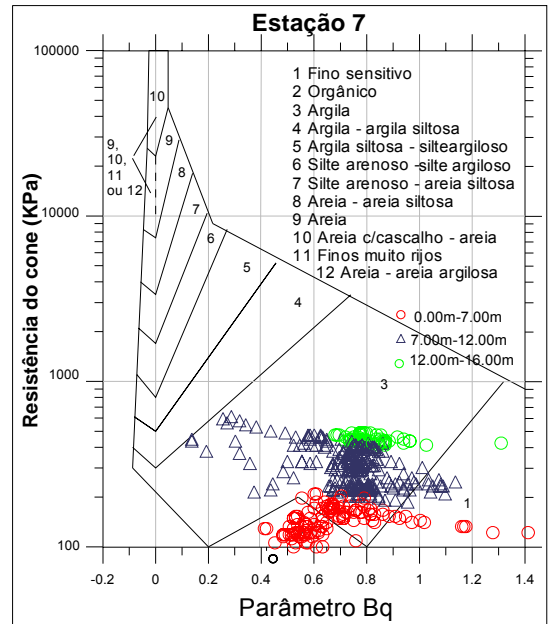
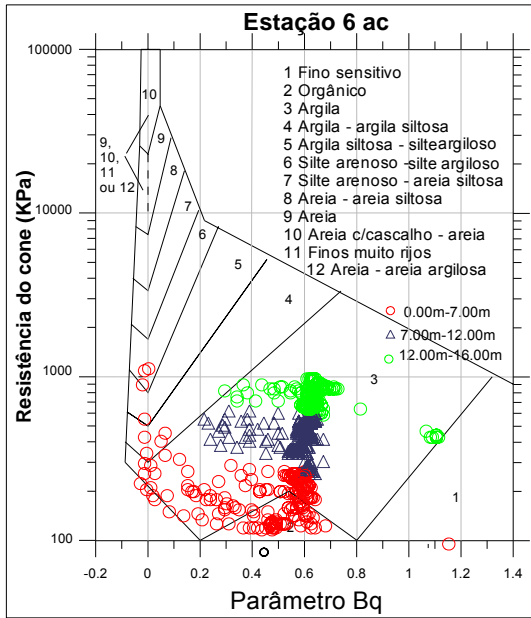
# Área - ARB#3

Propostas de classificação -CPTU - Campanha de 2005

▪ (ROBERTSON, 1986)





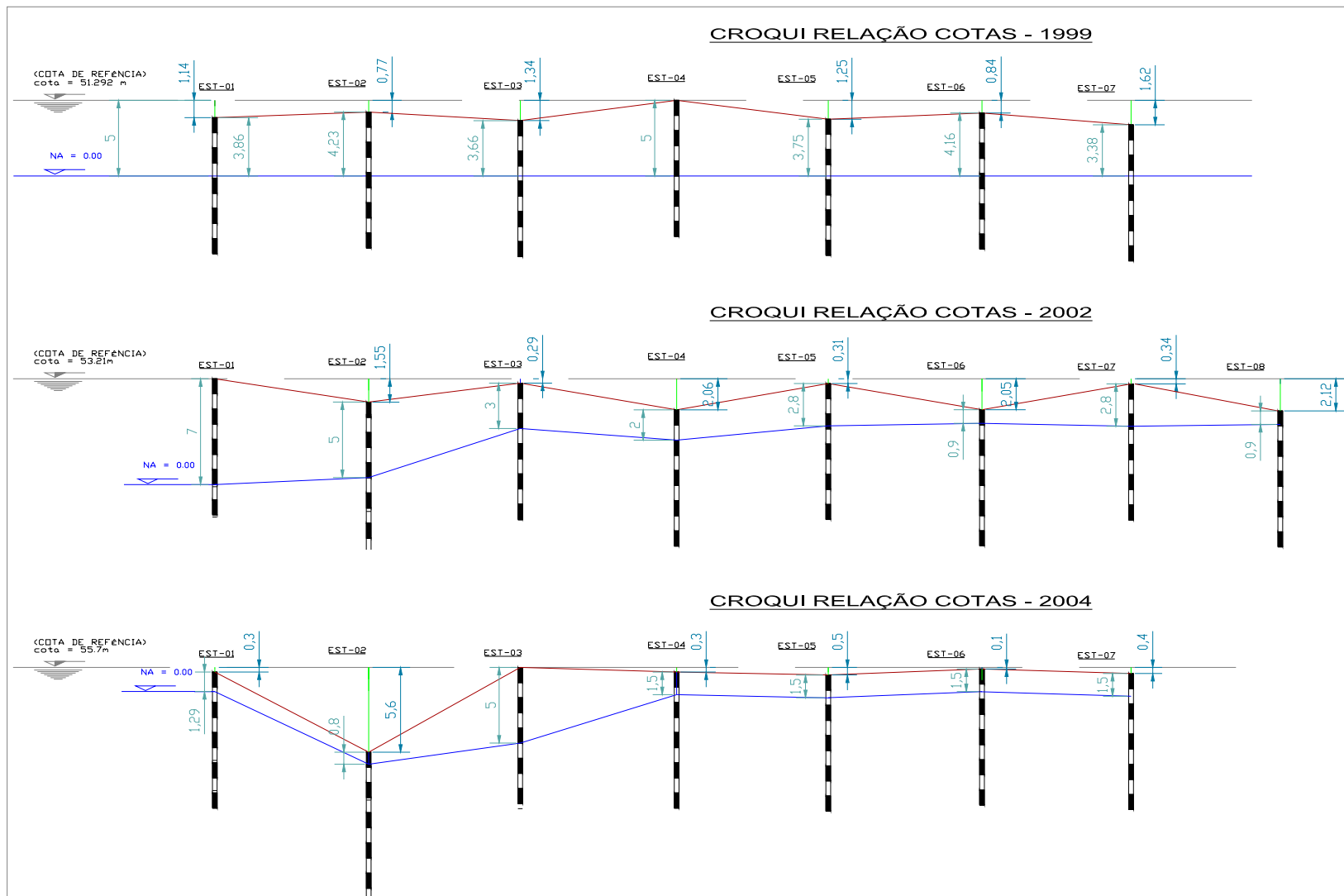


## ANEXO IV

# PERFIS INDICATIVOS DO NÍVEL DE ÁGUA E DO NÍVEL DO RESÍDUO DAS ÁREAS ARB#2 E ARB#3.

# Área - ARB#2

Estações de ensaios - Campanha de 1999, 2002 e 2004.



Interpretação de ensaios de piezocone em resíduos de bauxita

# Área - ARB#3

Estações de ensaios - Campanha de 2005.

