



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
ESCOLA DE MINAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA CIVIL



# **RETROANÁLISE DA FORMAÇÃO DE UM DEPÓSITO DE REJEITOS FINOS DE MINERAÇÃO CONSTRUÍDO PELO MÉTODO SUBAÉREO**

**AUTORA: LUCIANA DE MORAIS KELLY LIMA**

**ORIENTADOR: PROF. DR. WALDYR LOPES DE OLIVEIRA FILHO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração: Geotecnia.

Ouro Preto, agosto de 2006.

*Quando se sonha sozinho é apenas um sonho. Quando se sonha junto é o  
começo da realidade (D. Quixote).*

*Dedico esta dissertação aos meus pais, Luiz e Márcia,  
pelo incentivo, presença e amor incondicional. A vocês, meus exemplos,  
todo o mérito desta pesquisa.*

*Ao Rafael, minha paixão.*

## ***AGRADECIMENTOS***

---

Agradeço a Deus por permitir que o meu sonho se tornasse realidade.

Aos meus pais, pela dedicação e amor. As minhas maravilhosas irmãs, Dany e Gaby, pela amizade sincera.

Aos professores do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil e em especial ao meu amigo e orientador, Waldyr Lopes de Oliveira Filho, por todos os ensinamentos transmitidos.

Aos colegas do Programa de Pós Graduação - Rafael, Jeanne, Priscila, Rodrigo, Brasileu, Frank, Deilton, Germano, Kátia, Glaucitia, Gustavo, Alessandra e Gustavo – pelo companheirismo e amizade.

Aos professores Walter Dornellas e Luiz Gonzaga pela força.

A Fundação Gorceix pela bolsa de pesquisa. A Escola de Minas pela oportunidade.

A Samarco Mineração S.A. por confiar e financiar este projeto e em especial aos amigos Francisco Eduardo e Daviely Rodrigues.

Aos meus colegas da Pimenta de Ávila Consultoria pelo apoio e oportunidade de aplicar meus conhecimentos.

As minhas famílias de Ouro Preto: República Fogo de Palha e República Barraca Armada por me acolherem.

Ao Rafael, pelo amor, compreensão e auxílio em todos os momentos desta dissertação.

A Ouro Preto, pela magia que existe em suas ruas, em seus casarões, em suas ladeiras, em suas repúblicas, pelo CAEM, pelo carnaval, pela festa do 12...e principalmente por permitir que eu pudesse desfrutar de tudo isso.

A crescente exploração mineral contribui diretamente para o aumento na produção de rejeitos. Desta forma, áreas cada vez maiores são requeridas como destino final para seu armazenamento, que via de regra acontece de forma contínua, na condição natural, sem nenhum tipo de preparação para descarte. Essa prática gera depósitos com materiais de baixa densidade, muito compressíveis e com baixa capacidade de suporte. Essas características, que penalizam a estocagem e dificultam a reabilitação, têm sido objeto de estudos da engenharia geotécnica nas últimas décadas. Neste contexto surgiram contribuições importantes no conhecimento sobre as propriedades de engenharia dos rejeitos e também nas técnicas de disposição.

O presente trabalho examina um método alternativo de disposição de rejeitos finos conhecido como subaéreo, fazendo a retroanálise da formação de um depósito de rejeitos construído com essa técnica. O princípio desse método, que também se aplica a outros métodos alternativos, é o descarte de rejeitos em finas camadas, alternando ciclos de lançamento e espera (sem lançamento), permitindo a drenagem e/ou evaporação da água durante a espera. Essa operação permite a otimização de fenômenos físicos como adensamento e ressecamento do solo fino.

A abordagem utilizada nessa pesquisa para a retroanálise foi feita segundo duas frentes distintas, mas complementares. A primeira, mais qualitativa, tratou de identificar no terreno o perfil estratigráfico do depósito e sua história de formação. Isso foi possível através da análise de documentos diversos (projetos, relatórios, comunicações pessoais, fotos, etc.) e da realização de uma campanha de investigações geotécnicas de campo e de laboratório. A outra etapa, de cunho mais quantitativo, tratou da modelagem do método subaéreo através de solução numérica dos eventos de adensamento a grandes deformações e de ressecamento de solos finos, seguindo as etapas de enchimento e de espera previsto naquela técnica.

The growing mineral exploration generates increasing amounts of mining tailings that need to be properly disposed, requiring larger and larger areas. The conventional way of tailings disposal consists of spigotting tailings in a pulp form within an impoundment. This practice generates low density, compressible and soft deposits. These characteristics, which harm storage of tailings and make rehabilitation difficult, have been of concern to geotechnical engineers in the last decades. In this context, important developments on both engineering properties and tailings disposal have been made.

This work investigates an alternative method of fine tailings disposal, known as subaerial, by making a back analysis of a tailings deposit built using that construction technique. The method, which also applies to other alternative approaches, consists of discarding thin layers of tailings, alternating cycles of filling and resting (no deposition), and allowing drainage and/or evaporation to take place during the resting period. This operation leads to the optimization of physical processes such as consolidation and desiccation.

The research approach for the back analysis was done in two distinct but complementary fronts. The first - more qualitative, tried to identify the stratigraphic profile of the deposit and its formation history. This was made possible through document screening (design plans, technical reports, personal communications, photos, etc.) and by establishing a geotechnical program of field and laboratory investigations. The other front – more quantitative, sought to model the subaerial method by using numerical solutions of the soft soil large strain consolidation and desiccation events, following the filling and resting steps according to that technique.

AGRADECIMENTOS .....	iii
RESUMO .....	iv
ABSTRACT .....	v
ÍNDICE .....	vi
LISTA DE SÍMBOLOS .....	ix
LISTA DE FIGURAS .....	xi
LISTA DE TABELAS .....	xiv
CAPÍTULO 1 .....	1
INTRODUÇÃO .....	1
1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS .....	1
1.2 OBJETIVOS .....	3
1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO .....	4
CAPÍTULO 2 .....	6
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	6
2.1 DEPÓSITOS DE REJEITOS FINOS DE MINERAÇÃO .....	6
2.2 CONSISTÊNCIA DE REJEITOS FINOS (LAMA) .....	7
2.3 MÉTODOS CONVENCIONAIS DE DISPOSIÇÃO DE REJEITO FINO .....	8
2.4 MÉTODOS ALTERNATIVOS DE DISPOSIÇÃO DE REJEITO FINO .....	10
2.4.1 Método de Disposição de Lama Espessada (TTD) .....	10
2.4.2 Método de Disposição em Pasta .....	13
2.5 MÉTODO DE DISPOSIÇÃO SUBAÉREA .....	17
2.5.1 Fenômenos Físicos .....	18
2.5.2 Modelos Teóricos dos Fenômenos .....	19
2.5.4 Modelo Numérico dos Fenômenos .....	19
2.6 COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS ALTERNATIVOS .....	20
CAPÍTULO 3 .....	23
MATERIAIS E MÉTODOS .....	23

3.1 HISTÓRICO DO DEPÓSITO .....	23
3.2 INVESTIGAÇÃO DE CAMPO .....	26
3.2.1 Sondagens de Simples Reconhecimento com Medida de SPT .....	27
3.2.2 Ensaio de Piezocone.....	28
3.3 ENSAIOS DE LABORATÓRIO .....	32
3.3.1 Amostragem .....	33
3.3.2 Mapeamento das Amostras .....	34
3.3.3 Ensaio de Caracterização Básica .....	35
CAPÍTULO 4.....	37
APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	37
4.1 SONDAGEM DE SIMPLES RECONHECIMENTO COM MEDIDA DE $N_{SPT}$ .....	38
4.2 ENSAIO DE PIEZOCONES.....	42
4.2.1 Ensaio de Piezocone Realizado na Área Central .....	42
4.2.2 Ensaio de Piezocone Realizado no Dique .....	45
4.3 ENSAIOS DE LABORATÓRIO .....	48
4.4 CALIBRAÇÃO TEXTURAL.....	54
4.5 PERFIL ESTRATIGRÁFICO DA ÁREA CENTRAL .....	60
CAPÍTULO 5.....	68
RETROANÁLISE DA FORMAÇÃO DO DEPÓSITO .....	68
5.1 MODELO QUALITATIVO DA FORMAÇÃO DO DEPÓSITO .....	68
5.2 MODELAGEM NUMÉRICA DO MÉTODO SUBAÉREO - ALGORITMO ....	70
5.3 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS DO MÉTODO SUBAÉREO - MANEJOS .....	72
5.3.1 Aplicação do Algoritmo para Tempo de Espera Constante .....	72
5.3.2 Aplicação do Algoritmo para Tempo de Espera Variável.....	75
5.4 RETROANÁLISE DA FORMAÇÃO DO DEPÓSITO ATRAVÉS DO ALGORITMO NUMÉRICO.....	78
5.4.1 Considerações Iniciais.....	78
5.4.2 Simulação da Formação do Depósito.....	79
5.4.3 Resultados das Análises .....	80
5.4.4 Outras Considerações de Manejo e Projeto .....	83
5.5 CONCLUSÃO SOBRE O MANEJO REALIZADO .....	84
CAPÍTULO 6.....	86
CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	86

6.1 CONCLUSÕES.....	86
6.1.1 Ensaios de Campo .....	86
6.1.2 Ensaios de Laboratório.....	87
6.1.3 Simulações Numéricas .....	88
6.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS .....	89
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	91
APÊNDICE A.....	96
APÊNDICE B .....	110



## ***LISTA DE SÍMBOLOS***

---

a	Coordenada lagrangeana
A	Razão de áreas do piezocone
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society Test Method
Bq	Coefficiente de poropressão
CPTU	Ensaio de piezocone
e	Índice de vazios
$e_0$	Índice de vazios inicial
$e_{00}$	Índice de vazios para tensão efetiva igual a zero
$e_{\min}$	Índice de vazios mínimo
FR	Razão de atrito
Gs	Densidade real dos grãos
$H_0$	Altura inicial da camada
ICOLD	International Congress on Large Dams
IP	Índice de plasticidade
k	Coefficiente de permeabilidade
LC	Limite de contração
LL	Limite de liquidez
LP	Limite de plasticidade
MB	Método Brasileiro
MHE	Mistura heterogênea
MHO	Mistura homogênea
NA	Nível d'água
NBR	Norma Brasileira
$q_c$	Resistência de ponta
$q_T$	Resistência de ponta corrigida
Q	Parâmetro de classificação dos solos de Robertson (1990)
SPT	Sondagem a Percussão

$t$	Tempo
TTD	Thickened Tailings Disposal
$u_0$	Poropressão hidrostática
$u_2$	Poropressão dinâmica
$\gamma_w$	Peso específico da água
$\sigma$	Tensão vertical efetiva
$\sigma_{v0}$	Tensão vertical in situ

## ***LISTA DE FIGURAS***

---

### **CAPÍTULO 2**

Figura 2. 1 – Concentração da lama versus resistência (Modificado ICOLD, 2002).....	8
Figura 2. 2– Métodos convencionais de disposição de rejeitos (Ribeiro , 2000) .....	9
Figura 2. 3 – Disposição de lama espessada, TTD .....	11
Figura 2. 4 - Comparação, em um mesmo local de, (a) Método de disposição convencional e, (b) método de disposição espessada (Modificado – Robinsky, 2000) .....	12
Figura 2. 5 – Comparação da área requerida pelo método de disposição convencional e de disposição de lama espessada, TTD (Robinsky, 2000) .....	13
Figura 2. 6– (a) Slump de pasta 250 mm, e (b) Slump de pasta 175mm (Grabinsky et al. 2002) .....	14
Figura 2. 7 – Disposição de finas camadas de rejeitos em pasta (Theriault et al., 2003).....	15
Figura 2. 8 – Rejeitos recentemente lançados (Theriault et al., 2003) .....	15
Figura 2. 9 - Período de espera, note as trincas de ressecamento (Theriault et al., 2003) .....	16
Figura 2. 10 - Camada depositada sobre uma camada ressecada (Theriault et al., 2003) .....	16
Figura 2. 11 - Fases do método construtivo subaéreo: (a) Período de enchimento – fenômenos de sedimentação e adensamento, e (b) período de espera – fenômenos de adensamento e ressecamento (Modificado: Almeida, 2004) .....	18

### **CAPÍTULO 3**

Figura 3. 1— Baias de ressecamento (depósitos) na barragem de Germano, .....	25
Figura 3. 2 – Locais onde foram realizadas as investigações de campo.....	27
Figura 3. 3 – (a)Vista do acesso construído na área central e, (b) vista do acesso a partir do dique .....	28
Figura 3. 4 – (a) Máquina de cravação, (b) montagem do equipamento e, (c) detalhe da ancoragem .....	29
Figura 3. 5 – Piezocone utilizado no ensaio de campo .....	29
Figura 3. 6 - Proposta de classificação dos solos de Robertson & Campanella (1983)..	30
Figura 3. 7 - Proposta de classificação dos solos de Senneset et al., 1989.....	30

Figura 3. 8 - Proposta de classificação dos solos Robertson, 1990 .....	31
Figura 3. 9 – Amostragem tipo Shelby, (a) equipamento de sondagem mista utilizado no avanço da sondagem, (b) detalhe do tubo de revestimento, (c) amostrador Shelby, (d) montagem do amostrador, (e) amostras coletadas e, (e) acondicionamento dos shelbies nas caixas com as camisas envoltas com serragem úmida .....	34
Figura 3. 10 - Materiais encontrados nos amostradores .....	35

## CAPÍTULO 4

Figura 4. 1 – Perfil de sondagem realizado na área central, elevação 905,00 m .....	38
Figura 4. 2 – Perfil de sondagem realizados nas proximidades dique, cota 907,50 m ...	39
Figura 4. 3 – Perfil de sondagem da área central e do dique. ....	41
Figura 4. 4 – Amostras deformadas retiradas dos ensaios de sondagem .....	41
Figura 4. 5 – Perfil de resistência de ponta corrigida obtido do ensaio de piezocone realizado na área central do depósito (Adaptado: Relatório In Situ Geotecnia Ltda) .....	43
Figura 4. 6 – Perfil de razão de atrito obtido do ensaio de piezocone realizado na área central do depósito (Adaptado: Relatório In Situ Geotecnia Ltda) .....	43
Figura 4. 7 – Perfis de poropressão dinâmica e de poropressão hidrostática obtidos do ensaio de piezocone realizado na área central do depósito (Adaptado: Relatório In Situ Geotecnia Ltda) .....	44
Figura 4. 8 – Perfil de coeficiente de poropressão do ensaio realizado na área central do depósito .....	44
Figura 4. 9 – Perfil de resistência de ponta corrigida obtida do ensaio de piezocone realizado no dique (Adaptado: Relatório In Situ Geotecnia Ltda) .....	46
Figura 4. 10 – Perfil de razão de atrito obtido do ensaio de piezocone realizado no dique .....	47
Figura 4. 11 – Perfis de poropressão dinâmica e de poropressão hidrostática obtidos do ensaio de piezocone realizado no dique(Adaptado: Relatório In Situ Geotecnia Ltda) .....	47
Figura 4. 12 – Perfil de coeficiente de poropressão do ensaio realizado no dique .....	48
Figura 4. 13 – Porcentagens de areia, silte e argila .....	51
Figura 4. 14 – Carta de Plasticidade de Casagrande aplicada aos resultados dos ensaios de limites (Modificado: Holtz & Kovacs,1981) .....	52
Figura 4. 15 – Perfil de umidade do dique, (a) de cada amostra em uma mesma elevação e (b) média de todas as amostras em uma mesma elevação .....	52
Figura 4. 16 – Perfil de peso específico natural do solo média de todas as amostras em uma mesma elevação .....	53

Figura 4. 17 – Proposta de classificação de Robertson e Campanella (1983) aplicada aos resultados do dique: (a) aplicada a todos os resultados, (b) aplicada as elevações 902,25 a 895,00 m, (c) aplicada as elevações 895,00 a 893,00 e, aplicadas as elevações 893,00 a 885,00 m .....	55
Figura 4. 18 – Proposta de classificação de Senneset et al. (1989) aplicada aos resultados do ensaio realizado no dique: (a) aplicada a todos os resultados, (b) aplicada as elevações 902,25 a 895,00 m, (c) aplicada as elevações 895,00 a 893,00 e, aplicadas as elevações 893,00 a 885,00 m .....	56
Figura 4. 19.– Proposta de classificação de Robertson (1990) aplicada aos resultados do ensaio realizado no dique: (a) aplicada a todos os resultados, (b) aplicados às elevações 902,25 a 895,00 m, (c) aplicada às elevações 895,00 a 893,00 e, aplicadas às elevações 893,00 a 885,00 m .....	58
Figura 4. 20 – Proposta de classificação de Senneset et al. (1989) aplicada aos resultados do ensaio realizado na área central .....	62
Figura 4. 21 – Perfil estratigráfico da área centra .....	66

## CAPÍTULO 5

Figura 5. 1 – Esquema de operação da draga .....	69
Figura 5. 2 – Ciclos de enchimento e de espera.....	71
Figura 5. 3 – Perfil de índice de vazios.....	71
Figura 5. 4 – (a) Curva de altura do depósito versus tempo e, (b) Perfil de índice de vazios.....	74
Figura 5. 5 – Análises com tempo de espera variável (a) Curva de altura do depósito versus tempo e, (b) Evolução do perfil de índice de vazios.....	77
Figura 5. 6 – Curva de enchimento obtida pelo registro da draga durante o período de abril de 2004 a agosto de 2005 (Dados: Samarco Mineração S.A. – Registros da draga).....	79
Figura 5. 7 – Altura do depósito investigado.....	82
Figura 5.8 – Evolução do perfil de índice de vazios do depósito investigado.....	83
Figura 5. 9 – Variação da altura do depósito em relação aos fenômenos físicos sofridos pela lama .....	84

## ***LISTA DE TABELAS***

---

### **CAPÍTULO 2**

Tabela 2. 1 - Comparação entre os métodos alternativos de disposição de rejeito.....	21
--	----

### **CAPÍTULO 3**

Tabela 3. 1 – Elevações do dique auxiliar e das baías 1, 2, 3, 4 e 5, em setembro de 2005.....	25
Tabela 3. 2 – Quadro complementar da proposta de Senneiset et al.,1989 .....	31
Tabela 3. 3 - Proposta de classificação dos solos Robertson, 1990.....	31
Tabela 3. 4 - Programa de ensaios laboratoriais do dique .....	32

### **CAPÍTULO 4**

Tabela 4. 1– Classificação de solos segundo a NBR 7.250/82 (Schnaid, 2000). .....	40
Tabela 4. 2 – Classificação táctil-visual do solo investigado nas proximidades do dique .....	49
Tabela 4. 3 - Resultados dos ensaios de granulometria e de limites realizados nas amostras recolhidas das proximidades do dique (Adaptado: Relatório Parcial de Ensaios –UFV). .....	50
Tabela 4. 4 - Resultados dos ensaios de massa específica dos sólidos, massa específica natural e umidade realizados nas amostras recolhidas das proximidades do dique. (Adaptado: Relatório Parcial de Ensaios –UFV). .....	51
Tabela 4. 5 – Classificação textural do solo investigado nas proximidades do dique...	53
Tabela 4. 6 – Classificação do perfil de solo do dique a partir da proposta .....	59
Tabela 4. 7 – Classificação do perfil de solo do dique a partir da proposta de .....	59
Tabela 4. 8 – Classificação do perfil de solo do dique a partir da proposta de .....	59

### **CAPÍTULO 5**

Tabela 5. 1- Período dos ciclos de 1 a 8, considerando tempo de espera constante.....	73
Tabela 5. 2– Intervalos de tempo dos ciclos 1 ao 8 considerando o ressecamento constante.....	73

Tabela 5. 3– Intervalos de tempo dos ciclos 1 ao 8 considerando o tempo de espera variável.....	76
Tabela 5. 4– Resultados dos altura do depósito com o tempo.....	81

## **INTRODUÇÃO**

### **1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS**

Rejeitos são resíduos provenientes dos processos de beneficiamento e concentração de minérios. São materiais fabricados cujas propriedades dependem, num primeiro momento, das características de beneficiamento e do tipo de mineral lavrado. Posteriormente estas propriedades passam a ser afetadas também pelo modo da sua disposição final.

Normalmente, os rejeitos são descartados na condição de uma polpa fluida e têm sua disposição final na forma conhecida como convencional. Nesse caso, o lançamento do material se faz de uma maneira contínua e natural (sem mudança na sua consistência) numa grande área confinada por diques ou barragens. O local de lançamento dependerá em geral da textura dos rejeitos. A fração mais grosseira é depositada próxima à crista da barragem, sendo, inclusive, utilizada como material de construção de seus alteamentos. Já a fração fina é lançada diretamente no reservatório formando, posteriormente, o lago.

No reservatório, o rejeito fino, também conhecido como lama, passa basicamente por dois fenômenos físicos: a sedimentação e o adensamento por peso próprio. Esses processos liberam o licor ou a água do processo, drenando para a superfície e eventualmente também para a fundação se essa for permeável. A água superficial geralmente não é eliminada e, por consequência, o rejeito permanece saturado por um longo período de tempo (Norman & Raforth, 1998).



Além do método convencional de descarte de rejeitos finos de mineração, foram desenvolvidas outras técnicas alternativas. Nos métodos alternativos de disposição de rejeito fino, a camada de água superficial resultante da sedimentação e adensamento é eliminada, seja por drenagem e/ou evaporação, e o solo então passa a sofrer também o fenômeno de ressecamento (secagem). Esse se divide em dois estágios distintos: um de contração unidimensional (deformações verticais) e outro de contração tridimensional (deformações verticais e laterais) com conseqüente abertura e propagação das trincas (Abu-Hejleh, 1993). Com a continuidade do processo de secagem, o material pode passar ainda pelo estágio de desaturação, onde o solo já na condição não saturada continua a perder água de seus vazios, mas sem nenhuma variação volumétrica.

Ao longo de todos esses processos físicos, as propriedades e as características do rejeito são alteradas. O resultado é um material cada vez mais densificado, com maior teor de sólidos, menor índice de vazios, menos permeável e mais resistente. Segundo Konrad (1997), uma maior consistência do material ajuda a maximizar a capacidade de armazenamento do reservatório e permite que o local de disposição seja reabilitado em períodos de tempo relativamente menores.

Isso explica o interesse crescente pelos métodos alternativos na disposição de rejeitos: o de permitir maiores volumes de material estocado em menores áreas, associados a um ganho de resistência do solo em poucos dias (ICOLD, 2002).

Dentro desse contexto, destacam-se alguns métodos alternativos que vêm ganhando cada vez mais a aceitação de estudiosos, de empresas mineradoras e de consultores geotécnicos. Isto inclui a disposição subaérea (objeto de estudo desta pesquisa), a disposição de lama espessada (“thickened tailings disposal”) e a disposição em pasta.

O método de disposição subaérea é considerado o método mais fácil e de menor custo dentre os acima citados. É definido como um método em que os rejeitos são lançados em finas camadas, depositadas em ciclos de lançamento e de espera (interrupção do lançamento), permitindo seu adensamento e drenagem antes do lançamento da camada seguinte. A técnica, portanto, permite que as mudanças na consistência do rejeito ocorram durante aquelas etapas, o que significa que os fenômenos físicos de

adensamento, principal responsável pela densificação, e de ressecamento, importante para o ganho de resistência, sejam promovidos.

Estas mudanças podem ser monitoradas com o decorrer da construção do depósito ou podem ser conhecidas indiretamente por meio de investigações de campo e de laboratório quando o depósito já se encontra formado. Nesse último caso, o depósito de rejeitos finos fabricados necessita ser investigado quanto ao seu perfil estratigráfico, exigindo uma diretriz metodológica de investigação que envolva partes de campo e de laboratório.

## **1.2 OBJETIVOS**

A presente dissertação de mestrado tem como objetivo principal a retroanálise da formação de um depósito de rejeito fino de mineração construído pelo método de disposição subaérea. Este trabalho faz parte de um extenso programa de caracterização, calibração e análise do comportamento do rejeito fino oriundo do processo de beneficiamento do minério de ferro da Samarco Mineração S.A., em Mariana, Minas Geras.

Nesse contexto, esta dissertação dá continuidade aos trabalhos de Silva (2003) e de Almeida (2004). Silva (2003) investigou as propriedades geotécnicas do rejeito fino numa situação de campo através de um programa de monitoramento em uma área teste. Completando o estudo de Silva (2003), Almeida (2004), calibrou os modelos de adensamento e ressecamento do material.

A presente pesquisa utiliza os conhecimentos sobre o comportamento do rejeito fino a serem aplicados na modelagem de um método construtivo alternativo. O método em estudo foi o subaéreo, e o trabalho foi realizado com base na retroanálise de um depósito já formado, construído segundo essa técnica.

Além de todo trabalho de modelagem do método construtivo, um esforço foi realizado no sentido de obter o perfil estratigráfico do depósito de estudado. Para isso uma extensa campanha de investigações foi desenvolvida de modo a se conhecer qualitativa e quantitativamente as características do material reservado no depósito.

Essa investigação envolveu ensaios de campo e de laboratório onde foram realizados sondagens de simples reconhecimento com medida de SPT, ensaios de piezocone, coleta de amostras indeformadas através de amostrador tipo Shelby, além de ensaios de caracterização. Das amostras coletadas foram obtidas propriedades-índice dos materiais tais como a granulometria, limites de consistência, massa específica dos sólidos, teor de umidade e massa específica natural.

Concomitantemente aos ensaios, promoveu-se também um levantamento histórico/documental do depósito o qual possibilitou importantes informações sobre cronogramas, volume e tipos de materiais lançados no local.

### **1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO**

Esta dissertação está organizada em seis capítulos, incluindo o presente capítulo introdutório onde são apresentadas as considerações iniciais, objetivos e estruturação da dissertação.

O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica onde são abordados os métodos de disposição de rejeitos, convencionais e alternativos. Destaque para o método subaéreo, cuja aplicabilidade e investigação são objetivos deste trabalho. Dentro dessa técnica de disposição, os modelos teórico e numérico dos processos físicos envolvidos são analisados, como é o caso do adensamento e do ressecamento.

O capítulo 3 descreve o programa experimental realizado no depósito investigado, destacando o modo como os ensaios foram realizados. Este capítulo foi dividido em duas partes distintas, investigações de campo e ensaios de laboratório.

No capítulo 4, são apresentados os resultados de todos os ensaios - campo e laboratório. Além disso, os resultados são interpretados e discutidos de forma a definir o perfil estratigráfico do depósito. Para a definição do perfil estratigráfico foi feita uma calibração textural dos resultados dos ensaios de piezocone.

O capítulo 5 inicialmente apresenta uma interpretação qualitativa sobre o perfil estratigráfico do depósito no que diz respeito à sua formação. Em seguida, apresenta-se o algoritmo elaborado para a modelagem do método de disposição subaérea. A seguir

são feitas algumas aplicações do algoritmo a situações práticas que permitam avaliar a eficiência do método construtivo. Faz-se depois a modelagem do caso de estudo, utilizando-se dados históricos da formação do depósito. Por último é feita uma avaliação quanto à eficiência do método construtivo no caso estudado.

O capítulo 6 apresenta as conclusões com base nas análises efetuadas nos capítulos anteriores e as principais sugestões para a continuidade desta pesquisa.

Compõe também este trabalho, a lista de referências bibliográficas e os Apêndices A e B. Nos Apêndices A e B são mostrados maiores detalhes dos resultados dos ensaios de piezocone realizados na área central do depósito e nas proximidades do dique, respectivamente, aplicados a algumas propostas de classificação do tipo de solo.

## **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste capítulo, apresentam-se os estudos dos principais tópicos envolvidos na elaboração da dissertação. A abordagem compreende algumas definições importantes sobre os depósitos de rejeitos finos como a consistência dos materiais depositados e os métodos utilizados para a disposição: convencionais ou alternativos, destacando-se a disposição subaérea.

### **2.1 DEPÓSITOS DE REJEITOS FINOS DE MINERAÇÃO**

Os depósitos de rejeitos finos de mineração, embora fabricados, apresentam comportamento semelhante a depósitos naturais de solos moles devido a algumas semelhanças como, por exemplo, a alta compressibilidade e baixa permeabilidade desses materiais. Esse fato permite que os conhecimentos de engenharia sobre os solos moles possam ajudar a explicar o comportamento dos depósitos (reservatórios) de rejeitos finos.

Segundo Massad (2003), solos moles são solos sedimentares com baixa resistência à penetração (valores de SPT não superiores a 4 golpes), em que a fração argila imprime as características de solo coesivo e compressível.

O comportamento desses solos depende, dentre outros fatores, do teor de umidade, do estado de tensão em que está submetido e de sua composição mineralógica. Inclusive, a porcentagem da fração argila desempenha papel fundamental na determinação de algumas características e propriedades dos solos moles tais como a compressibilidade, a permeabilidade e a resistência (Spannenberg, 2003).

Essas propriedades são extremamente importantes na análise de recalques e na determinação da capacidade de suporte do depósito. Em materiais dragados e em rejeitos finos de mineração são esperadas grandes deformações em relação à espessura inicial da camada em análise (Botelho, 2001) e, portanto, a teoria de grandes deformações se enquadra perfeitamente nestas análises.

## **2.2 CONSISTÊNCIA DE REJEITOS FINOS (LAMA)**

Os rejeitos finos são materiais em geral plásticos, altamente compressíveis, constituídos de siltes e argilas. Convencionalmente são depositados como uma lama (fluida) com grande quantidade de água em sua composição, sendo esta geralmente transportada através de canais ou tubulações.

Quando depositados por métodos alternativos, estes materiais apresentam um teor de sólidos (razão entre volume de sólidos e volume total) maior que quando depositados de forma convencional. Dentre os métodos alternativos de disposição, destacam-se, numa ordem de menor para maior densidade do rejeito lançado, os seguintes métodos: disposição subaérea, disposição espessada e disposição em pasta.

A Figura 2.1 mostra as diferentes densidades que o rejeito fino pode apresentar dependendo da forma como é disposto: convencional ou alternativa. Nesta figura uma relação idealizada entre densidade e resistência não drenada do rejeito fino mostra que quanto mais denso for o material maior é sua resistência, ou seja, a resistência é uma função crescente da densidade do material e, portanto, inversamente proporcional ao índice de vazios (ICOLD, 2002).

Na figura são apresentados também os diferentes meios de transporte da lama (bombas de gravidade ou centrífugas), os quais variam de acordo com sua consistência, bem como os possíveis equipamentos utilizados para sua densificação (filtros a vácuo e centrífugas).

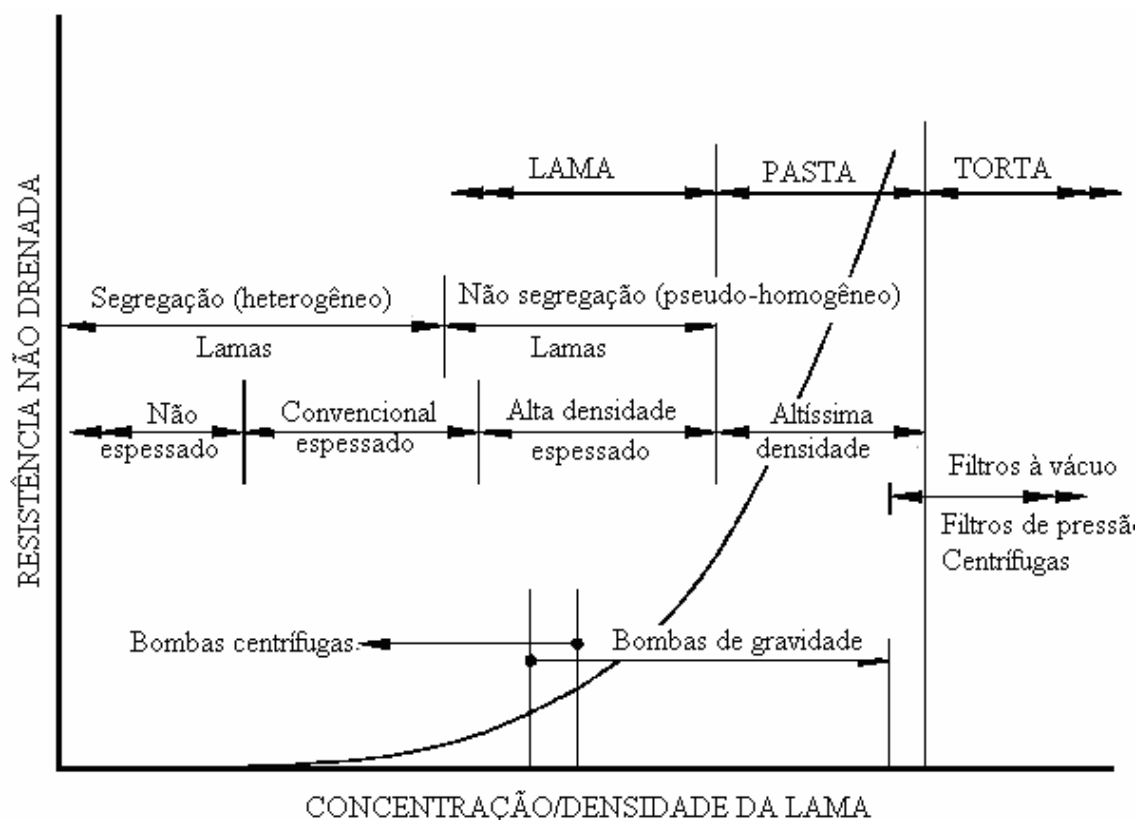


Figura 2. 1 – Concentração da lama versus resistência (Modificado ICOLD, 2002)

### 2.3 MÉTODOS CONVENCIONAIS DE DISPOSIÇÃO DE REJEITO FINO

Os métodos convencionais se caracterizam pela disposição dos rejeitos na sua condição natural, isto é, como descartados pelas plantas de beneficiamento, em geral, consistindo numa lama fluida de baixa densidade (sem espessamento e sem adição de aglomerantes).

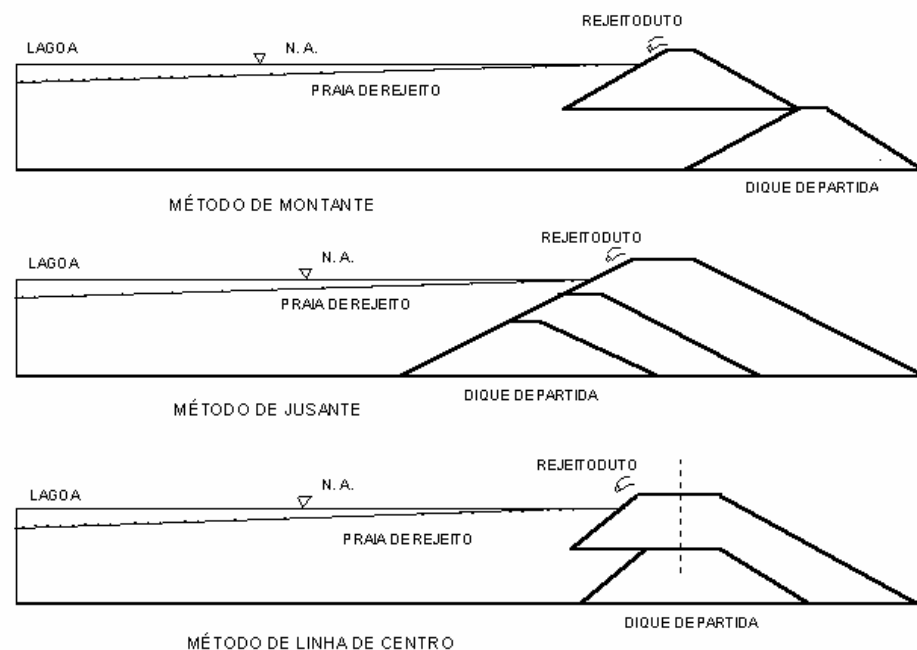
Nesses métodos, a disposição é feita de forma contínua e grandes áreas são ocupadas, o que requer estruturas como diques ou barragens para a sua contenção. Seu lançamento normalmente é realizado por meio de hidrociclones ou canhões (spigots). Os hidrociclones podem ser utilizados tanto na planta de beneficiamento como próximo à barragem tendo a função de separar as diferentes frações granulométricas constituintes do rejeito, denominadas underflow (rejeito arenoso) e overflow (rejeito fino ou lama). Cada uma destas frações apresenta características peculiares e aplicações específicas.

O underflow geralmente é lançado na crista da barragem e, muitas vezes, é usado como material de sua construção devido às boas características de drenagem e resistência. Já a

lama é lançada diretamente no reservatório formando o lago (reservatório). Neste local o rejeito pode permanecer saturado por anos se a água resultante dos processos de sedimentação e de adensamento não for eliminada, seja por evaporação e/ou por drenagem. Assim grandes áreas de armazenamento e estruturas de contenções robustas são necessárias para garantir o confinamento dos materiais e a segurança do depósito.

Essas estruturas podem ser construídas a partir de materiais naturais (empréstimo) ou a partir da utilização do próprio rejeito (no caso, arenoso). A última solução é vantajosa no sentido de economia em relação ao material de construção e também como destino final de armazenamento.

Existem três métodos principais na construção de barragens que podem usar o próprio rejeito como material de construção. As configurações básicas destes métodos de disposição são: alteamento para montante, alteamento para jusante e alteamento pela linha de centro (Vick, 1983). A escolha de um desses métodos depende, dentre outros fatores, da topografia, das características do próprio rejeito, do clima e da área de armazenamento. A Figura 2.2 ilustra os três métodos citados.



**Figura 2. 2– Métodos convencionais de disposição de rejeitos (Ribeiro, 2000)**



## **2.4 MÉTODOS ALTERNATIVOS DE DISPOSIÇÃO DE REJEITO FINO**

Embora a técnica convencional seja o método predominantemente utilizado na disposição de rejeitos, os métodos que modificam a consistência inicial da lama antes do descarte estão ganhando cada vez mais a aceitação de empresas mineradoras e tornando-se cada vez mais utilizados (Norman & Raforth, 1998).

Esses métodos surgem com a idéia de otimizar ainda mais os volumes de reservação e aumentar a segurança do sistema de rejeitos (reservatório e contenções). Possibilitam estruturas mais estáveis, rápida reabilitação da área, diminuição das taxas de percolação, minimização do potencial poluidor ao longo do tempo, melhor aproveitamento da água e menores impactos ao meio ambiente (ICOLD, 2002).

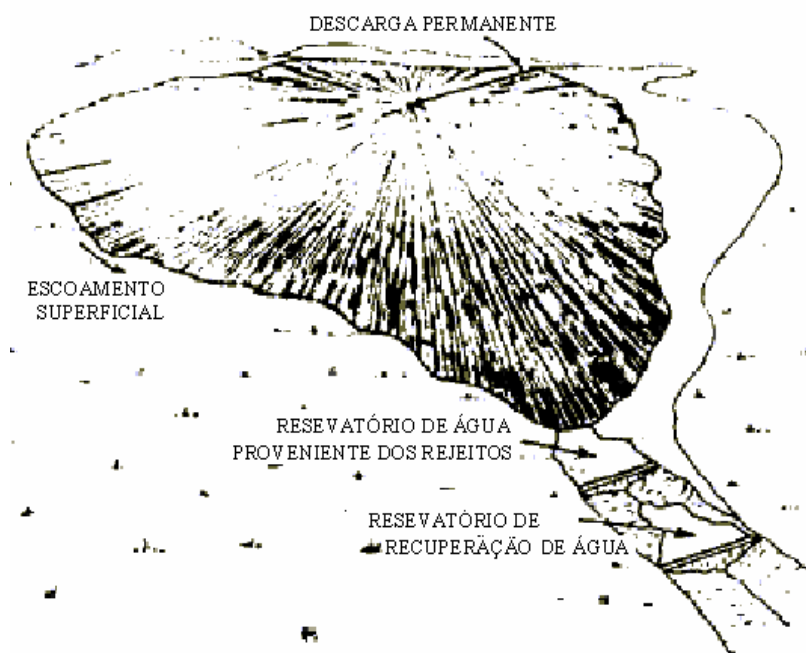
Ao se dispor os rejeitos estes podem passar basicamente por quatro fenômenos físicos: sedimentação, adensamento, ressecamento e eventualmente chegam ao estágio de desaturação. A ocorrência e intensidade destes fenômenos dependem de vários fatores, sendo que o método de disposição merece um destaque especial.

Em todos esses métodos é esperado um aumento do teor de sólidos e o conseqüente aumento da resistência do material, sendo os fenômenos do adensamento e do ressecamento responsáveis por isso. A efetivação destes processos acontece através da disposição do rejeito em finas camadas e em ciclos regulares de lançamento e espera (interrupção de lançamento). Experiências demonstram que camadas muito espessas não permitem adequada densificação e ganham resistência vagarosamente (Theriault et al., 2003).

Os principais métodos alternativos de disposição estão detalhados nos itens a seguir, salvo a disposição subaérea apresentada separadamente no item 2.5.

### **2.4.1 Método de Disposição de Lama Espessada (TTD)**

O método de disposição espessada (“Thickened discharge” ou “Central discharge”) foi concebido por Shields (1974) e desenvolvido por Robinsky em 1979 (Vick, 1983) sendo ilustrado na Figura 2.3.



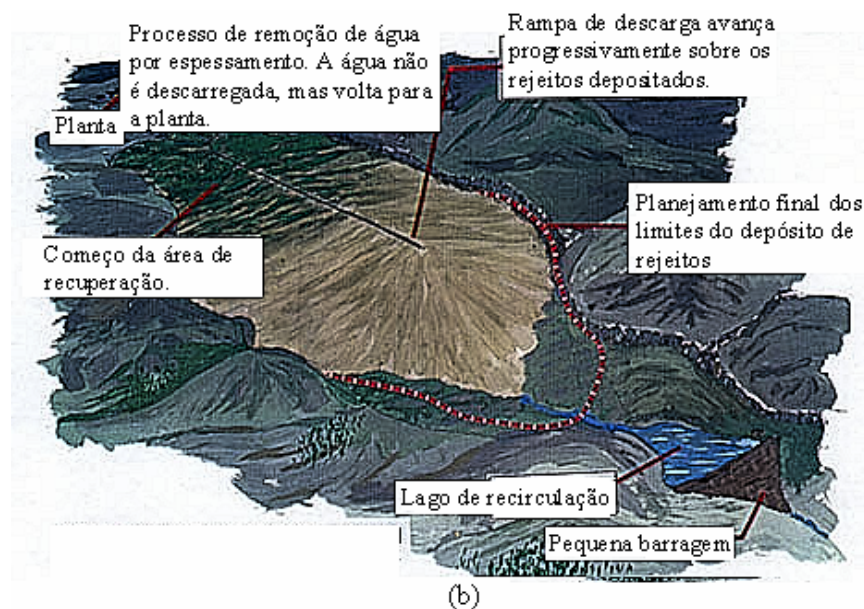
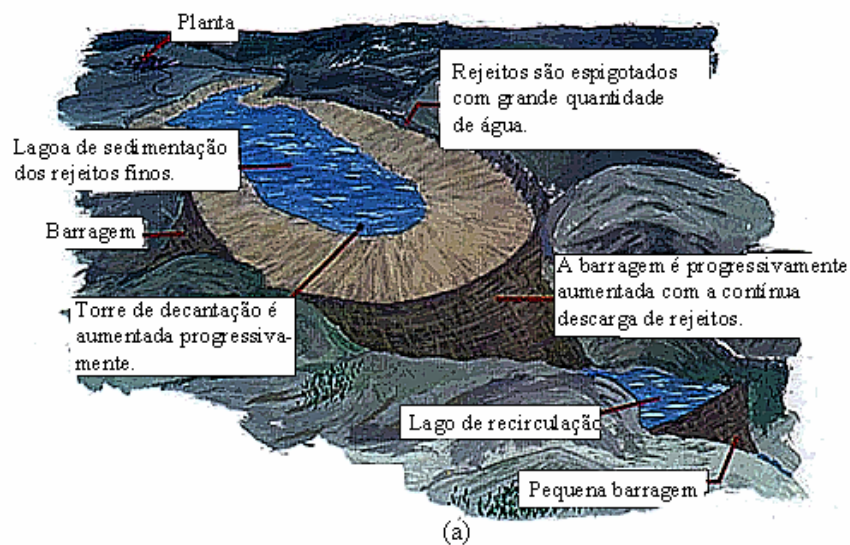
**Figura 2. 3 – Disposição de lama espessada, TTD  
(Modificado – Robinsky, 1979 citado em Vick, 1983)**

Segundo Robinsky (2000), no sistema TTD, os rejeitos são espessados na planta num teor de sólidos de 40%, aproximadamente, e transportados até a área de disposição onde são descarregados de uma posição elevada (posição natural) a fim de formar um talude e obter a máxima superfície exposta à evaporação.

A linha de descarga avança progressivamente sobre o depósito de rejeito formando um depósito convexo, diferentemente dos depósitos convencionais que são côncavos. A diferença entre essas duas formas de disposição é ilustrada na Figura 2.4.(a) e (b).

Na figura 2.4(a), disposição convencional, o rejeito fino é lançado com baixo teor de sólidos, baixa densidade e grande quantidade de água. Grandes áreas são ocupadas e a barragem é alteada à medida das necessidades até a cota prevista em projeto.

Já a figura 2.4(b) mostra que o rejeito ao ser lançado pela forma espessada possibilita maior armazenamento de material em uma mesma área, além de apresentar estruturalmente mais estável que quando lançado convencionalmente. Devido à elevada consistência do rejeito, as barragens são bem menores ou até mesmo não existem nesse caso.

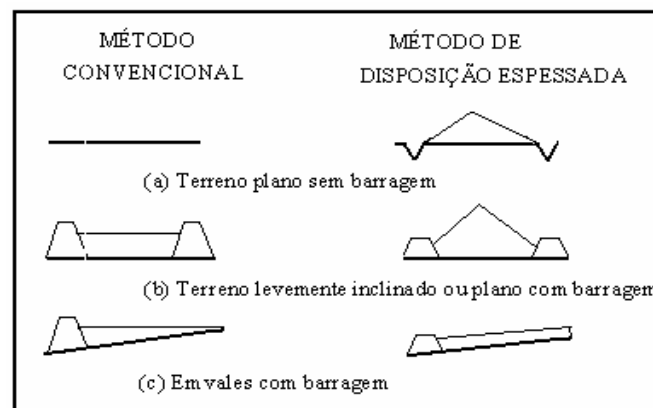


**Figura 2. 4 - Comparação, em um mesmo local de, (a) Método de disposição convencional e, (b) método de disposição espessada (Modificado – Robinsky, 2000)**

No sistema TTD, os rejeitos são espessados com ou sem adição de floclantes. O uso de floclantes sintéticos, bacias profundas, espessadores ou tanques de decantação, ajudam a produzir um rejeito mais fino com maior densidade e mais rapidamente. É possível também filtrar o underflow espessado para aumentar a porcentagem de sólidos antes da descarga (Robinsky, 2000).

Os espessadores são equipamentos constituídos de um tanque cilíndrico cônico. Alimentado pelo centro, as partículas sólidas sedimentam e são retiradas pelo fundo, enquanto o líquido sobrenadante transborda e é recolhido em uma calha que circunda o tanque. Já a filtragem é uma operação unitária de separação de sólidos contidos numa suspensão em líquido mediante a passagem do líquido através de um meio poroso, que retêm as partículas sólidas (Chaves et al., 1996).

Uma importante consideração também deve ser feita em relação aos volumes de rejeito armazenado. Comparado ao método de disposição convencional, o método de disposição da lama espessada armazena maiores quantidades de rejeitos em menores barragens como apresentado na Figura 2.5. Este fato é extremamente vantajoso, pois maiores volumes são armazenados em uma mesma área de disposição. Em todos os casos da figura abaixo, os diques perimetrais são menores usando o rejeito espessado. Percebe-se, também, que o método do rejeito espessado é versátil e pode ser acomodado em qualquer topografia ao contrário do método de disposição convencional onde o depósito é preferencialmente em vales.



**Figura 2. 5 – Comparação da área requerida pelo método de disposição convencional e de disposição de lama espessada, TTD (Robinsky, 2000)**

#### **2.4.2 Método de Disposição em Pasta**

Rejeito em pasta é definido como uma mistura densa e viscosa de rejeitos e água que, diferente da lama fluida, não segrega ao ser transportada. Ou seja, a separação

sólido/água é considerada mínima. Esta não segregação se deve a distribuição granulométrica do rejeito em pasta que deve conter cerca de 15% de peso menor que 20 microns (Yilmaz et al., 2003).

A consistência da pasta é semelhante a um concreto úmido, sendo que várias de suas caracterizações geotécnicas tiveram origem nessa indústria. O ensaio slump, por exemplo, é utilizado para medir a consistência da pasta através do cone de Abrams. A altura inicial do cone é de 300 mm e o abatimento do material após a retirada do cone é o slump. A Figura 2.6 mostra a diferença entre alto slump (250 mm) e médio slump (175 mm).



**Figura 2. 6– (a) Slump de pasta 250 mm, e (b) Slump de pasta 175mm (Grabinsky et al. 2002)**

Este método de disposição já vem sendo usado extensivamente como “backfill” em minas subterrâneas. Existe, portanto, um grande interesse que seu uso seja disseminado para a disposição em superfície devido a várias vantagens que sua utilização pode trazer.

O primeiro local a utilizar o método de disposição em pasta em superfície foi a mina de ouro de Bulyanhulu na Tanzânia. A escolha desse método se deu principalmente pela pouca quantidade de água disponível e pela topografia local. A fabricação da pasta envolvia algumas etapas. Inicialmente a água era retirada do rejeito produzido na planta de beneficiamento por meio de um filtro. Após este procedimento, o material resultante era encaminhado à planta de pasta onde eram adicionados água e “ligantes” até a consistência desejada, de aproximadamente 73% de sólidos e alto slump (250 mm). Por

fim, o rejeito era bombeado para o reservatório (células) onde era disposto em finas camadas (Figura 2.7).



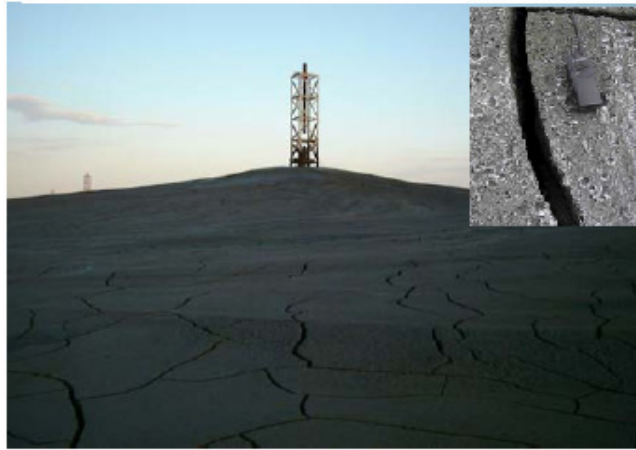
**Figura 2. 7 – Disposição de finas camadas de rejeitos em pasta (Theriault et al., 2003)**

A partir do lançamento o rejeito passava pelos processos de adensamento (por peso próprio) e ressecamento (evaporação). Os ciclos de lançamento (Figura 2.8) e espera (Figura 2.9) eram otimizados, para que o ganho de resistência e a conseqüente densificação do rejeito fosse alcançada. Aguardado estes intervalos, uma nova camada era lançada (Figura 2.10).



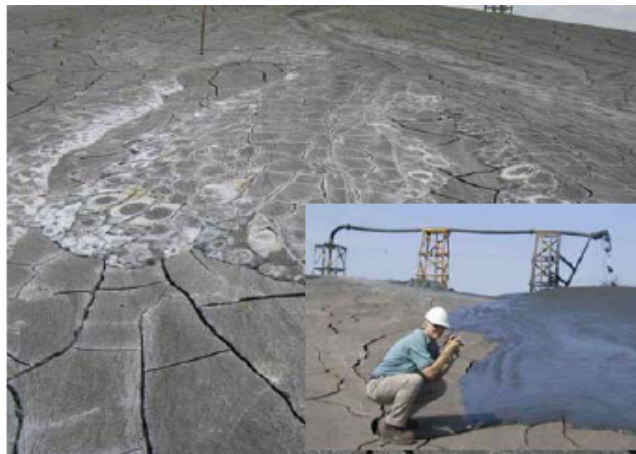
**Figura 2. 8 – Rejeitos recentemente lançados (Theriault et al., 2003)**





**Figura 2. 9 - Período de espera, note as trincas de ressecamento (Theriault et al., 2003)**

Todos os ciclos (lançamento e espera) foram monitorados e os objetivos atingidos. Essa experiência foi considerada satisfatória pelos projetistas e consultores à medida que a técnica possibilitou a diminuição do teor de umidade (variando de 36% a 22%), pouca ou nenhuma água livre nas células, ganho de resistência (ordem de 5 a 20 kPa na camada superficial) e alta sucção nos primeiros centímetros do depósito.



**Figura 2. 10 - Camada depositada sobre uma camada ressecada (Theriault et al., 2003)**

Norman & Raforth (1998) enumeram algumas vantagens ambientais do rejeito em pasta. Primeiro há pouca água disponível que possa contaminar a água subterrânea. Segundo, a eliminação da água livre durante a disposição dispensaria a necessidade de estruturas de contenção em muitos locais. Terceiro, uma pequena porcentagem de

cimento pode ser adicionada à pasta, o que significa um aumento na resistência e na durabilidade, além da possibilidade de funcionar como uma barreira protetora a elementos potencialmente geradores de ácidos.

Essa solução requer, no entanto, a implantação de uma planta específica para a fabricação da pasta. Materiais como rejeito (granular e fino), cimento, escória e até cinzas podem vir a ser componentes desta forma de disposição.

Qualquer que seja a constituição da pasta é prudente que cada mistura seja examinada não só quanto aos aspectos de seu desempenho mecânico (resistência) e hidráulico (permeabilidade), mas também quanto ao potencial de contaminação. Nesse sentido uma caracterização química da pasta se faz também necessária.

Ainda não há um consenso sobre a composição do rejeito em pasta. Talvez, a única certeza em relação a esta forma de disposição seja que este método tem um potencial de ser uma das formas mais utilizadas no futuro.

## **2.5 MÉTODO DE DISPOSIÇÃO SUBAÉREA**

A disposição subaérea foi descrita por Knight & Haile (1983) como uma técnica em que o rejeito é depositado em finas camadas, permitindo-se seu adensamento e drenagem antes do lançamento da camada seguinte, de modo a produzir uma condição do material mais densificada, baixas poropressões e eventualmente sucção (Ulrich et al., 2000).

Segundo Ulrich et al. (2000) a técnica traz benefícios não só por conta de uma maior densificação do material, mas também porque há um significativo aumento da sua resistência.

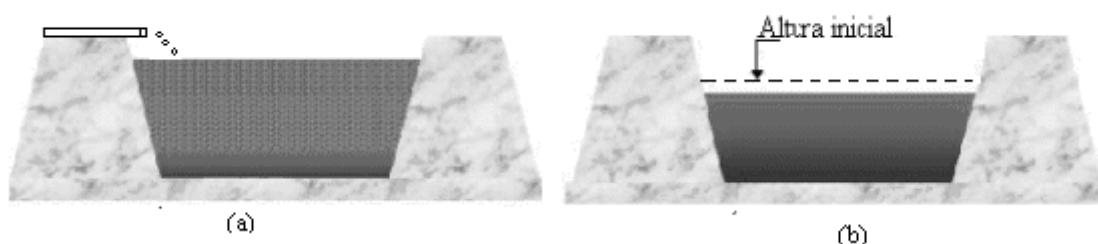
Ávila et al. (1995) destaca a importância de diferentes reservatórios que permitam os ciclos de lançamento e de espera. Norman & Raforth (1998) afirmam que estes reservatórios devem possuir área suficiente para que a disposição ocorra em um dos reservatórios enquanto a secagem continue em outros, sendo recomendado pelo menos dois. Gipson (1998) menciona que o número mínimo de reservatórios deve ser baseado em diversos fatores como clima, taxa de produção de rejeito, características do próprio rejeito e tipo de instalação de armazenamento.



Gipson (1998) afirma ainda que a técnica subaérea permite ao depósito armazenar aproximadamente o dobro da quantidade de rejeito estocado numa mesma área em comparação com o método convencional. Entretanto, de acordo com Marinho (1994), citado por Villar (2002), isso não é uma regra, uma vez que, a contração dos solos depende de vários fatores como composição mineralógica, estrutura do solo e teores de umidade inicial e final.

### 2.5.1 Fenômenos Físicos

No método subaéreo é esperado que a lama ao ser lançada experimente os seguintes processos físicos: sedimentação, adensamento, ressecamento e eventualmente desaturação. A Figura 2.11 ilustra a ocorrência desses fenômenos durante as duas etapas do método.



**Figura 2. 11 - Fases do método construtivo subaéreo: (a) Período de enchimento – fenômenos de sedimentação e adensamento, e (b) período de espera – fenômenos de adensamento e ressecamento (Modificado: Almeida, 2004)**

Almeida (2004) e também Oliveira-Filho e van Zyl (2006a) apresentam uma detalhada descrição desses fenômenos físicos. Um resumo destes processos é visto a seguir.

A fase de sedimentação é relativamente rápida e a magnitude das variações de volume dependem do teor de sólidos inicial da polpa. Nas fases de adensamento e de ressecamento podem ocorrer recalques significativos do material depositado e isto deferido no tempo. A fase de ressecamento é dividida em dois estágios distintos: ressecamento unidimensional e ressecamento tridimensional. Na fase tridimensional ocorre a abertura e a propagação das trincas de ressecamento. Neste trabalho será

abordada somente a fase unidimensional. Mais detalhes da fase tridimensional podem ser encontrados em Abu-Hejleh & Znidarcic (1995).

### 2.5.2 Modelos Teóricos dos Fenômenos

O estudo do adensamento de materiais de alta compressibilidade, como os rejeitos finos de mineração, deve ser analisado pela teoria do adensamento a grandes deformações também chamada de teoria de deformações finitas. Esta teoria pode ser estendida à fase unidimensional do processo de ressecamento (antes da abertura de trincas). Abu-Hejleh & Znidarcic (1995) deduziram a equação governadora desses fenômenos tomando o índice de vazios como variável dependente. A equação obtida por esses autores é dada a seguir:

$$(1 - G_s) \frac{d}{de} \left[ \frac{k}{(1 + e)} \right] \frac{\partial e}{\partial a} - \frac{\partial}{\partial a} \left[ \frac{k}{\gamma_w} \frac{(1 + e_0)}{(1 + e)} \frac{d\sigma'}{de} \frac{\partial e}{\partial a} \right] = \frac{1}{(1 + e_0)} \frac{\partial e}{\partial t} \quad (2.1)$$

onde,  $G_s$  é a densidade real dos grãos,  $\gamma_w$  o peso específico da água,  $e$  o índice de vazios,  $a$  é a coordenada espacial do sistema lagrangeano,  $\sigma'$  a tensão vertical efetiva,  $k$  a condutividade hidráulica e  $t$  o tempo.

A solução da equação acima requer que sejam conhecidas as relações constitutivas de compressibilidade ( $e$  versus  $\sigma'$ ) e de permeabilidade ( $k$  versus  $e$ ) do solo.

### 2.5.4 Modelo Numérico dos Fenômenos

Para a solução do problema de adensamento e de ressecamento unidimensional representada pela equação acima, foi desenvolvido um código computacional chamado CONDES (Yao et al., 2002; Almeida et al., 2005). É um código empregado na solução das equações diferenciais parciais não lineares de segunda ordem que modelam os processos de adensamento e de ressecamento dos solos finos moles baseado na teoria de Abu-Hejleh (1993).

O programa CONDES utiliza o método de diferenças finitas (MDF) na solução de equações diferenciais não lineares de segunda ordem formuladas para adensamento e ressecamento unidimensional, contração tridimensional e propagação vertical das trincas em solos finos. A programação é feita em FORTRAN necessitando de uma plataforma DOS e de um arquivo do tipo DOSXMF.EXE.

No programa, as equações governadoras dos processos físicos de adensamento e de ressecamento e as condições de contorno são discretizadas espacialmente em uma malha uniforme, sendo adotada uma forma mista dos métodos das diferenças central e avançada com um esquema de integração implícito no tempo.

Dados de entrada (input) como as relações constitutivas do material (compressibilidade e permeabilidade), altura inicial, tipo de enchimento (instantâneo ou contínuo), índice de vazios mínimo, condições de contorno, entre outros, são necessários para a solução do problema. Como arquivos de saída o programa fornece o perfil de índice de vazios versus elevação e a curva de recalque no tempo.

No caso do ressecamento, a condição de contorno a ser imposta no programa é do tipo Neuman, no caso taxa de evaporação (efetiva). O programa é capaz de passar automaticamente da condição de adensamento para a de ressecamento pela superfície sempre que a velocidade de drenagem devido ao adensamento na superfície for igual ou menor que aquela taxa.

## **2.6 COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS ALTERNATIVOS**

Como já mencionado, a motivação para o desenvolvimento de métodos alternativos de disposição de rejeitos está ligada, principalmente, à busca de menores impactos ao meio ambiente, rápida reabilitação das áreas somadas à possibilidade de armazenamento de maiores volumes de material em menores áreas.

No entanto, os métodos alternativos expostos neste trabalho apresentam custos relativamente altos quando comparados com o método convencional. A utilização de equipamentos como espessadores, filtros e modernos meios de transporte tornam estes métodos onerosos, mesmo sem incluir outros custos ligados à adição de flocculantes e

ligantes ao rejeito. No caso da pasta, por exemplo, uma outra planta deve ser construída especialmente para a fabricação desta forma de rejeito.

Com o intuito de ajudar na escolha do método mais adequado, foi confeccionada a Tabela 2.1 que compara esses diversos métodos segundo aspectos importantes de projeto.

Pelo que se vê nesta tabela, dependendo de como se pondera os fatores analisados uma ou outra opção será a mais vantajosa. Isso implica que seja feito um estudo criterioso da relação custo/benefício das alternativas para a escolha do método de disposição de rejeitos mais adequado em cada caso.

Qualquer que seja o método de disposição a ser utilizado é importante que a escolha se fundamente numa argumentação mais racional e menos empírica, utilizando toda a tecnologia disponível para o desenvolvimento do projeto. Isto inclui o entendimento das características e das restrições de cada técnica de disposição de rejeitos, bem como a caracterização do próprio rejeito, aliadas à comparação das mesmas em uma determinada situação. Desta forma é possível melhorar a qualidade dos sistemas de disposição, além de aumentar as garantias de segurança dos depósitos.

**Tabela 2. 1 - Comparação entre os métodos alternativos de disposição de rejeito**

	<b>SUBAÉREA</b>	<b>ESPESSADO (TTD)</b>	<b>PASTA</b>
<b>Densidade final</b>	Média a alta	Média a alta	Alta
<b>Segregação</b>	Alta a leve	Leve	Nenhuma
<b>Água sobrenadante</b>	Alta a alguma	Alguma a nenhuma	Nenhuma
<b>Percolação</b>	Alta a alguma	Alguma	Insignificante
<b>Reabilitação</b>	Após algum tempo	Quase imediata	Imediata
<b>Permeabilidade</b>	Média a baixa	Baixa	Muito baixa
<b>Aplicação</b>	Na superfície	Na superfície	Na superfície e subterrânea
<b>Consumo de água</b>	Alto a médio	Médio	Baixo
<b>Custos</b>	Médio a alto	Alto	Alto

Finalizando, um bom exemplo que estimula o uso desses métodos é a preocupação que está acontecendo atualmente com a desativação de minas no Brasil. Anos atrás esta preocupação era inexistente e a recuperação da área degradada demorava anos ou até mesmo não acontecia. Hoje, a legislação é outra. O pensamento e a fiscalização por parte dos órgãos ambientais também. A estabilidade e a rapidez na reabilitação da área minerada são regra. A partir dessas mudanças de conceitos, os métodos alternativos estão sendo encarados, muitas vezes, como uma solução eficiente para o período pós-operacional.

## **MATERIAIS E MÉTODOS**

Este capítulo descreve a área investigada, detalhando o processo de construção do depósito e seu histórico de formação, além de uma breve análise qualitativa dos materiais ali lançados. É apresentada também a campanha de investigações realizadas para conhecimento do perfil do depósito.

As investigações programadas partiram do princípio de que o depósito tivesse recebido apenas rejeito fino na forma de lama. Esses trabalhos foram executados por empresas qualificadas terceirizadas com o acompanhamento de pessoal da UFOP e da Samarco Mineração S.A.

Além das investigações de campo, uma extensa campanha de ensaios de laboratório foi realizada a partir de amostras coletadas em amostradores tipo Shelby, de modo a conhecer as características e propriedades do rejeito depositado.

### **3.1 HISTÓRICO DO DEPÓSITO**

O depósito de rejeito fino investigado está situado na barragem de Germano da Samarco Mineração S. A., na região do Quadrilátero Ferrífero, em Mariana, Minas Gerais.

Do processo de beneficiamento do minério de ferro resultam, além do próprio mineral, dois tipos de rejeitos, um mais grosseiro (arenoso) e outro de textura fina (lama).

Esses rejeitos foram depositados de forma convencional entre os anos de 1976 a agosto de 2003. Por esse método, o rejeito arenoso era depositado à montante da barragem principal, sendo, após sua drenagem, utilizado como material de construção nos

alteamentos desta estrutura. Por outro lado, a lama era lançada na região mais distante da barragem principal, formando o lago de sedimentação e adensamento, e assim melhorando a segurança do dique principal da barragem ao longo de sua vida útil.

A partir de setembro de 2003, com o significativo aumento da produção mineral e, conseqüentemente, de rejeitos, a empresa optou pela implantação de um projeto audacioso e pioneiro na região sudeste do Brasil: o ressecamento do rejeito fino (lama). Esse projeto tinha interesses de cunho econômico e ambiental (otimização dos volumes de reservação e reabilitação da área em um curto período de tempo).

O projeto de ressecamento de lama concebido pela Pimenta de Ávila Consultoria (2001) previa a disposição do rejeito em cinco baias (Figura 3.1). Segundo este projeto a barragem se dividiria em:

- Reservatório à montante do dique auxiliar utilizado para receber a lama proveniente da usina de beneficiamento, com teor de sólidos inicial de 20%. Esta estrutura funcionaria como uma bacia de sedimentação/adensamento. Após estes processos a lama com teor de sólidos de cerca de 40 % seria removida por meio de uma draga, conduzida através de tubulações e lançada nas baias de ressecamento (depósitos);
- Baias 1, 2, 3 e 4 onde a lama sofreria, além do processo de adensamento, o processo de ressecamento, chegando ao final com o teor de sólidos de aproximadamente 80%. Dados da empresa informam que as baias 1 e 2 foram as primeiras a serem construídas e, posteriormente, foram implantadas as baias 3 e 4;
- Baia 5 cuja função seria de receber as águas de drenagem superficial das outras baias e funcionaria como amortecimento para as cheias, não sendo projetada para a mesma finalidade das demais estruturas de ressecamento.

Com a implantação do projeto de ressecamento de lama em setembro de 2003, as baias foram construídas com diferentes áreas. Em agosto de 2005, as baias atingiram as elevações mostradas na Tabela 3.1.

Os rejeitos finos produzidos pela planta de beneficiamento eram lançados nas baias em um único ponto e em uma única estrutura por vez. Esta medida assegurava o lançamento intermitente do material e permitia intervalos de lançamento e de secagem nas estruturas de armazenamento.



**Figura 3. 1— Baias de ressecamento (depósitos) na barragem de Germano, da Samarco Mineração S.A.**

**Tabela 3. 1 – Elevações do dique auxiliar e das baias 1, 2, 3, 4 e 5, em setembro de 2005 (Samarco Mineração S.A.- Nota técnica)**

Estrutura	Elevação (m)
Dique auxiliar	902,50
Baia 1	900,00
Baia 2	900,00
Baia 3	908,00
Baia 4	905,00
Baia 5	898,00

De todas as baias existentes, fez-se opção pela investigação do depósito 4. A razão dessa escolha deveu-se à representatividade no contexto geral da barragem, somados a fatores econômicos, limite de tempo estabelecido para a conclusão deste trabalho e, principalmente, ao interesse da empresa em conhecer o comportamento e as características do material armazenado neste local.



A disposição de rejeitos pelo método subaéreo na baía 4 durou 690 dias (aproximadamente 23 meses), dividindo-se em períodos de enchimento e de espera.

Para a contenção dos rejeitos lançados, o depósito 4 contou com diques de contenção no seu perímetro feitos com o próprio rejeito arenoso compactado e alteados para montante com inclinação 1V:2H.

Os registros sobre o rejeito lançado no depósito não são muito completos. Do volume total de rejeitos armazenados, por exemplo, não havia dados exatos, mas existia uma avaliação qualitativa do material lançado na bacia de sedimentação/adensamento, mostrando que nem só rejeito fino foi direcionado aos depósitos.

Isso levou a que se pensasse que o material depositado na área pudesse ter sido contaminado com outros tipos de materiais, em maior ou menor escala, dependendo do material dragado.

### **3.2 INVESTIGAÇÃO DE CAMPO**

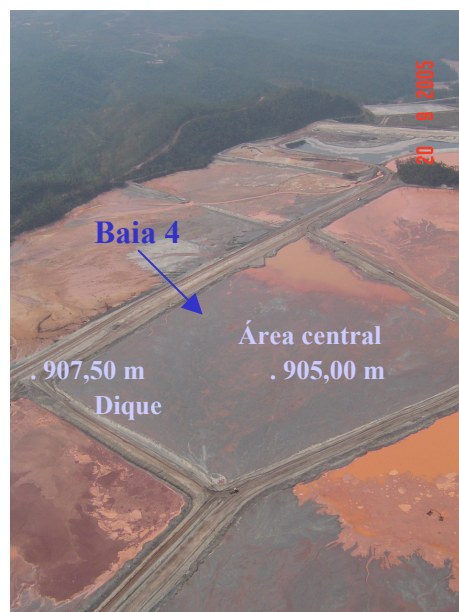
A campanha de investigação de campo teve como base trabalhos semelhantes realizados em depósitos naturais e de rejeitos de granulometria fina (Árabe, 1995; Schnaid, 2000; Massad 2003; Oliveira, 2002; Spannenberg, 2003; Bedeschi, 2004; Albuquerque Filho 2004 e Mondelli, 2004).

Desta forma as seguintes investigações de campo foram estabelecidas: sondagem de simples reconhecimento com medida de SPT e ensaio de piezocone.

Os ensaios de sondagem de simples reconhecimento com medida de SPT objetivaram ter uma avaliação prévia dos materiais componentes do perfil do depósito. Foram realizadas duas sondagens SPT.

Os ensaios de piezocone tiveram como finalidade fornecer uma melhor definição estratigráfica do terreno e a classificação do solo. Foram realizadas duas sondagens com ensaio de piezocone.

Os ensaios de campo aconteceram em dois locais, o primeiro localizado na área central (elevação 905,00) do depósito, e o segundo em um dos quatro lados do dique (elevação 907,50 m). A Figura 3.2 mostra os locais das investigações.



**Figura 3. 2 – Locais onde foram realizadas as investigações de campo:  
Dique (elevação 907,50 m) e área central (elevação 905,00 m)**

### **3.2.1 Sondagens de Simples Reconhecimento com Medida de SPT**

A execução das sondagens ficou a cargo da Setes Engenharia e Sondagens a qual seguiu os procedimentos da NBR 6484/2001 (Sondagens de simples reconhecimento com SPT – método de ensaio) e da NBR 7250/1982 (Identificação e descrição de amostras de solo obtidas em sondagens de simples reconhecimento dos solos).

Na programação dos furos de sondagem, admitiu-se a hipótese de homogeneidade horizontal do material armazenado, uma vez que a disposição era hidráulica e não se esperava segregação.

O primeiro furo de sondagem foi feito na parte central do depósito (elevação 905,0 m) e chegou a 18,45 m de profundidade. Adotou-se para paralisação da sondagem o histórico do depósito e não a condição impenetrável do solo, pois o histórico da baia mostrava no máximo 12,00 m de espessura de rejeito lançado pelo método sub-aéreo, e aproximadamente 6,00 m de rejeitos depositados pelo método convencional.

O segundo furo foi executado no dique (elevação 907,50 m) e atingiu a profundidade de 21,45 m. O fim da sondagem nesta profundidade também teve como base o histórico de construção do depósito somado ao desnível promovido pelo dique de 2,50 m de altura.

Nos dois furos de sondagem, a recuperação de amostras deformadas não aconteceu em todas as profundidades.

### 3.2.2 Ensaio de Piezocone

Como nos demais ensaios de campo, os ensaios de piezocone aconteceram em dois pontos: área central e dique. No entanto, para a realização do ensaio na área central fez-se necessário à construção de um acesso com capacidade suficiente para suportar o peso da máquina de reação (Figura 3.3).



**Figura 3.3 – (a) Vista do acesso construído na área central e, (b) vista do acesso a partir do dique**

O equipamento utilizado para execução dos ensaios de piezocone era composto de um penetrômetro estático de fabricação italiana (Pagani Geotechnical Equipment), Figura 3.4, e de uma sonda cone penetrométrica procedente da Geotech – Suécia, a qual possuía no seu extremo inferior uma ponteira com formato cônico (ângulo de vértice de  $60^\circ$ ) e área de  $10 \text{ cm}^2$  (Figura 3.5).

A localização do elemento poroso para a medida de poropressão desse cone é a posição  $u_2$ , base do cone, de acordo com a prática internacional. O equipamento tem capacidade de cravação de até 100 kN e uma relação de áreas ( $A_N/A_T$ ) igual a 0,61.

Os ensaios foram realizados pela In Situ Geotecnia Ltda, obedecendo as normas MB 3406 (solo-ensaio de penetração de cone in situ) e ASTM 3441 (Standard Test Method for Deep, quasi-static, cone and friction-cone penetration tests of soil). O equipamento era primeiramente posicionado, nivelado e ancorado. Com o sistema de aquisição de dados inicializado, o ensaio de penetração do piezocone era feito a uma velocidade

constante de 2 cm/s interrompida apenas para conexão de novas hastes. Um cuidado especial era tomado com relação à saturação prévia do elemento poroso através do uso de glicerina líquida e a proteção por uma membrana de borracha.



**Figura 3. 4 – (a) Máquina de cravação, (b) montagem do equipamento e, (c) detalhe da ancoragem**



**Figura 3. 5 – Piezocone utilizado no ensaio de campo**

As medidas registradas durante o ensaio foram:

- Resistência à penetração da ponta ( $q_c$ );
- Resistência por atrito lateral ( $f_s$ );
- Poropressão ( $u_2$ );
- Razão de atrito (FR em %), dada por  $FR = \frac{f_s}{q_c} \times 100$ .

Ressalta-se que nos pontos onde foram realizados os ensaios de piezocone, foi feita a execução de pré – furos, a fim de se ultrapassar a camada superficial de aterro e atingir o nível de água.

Com os dados dos ensaios, passou-se a etapa de classificação do solo a partir de algumas propostas existentes na literatura. Foram usadas três das mais consagradas, a saber: Robertson & Campanella (1983), Senneset et al. (1989) e Robertson (1990). As Figuras 3.6, 3.7 e 3.8 assim como as Tabelas 3.2 e 3.3 mostram essas classificações.

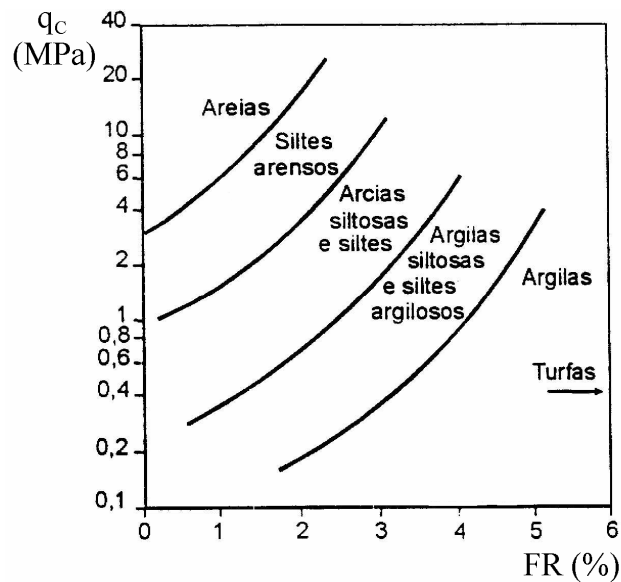


Figura 3. 6 - Proposta de classificação dos solos de Robertson & Campanella (1983)

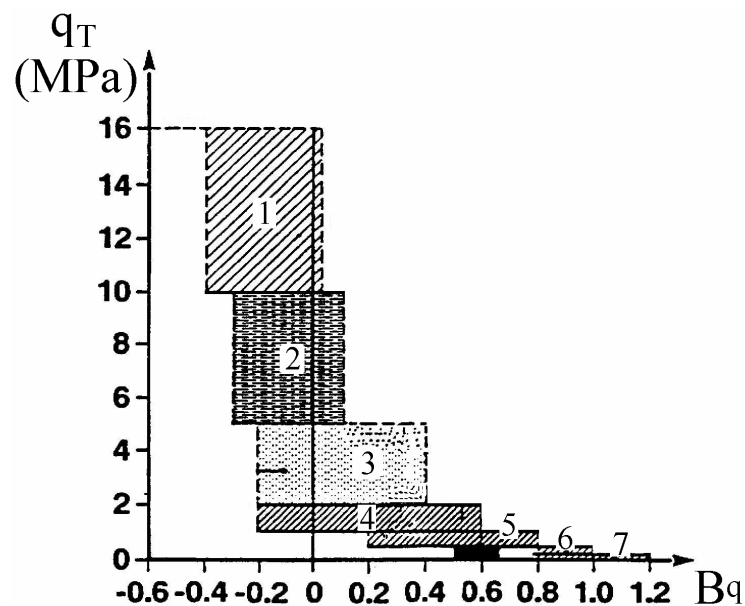
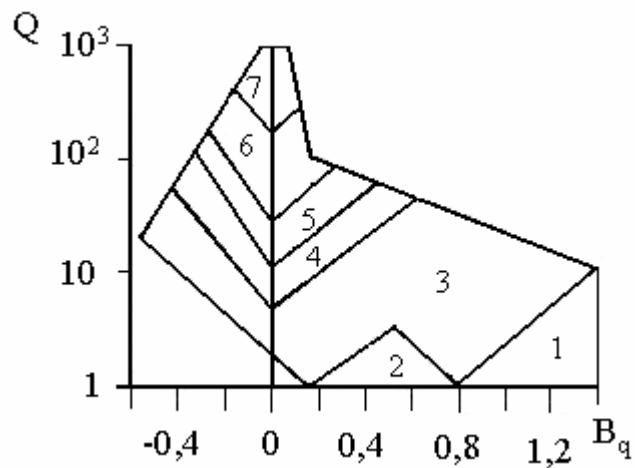


Figura 3. 7 - Proposta de classificação dos solos de Senneset et al., 1989

**Tabela 3. 2 – Quadro complementar da proposta de Senneset et al.,1989**

Zona	Tipo de Solo
1	Solos duros (pré-adensamento)
2	Areias compactas
3	Areias fofas
4	Siltes e argilas rígidas
5	Siltes finos e argilas médias
6	Argilas moles
7	Argilas muito moles



**Figura 3. 8 - Proposta de classificação dos solos Robertson, 1990**

**Tabela 3. 3 - Proposta de classificação dos solos Robertson, 1990.**

Zona	Tipo de Solo
1	Solo fino, sensível
2	Solo orgânico
3	Argila pura a argila siltosa
4	Mistura de siltes: silte argiloso a argila siltosa
5	Mistura de areias: areia siltosa a silte arenoso
6	Areia pura a areia siltosa
7	Areia com pedregulho

Schnaid (2000) destaca que as metodologias de classificação sugerem relacionar a resistência de ponta corrigida,  $q_T$  (equação 3.1) com o coeficiente de poropressão,  $B_q$  (equação 3.2), como indicativo do tipo de solo. Meireles (2002) sugere este tipo de gráfico em virtude das medidas de atrito lateral ser menos acuradas, e a geração de excesso de poropressão ser uma excelente indicação do tipo de solo.

$$q_T = q_c + (1 - a)u_2 \quad (3.1)$$

em que  $a$  representa a relação de áreas do cone ( $A_N/A_T$ ) e  $u_2$  representa a poropressão medida no ensaio de piezocone.

$$B_q = \frac{u_2 - u_0}{q_T - \sigma_{v0}} \quad (3.2)$$

em que  $u_2$  representa a poropressão medida no ensaio de piezocone,  $u_0$  a poropressão hidrostática,  $q_T$  a resistência de ponta corrigida e  $\sigma_{v0}$  a tensão total vertical in situ.

A classificação de Robertson (1990) utiliza o parâmetro  $Q$ , onde:

$$Q = \frac{q_T - \sigma_{v0}}{\sigma_{v0}} \quad (3.3)$$

### 3.3 ENSAIOS DE LABORATÓRIO

Os ensaios de laboratório foram realizados no Laboratório de Geotecnia da Universidade Federal de Viçosa durante dezembro de 2005 a março de 2006. A campanha de ensaios, realizada nas proximidades do dique teve como objetivos a caracterização básica do material do depósito. A Tabela 3.4 mostra um resumo do programa dos ensaios realizados.

**Tabela 3. 4 - Programa de ensaios laboratoriais do dique**

TIPO DE ENSAIO	NÚMERO DE ENSAIOS
Granulometria	23
Peso Específico	51
Densidade dos Grãos	18
Umidade	51
Limites de Atterberg	18

### **3.3.1 Amostragem**

Apesar de ser uma operação de campo, a coleta de amostras tem como objetivo o fornecimento de material para a realização dos ensaios de laboratório e por isso sua localização é justificada neste item.

A amostragem do solo foi feita em furo de sondagem por meio de amostradores tubulares de parede fina tipo Shelby. A escolha deste amostrador foi necessária no sentido de se obter amostras de boa qualidade com preservação da estrutura do solo do depósito. O amostrador Shelby utilizado nesta pesquisa consistiu de um tubo de bronze de 60 cm de comprimento e 3” de diâmetro externo, acoplado a uma cabeça de amostragem provida de uma válvula de esfera que possibilita ao ar e à água escaparem à medida que há penetração da amostra na camisa.

A execução das amostragens ficou a cargo da Setes Engenharia e Sondagens e aconteceu apenas na área do dique, sendo realizada de metro em metro a partir de 5,00 m de profundidade. O procedimento de amostragem consistiu primeiramente num pré-furo até a cota desejada para extração da amostra por meio de uma sonda rotativa e a manutenção do furo com revestimento ou lama bentonítica. Na cota de amostragem, depois da limpeza do furo, o conjunto haste e amostrador shelby eram cravados estaticamente no comprimento interno do tubo (55 cm), e em seguida a amostra era retirada do furo.

Após a retirada da amostra, a camisa era liberada removendo-se dois parafusos de fixação, selada com parafina e enviada ao laboratório em caixas de madeira preenchidas com serragem úmida.

Embora a intenção fosse de preencher os amostradores em quase toda sua extensão, em algumas profundidades, isto não foi possível por problemas no manuseio da sonda. Mesmo assim a maioria das camisas teve recuperação de pelo menos 30% (cerca de 18 cm). As Figuras de 3.9(a) a 3.9(f) ilustram toda a operação de amostragem, apresentando desde o posicionamento da sonda até a colocação das camisas em caixas preenchidas com serragem úmida.





**Figura 3. 9 – Amostragem tipo Shelby, (a) equipamento de sondagem mista utilizado no avanço da sondagem, (b) detalhe do tubo de revestimento, (c) amostrador Shelby, (d) montagem do amostrador, (e) amostras coletadas e, (f) acondicionamento dos sheldies nas caixas com as camisas envoltas com serragem úmida**

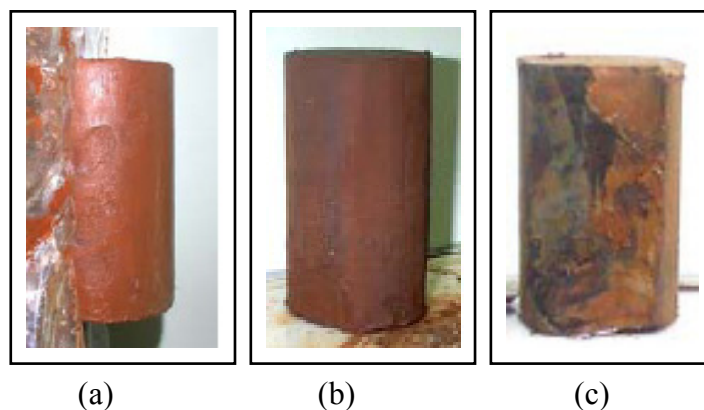
Todas as amostragens foram realizadas com sucesso, salvo nas elevações de 10,00 m, 11,00 m e 20,00 m onde não houve recuperação de amostras por problemas operacionais.

### **3.3.2 Mapeamento das Amostras**

Com o intuito de verificar a existência de diferentes materiais formadores do depósito foi proposto um mapeamento das amostras extraídas das camisas dos amostradores Shelby.

Todas as camisas ao serem abertas eram divididas em sub-amostras de no máximo 15 cm de comprimento, devidamente medidas e pesadas. Este procedimento inicial objetivava a determinação do peso específico e da umidade do solo em seu estado natural. A seguir, com a ajuda de uma lente de aumento, as amostras passavam por uma descrição tátil – visual e eram separadas de acordo com a seguinte nomenclatura (Figura 3.10):

- Lama pura: amostra composta essencialmente de rejeito fino argiloso sem nenhum traço de material arenoso;
- Mistura homogênea (MHO): amostra composta de lama e de rejeito arenoso misturado de forma homogênea onde somente com a identificação tátil - visual é possível saber da existência de material grosseiro. Nesta mistura a quantidade de lama é superior a de material arenoso;
- Mistura heterogênea (MHE): amostra composta de lama e de porções de rejeito arenoso onde a identificação visual do material grosseiro é possível. Nesta mistura a quantidade de material arenoso é superior ao de lama.



**Figura 3. 10 - Materiais encontrados nos amostradores:  
(a) lama pura, (b) mistura homogênea e; (c) mistura heterogênea**

### **3.3.3 Ensaios de Caracterização Básica**

Para a caracterização básica do material foram realizados os seguintes ensaios: análise granulométrica, massa específica dos sólidos, limites de consistência, teor de umidade e massa específica natural.

A realização dos ensaios de granulometria seguiu a norma NBR 7181/1984. O número total de ensaios foi determinado pelo mapeamento das amostras. Caso as amostras retiradas de uma camisa fossem semelhantes, a granulometria era feita de forma conjunta com todo o solo amostrado. Caso contrário, ou seja, amostras aparentemente diferentes em uma mesma camisa, o ensaio era realizado em cada amostra separadamente.

Os ensaios para determinação dos limites de Atterberg seguiram as seguintes normas: NBR 6459/1974 (limite de liquidez) e NBR 7181/1984 (limite de plasticidade). Como ocorrido com a granulometria, nos ensaios de determinação dos limites, algumas profundidades necessitaram de mais de um ensaio devido à presença de diferentes materiais em uma só camisa.

Os ensaios de densidade real dos grãos e limites de plasticidade seguiram as normas da ABNT respectivas, NBR 6508/1984 e NBR 7180/1984.

Os ensaios de massa específica natural aconteceram imediatamente após a extração das amostras as quais passavam pela rotina de pesagem e medida. Após estes procedimentos a amostra passava pela estufa e a seguir eram determinadas suas umidades.

## **APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS**

Na parte inicial deste capítulo são apresentados, analisados e discutidos os aspectos mais relevantes da investigação de campo realizada na Barragem do Germano. Esta campanha, como mostrada no capítulo 3, englobou sondagens de simples reconhecimento com medida de SPT e piezocone (CPTu). Os trabalhos foram realizados em dois pontos (duas verticais) da baía 4, um mais no interior (área central) e outro no perímetro (dique de contenção).

No conjunto das investigações realizadas, destaca-se a análise dos resultados do ensaio de piezocone com respeito ao seu potencial na identificação textural do solo baseado no seu comportamento.

A partir dos resultados do CPTu e de ensaios de caracterização realizados em amostras recolhidas na vertical do perímetro (dique) foi feita a calibração textural do ensaio de cone para os materiais depositados na baía 4 ou que se misturaram aos mesmos na construção do dique (no caso rejeito arenoso).

Com a calibração textural obtida na vertical do dique foi possível inferir as características e propriedades dos materiais dos perfis investigados dentro da área da baía 4 (principalmente textura), pelo menos no que diz respeito aos seus comportamentos.

#### 4.1 SONDAGEM DE SIMPLES RECONHECIMENTO COM MEDIDA DE $N_{SPT}$

As Figuras 4.1 e 4.2 mostram os perfis obtidos com a sondagem de simples reconhecimento nos dois furos executados, área central (elevação 905,00 m) e dique (elevação 907,50 m).

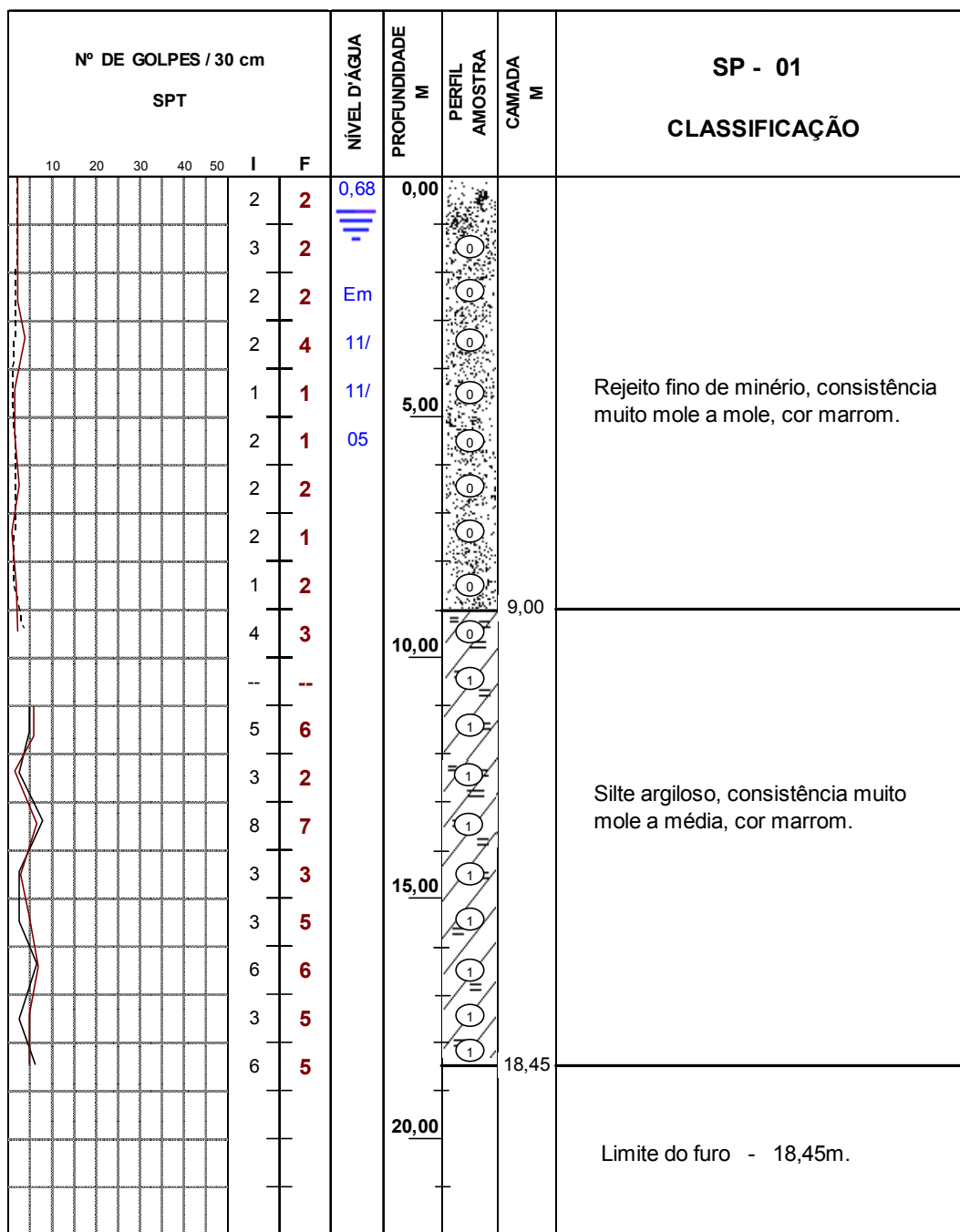


Figura 4. 1 – Perfil de sondagem realizado na área central, elevação 905,00 m  
(Adaptado: Setes Engenharia e Sondagens Ltda.)

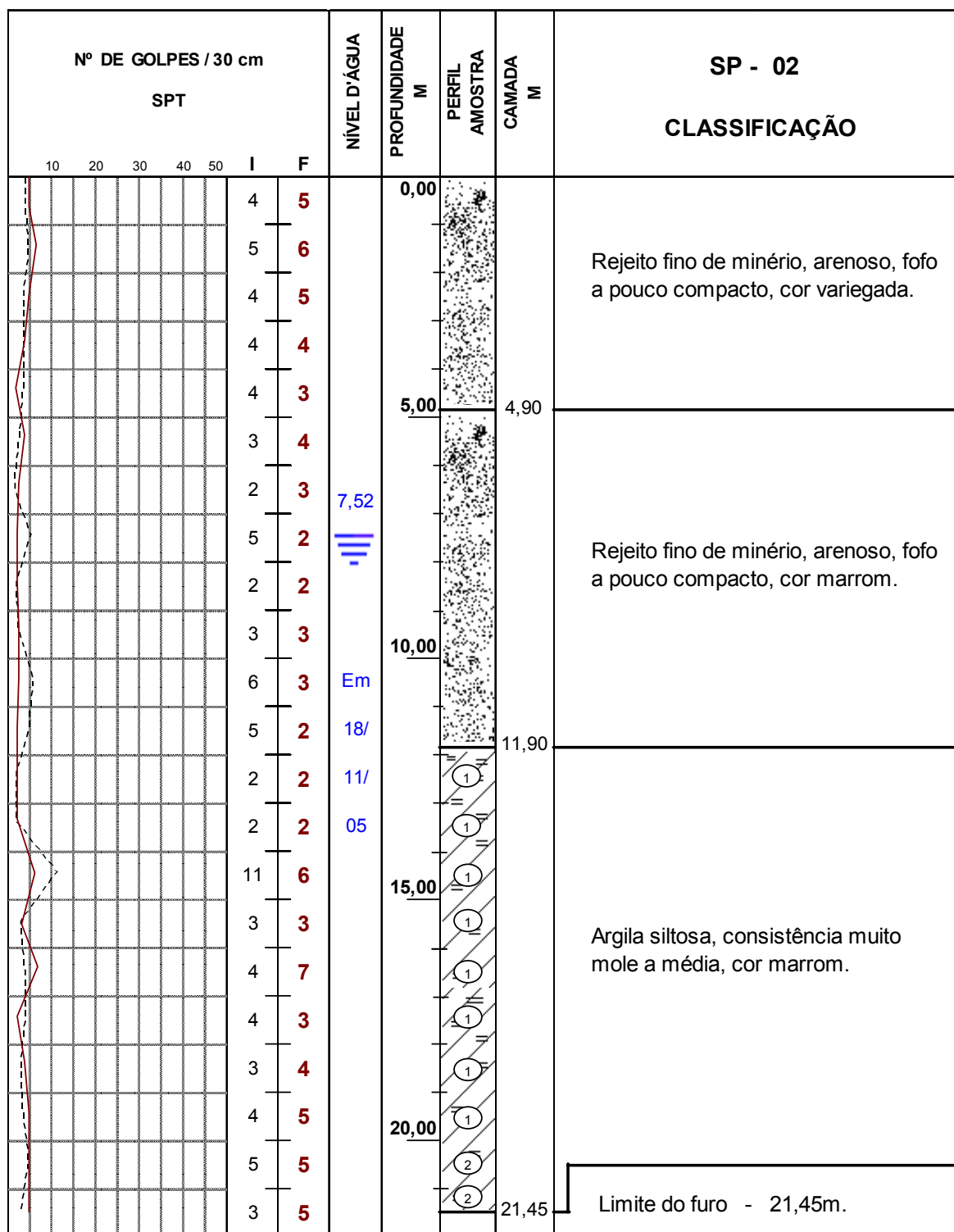


Figura 4. 2 – Perfil de sondagem realizados nas proximidades dique, cota 907,50 m  
(Adaptado: Setes Engenharia e Sondagens Ltda.)

A análise do perfil de solo investigado na área central apresenta valores baixos de  $N_{SPT}$  nos primeiros 9,00 m de profundidade (variação de 0 – 4). Esta faixa de valores sugere a existência de materiais de resistência entre baixa e média. Em geral, solos argilosos e siltosos com  $N_{SPT}$  inferiores a 5 são compressíveis e poucos resistentes (Tabela 4.1). O mesmo se pode dizer em relação a areias e siltes arenosos. Em contrapartida, os resultados de  $N_{SPT}$  tendem a aumentar abaixo da elevação 894,00 m. Provavelmente isto mostra a existência de outro horizonte distinto e denominado nesse trabalho de camada de fundação do depósito.

**Tabela 4. 1 – Classificação de solos segundo a NBR 7.250/82 (Schnaid, 2000)**

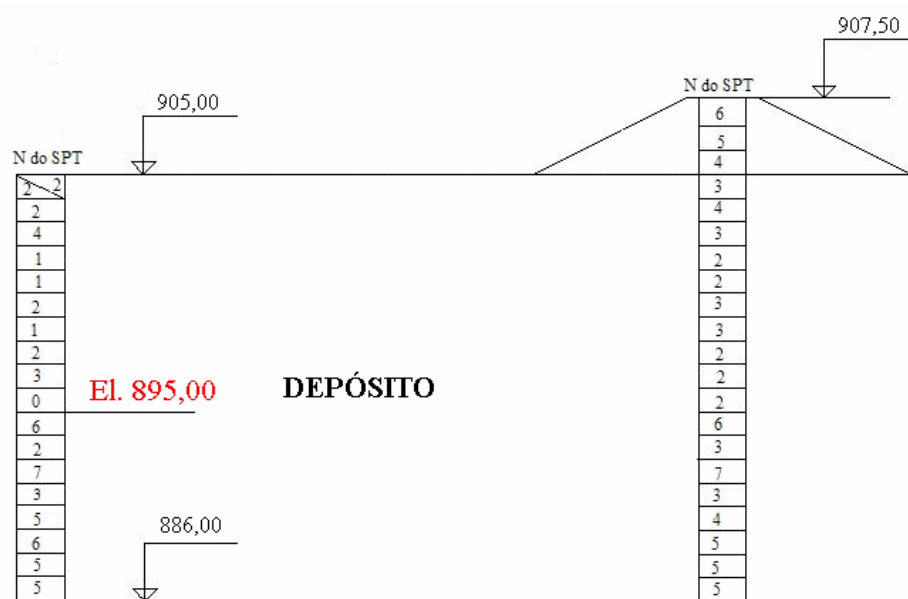
<b>SOLO</b>	<b>ÍNDICE DE RESISTÊNCIA A PENETRAÇÃO</b>	<b>DESIGNAÇÃO</b>
Areia e silte arenoso	<4	Fofa
	5 – 8	Pouco Compacta
	9 – 18	Medianamente Compacta
	19 – 40	Compacta
	>40	Muito Compacta
Argila e silte argiloso	<2	Muito Mole
	3 – 5	Mole
	6 – 10	Média
	11 – 19	Rija
	>19	Dura

Já no perfil de sondagem do dique, foi observado um elevado valor de  $N_{SPT}$  nos primeiros metros. Estes resultados podem ser justificados pela presença do rejeito arenoso compactado na construção do dique. A presença deste tipo de material no local e informações de que foi utilizado o método de aterro de ponta faz supor que o perfil do dique apresente próximo à superfície material resistente, provavelmente o rejeito compactado, em seguida o rejeito arenoso não compactado que afundou deslocando o material do depósito e eventualmente se misturando com o mesmo, e finalmente o material do depósito.

Abaixo da elevação 894,00 m o material apresenta praticamente os mesmos resultados de  $N_{SPT}$  encontrados na área central (Figura 4.3) no trecho denominado fundação (abaixo da elevação 895,00 m). Esta concordância de valores parece confirmar a hipótese de continuidade horizontal do material da baía (principalmente o de fundação)

adotada no início das investigações. Esta hipótese está ligada ao processo de formação do terreno (disposição hidráulica).

Nas duas frentes de sondagens realizadas, a recuperação das amostras foi comprometida, não sendo possível a coleta em todas as profundidades. As amostras recolhidas pelo amostrador-padrão permitiram a identificação tátil-visual do material como solos de textura variável de areias a argilas, dispostos em camadas centimétricas ou decimétricas como mostra a Figura 4.4.



**Figura 4.3 – Perfil de sondagem da área central e do dique.  
Observe a concordância de valores entre as camadas**



**Figura 4.4 – Amostras deformadas retiradas dos ensaios de sondagem  
(Observe a variedade dos materiais encontrados)**



## **4.2 ENSAIO DE PIEZOCONO**

Neste item faz-se um resumo das interpretações dos dados obtidos dos ensaios de piezocone. Ao todo foram dois ensaios, executados em dois pontos diferentes: área central e dique. A elevação atingida no ensaio da área central foi de 889,55 m e de 885,00 m no dique.

Na área central a paralisação prematura do ensaio se deu pela perda de ancoragem do penetrômetro. Já na sondagem realizada no dique, a paralisação do ensaio na elevação 885,00 m acompanhou a profundidade atingida na sondagem SPT.

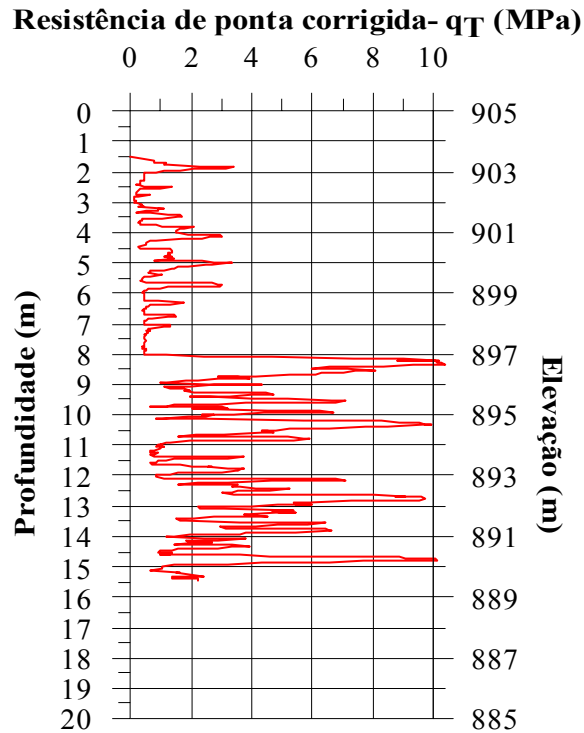
Os resultados dos ensaios obtidos no dique serviram como base para a calibração textural do material depositado na baía 4, aproveitando que neste local foram retiradas amostras indeformadas a partir de amostradores sheldies.

### **4.2.1 Ensaio de Piezocone Realizado na Área Central**

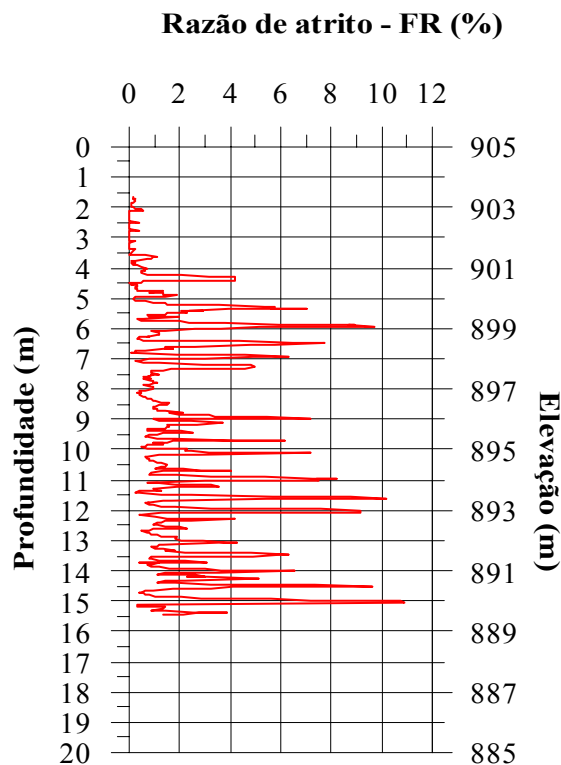
As Figuras 4.5, 4.6 e 4.7 apresentam os perfis de resistência de ponta corrigida, razão de atrito e poropressão dinâmica construídos a partir dos ensaios de piezocone realizados na área central do depósito. A análise conjunta destes três gráficos permitiu algumas importantes conclusões.

O perfil de solo apresenta três faixas distintas de comportamentos. A primeira compreendida entre as elevações 903,50 e 897,00 m, a segunda entre 897,00 a 894,00 m e a última entre as elevações 894,00 a 889,55 m.

O primeiro terço do perfil mostra um solo com baixos valores de resistência de ponta corrigida ( $q_T$ ) e excessos de poropressões dinâmicas ( $u_2$ ). A identificação de excessos de poropressão dinâmica está normalmente associada à ocorrência de depósitos com granulometria majoritariamente fina e de baixa condutividade hidráulica. A ocorrência destes estratos de granulometria fina no interior do depósito também pôde ser identificada através do perfil do coeficiente de poropressão ( $B_q$ ) apresentado na Figura 4.8.



**Figura 4. 5 – Perfil de resistência de ponta corrigida obtido do ensaio de piezocone realizado na área central do depósito (Adaptado: Relatório In Situ Geotecnia Ltda)**



**Figura 4. 6 – Perfil de razão de atrito obtido do ensaio de piezocone realizado na área central do depósito (Adaptado: Relatório In Situ Geotecnia Ltda)**

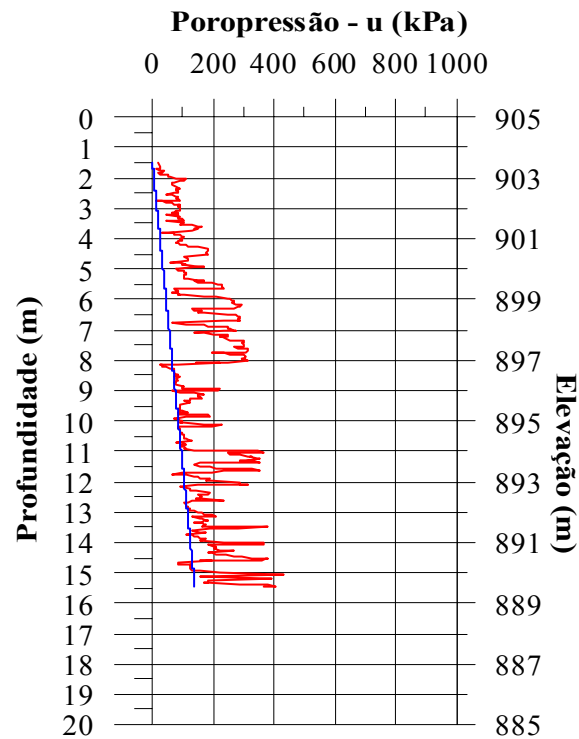


Figura 4. 7 – Perfis de poropressão dinâmica e de poropressão hidrostática obtidos do ensaio de piezocone realizado na área central do depósito (Adaptado: Relatório In Situ Geotecnia Ltda)

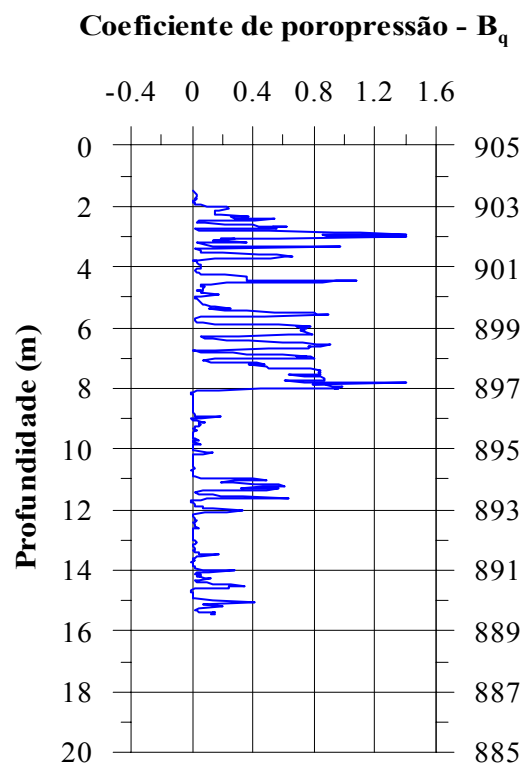


Figura 4. 8 – Perfil de coeficiente de poropressão do ensaio realizado na área central do depósito

Nos últimos dois terços do perfil, o solo apresenta resistência de ponta corrigida relativamente mais elevada em boa parte do perfil, intercalado por lentes de menor resistência. Ainda nesses dois últimos terços do perfil, há um comportamento distinto quanto aos excessos de poropressão dinâmica, com o terço médio drenado (coeficiente de poropressão coincidente com a linha de pressão hidrostática) e o último terço apresentando excessos de poropressão.

Estes resultados levam a crer que a espessura do depósito de rejeito no local do ensaio tenha, na verdade, 8,00 m e não 12,00 m como mencionado no histórico. Ou que talvez no ponto em que se realizou esta sondagem as camadas correspondentes às profundidades de 9,00 m e 10,00 m não apresentem continuidade.

Os resultados observados nos perfis do ensaio, em geral com muitos picos e vales se sucedendo (pulsos), faz supor a presença de estratos delgados de materiais diversos, o que refletiria o manejo da disposição de rejeitos a partir da operação da draga. Essa hipótese será mais bem avaliada adiante no texto.

#### **4.2.2 Ensaio de Piezocone Realizado no Dique**

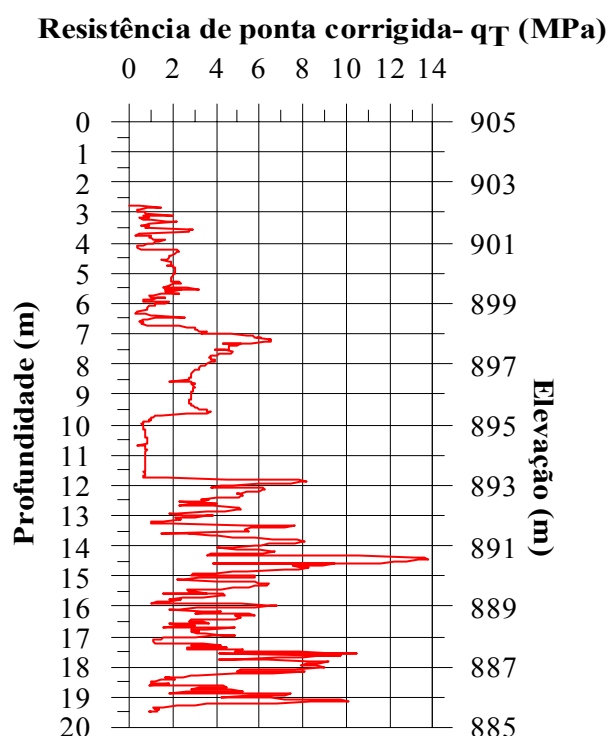
Passando à análise do ensaio de piezocone realizado no dique, as Figuras 4.9, 4.10 e 4.11 apresentam os perfis de resistência de ponta corrigida, razão de atrito e poropressão dinâmica, respectivamente.

A observação dos gráficos revela que quase todo o perfil de poropressão dinâmica coincide com a linha de pressão hidrostática (Figura 4.12). Nos primeiros metros investigados, este fato pode ser justificado pela presença do rejeito arenoso da construção do dique contaminado.

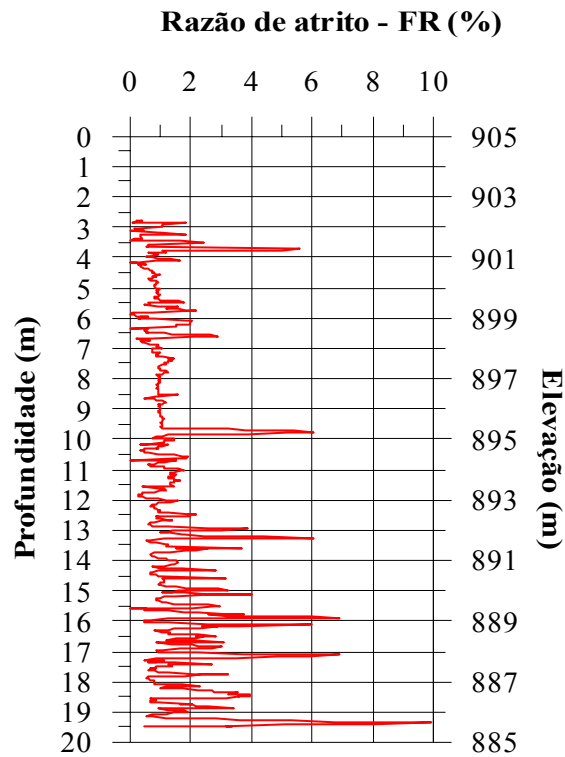
No entanto, no estrato correspondente às elevações de 895,00 m a 893,00 m observam-se elevados valores de poropressões dinâmicas, indicando a presença de camada de granulometria fina. A presença desse material de granulometria fina no interior do depósito também pôde ser verificada através do perfil do coeficiente de poropressão (Figura 4.12). Provavelmente, neste estrato o rejeito fino se encontra “puro” (sem contaminação do material do dique).

Ao analisar os perfis de resistência de ponta corrigida, razão de atrito e poropressão é possível visualizar que o material do depósito (ou sua fundação) entre as elevações. 895,00 m e 893,00 m apresenta comportamento também divergente com relação ao restante do perfil. Nesse caso os valores de  $q_T$  são muito inferiores às médias encontradas nos demais estratos.

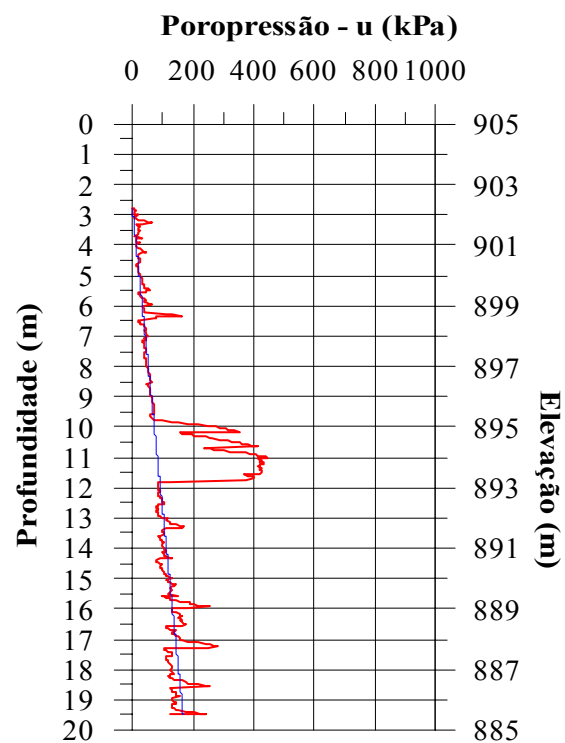
Abaixo da elevação 893,00 m o material volta a ter o mesmo comportamento observado nos primeiros estratos, isto é, ocorrência de estratos de solos aparentemente arenosos de granulometria fina a média.



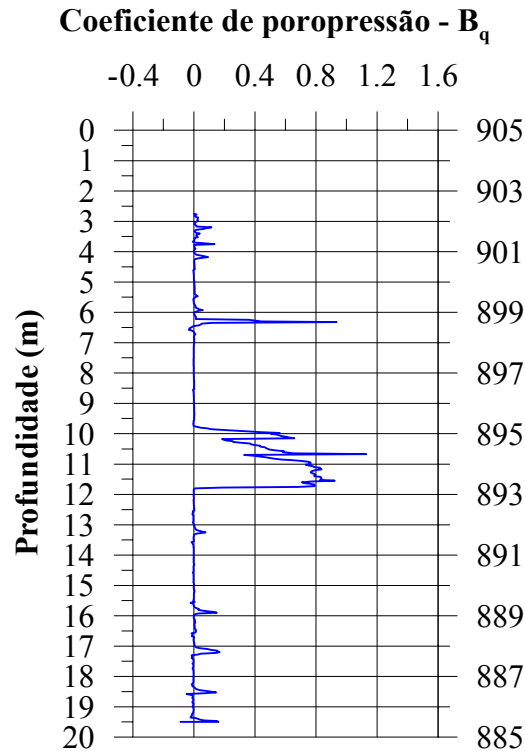
**Figura 4. 9 – Perfil de resistência de ponta corrigida obtida do ensaio de piezocone realizado no dique (Adaptado: Relatório In Situ Geotecnia Ltda)**



**Figura 4. 10 – Perfil de razão de atrito obtido do ensaio de piezocone realizado no dique**  
(Adaptado: Relatório In Situ Geotecnia Ltda)



**Figura 4. 11 – Perfis de poropressão dinâmica e de poropressão hidrostática obtidos do ensaio de piezocone realizado no dique**(Adaptado: Relatório In Situ Geotecnia Ltda)



**Figura 4. 12 – Perfil de coeficiente de poropressão do ensaio realizado no dique**

### 4.3 ENSAIOS DE LABORATÓRIO

Como relatado no capítulo 3, a campanha de investigações de campo incluiu também a retirada de amostras indeformadas da subsuperfície, que por razões técnicas ficou restrita a operações apenas no dique. As amostras foram coletadas em tubos tipo shelby, mapeadas e utilizadas em ensaios de laboratório de caracterização geotécnica

Os resultados do mapeamento do perfil do dique a partir das amostras shelby podem ser vistos através da identificação tátil visual apresentada na Tabela 4.2. Nesta tabela, os materiais são na maior parte das vezes identificados como misturas de diferentes frações de solo. Na verdade, o único estrato que identifica claramente a presença significativa de solo argiloso é o correspondente à elevação 895,00 m. Provavelmente, as próximas duas elevações - 894,00 m e 893,00 m - seriam também de material argiloso, como mostrado nos resultados dos ensaios de piezocone (caso fossem recolhidas amostras nestas profundidades).

**Tabela 4. 2 – Classificação tátil-visual do solo investigado nas proximidades do dique**

<b>Elevação</b>	<b>Amostras Shelby</b>
<b>(m)</b>	<b>Classificação tátil-visual</b>
904,50 – 903,90	-
903,50 – 902,90	-
902,50 – 901,90	Mistura de lama com rejeito silto-arenoso em grande quantidade
901,50 – 900,90	Mistura de lama e rejeito arenoso
900,50 – 899,90	Mistura homogênea de lama e rejeito arenoso
899,50 – 898,90	Solo arenoso homogêneo com algumas manchas de argila marrom
898,50 – 897,90	Mistura de solo arenoso fino cinza escuro com pequenas porções de argila
897,50 – 896,90	Solo arenoso homogêneo
896,50 – 895,90	Mistura homogênea de lama e rejeito arenoso em quantidade significativa
895,50 – 894,9	Lama pura (chocolate)
894,50 – 893,90	-
893,50 – 892,90	-
892,50 – 891,90	Solo arenoso com poucas manchas de solo argiloso marrom
891,50 – 890,90	Mistura homogênea de lama e rejeito arenoso com quantidade maior de lama
890,50 – 889,90	Solo arenoso com veias de argila marrom (chocolate)
889,50 – 888,90	Mistura homogênea de lama e rejeito arenoso
888,50 – 887,90	Solo arenoso
887,50 – 886,90	-
886,50 – 885,90	Solo com partes arenosas e argilosas marrom escura

Além da identificação tátil visual das amostras, a definição do perfil do dique recebeu a ajuda também dos ensaios de caracterização. As Tabelas 4.3 e 4.4 apresentam o conjunto dos resultados dos ensaios realizados sobre aquelas amostras.

A classificação textural do solo indica a predominância de solos silto-arenosos. A Figura 4.13 apresenta as porcentagens referentes as diferentes frações granulométricas constituintes do perfil investigado, e mostra graficamente a predominância do material silto-arenoso em praticamente todo o perfil. A única exceção a esta regra está na elevação 895,00 m onde o solo é classificado como silto-argiloso.

Em termos de plasticidade dos finos utilizou-se a Carta de Plasticidade de Casagrande (1948) apresentada na Figura 4.14. De acordo com esta carta a fração fina do solo é identificada como silte ou argila de baixa plasticidade. É interessante observar que não há muita diferença na plasticidade dos materiais do perfil como um todo, mesmo considerando o horizonte silto-argiloso (El. 895,50 m). O fato de o solo ser de baixa plasticidade pode estar relacionado ao tipo de mineral argílico presente nos itabiritos, caulinita, a qual apresenta baixa plasticidade (Mitchell, 1976).



**Tabela 4. 3 - Resultados dos ensaios de granulometria e de limites realizados nas amostras recolhidas das proximidades do dique (Adaptado: Relatório Parcial de Ensaio –UFV)**

Elevação (m)	Profundidade Shelby (m)	Granulometria			Limites		
		Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)
904,5 – 903,9	0,50 – 1,10	-	-	-	-	-	-
903,5 – 902,9	1,50 – 2,10	-	-	-	-	-	-
902,5 – 901,9	2,50 – 3,10	41	53	6	14	8	7
901,5 – 900,9	3,50 – 4,10	36	61	3	21	13	8
900,5 – 899,9	4,50 – 5,10	30	66	4	16	12	4
899,5 – 898,9	5,50 – 6,10	47	50	3	16	10	6
898,5 – 897,9	6,50 – 7,10	41*	57*	2*	24*	14*	10*
897,5 – 896,9	7,50 – 8,10	63	35	2			
896,5 – 895,9	8,50 – 9,10	54	44	2	21	15	6
895,5 – 894,9	9,50 – 10,10	4*	72*	24*	25*	17*	9*
894,5 – 893,9	10,50 – 11,10	-	-	-	-	-	-
893,5 – 892,9	11,50 – 12,10	-	-	-	-	-	-
892,5 – 891,9	12,50 – 13,10	27*	67*	6*	15*	8*	7*
891,5 – 890,9	13,50 – 14,10	47*	48*	5*	15	8	7
890,5 – 889,9	14,50 – 15,10	29	62	9	14	9	5
889,5 – 888,9	15,50 – 16,10	33*	62*	5*	17	15	2
888,5 – 897,9	16,50 – 17,10	37*	57*	6*	17	10	7
887,5 – 886,9	17,50 – 18,10	-	-	-	-	-	-
886,5 – 885,9	18,50 – 19,10	21*	71*	9*	15*	9*	6*

Observação: os números representados com asterisco\* correspondem a valores médios.

A densidade real dos grãos varia pouco, com média em torno de 3,27, enquadrando-se na faixa de valores esperados para um rejeito fino de minério de ferro.

A distribuição do teor de umidade, apresentada nas Figuras 4.15(a) e 4.15(b), mostra um aumento expressivo na elevação 895,00 m, o qual já era de se esperar em função da textura silto-argilosa.

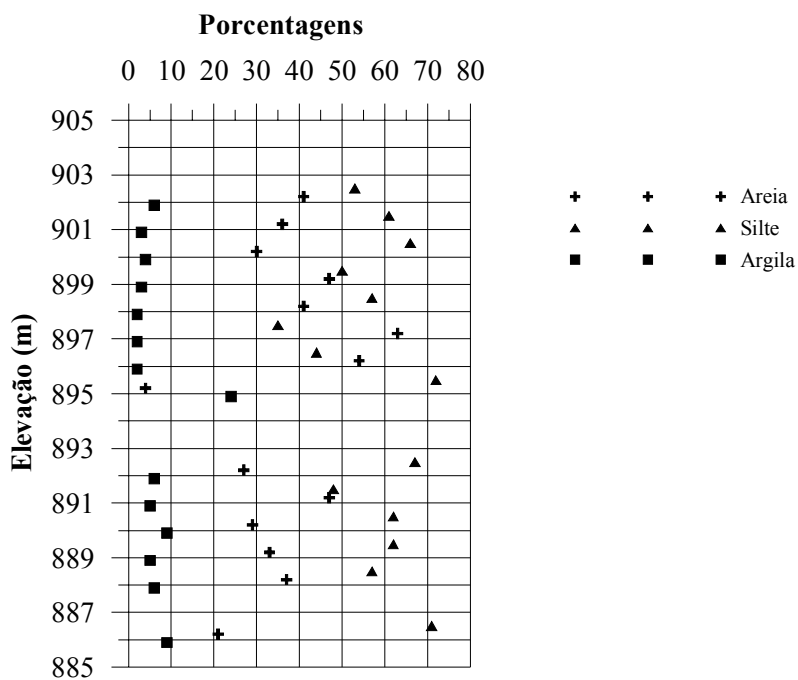
O perfil de peso específico natural médio do solo encontra-se nas Figuras 4.16. Em geral, os resultados seguem a tendência de aumentar com a profundidade.

A análise das propriedades-índice do perfil do dique vista permitiu juntamente com a identificação táctil visual uma definição textural que pôde ser usada na calibração dos ensaios de cone. A Tabela 4.5 tem esse objetivo e será usada no item a seguir.

**Tabela 4. 4 - Resultados dos ensaios de massa específica dos sólidos, peso específico natural e umidade realizados nas amostras recolhidas das proximidades do dique. (Adaptado: Relatório Parcial de Ensaios –UFV)**

Elevação (m)	Profundidade Shelby	$G_s$	$\gamma_n^*$	$w^*$
	(m)		(kN/m <sup>3</sup> )	(%)
904,5 – 903,9	0,50 – 1,10	-	-	-
903,5 – 902,9	1,50 – 2,10	-	-	-
902,5 – 901,9	2,50 – 3,10	3,326	23,65	17,97
901,5 – 900,9	3,50 – 4,10	2,949	18,98	19,25
900,5 – 899,9	4,50 – 5,10	3,320	21,80	17,57
899,5 – 898,9	5,50 – 6,10	3,131	22,70	17,65
898,5 – 897,9	6,50 – 7,10	2,965*	20,03	19,09
897,5 – 896,9	7,50 – 8,10	2,961	22,60	19,74
896,5 – 895,9	8,50 – 9,10	3,000	20,59	20,77
895,5 – 894,9	9,50 – 10,10	3,771*	23,05	26,60
894,5 – 893,9	10,50 – 11,10	-	-	-
893,5 – 892,9	11,50 – 12,10	-	-	-
892,5 – 891,9	12,50 – 13,10	3,366*	23,67	18,42
891,5 – 890,9	13,50 – 14,10	3,276*	23,02	18,67
890,5 – 889,9	14,50 – 15,10	3,407	24,13	19,08
889,5 – 888,9	15,50 – 16,10	3,326*	22,52	19,23
888,5 – 897,9	16,50 – 17,10	3,338*	24,51	17,71
887,5 – 886,9	17,50 – 18,10	-	-	-
886,5 – 885,9	18,50 – 19,10	3,623*	25,44	17,56

Observação: os números representados com asterisco\* correspondem a valores médios.



**Figura 4. 13 – Porcentagens de areia, silte e argila**

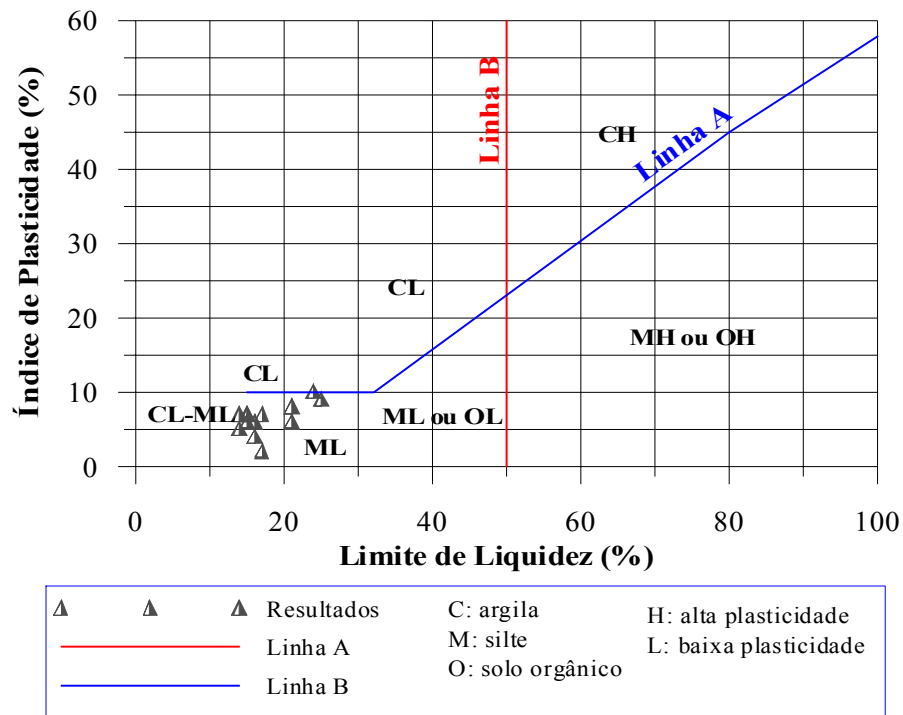


Figura 4. 14 – Carta de Plasticidade de Casagrande aplicada aos resultados dos ensaios de limites (Modificado: Holtz & Kovacs,1981)

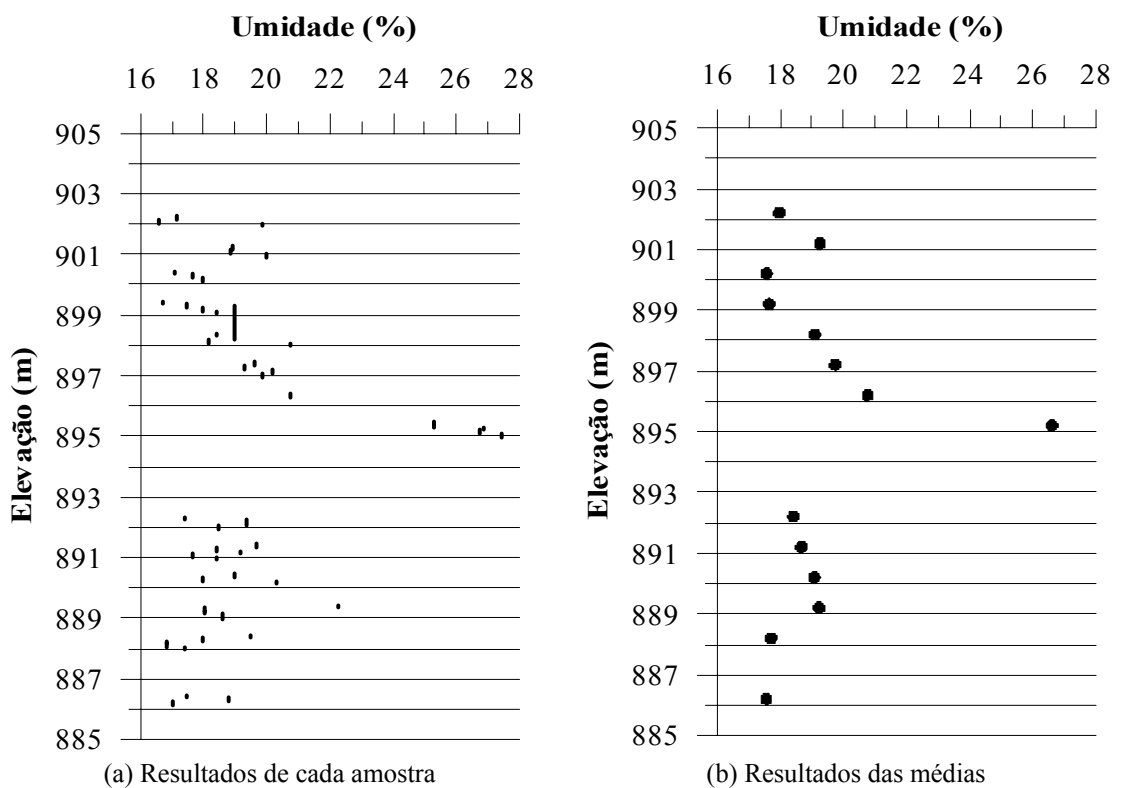
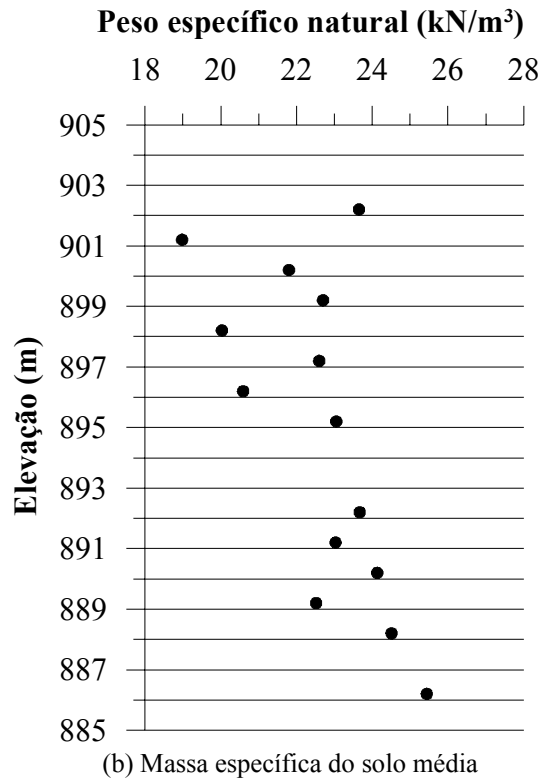


Figura 4. 15 – Perfil de umidade do dique, (a) de cada amostra em uma mesma elevação e (b) média de todas as amostras em uma mesma elevação



**Figura 4. 16 – Perfil de peso específico natural do solo média de todas as amostras em uma mesma elevação**

**Tabela 4. 5 – Classificação textural do solo investigado nas proximidades do dique**

<b>Elevação</b>	<b>Amostras Shelby</b>
<b>(m)</b>	<b>Classificação textural</b>
904,50 – 903,90	-
903,50 – 902,90	-
902,50 – 901,90	Solo silto-arenoso com traços de argila
901,50 – 900,90	Solo silto-arenoso com traços de argila
900,50 – 899,90	Solo silto-arenoso com traços de argila
899,50 – 898,90	Solo silto-arenoso com traços de argila
898,50 – 897,90	Solo silto-arenoso com traços de argila
897,50 – 896,90	Solo areno-siltoso
896,50 – 895,90	Solo areno-siltoso
895,50 – 894,9	Solo silto-argiloso
894,50 – 893,90	-
893,50 – 892,90	-
892,50 – 891,90	Solo silto-arenoso com traços de argila
891,50 – 890,90	Solo silto-arenoso com traços de argila
890,50 – 889,90	Solo silto-arenoso com traços de argila
889,50 – 888,90	Solo silto-arenoso com traços de argila
888,50 – 887,90	Solo silto-arenoso com traços de argila
887,50 – 886,90	-
886,50 – 885,90	Solo silto-arenoso com traços de argila

#### **4.4 CALIBRAÇÃO TEXTURAL**

A calibração textural do ensaio de piezocone se deu através da comparação da interpretação dos resultados do ensaio, segundo propostas consagradas de classificação de solo, com resultados de laboratório e demais ensaios de campo mencionados anteriormente.

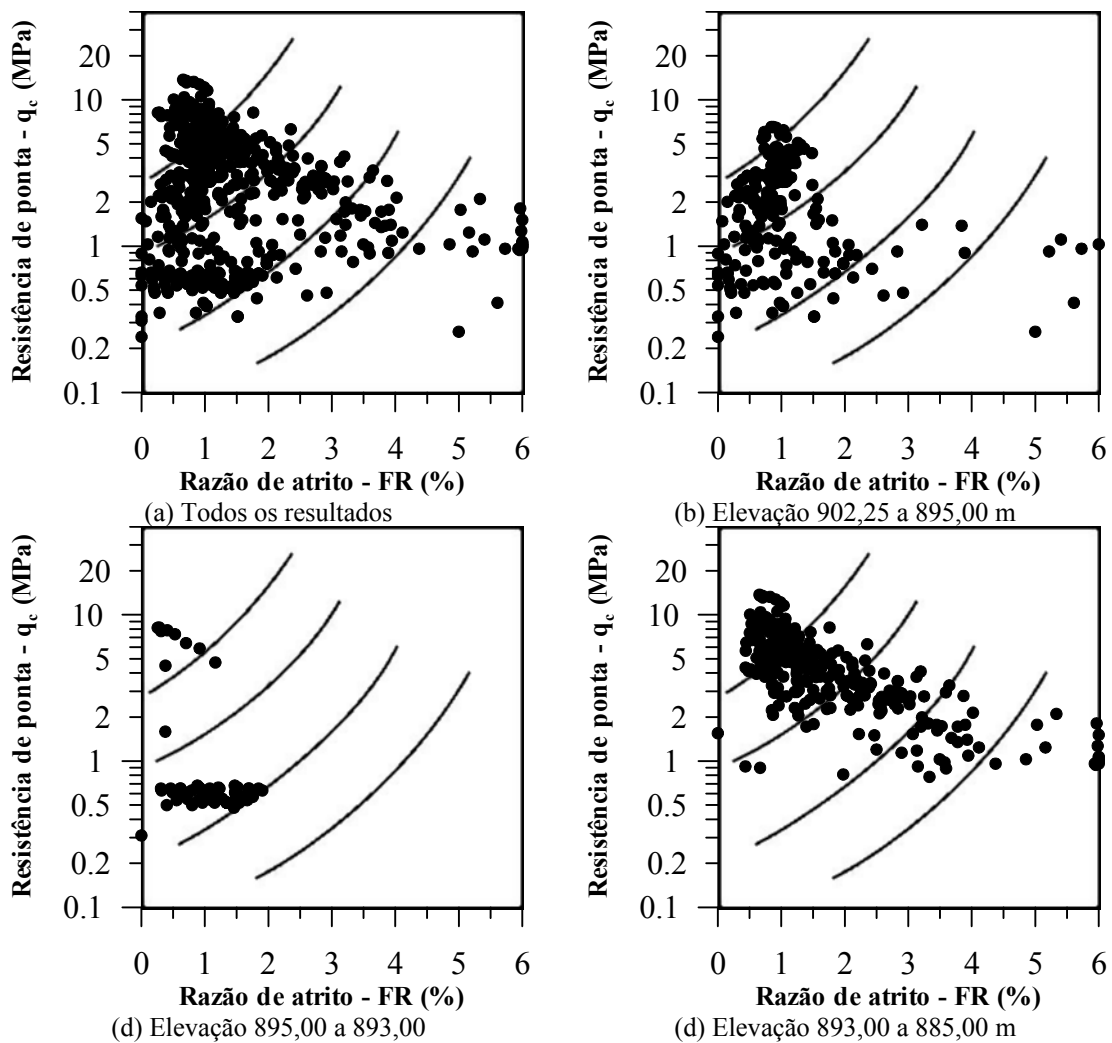
As propostas de classificação textural são as apresentadas no capítulo 3: Robertson & Campanella (1983), Senneset et al. (1989) e Robertson (1990).

Uma primeira avaliação da adequação dessas propostas foi feita dividindo-se o perfil de solo investigado no dique em três partes (902,25 a 895,00m, 895,00 a 893,00 m e 893,00 a 885,00 m) e procedendo-se a classificação segundo as três propostas.

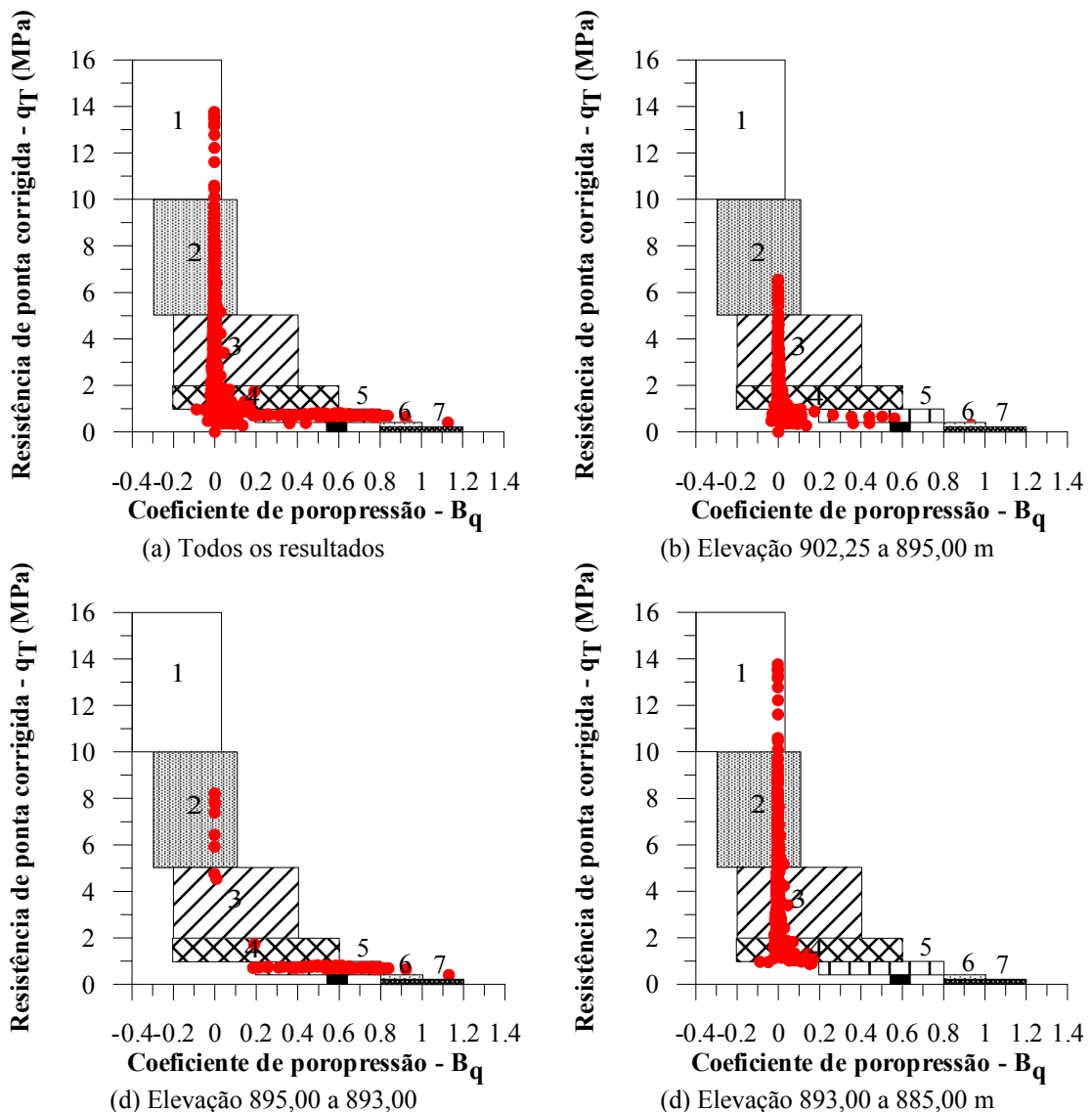
A partir da utilização da proposta de classificação desenvolvida por Robertson & Campanella (1983) foram construídos os gráficos das Figuras 4.17(a) a 4.17(d). A análise destas figuras permite dizer que, em geral, o perfil de solo está inserido dentro de praticamente todas as faixas de classificação. A análise feita separadamente mostra que existem camadas tipicamente arenosas (primeiros metros do perfil) e camadas que indicam certa presença de argila.

Nas elevações 895,00 m a 893,00 m, a classificação de Robertson & Campanella (1983) sugere um material areno-siltoso ou siltoso. Isto indica uma classificação totalmente divergente daquele observada nos ensaios de laboratório, e nos perfis de poropressão e de resistência de ponta corrigida.

A proposta de classificação de solo de Senneset et al. (1989) é apresentada nas Figuras 4.18(a) a 4.18(d).



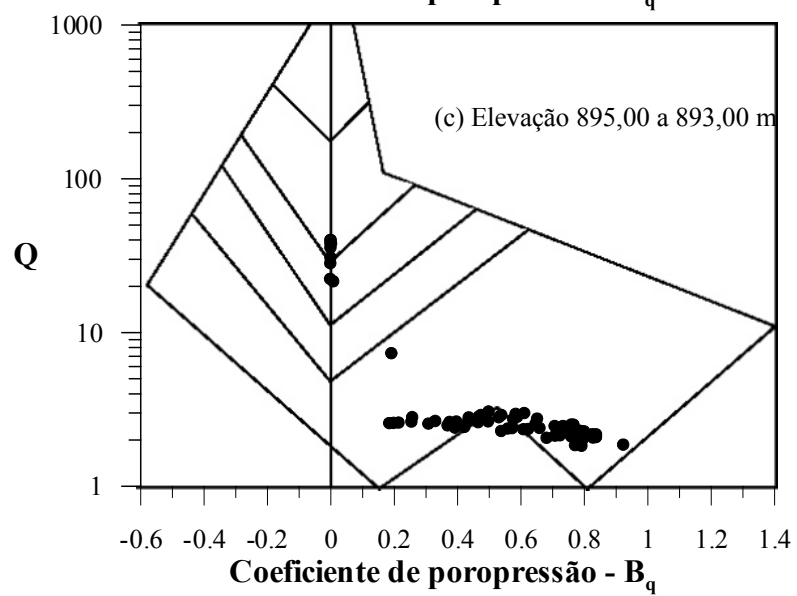
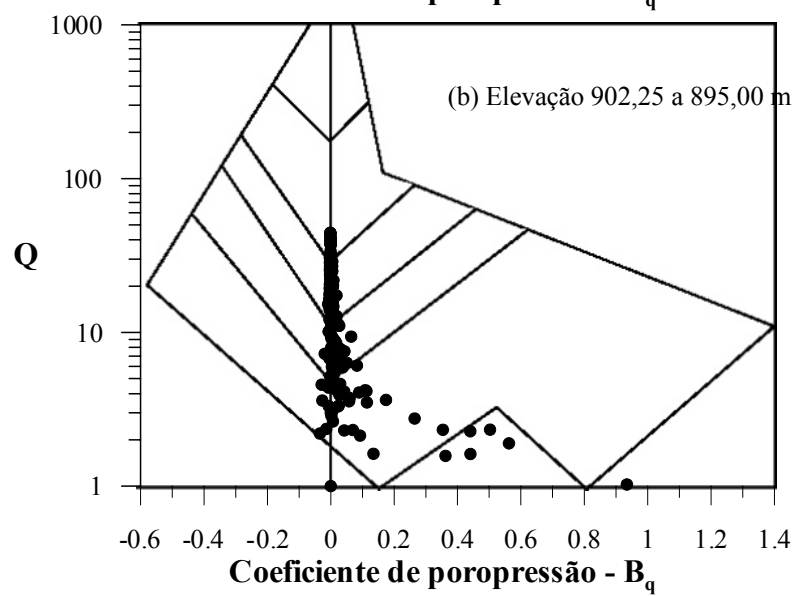
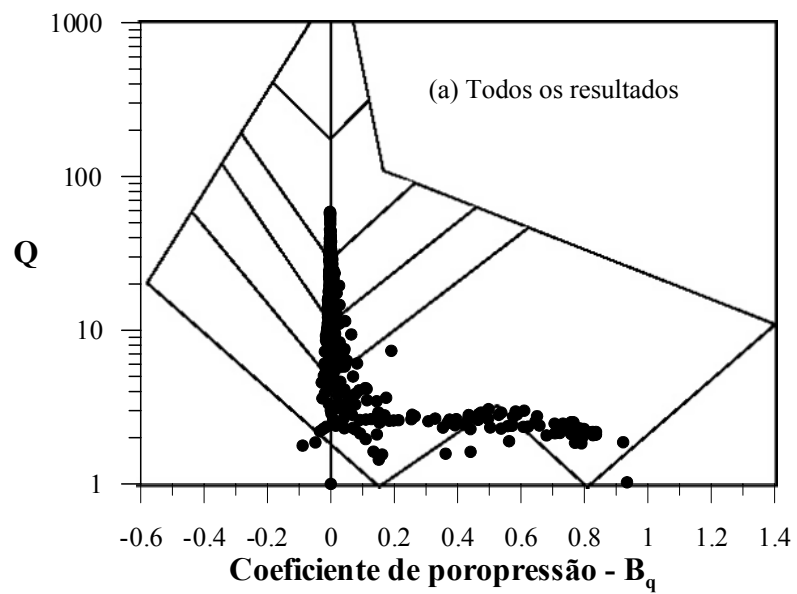
**Figura 4. 17 – Proposta de classificação de Robertson e Campanella (1983) aplicada aos resultados do dique: (a) aplicada a todos os resultados, (b) aplicada as elevações 902,25 a 895,00 m, (c) aplicada as elevações 895,00 a 893,00 e, aplicada as elevações 893,00 a 885,00 m**



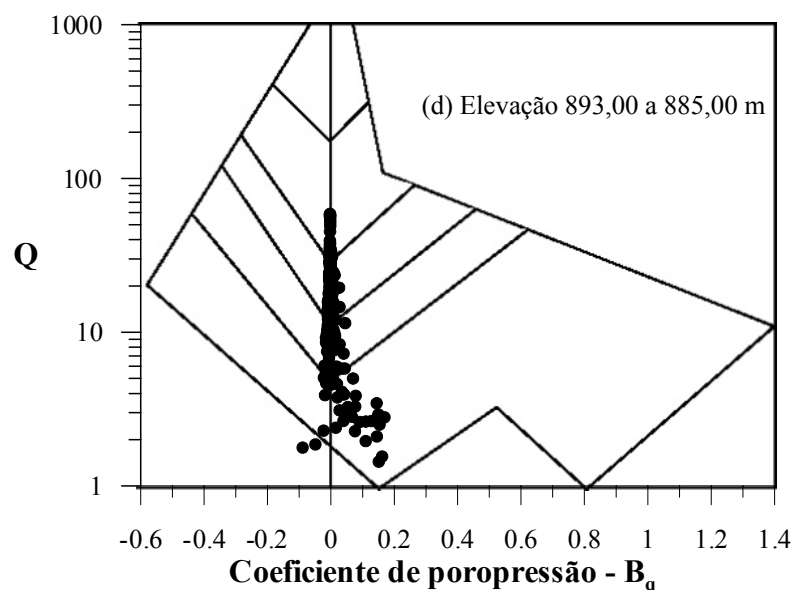
**Figura 4. 18 – Proposta de classificação de Senneset et al. (1989) aplicada aos resultados do ensaio realizado no dique: (a) aplicada a todos os resultados, (b) aplicada as elevações 902,25 a 895,00 m, (c) aplicada as elevações 895,00 a 893,00 e, aplicadas as elevações 893,00 a 885,00 m**

Como pode ser observado, a classificação do solo de Senneset et al. (1989) parece identificar de forma satisfatória os diferentes materiais constituintes do perfil. É clara, por exemplo, a identificação de materiais de granulometria fina (siltes finos e argilas), nos estratos correspondentes às elevações 895,00 m a 893,00 m. Em contrapartida, camadas de areias e siltes também são identificadas ao longo do perfil mostrando o bom ajuste entre os materiais identificados nos ensaios e esta proposta de classificação.

Nas Figuras 4.19(a) a 4.19(d) estão apresentados os resultados a partir da proposta de classificação de Robertson (1990).







**Figura 4. 19.– Proposta de classificação de Robertson (1990) aplicada aos resultados do ensaio realizado no dique: (a) aplicada a todos os resultados, (b) aplicados às elevações 902,25 a 895,00 m, (c) aplicada às elevações 895,00 a 893,00 e, aplicadas às elevações 893,00 a 885,00 m**

A classificação de Robertson (1990) mostrou alguns pontos inseridos na faixa de solo orgânico. Este fato demonstra certa inconsistência entre a classificação proposta e o material do depósito, uma vez que tanto o rejeito depositado quanto o material do dique não apresentam matéria orgânica em sua constituição.

No entanto, no que tange a classificação das areias e siltes, principalmente no primeiro e no último terço do perfil, a proposta se encaixa perfeitamente mostrando, nestes locais, a presença de misturas de siltes e de misturas de areias.

Concluída essa primeira comparação entre as propostas de classificação, com ligeira vantagem para a proposta de Senneset et al. (1989), julgou-se por bem analisar essa diferença de um modo mais detalhado e definitivo. Assim o perfil de solo investigado foi dividido em camadas de um metro (Anexo B) e classificadas segundo as propostas acima citadas. As Tabelas 4.6, 4.7 e 4.8 apresentam estes resultados.

No comparativo metro a metro, é nítido que a proposta de Senneset et al. (1989) apresenta em geral melhor ajuste ao tipo de solo investigado. Adicionalmente, as classificações de Robertson & Campanella (1983) e Robertson (1990) mostram as mesmas limitações observadas na classificação do perfil de solo do dique já comentadas.

**Tabela 4. 6 – Classificação do perfil de solo sob o dique a partir da proposta de Robertson & Campanella (1983)**

Elevação	Robertson & Campanella (1983)
(m)	
895,00 – 894,00	Areias siltosas e siltes
894,00 – 893,00	Mistura de areias e siltes
893,00 – 892,00	Areias e siltes arenosos
892,00 – 891,00	Mistura de siltes e areias com presença de argilas
891,00 – 890,00	Mistura de areias e siltes
890,00 – 889,00	Mistura de siltes, areias com presença de argilas
889,00 – 888,00	Mistura de areias e siltes com presença de argilas
888,00 – 887,00	Mistura de areias e siltes com presença de argilas
887,00 – 886,00	Mistura de areias e siltes com presença de argilas
886,00 – 885,00	Mistura de siltes, areias e argilas

**Tabela 4. 7 – Classificação do perfil de solo sob o dique a partir da proposta de Robertson (1990)**

Elevação	Robertson (1990)
(m)	
895,00 – 894,00	Argilas e solos orgânicos*
894,00 – 893,00	Mistura de areias, argilas e argilas siltosas
893,00 – 892,00	Mistura de areias, mistura de siltes
892,00 – 891,00	Mistura de areias, mistura de siltes com presença de argilas
891,00 – 890,00	Mistura de areias, mistura de siltes
890,00 – 889,00	Mistura de siltes com presença de argilas
889,00 – 888,00	Mistura de siltes com presença de argilas
888,00 – 887,00	Mistura de areias, mistura de siltes com presença de argilas
887,00 – 886,00	Mistura de areias, mistura de siltes com presença de argilas
886,00 – 885,00	Mistura de areias, mistura de siltes com presença de argilas

\* Classificação discrepante com o tipo de solo encontrado no local

**Tabela 4. 8 – Classificação do perfil de solo sob o dique a partir da proposta de Seneset et al. (1989)**

Elevação	Seneset et al. (1989)
(m)	
895,00 – 894,00	Siltes finos e argilas médias
894,00 – 893,00	Areias fofas e argilas de consistência média a mole
893,00 – 892,00	Areias: compactas a fofas
892,00 – 891,00	Areias: compactas a fofas e siltes
891,00 – 890,00	Solos duros e areias compactas a fofas
890,00 – 889,00	Areias: compactas a fofas e siltes
889,00 – 888,00	Areias: compactas a fofas
888,00 – 887,00	Areias: compactas a fofas e siltes
887,00 – 886,00	Areias: compactas a fofas e siltes
886,00 – 885,00	Areias: compactas a fofas e siltes

Provavelmente este melhor desempenho da classificação de Senne set et al. (1989) pode ser atribuído ao uso conjunto por aquela proposta de relações do tipo coeficiente de poropressão ( $B_q$ ) e resistência de ponta corrigida ( $q_T$ ). Segundo Mondelli (2004) a introdução do parâmetro  $B_q$  na classificação do solo é especialmente interessante para solos moles, onde os valores de resistência de ponta são baixos e a geração de poropressão é elevada.

Uma consequência importante desta seção do trabalho será a utilização da classificação de Senne set et al. (1989) na identificação do perfil de solo da área central como será visto a seguir.

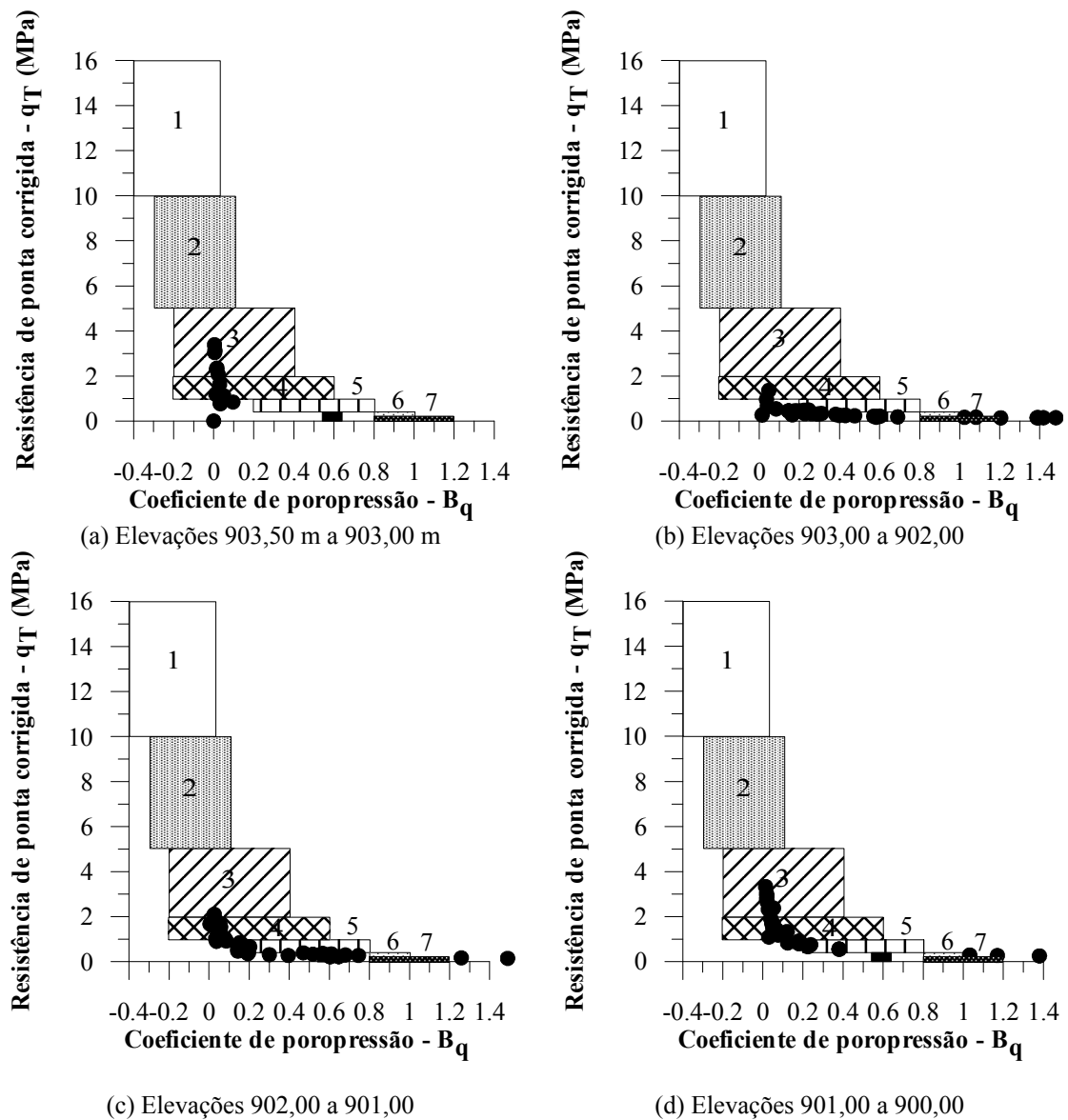
#### **4.5 PERFIL ESTRATIGRÁFICO DA ÁREA CENTRAL**

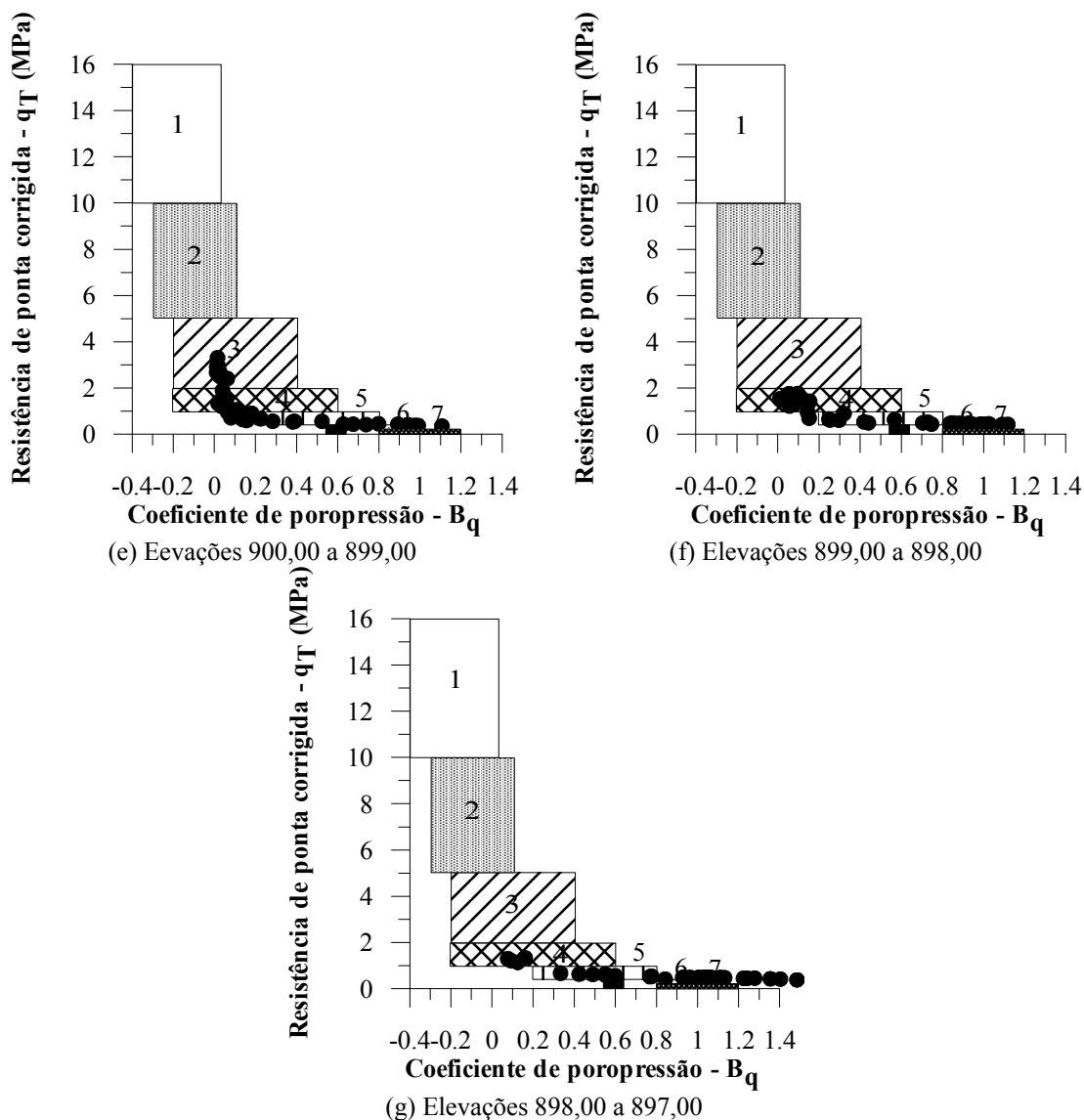
Como visto no item anterior, a classificação de Senne set et al. (1989) foi a que obteve melhor ajuste na comparação com os resultados de ensaio de laboratório e de campo e mapeamento das amostras, principalmente na identificação dos solos de granulometria fina.

Nesta seção far-se-á uma interpretação textural dos materiais que formam o perfil do depósito na baía 4 com base nos resultados do ensaio de cone na área central da baía 4. Trata-se de uma inferência utilizando a classificação textural de Senne set et al. (1989) para os rejeitos de minério de ferro da barragem do Germano. A espessura do depósito de acordo com considerações feitas anteriormente está limitada a 8,00 m.

Uma primeira tentativa de classificação estratigráfica da subsuperfície da área central foi feita dividindo-se o perfil do depósito em sete horizontes. A Figura 4.20(a) apresenta os primeiros 50 cm investigados, onde predominam materiais como areias fofas e siltes. Na Figura 4.20(b), o solo tem uma presença maior de finos que o apresentado na figura anterior, sendo predominantemente composto por siltes finos com presença de argilas. O mesmo comportamento se estende nos próximos estratos, como é o caso do apresentado na Figura 4.20(c). A partir da Figura 4.20(d), o solo muda de comportamento mostrando uma predominância de areias fofas e siltes. Este comportamento continua no próximo estrato, Figura 4.20(e) só que com presença significativa de argilas de consistência média a muito mole. Na Figura 4.20(f) o solo

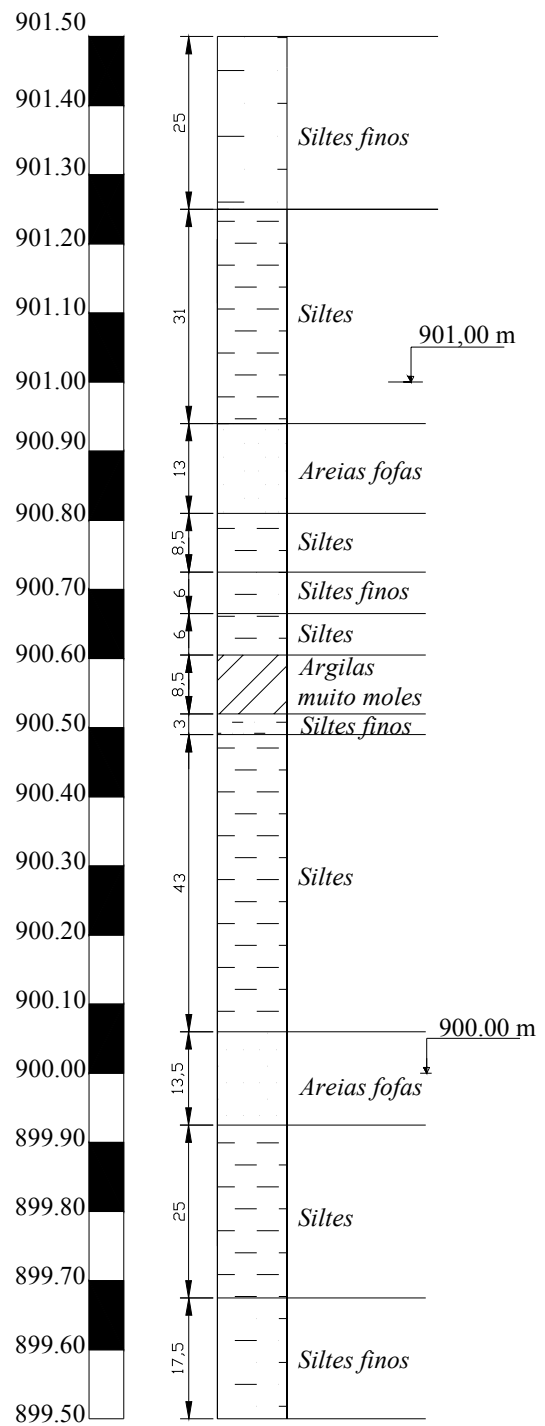
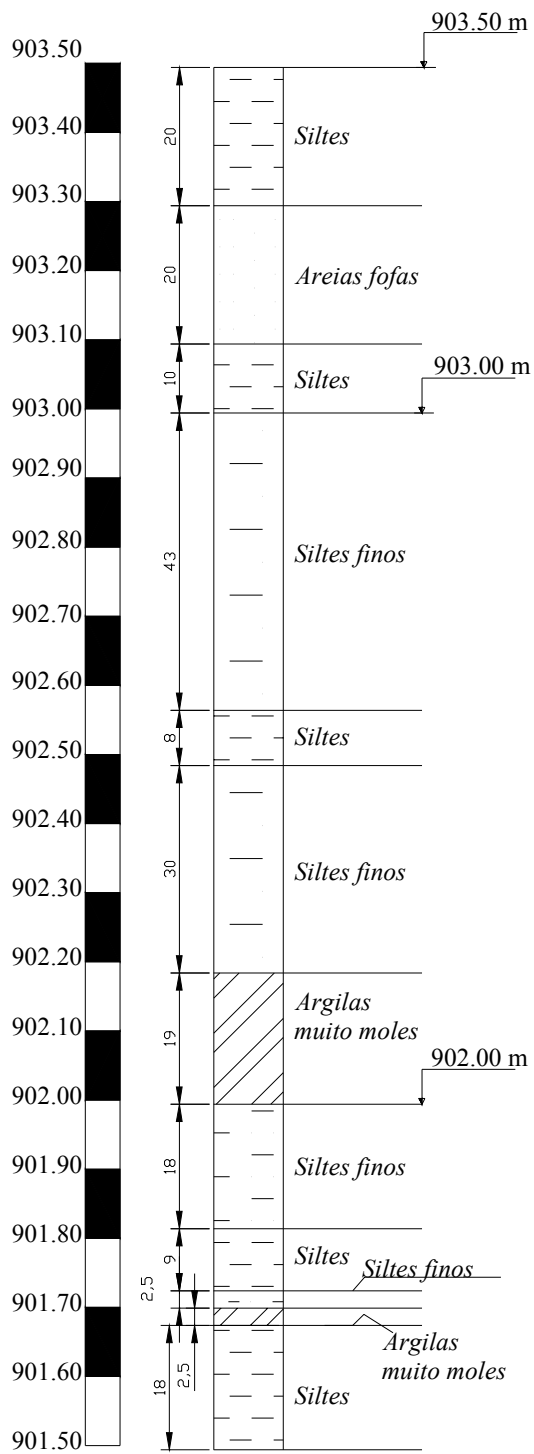
deixa de apresentar a fração arenosa, e a presença de siltes finos e argilas é acentuada. No último metro do depósito, Figura 4.20(g), o comportamento do solo indica presença de materiais de granulometria muito fina, com predominância de siltes finos e argilas (de consistência média a mole).

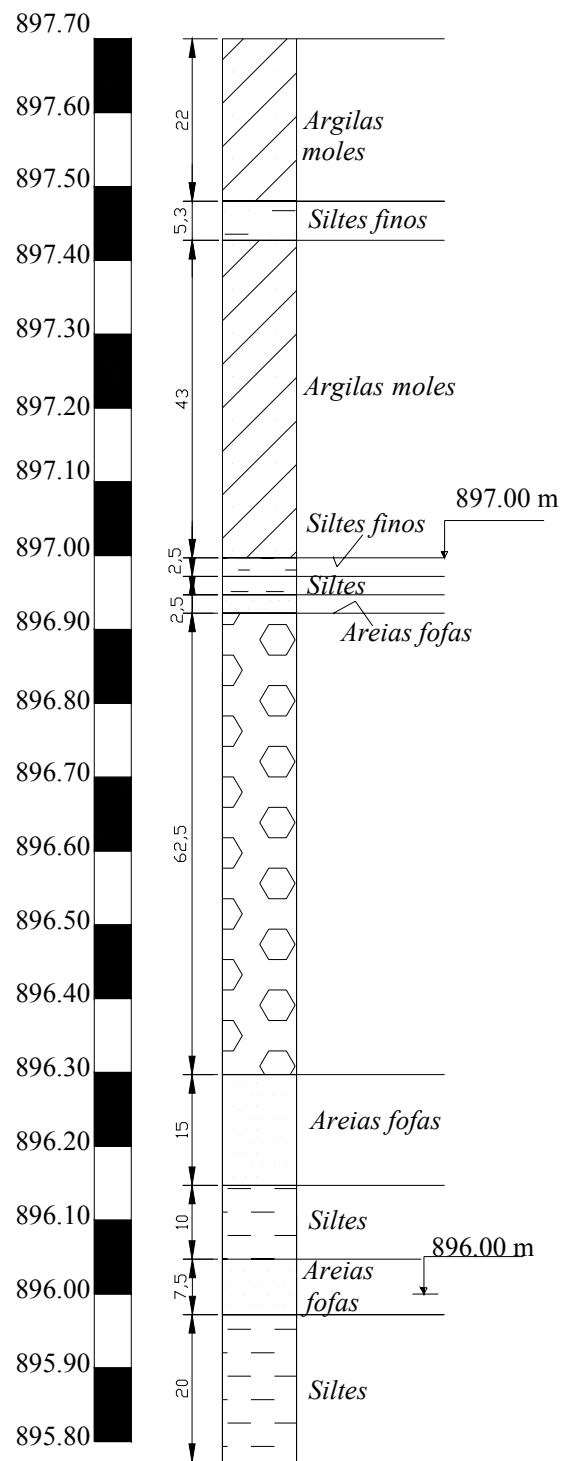
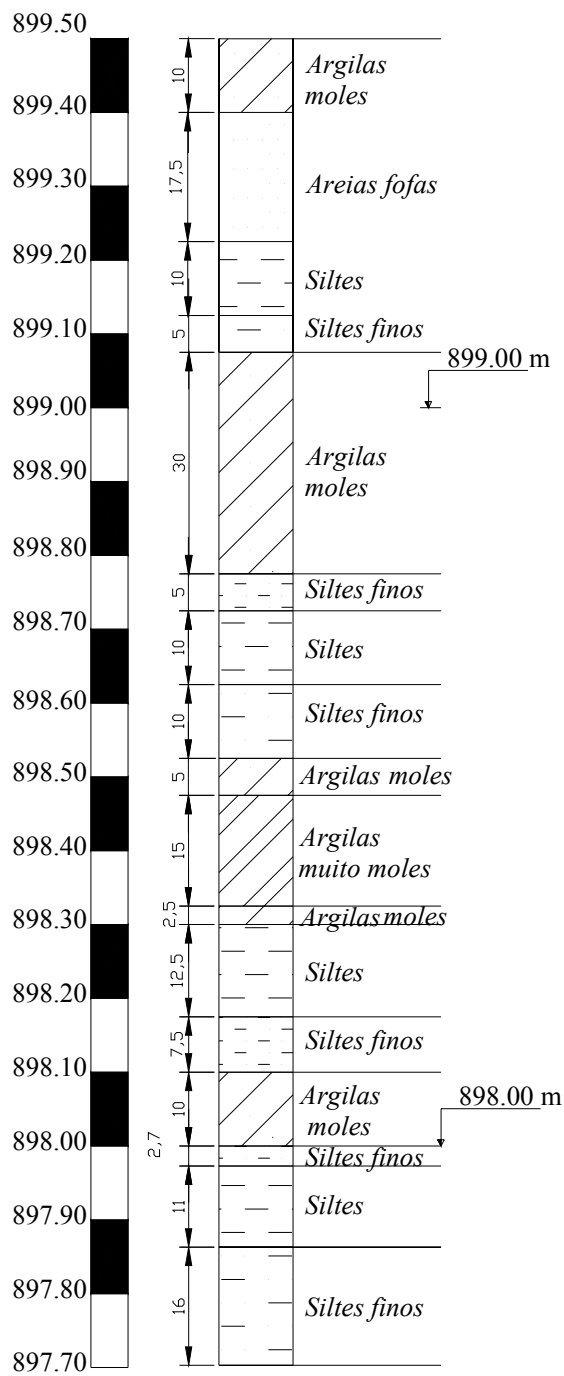


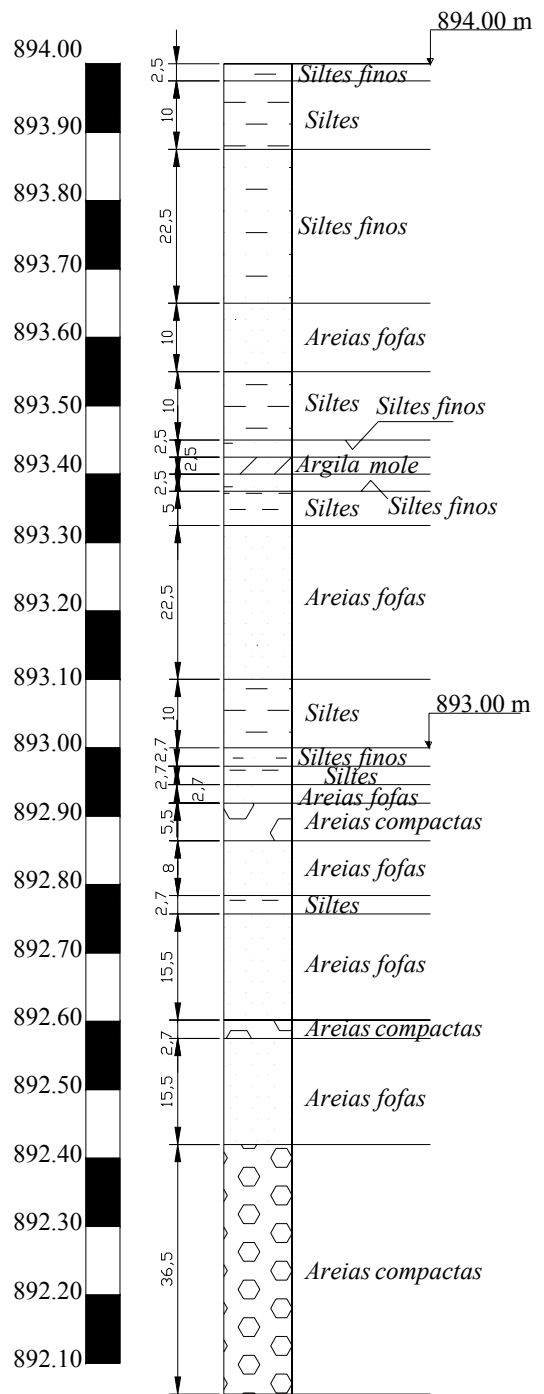
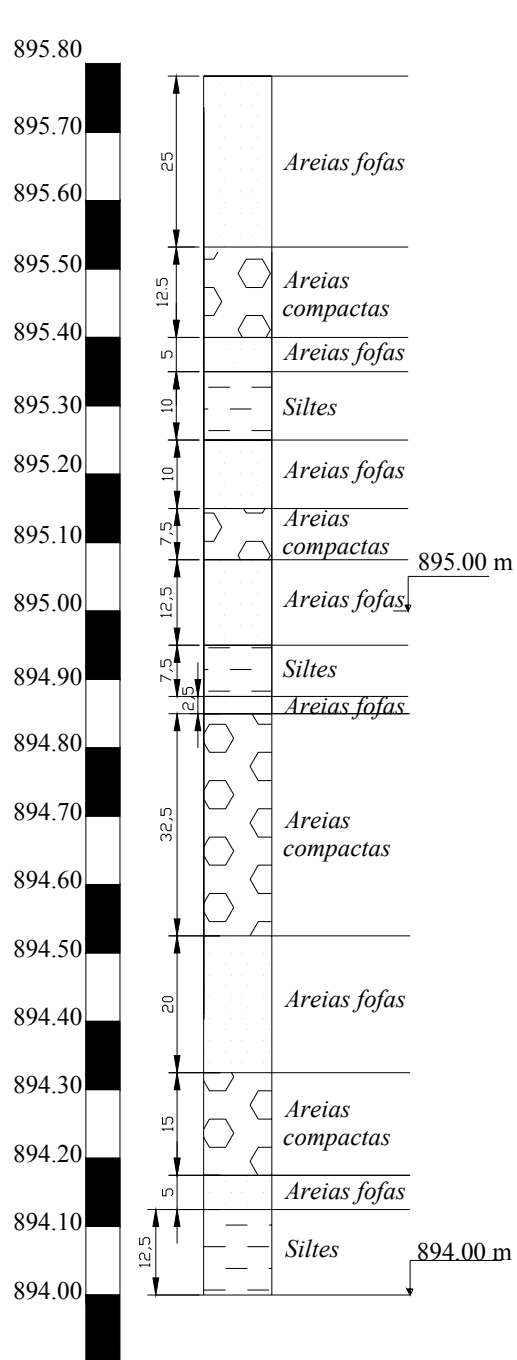


**Figura 4. 20 – Proposta de classificação de Senneset et al. (1989) aplicada aos resultados do ensaio realizado na área central**

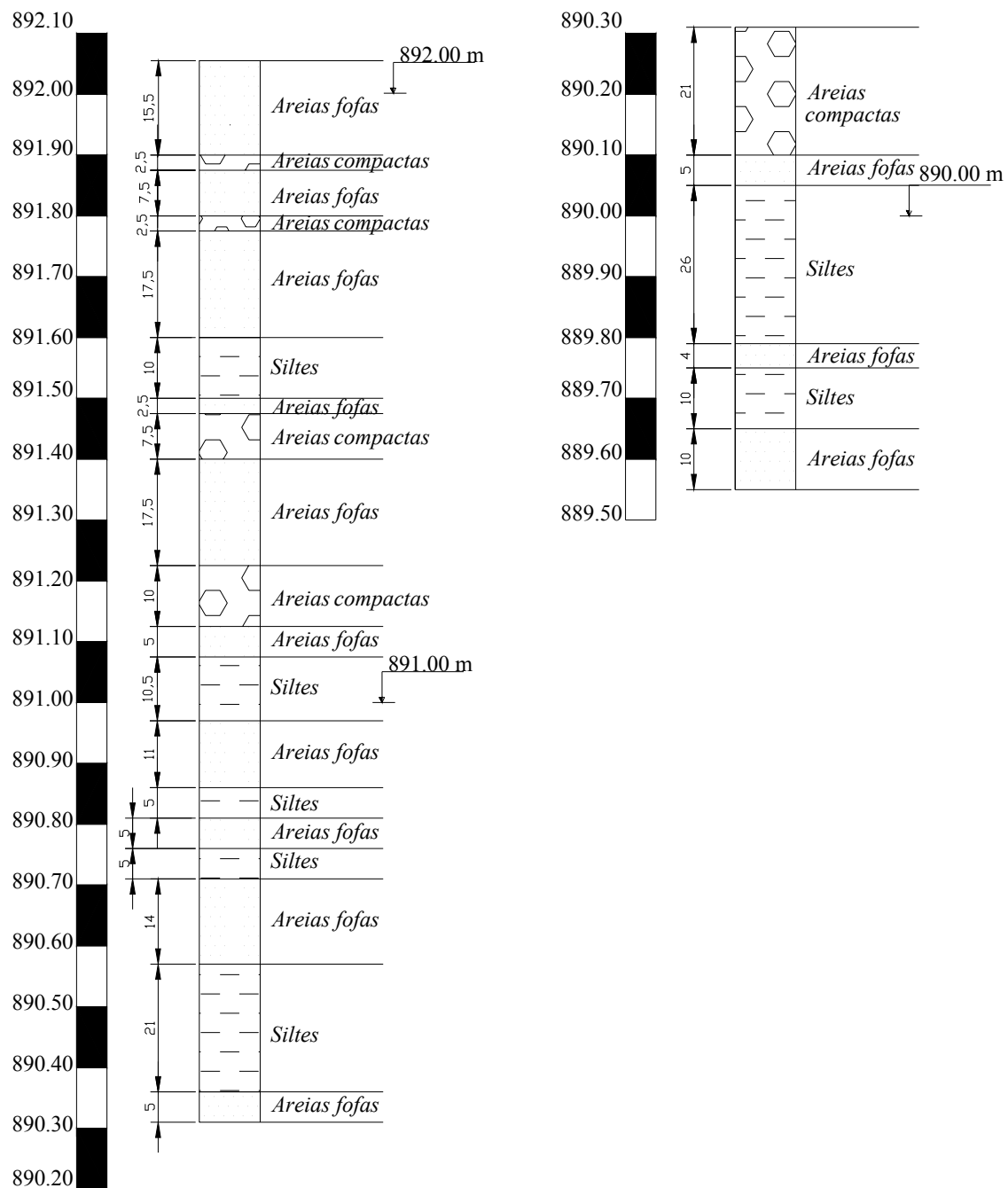
Depois dessa avaliação preliminar dos materiais que podem constituir o perfil do depósito, julgou-se conveniente uma análise de detalhe ao nível da menor medida possível do cone que é de 2,00 a 2,50 cm. Assim o perfil de solo foi dividido em pequenas camadas de aproximadamente 2,00 cm e o solo classificado segundo a proposta de Senneset et al. (1989). Nesta análise de detalhe inclui-se além do depósito (8,00 m) o seu material de fundação (abaixo da El. 897,00 m). O perfil estratigráfico interpretado aparece na Figura 4.21.











**Figura 4. 21 – Perfil estratigráfico da área central**

A análise do perfil da Figura 4.21 mostra claramente que a El. 897,00 m deve ser um divisor na história de deposição de rejeitos naquele local. Acima dessa elevação o perfil é heterogêneo em sua textura, com estratos de granulometria uniforme, mas distintas (de areias a argilas muito moles) e espessuras que podem ser centimétricas ou decimétricas.

Abaixo da El. 897,00 m, os materiais são mais grosseiros, formado por areias e siltes quase que exclusivamente.

É importante ressaltar que a interpretação textural a partir dos ensaios de piezocone é muito reveladora, mas se refere principalmente ao comportamento do material (mecânico e hidráulico). A calibração realizada, no entanto, dá suporte a um grau de confiança na inferência realizada sobre o perfil estratigráfico do depósito.

Finalmente, uma discussão sobre a formação do depósito que deu origem ao perfil acima é feita no Capítulo 5 a seguir.

## **RETROANÁLISE DA FORMAÇÃO DO DEPÓSITO**

Neste capítulo discute-se a retroanálise da formação do depósito segundo duas abordagens. A primeira mais qualitativa é feita a partir de considerações sobre o manejo dos rejeitos (Capítulo 3) e os resultados das investigações (Capítulo 4). A outra usa uma modelagem numérica do método construtivo sub-áereo aplicado à formação do depósito.

### **5.1 MODELO QUALITATIVO DA FORMAÇÃO DO DEPÓSITO**

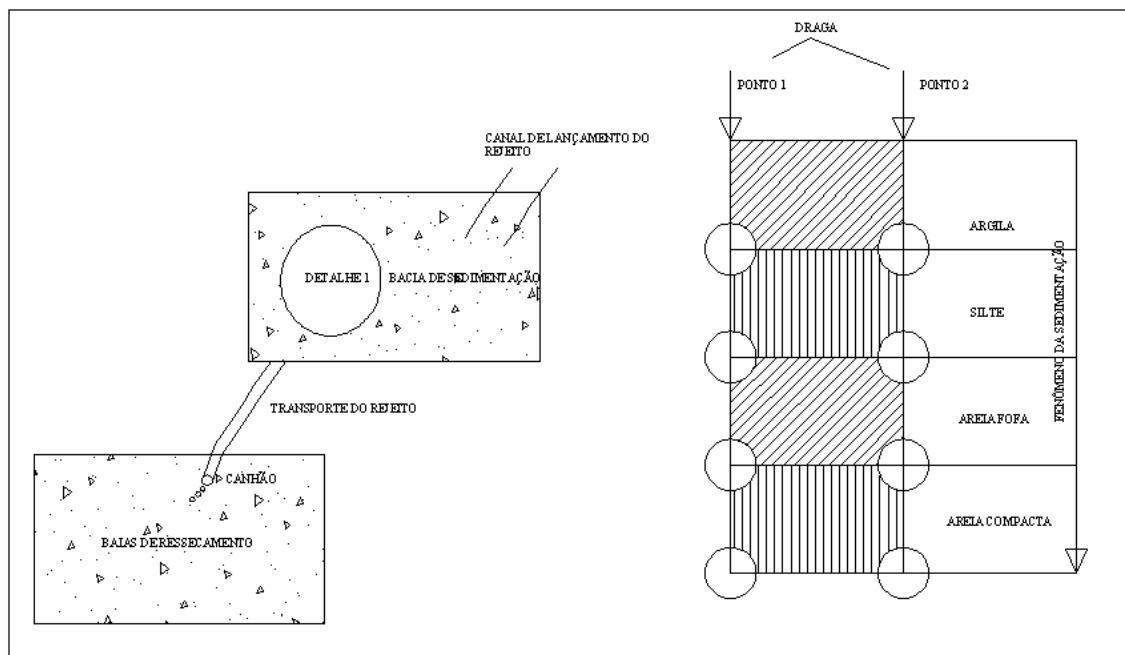
Como visto no Capítulo 4, a heterogeneidade dos materiais do depósito (acima da El. 897,00 m) é algo significativo, mostrando que os materiais lançados não eram apenas rejeitos finos silto-argilosos como se suponha como identificados em trabalhos anteriores com lamas (Silva, 2003; Almeida, 2004).

A seqüência textural de materiais do depósito parece refletir o padrão típico de uma deposição hidráulica e a forma de manejo. É evidente a variação da textura do material desde areia até argila (ver Figura 4.21).

Sobre o manejo dos rejeitos, é importante que se lembrem pontos já apresentados no Capítulo 3 que podem explicar essa variação na textura. Pelo que se sabe os rejeitos do depósito são originários do material dragado na bacia de sedimentação/adensamento do reservatório de Germano, aquela que servia de residência para o aumento de teor de sólidos antes da deposição nas baías de ressecamento (Figura 3.1). Este material da

bacia obedecia às leis de sedimentação e de segregação típicas de uma deposição hidráulica. Esse aspecto aliado ao fato de os materiais lançados na barragem não serem materiais apenas de granulometria fina podem sugerir que num perfil possam ser encontrados materiais heterogêneos com espessuras variáveis.

No contexto de formação sugerido acima para a bacia de sedimentação atuou a draga que removia esse material para as baias de ressecamento (Figura 5.1). A exploração da draga iniciava-se numa cota mais elevada e seguia em profundidade, encontrando estratos diferenciados numa mesma vertical. Ao ser deslocado para outro local, algo que se fazia com frequência, repetia-se a mesma seqüência de materiais explorados na vertical anterior. O material dragado era lançado nas baias e o perfil resultante constituiria o reverso do existente na bacia de sedimentação.



**Figura 5. 1 – Esquema de operação da draga**

Um bom exemplo do que se discutiu acima é o perfil da figura 4.21 entre as elevações de 900,00 m a 899,00 m, onde fica evidente a variação gradual da textura do material desde areia até argila em duas seqüências seguidas.

## **5.2 MODELAGEM NUMÉRICA DO MÉTODO SUBAÉREO - ALGORITMO**

O programa CONDES citado no Capítulo 2 é usado aqui para a modelagem do método construtivo subaéreo utilizado na disposição de rejeitos da baía 4. Neste sentido um algoritmo é proposto e apresentado a seguir:

### **1ª. Camada:**

Executa-se o programa CONDES na condição de adensamento com enchimento contínuo, obedecendo a uma certa taxa de formação da camada; adota-se base impermeável. Esta fase é denominada ciclo de enchimento.

Executa-se CONDES na condição de adensamento com possibilidade de ressecamento; neste caso a altura inicial da camada é a da simulação anterior; outras condições iniciais, como o perfil de índice de vazios, são também os da simulação anterior; a taxa de evaporação é prescrita na fronteira superior; a base é admitida impermeável. Esta etapa é conhecida como ciclo (ou tempo) de espera.

### **2ª. Camada e outras sucessivas:**

Executa-se CONDES na condição de adensamento com enchimento contínuo, obedecendo a uma certa taxa de formação da camada; a altura da camada é a do final da simulação anterior; as condições iniciais são as herdadas da simulação anterior (perfil final de índice de vazios); adota-se base impermeável (ciclo de enchimento).

Executa-se CONDES na condição de adensamento com possibilidade de ressecamento; a altura da camada é a da simulação anterior; as condições iniciais (perfil de índice de vazios) são as da simulação anterior; a taxa de evaporação é prescrita na fronteira superior; a base é admitida impermeável (ciclo de espera).

Um algoritmo semelhante a este foi adotado por Almeida (2004) para duas camadas. No entanto, a diferença entre a modelagem atual e a realizada por Almeida (2004) está em considerar que as camadas inferiores estão livres para experimentar recalques adicionais. Esta situação é diferente da estratégia adotada pelo referido autor que

“congelava” a camada anterior, considerando a mesma rígida o suficiente para não sofrer recalques adicionais.

As Figuras 5.2 e 5.3 ilustram os resultados obtidos usando o algoritmo na modelagem do método construtivo subaéreo.

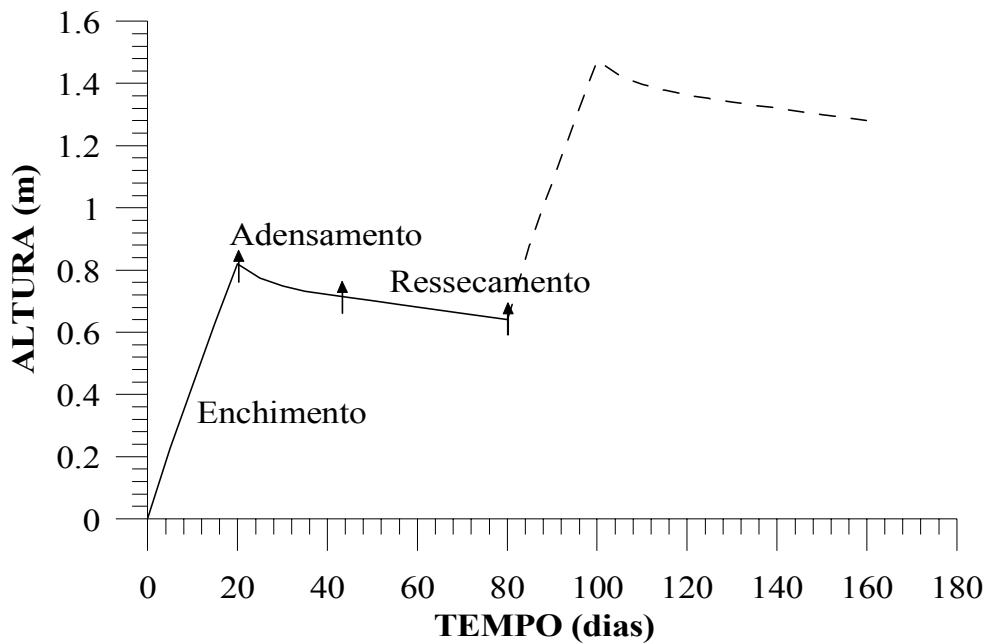


Figura 5. 2 – Ciclos de enchimento e de espera

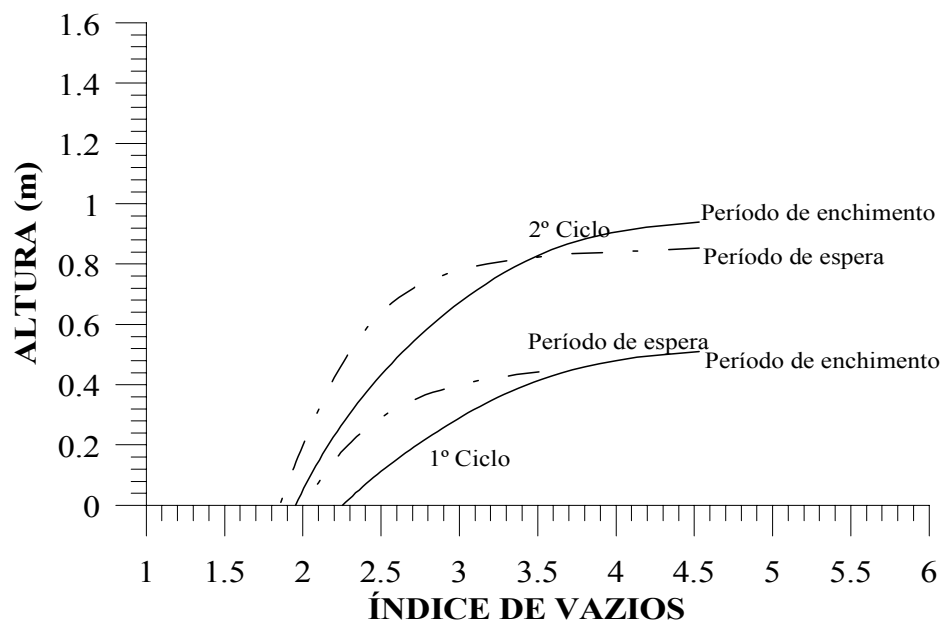


Figura 5. 3 – Perfil de índice de vazios

### **5.3 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS DO MÉTODO SUBAÉREO - MANEJOS**

O algoritmo proposto anteriormente modela as fases de enchimento e de espera e segue os passos estabelecidos no manejo de um rejeito fino pelo método sub-aéreo. No que segue são apresentadas simulações para situações práticas de disposição daqueles rejeitos.

Utilizando-se os dados de entrada de Almeida (2004), as simulações foram feitas para tempos, em geral, de 20 dias de enchimento e de 60 dias de espera, e foram considerados 8 ciclos completos. Outros dados de entrada importantes para as análises incluem as taxas de 0.002 mm/dia de evaporação potencial (Silva, 2003) e de 0.06 m/dia de enchimento do reservatório, e o índice de vazios mínimo para o ressecamento, determinado em 1,05.

As condições acima de manejo supõe a existência de 4 estruturas de secagem. Ávila et al. (1995) destacam a importância de diferentes seções de um reservatório (baías) que permitam os ciclos de lançamento e de espera. Segundo Ulrich et al. (2000) estes ciclos previstos no método subaéreo trazem benefícios não só porque permitem a densificação do material, mas porque também há um aumento significativo da sua resistência.

#### **5.3.1 Aplicação do Algoritmo para Tempo de Espera Constante**

Estas simulações objetivam mostrar, de maneira geral, as possibilidades de o algoritmo modelar a formação de um depósito numa condição mais realista e, em particular, avaliar a influência do peso próprio das camadas superiores no comportamento das camadas iniciais. A Tabela 5.1, a seguir, mostra os períodos dos ciclos correspondentes a 8 camadas.

Os resultados das simulações são mostrados nas Figuras. 5.4(a) e 5.4(b). Entretanto, antes de se analisar esta figura, é oportuno observar a Tabela 5.2 que apresenta informações sobre o ressecamento das camadas nos diversos ciclos.

**Tabela 5. 1 - Período dos ciclos de 1 a 8, paratempo de espera constante**

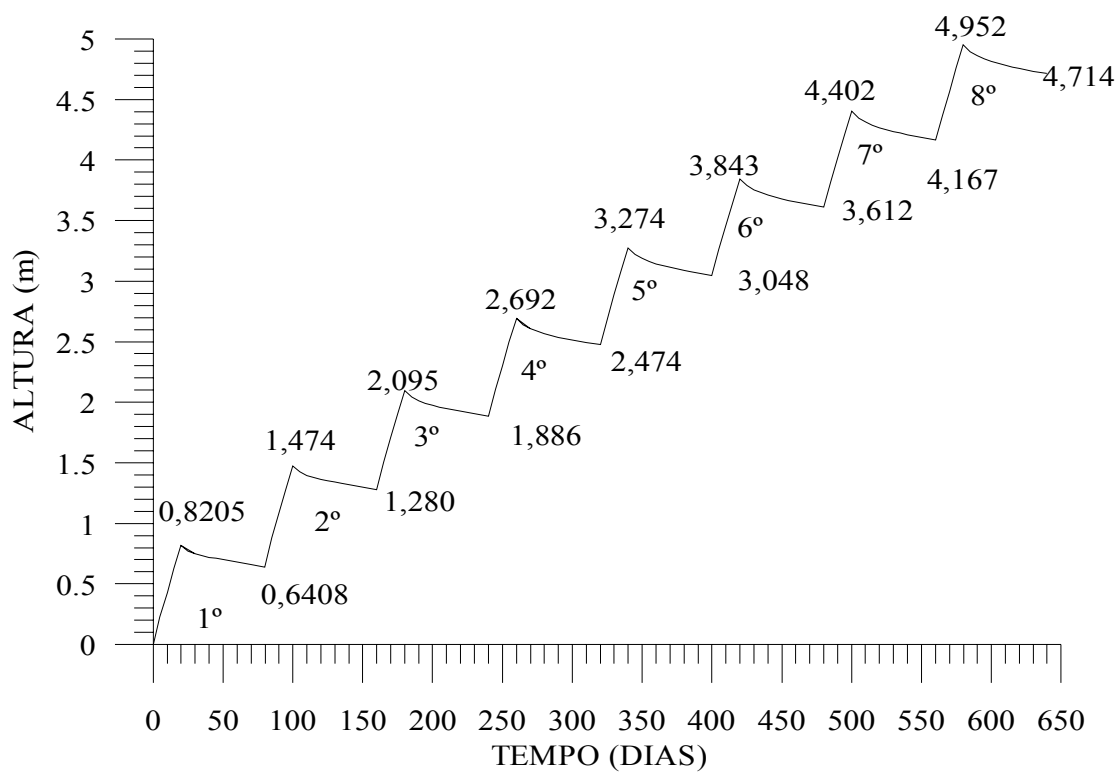
<b>Ciclos</b>	<b>Início do enchimento (dia)</b>	<b>Final do enchimento e início da fase de espera (dia)</b>	<b>Final da fase de espera (dia)</b>
1	0	20	80
2	80	100	160
3	160	180	240
4	240	260	320
5	320	340	400
6	400	420	480
7	480	500	560
8	560	580	640

**Tabela 5. 2 – Intervalos de tempo dos ciclos 1 ao 8 para o tempo de ressecamento constante**

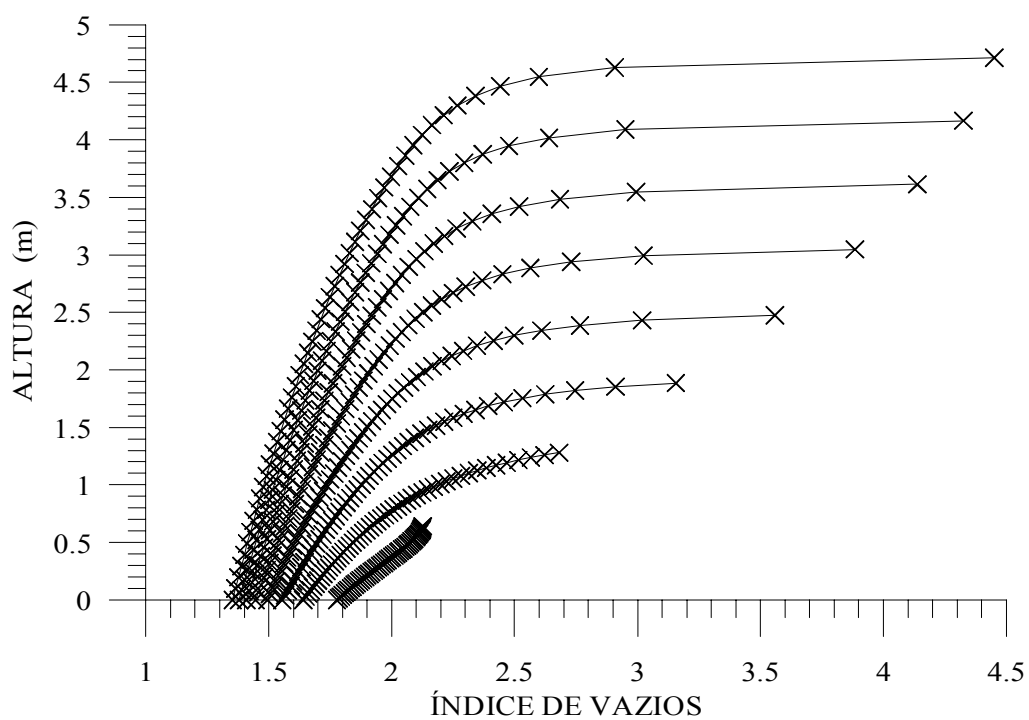
<b>Ciclos</b>	<b>Período de espera (dia)</b>	<b>Tempo de espera (dia)</b>	<b>Início do ressecamento (dia)</b>	<b>Tempo de ressecamento (dia)</b>
1	20-80	60	40	40
2	100-160	60	135	35
3	180-240	60	215	25
4	260-320	60	300	20
5	340-400	60	385	15
6	420-480	60	470	10
7	500-560	60	553	7
8	580-640	60	637	3

O início do ressecamento cada vez mais tardio em cada novo ciclo de espera, mostrado na Tabela 5.2, permite que sejam feitas algumas considerações: A primeira é a interpretação de que às deformações (recalques) por adensamento devido ao peso próprio da camada nova se somam deformações adicionais das camadas inferiores devido ao aumento da coluna de lama. Essa reativação do adensamento dessas camadas justificaria o “atraso para o início do ressecamento”. A segunda observação diz respeito à duração do ressecamento que no decorrer dos ciclos é cada vez menor e chega quase a desaparecer no último período de espera. A consequência disso serão camadas cada vez menos densificadas na sua totalidade (ação dos fenômenos físicos de adensamento e ressecamento).





(a)



(b)

Figura 5. 4 – (a) Curva de altura do depósito versus tempo e, (b) Perfil de índice de vazios

A Figura 5.4(a) mostra a progressão da espessura do depósito com o tempo segundo o manejo estabelecido. A altura de rejeito é justificada pelas etapas de enchimento e os processos físicos envolvidos, nesse caso principalmente o adensamento por peso próprio como visto na Tabela 5.2. Assim, pelo menos nessa estratégia, não há muita contribuição do ressecamento na densificação do depósito.

A Figura 5.4(b) mostra a evolução do perfil de índice de vazios durante a formação do depósito. Percebe-se a atuação cada vez menor do ressecamento na parte mais superficial do depósito em cada ciclo. As consequências já vistas quanto a densificação, podem ser estendidas à questão da resistência do material na superfície e próximo a esta, que deverá ser muito menor quando comparado com uma camada totalmente ressecada. Este último resultado pode afetar trabalhos de reabilitação do reservatório ou a execução de obras temporárias. Resumidamente, o método subaéreo não estaria sendo realizado na sua plenitude.

### **5.3.2 Aplicação do Algoritmo para Tempo de Espera Variável**

Foram realizadas análises adicionais para o tempo de espera variável de modo a simular um manejo onde o ressecamento pudesse ser mais efetivo, caso que não foi observado no item 5.3.1.

A variação do tempo de espera foi estabelecida a partir de simulações numéricas preliminares que indicavam, em cada ciclo, o início do processo de ressecamento. A essa informação, data de início do ressecamento, foi somado um número constante de dias de ressecamento. No caso, adotou-se 40 dias, o mesmo estabelecido no 1º ciclo da simulação do item 5.3.1. Desta forma, foi possível assegurar um tempo de ressecamento constante para cada camada e conseqüentemente avaliar sua interferência nos resultados finais.

A Tabela 5.3 exibe os correspondentes tempos de enchimento e espera. Vale observar que o tempo de ressecamento é fixado em 40 dias.

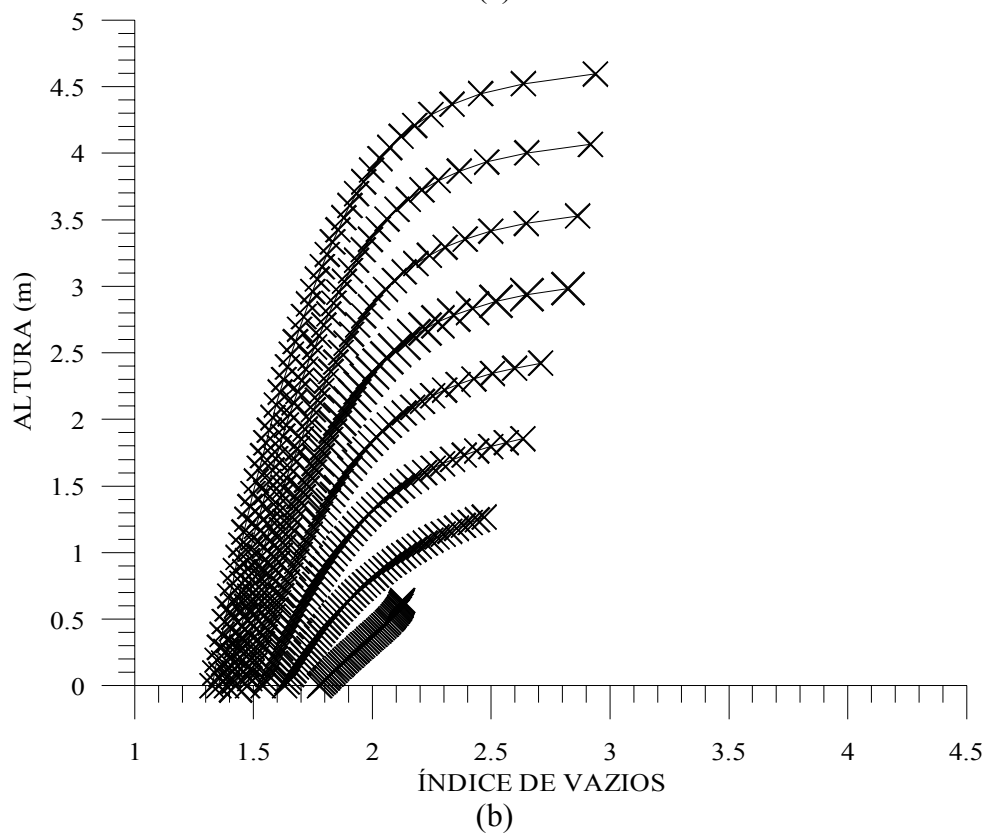
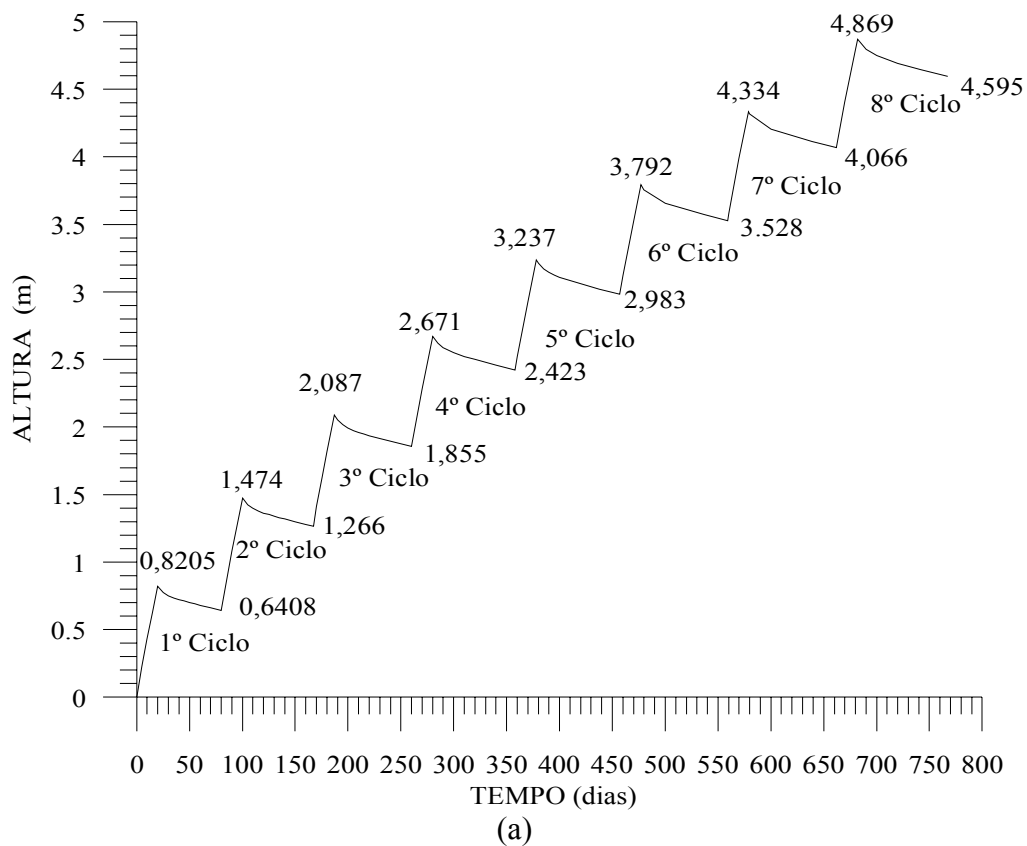
Os resultados dessas simulações aparecem nas Figuras 5.5(a) e 5.5(b). Um manejo como o proposto renderia um depósito mais densificado na comparação à proposta de

manejo anterior com base nas diferenças entre as alturas finais. Adicionalmente, esse manejo possibilitaria a existência de uma camada superior mais resistente (menor índice de vazios) e conseqüentemente mais adequada a receber carregamentos de uma eventual obra temporária ou definitiva na superfície.

Finalmente, vale dizer que essa última estratégia de manejo poderia ser ainda melhorada com tempos de ressecamento progressivamente maiores (maiores tempos de espera), uma vez que a estratégia de tempos de ressecamento constante ainda não corresponde a uma otimização (veja, por exemplo, o recuo desigual do índice de vazios no topo da camada atual ao longo dos diversos ciclos).

**Tabela 5. 3 – Intervalos de tempo dos ciclos 1 ao 8 considerando o tempo de espera variável**

<b>Ciclos</b>	<b>Período de enchimento (dia)</b>	<b>Periodo de espera (dia)</b>	<b>Tempo de espera (dia)</b>	<b>Início do ressecamento (dia)</b>	<b>Tempo de ressecamento (dia)</b>
1	0 -20	20-80	60	40	<b>40</b>
2	80-100	100-167	67	127	<b>40</b>
3	167-187	187-260	73	220	<b>40</b>
4	260-280	280-358	78	318	<b>40</b>
5	358-378	378-457	79	417	<b>40</b>
6	457-477	477-559	82	519	<b>40</b>
7	559-579	579-662	83	622	<b>40</b>
8	662-682	682-767	85	727	<b>40</b>



**Figura 5. 5 – Análises com tempo de espera variável (a) Curva de altura do depósito versus tempo e, (b) Evolução do perfil de índice de vazios**

## **5.4 RETROANÁLISE DA FORMAÇÃO DO DEPÓSITO ATRAVÉS DO ALGORITMO NUMÉRICO**

### **5.4.1 Considerações Iniciais**

O algoritmo apresentado nos itens anteriores será agora aplicado ao depósito de rejeitos objeto de estudo. Uma breve descrição do projeto é feita inicialmente a título de introdução ao problema. Um relato mais detalhado foi apresentado no Capítulo 3.

O projeto de ressecamento de lama concebido pela Pimenta de Ávila Consultoria (2001) tinha por objetivo a redução do índice de vazios (aumento do teor de sólidos) e, conseqüentemente, um ganho de resistência do material.

Por esse projeto, o rejeito fino da planta chegaria a uma bacia de sedimentação/adensamento com um teor de sólidos de 20% e ficaria residente na mesma até atingir, por adensamento, um teor de sólidos da ordem de 40%. Esse material já adensado seria então dragado e lançado em outras áreas do reservatório do Germano chegando ao final dos processos de adensamento e ressecamento com cerca de 80% de sólidos em sua constituição.

Como relatado no Capítulo 3, a implantação do projeto começou em setembro de 2003. Por meio de uma draga, o rejeito da bacia de residência era bombeado às estruturas destinadas ao seu armazenamento chamadas baias de ressecamento. Ao todo eram quatro baias destinadas a receber o rejeito. O lançamento do rejeito nas baias era feito em um único ponto e em uma única estrutura por vez. Daí a necessidade de mais de um reservatório que garantisse o lançamento intermitente do material.

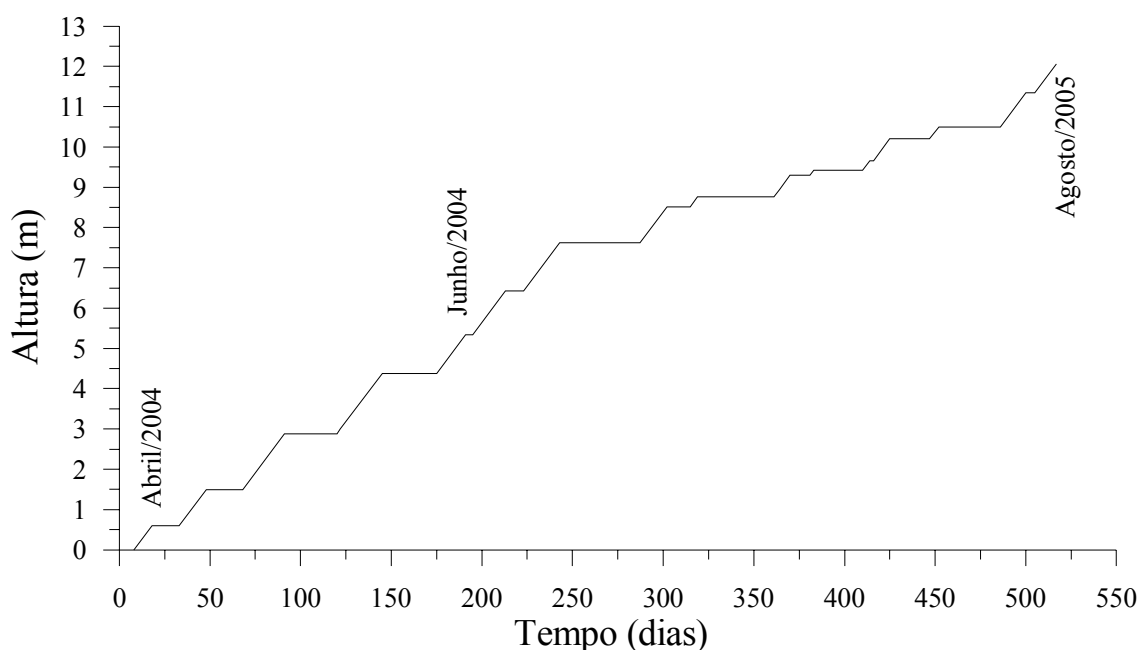
O rejeito fino depositado na baia ficava então exposto à evaporação superficial por um determinado tempo. Passado o ciclo de espera, o lançamento era novamente direcionado àquela estrutura.

A baia 4 objeto de estudo desta pesquisa, de área equivalente a 153.750,00 m<sup>2</sup>, contém aproximadamente 8,00 m de espessura de rejeitos depositados pelo método subaéreo, e em setembro de 2005 o rejeito da baia encontrava-se na cota 905,00 m.

Como já discutido no item 5.1, ao contrário do que se pensara antes das investigações de campo, a baía 4 recebeu além da lama, outros materiais como o próprio rejeito arenoso e outros materiais provenientes de eventuais transbordos da planta de beneficiamento.

#### 5.4.2 Simulação da Formação do Depósito

A formação do depósito na baía 4 foi feita pelo método sub-aéreo conforme relatado no Capítulo 3. Os períodos de enchimento e de espera aparecem nos registros de operação da draga a partir de abril de 2004 e constam da Figura 5.6.



**Figura 5. 6 – Curva de enchimento obtida pelo registro da draga durante o período de abril de 2004 a agosto de 2005 (Dados: Samarco Mineração S.A. – Registros da draga)**

Pela figura pode-se afirmar que o método construtivo adotado pela empresa não seguiu intervalos de tempos regulares em nenhuma das fases - enchimento e espera. Por exemplo, em dezembro de 2004 e julho de 2005, não foram lançados rejeito no depósito enquanto que em junho de 2004, o depósito recebeu rejeito praticamente durante todo o mês.

Infelizmente, o período de observação não cobre o tempo total de existência do depósito, e assim para efeito da modelagem os dados anteriores foram extrapolados até agosto de 2003.

Para a modelagem numérica da formação do depósito optou-se por trabalhar não com a curva de enchimento real e sim uma que tivesse períodos regulares de enchimento e espera. A razão disso se deve a uma maior simplicidade e também porque no caso o que interessava era o resultado final. De qualquer forma a altura de sólidos, ou o seu equivalente tempo total de enchimento, seria o mesmo no modelo e na situação real (histórica).

As análises numéricas referentes à retroanálise do depósito em questão consideraram 23 ciclos completos incluindo as fases de lançamento e de espera. Em todos os ciclos as fases de lançamento e de espera seguiram intervalos de tempo de 12 e de 18 dias, respectivamente, num total de 690 dias. Este número foi estabelecido mediante a pesquisa documental e a curva de enchimento fornecida pela empresa.

Outros dados importantes para a análise (propriedades constitutivas da lama, por exemplo) foram os mesmos obtidos por Silva (2003) e por Almeida (2004).

#### **5.4.3 Resultados das Análises**

A Tabela 5.4 e as Figuras 5.7 e 5.8 mostram os resultados das análises em termos de altura da camada (H versus tempo) e índice de vazios (H versus índice de vazios), respectivamente.

Ao final dos 23 ciclos completos chegou-se à altura ( $H_0$ ) igual a 8,16 m. Como mencionado, a hipótese inicial adotada para a altura do depósito era de 8,00 m, o que demonstra de uma maneira geral uma boa qualidade da modelagem, refletindo consistência dos dados de entrada e a modelagem do método construtivo.

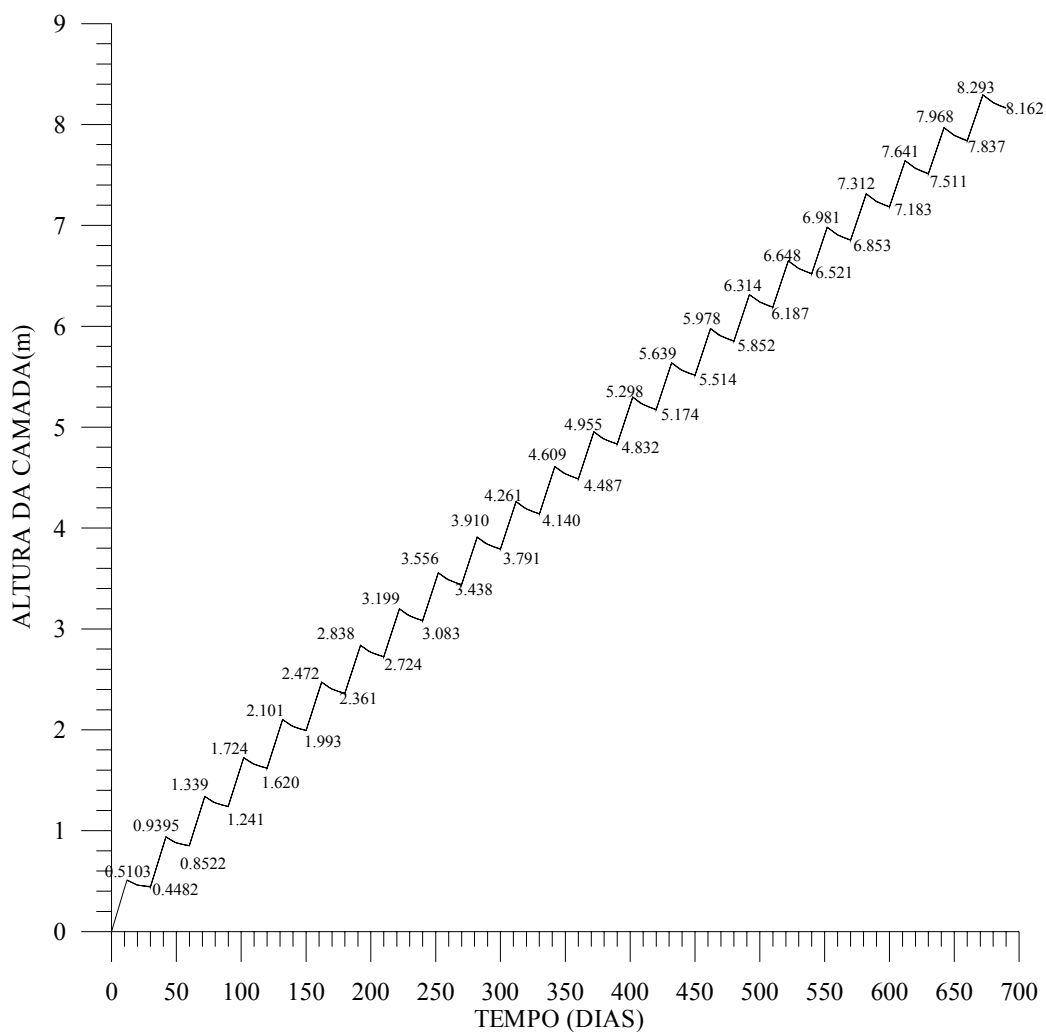
Os resultados das análises mostraram que os recalques sofridos num ciclo entre o final do enchimento e o final do período de espera eram gradativamente maiores enquanto os “incrementos de recalque” entre uma camada e outra passaram a ser menores a cada ciclo. Isto demonstra em primeiro lugar que as camadas sobrepostas causam recalques

adicionais devido ao seu peso próprio, e em segundo lugar que as camadas inferiores ficam cada vez mais rígidas (índice de vazios maiores) diminuindo os incrementos com o decorrer dos ciclos.

**Tabela 5. 4 – Resultados da variação da altura do depósito com o tempo**

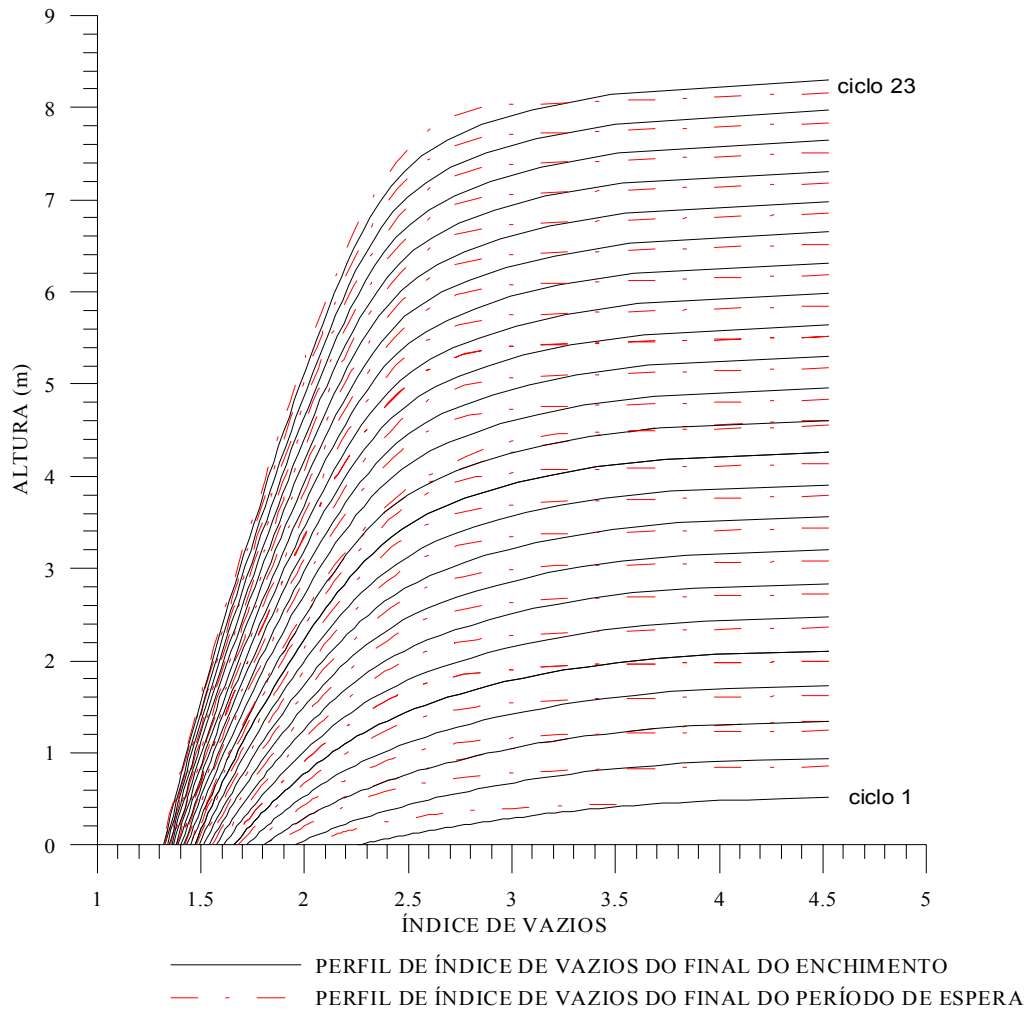
<b>Ciclos</b>	<b>H(enchimento) (m)</b>	<b>H (espera) (m)</b>	<b>H(enchimento) - H(espera) (m)</b>
1	0,5103	0,442	0,0683
2	0,9395	0,8522	0,0873
3	1,339	1,241	0,098
4	1,724	1,62	0,104
5	2,101	1,993	0,108
6	2,472	2,361	0,111
7	2,838	2,724	0,114
8	3,199	3,083	0,116
9	3,556	3,438	0,118
10	3,91	3,791	0,119
11	4,261	4,14	0,121
12	4,609	4,487	0,122
13	4,955	4,832	0,123
14	5,298	5,174	0,124
15	5,639	5,514	0,125
16	5,978	5,852	0,126
17	6,314	6,187	0,127
18	6,648	6,521	0,127
19	6,981	6,853	0,128
20	7,312	7,183	0,129
21	7,641	7,511	0,13
22	7,968	7,837	0,131
23	8,293	8,162	0,131





**Figura 5. 7 – Altura do depósito investigado**

Já as análises de ressecamento demonstraram que este fenômeno acontece cada vez mais tarde (algo já constatado no item 5.3.2). Inclusive, neste caso, a eficiência do ressecamento pode ser questionada a partir do 2º ciclo (observe não há recuo da curva de índice de vazios a não ser no 1º ciclo).



**Figura 5.8 – Evolução do perfil de índice de vazios do depósito investigado**

#### 5.4.4 Outras Considerações de Manejo e Projeto

Os resultados do manejo acima podem ser confrontados com duas hipóteses de projeto. Por exemplo, caso fossem consideradas as alturas nominais a que chegaria o depósito baseado em densidades de sedimentação a altura final seria de 16,59 m. Um cálculo fácil de ser feito tomando-se 276 dias de enchimento vezes a taxa de deposição, ou usando a equação 5.1, onde  $e_0 = 4,53$  e  $H_s = 3,00$  m, sendo  $e_0$  índice de vazios no final da sedimentação e  $H_s$  altura de sólidos.

$$H_0 = H_s (1 + e_0) \quad (5.1)$$

A altura obtida na hipótese acima é o dobro do manejo realizado o que dá uma idéia importância dos fenômenos físicos, nesse caso principalmente o adensamento.

Uma outra possibilidade, no outro extremo, seria realizar um manejo tal que no período de espera se permitisse o ressecamento total da camada do último enchimento, isto é, todas as camadas seriam ressecadas até seu limite máximo (limite de contração). Nesse caso, a altura final seria de 6,15 m. Para os cálculos bastaria utilizar a mesma equação 5.1, mas substituindo  $e_{00}$  por  $e_{min}$ , onde este último corresponde ao índice de vazios do limite de contração. No caso do material em questão, a lama utilizada nos estudos de Almeida (2004) e Silva (2003),  $e_{min} = 1,05$ .

Vê-se que nesse caso a eficiência seria máxima, embora a um custo que pode ser excessivo no que diz respeito ao tempo de espera. A Figura 5.9 ilustra estes comentários e situa o resultado do manejo obtido no caso real.

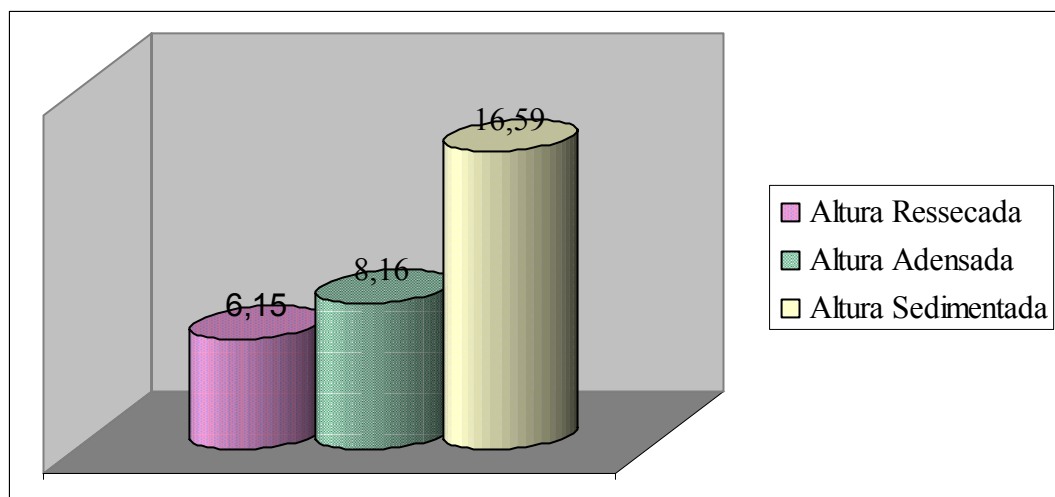


Figura 5. 9 – Variação da altura do depósito em relação aos fenômenos físicos sofridos pela lama

## 5.5 CONCLUSÃO SOBRE O MANEJO REALIZADO

O estudo realizado procurou retroanalisar um depósito de rejeitos a partir de considerações sobre o método construtivo e o manejo dos materiais que o formam. Viu-se que contrariamente ao que se pensava os rejeitos depositados na baía 4 não eram homogêneos e muito menos silto-argiloso como o considerado nas premissas de um projeto de ressecamento de lamas.

Na hipótese de um depósito formado apenas pela lama silto-argilosa, um modelo numérico foi construído para realizar a retroanálise. Esse trabalho de modelagem utilizando dados reais do manejo ou equivalentes (curva de enchimento) forneceu para o depósito em questão, a altura final de 8,16 m. A análise sugere que o processo de ressecamento não teve a eficiência esperada ou até mesmo não aconteceu. Isto parece mostrar que o manejo dos rejeitos em questão nem sempre aconteceu de maneira adequada.

Outra inadequação está nos tempos adotados nos períodos de enchimento e de espera, os quais não seguiram qualquer critério baseado nos processos físicos esperados no método subaéreo. Os resultados mostraram que os mesmos não seriam suficientes a ponto de efetivar os processos físicos que o rejeito fino passaria após seu lançamento. Esta constatação demonstra que pouco ou nenhum ganho em termos de otimização de volumes seria conseguido, aproximando-se os resultados do manejo realizado ao que seria esperado no método de disposição convencional ou até numa co-disposição convencional.

## **CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS**

### **6.1 CONCLUSÕES**

Este trabalho estudou a formação de um depósito de rejeitos finos construído pelo método conhecido como subaéreo. O trabalho consistiu na retroanálise de um depósito já formado em que essa técnica foi utilizada.

Para a retroanálise e conseqüente avaliação do depósito foram empregadas três metodologias de trabalho: ensaios de campo, ensaios de laboratório e simulações numéricas. A partir destas metodologias chegou-se às conclusões apresentadas abaixo:

#### **6.1.1 Ensaios de Campo**

##### **a) Sondagem de Simples Reconhecimento com Medida de $N_{SPT}$**

- Embora seja um ensaio de simples execução e relativamente barato, a sondagem simples se mostrou eficiente na identificação de camadas de solos com diferentes “resistências” no perfil;
- Como foi o primeiro ensaio executado serviu como referência para a realização de todos os demais ensaios;
- Os resultados das sondagens foram consistentes com os resultados obtidos no ensaio de piezocone e nos ensaios de laboratório, mostrando a eficiência deste ensaio na identificação dos tipos de solos constituintes do depósito.

#### b) Ensaio de Piezocone

- O piezocone mostrou-se uma ferramenta eficaz na definição do perfil estratigráfico do solo, fato conseguido através calibração de seus resultados;
- A classificação de Senneset et al. (1989) foi a que melhor se ajustou ao perfil de solo investigado com base na classificação textural;
- A calibração do piezocone para os rejeitos da barragem do Germano possibilitou que inferências pudessem ser feitas sobre os constituintes do perfil do depósito;
- É notável o nível de detalhe que a interpretação estratigráfica dos resultados do piezocone é capaz (2 a 2,5 cm), permitindo que lentes de camadas de pequena espessura pudessem ser identificadas;
- O perfil do terreno revelou, ao contrário do que fora inicialmente pensado, que o depósito não recebeu apenas finos silto-argilosos, mas também, e em sua maior parte, finos silto-arenosos;
- O perfil estratigráfico do depósito pode de fato ser considerado predominantemente silto-arenoso com presença de siltes, argilas e areias fofas em algumas camadas;
- O perfil mostra seqüências estratigráficas com variações graduais de textura, indicando que as condições de sedimentação da deposição hidráulica, ou do material que vinha para a baía, pudessem variar no tempo;
- A hipótese de continuidade horizontal das camadas, admitida inicialmente, pode ser questionada nos horizontes do perfil com material mais grosseiro;

### 6.1.2 Ensaaios de Laboratório

#### a) Ensaaios de Caracterização Completa

- Os resultados dos ensaios de laboratório serviram para calibração textural dos resultados do piezocone.

### 6.1.3 Simulações Numéricas

#### a) Casos Gerais

O projeto de manejo de rejeitos finos de mineração pode se beneficiar do algoritmo numérico proposto, principalmente naqueles casos dos métodos alternativos de disposição. A aplicação do algoritmo a situações práticas de manejo levou às seguintes conclusões:

- O algoritmo permite modelar a formação de um depósito de rejeito fino pelo método subaéreo, seguindo as fases de enchimento e de espera estabelecidos nesse manejo;
- Recalques adicionais (ou a reativação do adensamento) de camadas inferiores ocorrem e podem ser consideradas na modelagem;
- As camadas inferiores tendem a ficar cada vez mais rígidas com o decorrer dos ciclos;
- A atuação do fenômeno de ressecamento pode ser extremamente prejudicada numa estratégia de período de espera constante, tendo como consequência camadas menos densificadas e pouco consistentes próximo à superfície;
- Uma otimização do manejo é possível com a adoção de tempos de espera progressivamente maiores, de modo a permitir que a fase de ressecamento atue num maior período;
- O algoritmo proposto representa um avanço importante na popularização do uso de ferramentas computacionais de origem acadêmica na atividade de projeto, aproximando a Indústria da Universidade.

#### b) Aplicação ao Depósito de Rejeito Fino de Mineração da Samarco

- O manejo de rejeitos nem sempre aconteceu de forma controlada em termos de períodos de enchimento e de espera vindo a interferir significativamente na efetivação dos fenômenos físicos;
- Em termos médios, o período de enchimento corresponderia a 12 dias e o de espera a 18 dias;

- Adotando-se os tempos médios acima, as simulações mostram que o processo de ressecamento deixa de ser eficiente a partir do 2º ciclo, inexistindo a partir deste;
- Assim toda redução de volumes (e os recalques) pode ser atribuída ao adensamento da camada recém-lançada e aos recalques adicionais das camadas inferiores, não havendo nenhuma contribuição ressecamento;
- A não efetivação do ressecamento implica além de menores recalques, menor resistência das camadas superficiais;
- A situação acima descrita para o depósito leva à conclusão de que os resultados pouco se diferenciariam se o manejo dos rejeitos tivesse sido realizado pelo método convencional.

Concluindo os trabalhos pode-se dizer que o objetivo da retroanálise foi atingido mediante o concurso das três frentes de investigação. Nenhuma delas é completa, mas o conjunto possibilita uma interpretação satisfatória sobre a formação do depósito de rejeitos finos da baía 4. Além disso esse trabalho permitiu que algumas lições pudessem ser tiradas sobre o manejo de rejeitos fino, utilizando o método sub-aéreo tanto em termos de projeto como em suas implicações operacionais.

## **6.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS**

A investigação de métodos alternativos de disposição de rejeitos finos ainda é um campo a ser mais explorado, principalmente nestes tempos de maior preocupação ambiental, de dificuldades de licenciamento de novas áreas de disposição e da própria limitação quanto ao uso renovado da água do processo. Muito do que se conhece sobre o método convencional pode ser adaptado e aplicado a essas técnicas alternativas, como foi bem mostrado nessa dissertação.

Neste contexto, sugerem-se os seguintes tópicos a serem abordados futuramente:

- Examinar ainda no método subaéreo a questão das resistências que podem ser atingidas no período de espera durante a fase de ressecamento;



- Estudar os novos métodos de disposição de rejeitos finos como uma alternativa eficaz na otimização das áreas de armazenamento e no tempo de reabilitação destas áreas;
- Estender os estudos ora realizados a outros tipos de rejeitos e verificar a aplicabilidade das metodologias utilizadas neste trabalho;
- Aprofundar as semelhanças e diferenças do comportamento de depósitos de rejeitos finos fabricados pelo homem com os depósitos de solos moles formados naturalmente;
- Estudar a relação constitutiva entre a resistência ao cisalhamento não drenada e a consistência do solo fino para melhor entendimento dos benefícios das técnicas alternativas para fins de reabilitação.

## ***REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS***

---

- Abu-Hejleh, A. N (1993). Desiccation Theory for Soft Soils. Ph.D. Thesis, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of Colorado, 206 p., Boulder, Colorado.
- Abu-Hejleh, A.N. & Znidarcic, D (1995). Desiccation Theory for Soft Cohesive Soils. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, v. 121, n° 6, p. 493-502.
- Albuquerque Filho, L. H (2004). Análise do Comportamento de Barragens de Rejeitos de Minério de Ferro Através de Ensaio de Piezocone. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, 194 p., Ouro Preto.
- Almeida, F. E (2004). Análise Numérica do Processo de Ressecamento de um Rejeito Fino da Mineração de Ferro. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, 108 p., Ouro Preto.
- Almeida, F. E.; Oliveira Filho, W. L. & Nogueira, C. L. (2005). Análise Numérica de Ressecamento de um Rejeito Fino da Mineração de Ferro. Revista Escola de Minas, v.58, n.4, p. 355-365.
- Árabe, L. C. G. (1995). Aplicabilidade de Ensaio In situ para a Determinação de Propriedades Geotécnicas de Depósitos Argilosos e de Solos Residuais. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 346 p., Rio de Janeiro.
- Ávila, J. P.; Soares, R. & Costa, L. H. D (1995). Deposição de Rejeitos Finos pelo Método de Secagem. III Simpósio sobre Barragens de Rejeitos e Disposição de Resíduos (REGEO), v. 01, p. 97-108.
- Bedeschi, M. V. R. (2004). Recalques em Aterro Instrumentado Construído Sobre Depósito Muito Mole com Drenos Verticais na Barra da Tijuca. Dissertação de

Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 172p, Rio de Janeiro.

- Botelho, A. P. D (2001). Implementação de Metodologias de Ensaio para Determinação de Relações Constitutivas de Processos de Fluxo em Solos com a Utilização da Bomba de Fluxo. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, 242 p., Ouro Preto.
- Chaves, A. P (Org). Teoria e Prática do Tratamento de Minérios. 1ª edição. São Paulo: Signus, p. 279-288.
- Chaves, A.C.; Nascimento, J.P.; Carneiro, R. R. & Madeira, R. G (1996 Filtragem. In: Chaves, A. P (Org). Teoria e Prática do Tratamento de Minérios. 1ª edição. São Paulo: Signus, p. 349-400.
- ICOLD (2002) - International Commission on Large Dams, Belo Horizonte, 1 CD-ROM.
- Gipson (1998) citado em Norman & Raforth (1998).
- Grabinsky, M. W., Theriault, J. & Welch, D. (2002). An Overview of Paste and Thickened Tailings Disposal on Surface. Mine Waste and Environment, Noranda, Canadá, Novembro, p. 5-12.
- In Situ Geotecnia Ltda (2006). Investigação Geotécnica – Relatório Técnico ,7 p.
- Konrad, J. M., Ayad, R (1997). An Idealized Framework for the Analysis of Cohesive Soils Undergoing Desiccation. Canadian Geotechnical Journal, v. 34, p. 477- 488.
- Lima, M. J. C. P. A (1979). Prospecção geotécnica do subsolo. 1ª edição. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos.
- Marinho (1994) citado por Villar (2002).
- Massad, F. (2003) Obras de Terra: Curso Básico de Geotecnia. 1ª edição. São Paulo: Oficina de Textos Editora.

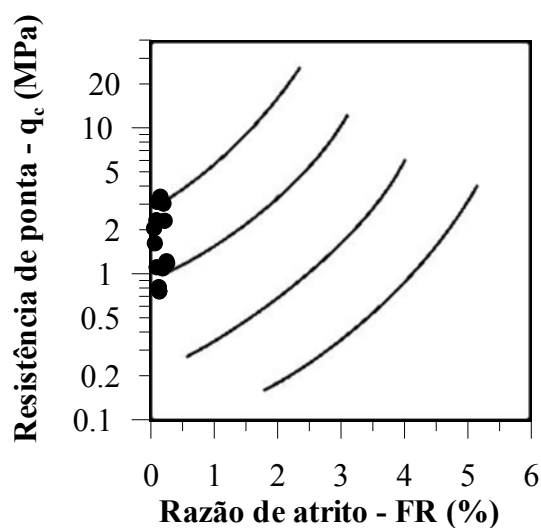
- Meireles, E. B. (2002). Retrospectiva dos Quinze Anos de Ensaios de Piezocone em Argila Mole na COPPE/UFRJ. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 210 p., Rio de Janeiro.
- Mitchell, J. K. (1976). Fundamentals of Soil Behaviour. John Wiley & Sons, Inc., New York, 422 p.
- Mondelli, G. (2004) Investigação Geoambiental em Áreas de Disposição de Resíduos Sólidos Urbanos Utilizando a Tecnologia do Piezocone. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 264 p., São Paulo.
- Norman, D. K. & Raforth, R. L. (1998). Innovations and Trends in Reclamation of Metal Mine Tailings in Washington. Washington Geology, v. 26, n ° 2/3, p. 29-42.
- Oliveira, J. T. R. (2002) A Influência da Qualidade da Amostra no Comportamento Tensão – Deformação - Resistência de Argilas Moles. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 264 p., Rio de Janeiro.
- Oliveira -Filho, W. L (1998). Verification of Desiccation Theory for Soft Soils. Ph.D. Thesis - Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of Colorado, 230 p., Boulder, Colorado.
- Oliveira-Filho, W. L. & van Zyl, D. (2006<sup>a</sup>). Modeling Discharge of Interstitial Water from Tailings Following Deposition – Part 1. Solos e Rochas, São Paulo, v.29, (1), 11p.
- Pimenta de Ávila Consultoria Ltda. (2001). Relatório da Revisão do Plano Diretor de Disposição de Rejeitos do Germano. Relatório Técnico, 10 p.
- Relatório Parcial de Ensaios (2006) - Universidade Federal de Viçosa.
- Ribeiro, L. F. M. (2000). Simulação Física do Processo de Formação de Aterros Hidráulicos Aplicado a Barragens de Rejeitos. 235p. Tese de Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, 235 p., Brasília.
- Robertson, P.K. & Campanella, R.G. (1983). Interpretation of Cone Penetration Tests. Part I: Sand. Canadian Geotechnical Journal, v. 20, p. 718-733.

- Robertson, P. K. (1990). Soil Classification Using the Cone Penetration Test: Replay. Canadian Geotechnical Journal, n ° 28, p. 176 - 178.
- Robinsky, E.I (2000). Sustainable Development in Disposal of Tailings. In: Tailings and Mine Waste'00. Anais...Balkema, Rotterdam, p. 39-48.
- Samarco Mineração S.A. – Nota Técnica enviada por email em setembro de 2005.
- Samarco Mineração S.A. – Relatório Técnico de Registro da Draga, 12 p.
- Schnaid, F. (2000). Ensaios de Campo e suas Aplicações à Engenharia de Fundações. 1ª edição. São Paulo: Oficina de Textos Editora.
- Setes Engenharia Ltda (2005). Relatório Técnico de Resultados de Sondagens, 5 p.
- Senneset, K., Sanven, R. & Janbu, N. (1989). Evaluation of soil parameters from piezocone tests. In: Transportation Research Record, Washington D.C., USA, p. 24-37.
- Spannenberg, M. G. (2003). Caracterização Geotécnica de um Depósito de Argila Mole da Baixada Fluminense. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 162 p., Rio de Janeiro.
- Silva, D. R. (2003). Estudos do Processo de Ressecamento de um Rejeito Fino de Minério de Ferro em uma Área Teste.. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, 141p., Ouro Preto.
- Theriault, J. A.; Frostiak, J.; Welch, D. Surface Disposal of Paste Tailings at the Bulyanhulu Gold Mine, Tanzânia. Disponível em: <http://tailings.info/casestudy/bulyanhulu.pdf>>. 2003. Acesso em 06 dez. 2005.
- Ulrich, B., East, D. R.; Gorman, J. (2000). Subaerial tailings deposition- Design, construction and operation for facility closure and reclamation. In: Tailings and Mine Waste'00. Anais...Balkema, Rotterdam, p. 29-37.
- Vick, S. G. (1983). Planning, Design and Analysis of Tailings Dams. John Wiley & Sons, Inc., 369 p.

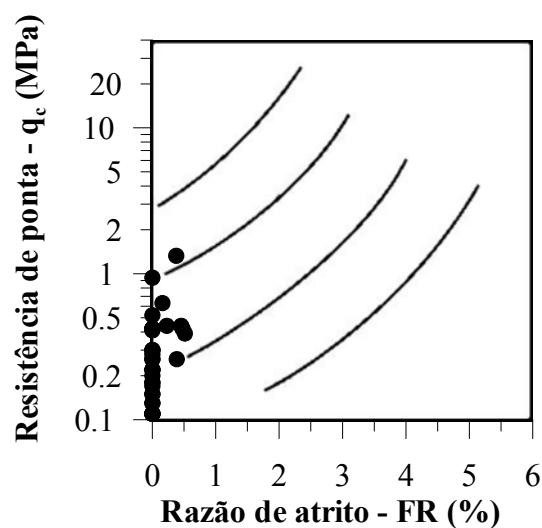
- Villar, L. F. S. (2002). Estudo do Adensamento e do Ressecamento de Resíduos de Mineração e Processamento de Bauxita. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 461 p., Rio de Janeiro.
- Yilmaz, E.; Kesimal, A.; Ercikdi, B. (2003). Factors Requiring for the Disposal of High Sulphide Tailings as Paste Backfill. In: International Conference on Earth Sciences and Electronics (ICESE), Anais...Istanbul.

## CLASSIFICAÇÃO DO PERFIL DE SOLO INVESTIGADO NA ÁREA CENTRAL

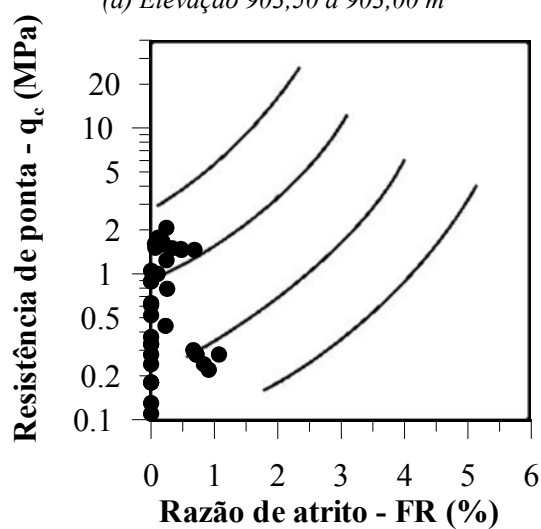
- Classificação de solo segundo a proposta de Robertson & Capanella (1983)



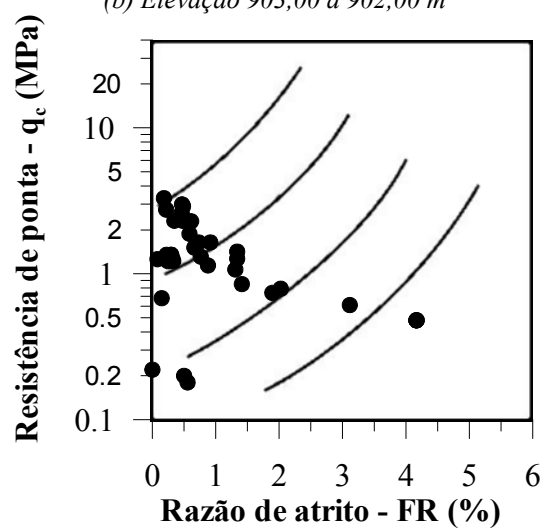
(a) Elevação 903,50 a 903,00 m



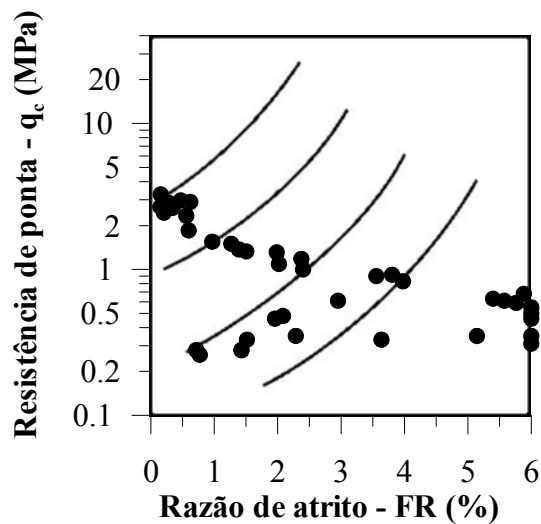
(b) Elevação 903,00 a 902,00 m



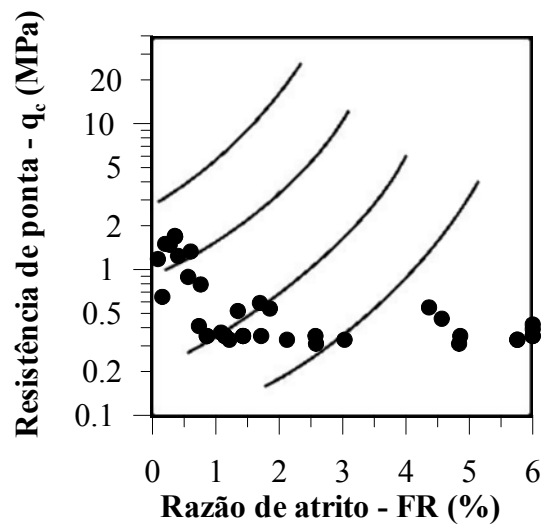
(c) Elevação 902,00 a 901,00 m



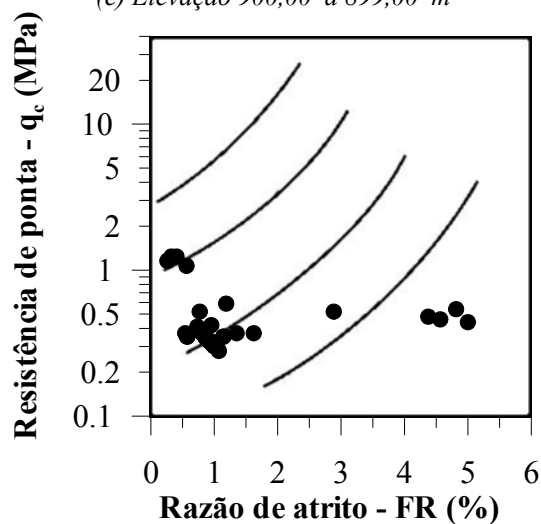
(d) Elevação 901,00 a 900,00 m



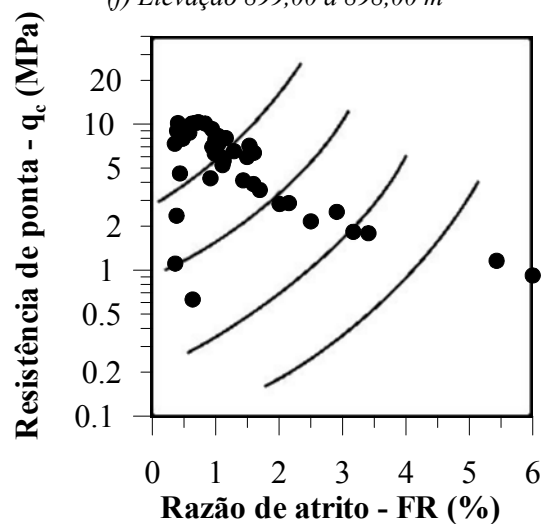
(e) Elevação 900,00 a 899,00 m



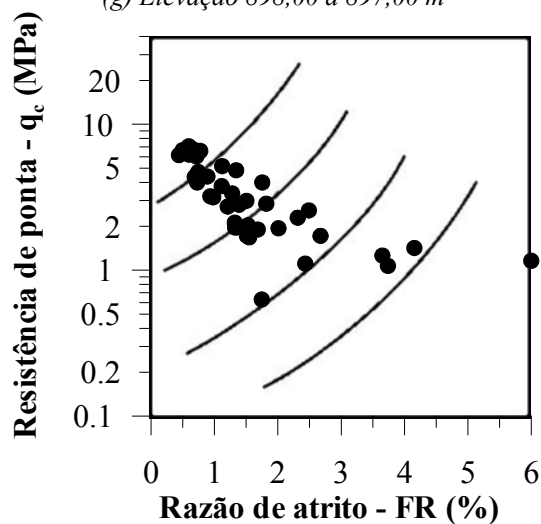
(f) Elevação 899,00 a 898,00 m



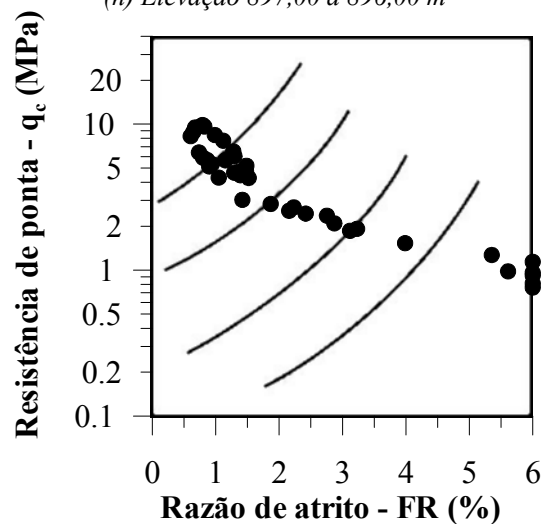
(g) Elevação 898,00 a 897,00 m



(h) Elevação 897,00 a 896,00 m

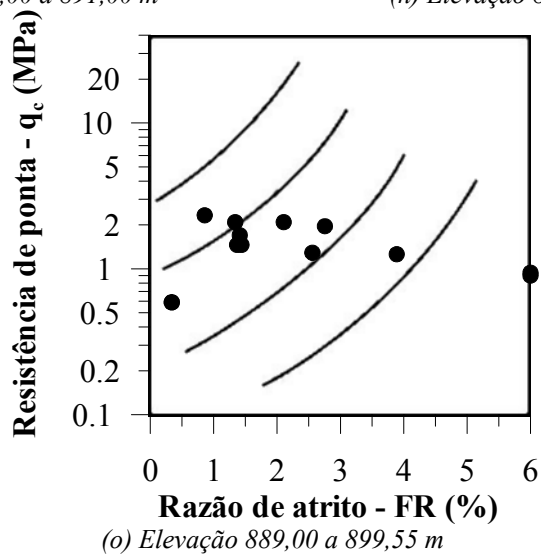
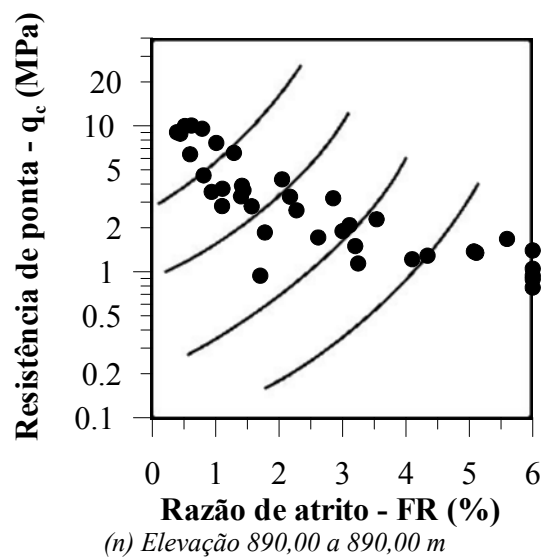
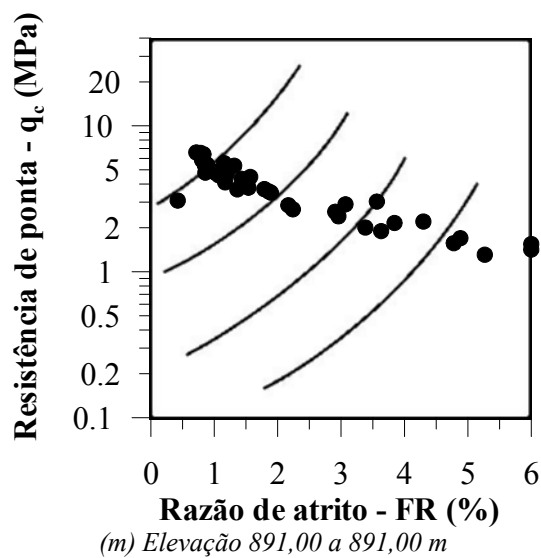
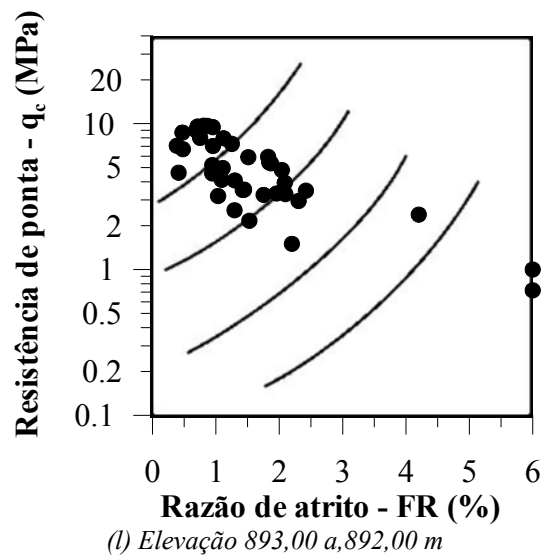
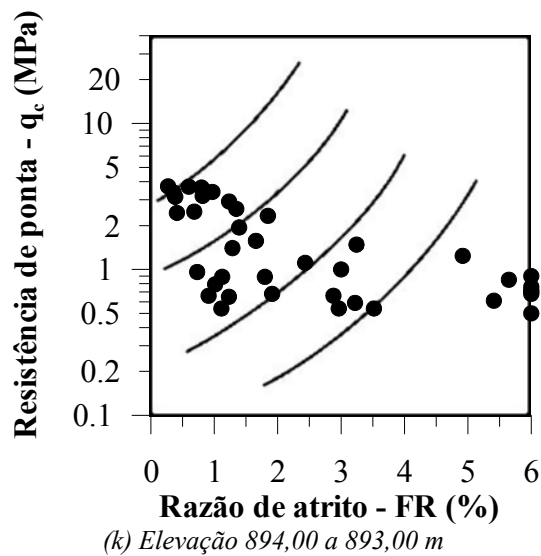


(i) Elevação 896,00 a 895,00 m

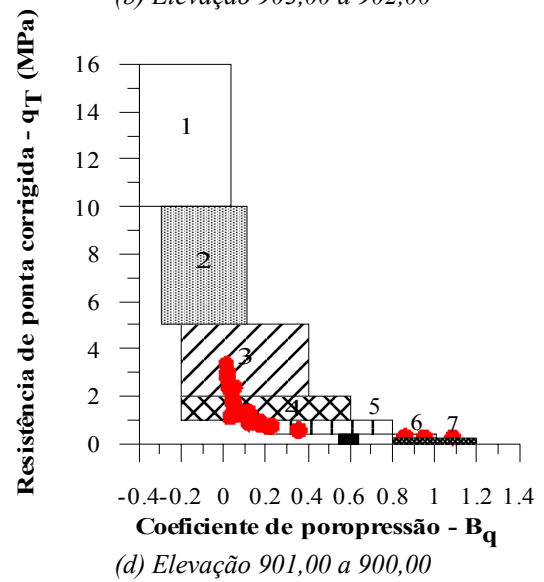
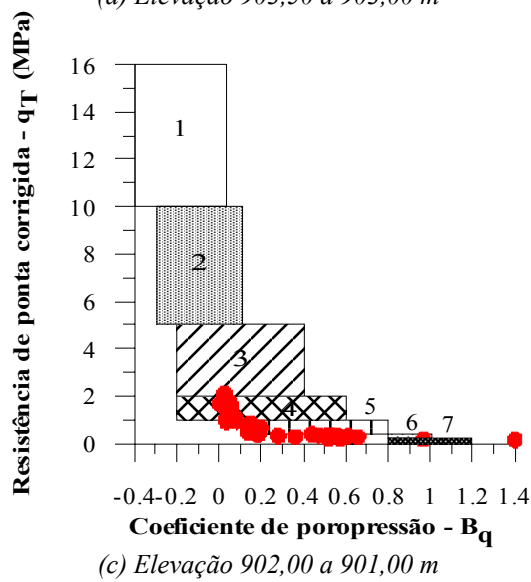
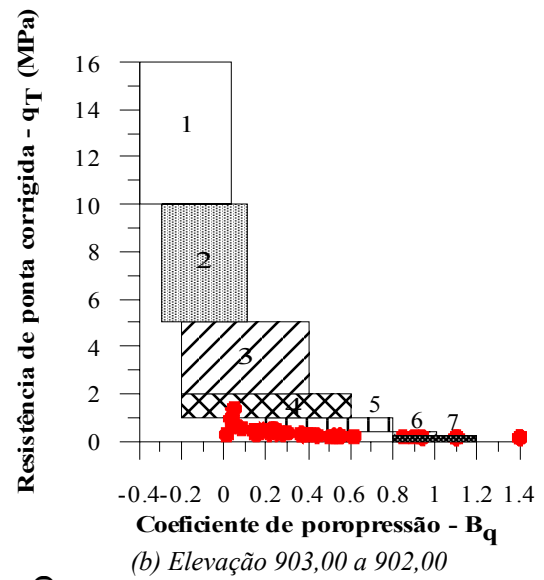
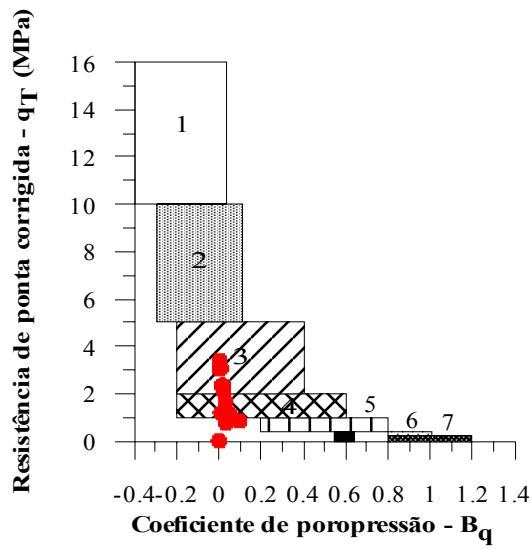


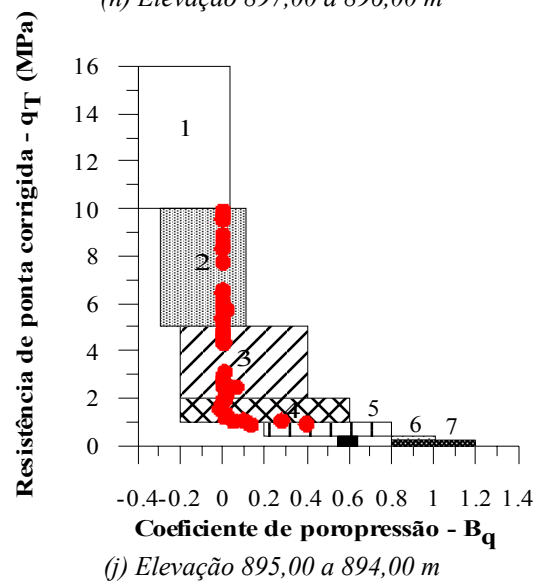
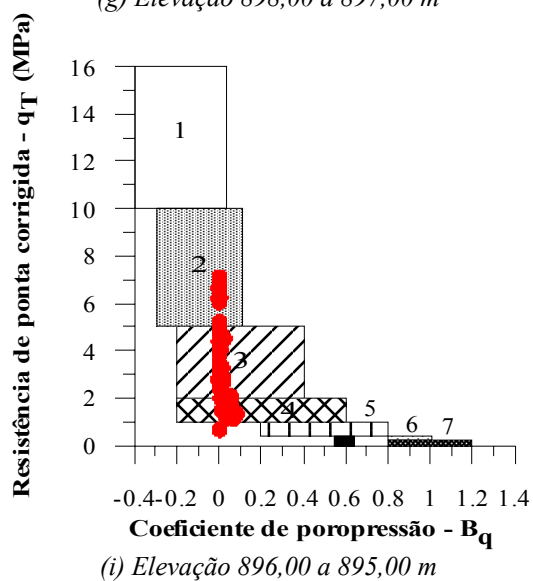
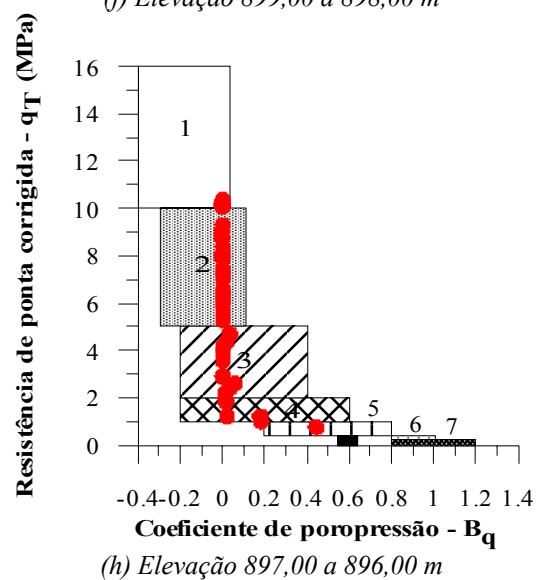
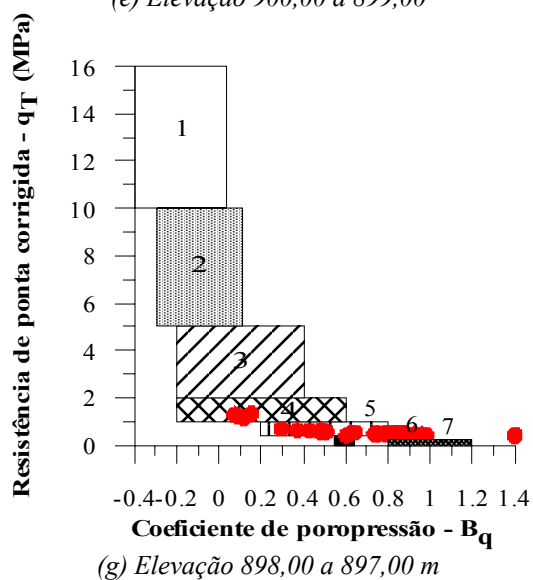
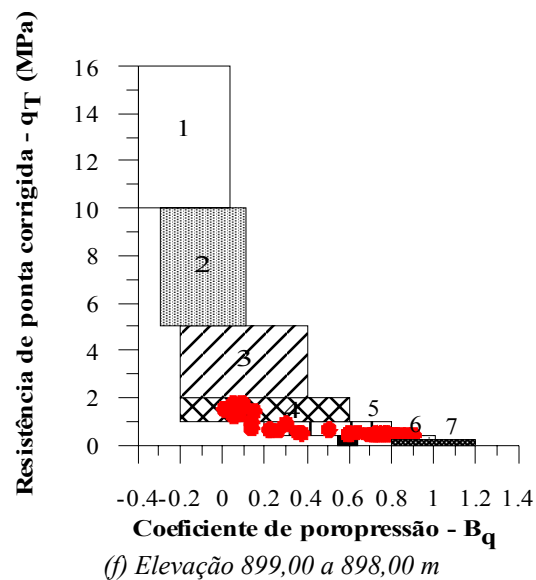
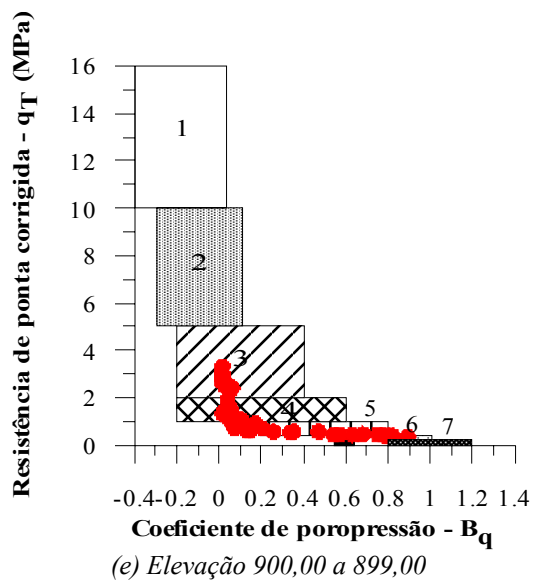
(j) Elevação 895,00 a 894,00 m

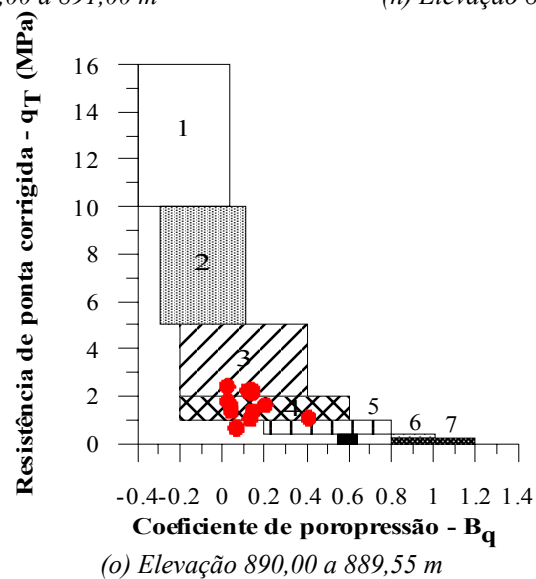
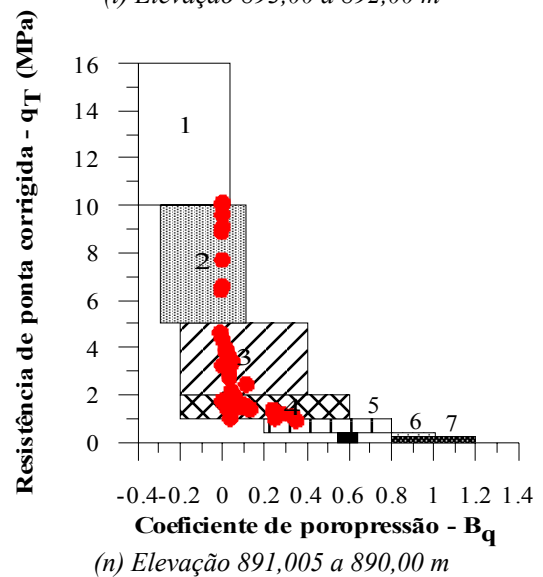
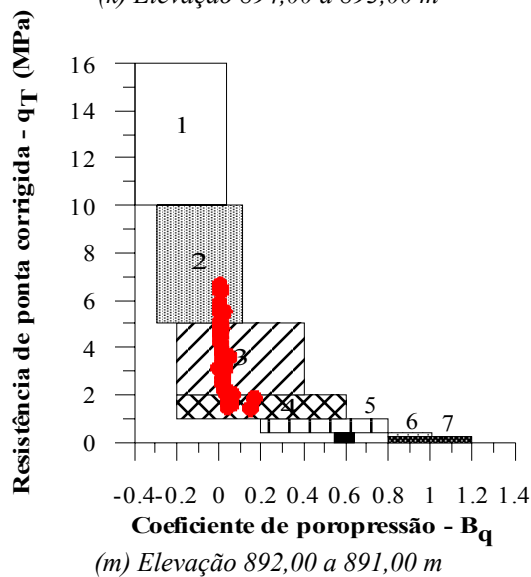
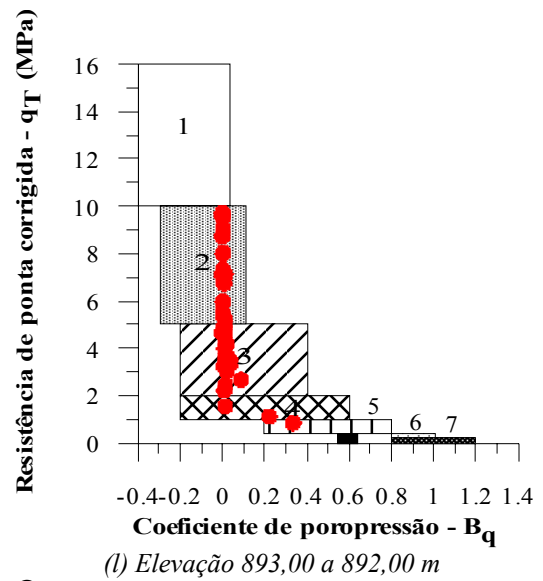
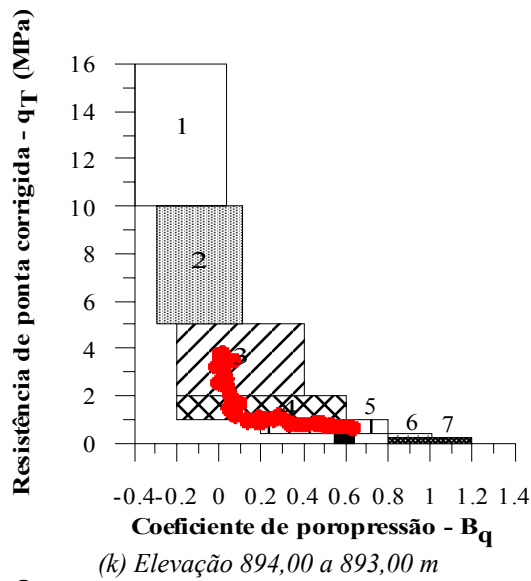




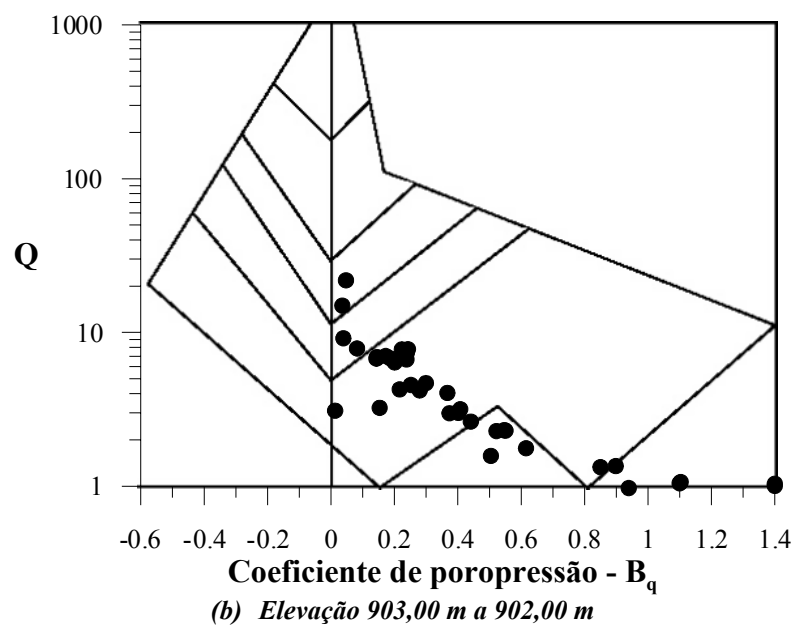
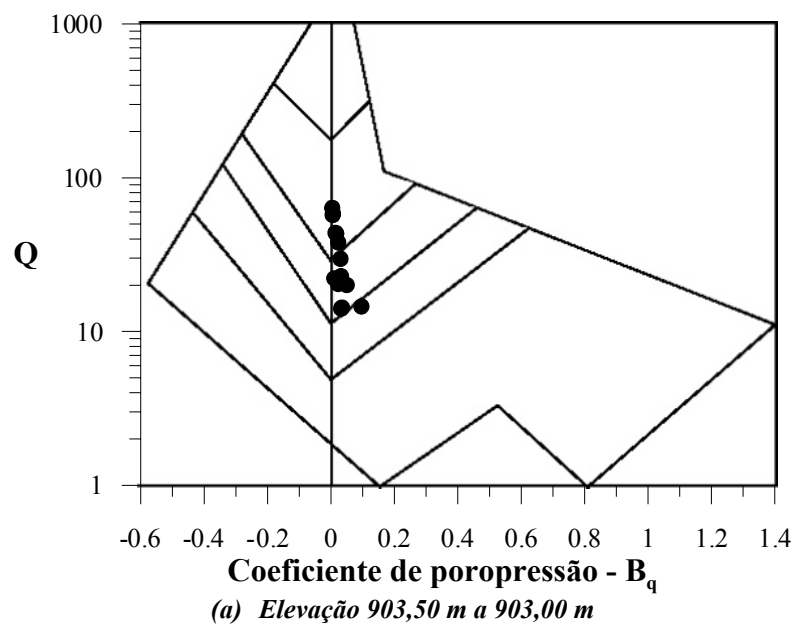
- Classificação de solo segundo a proposta de Senneset et al. (1989)

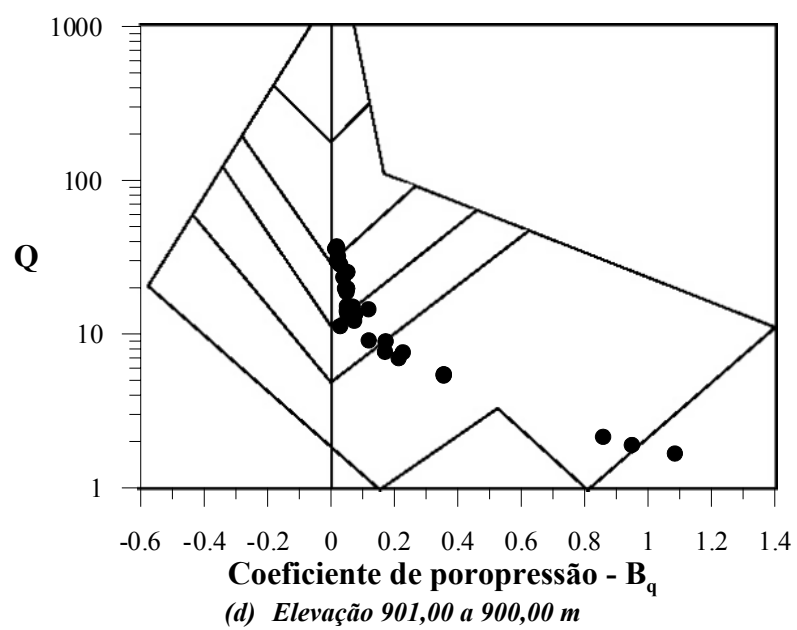
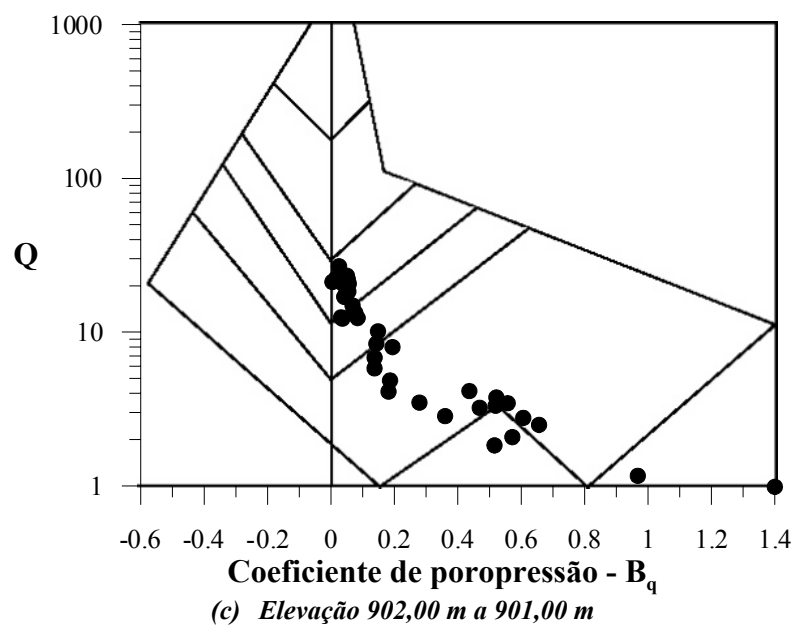


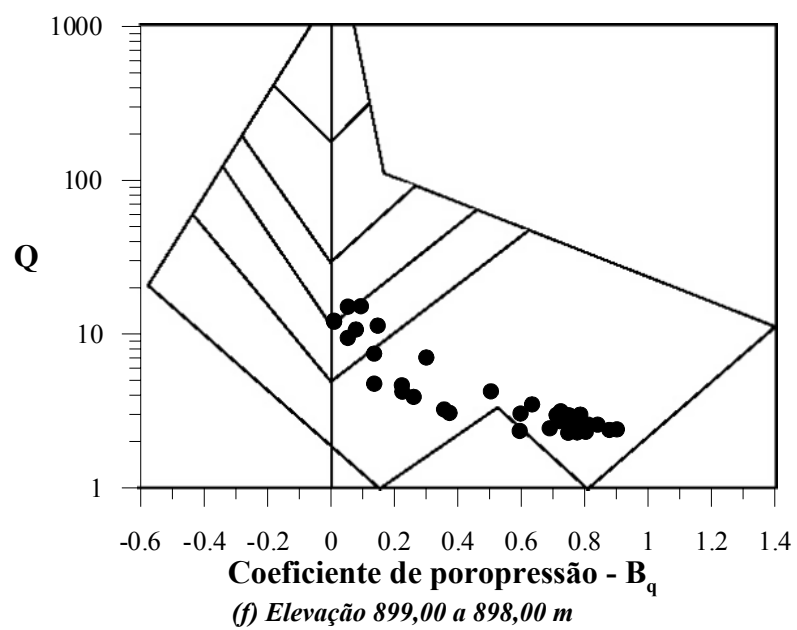
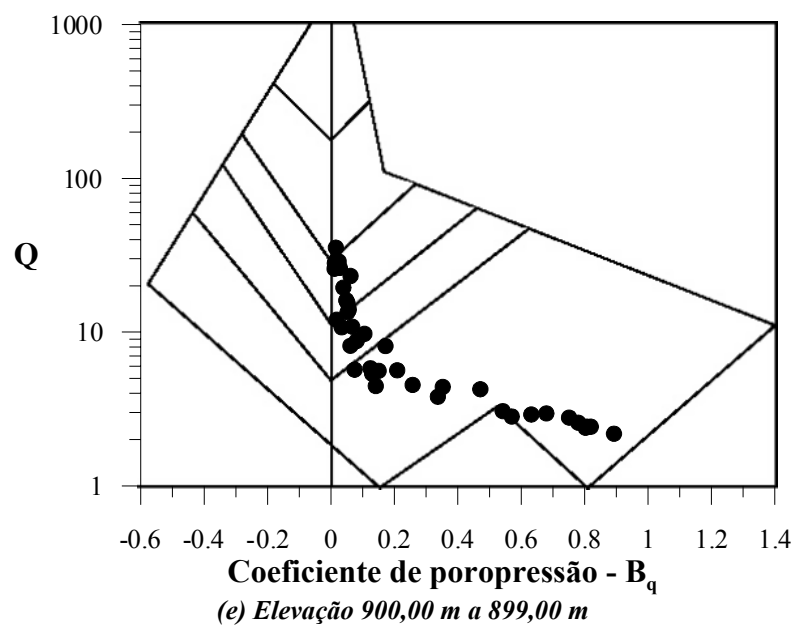


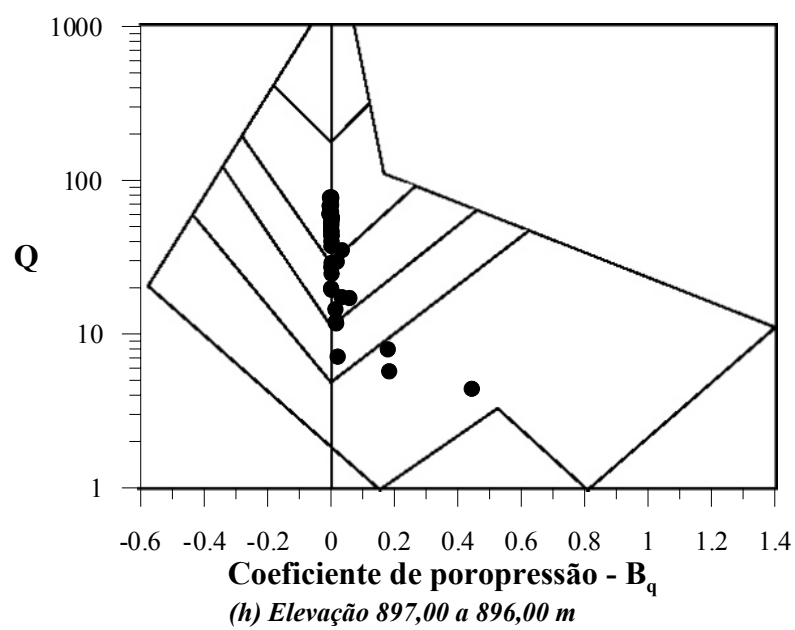
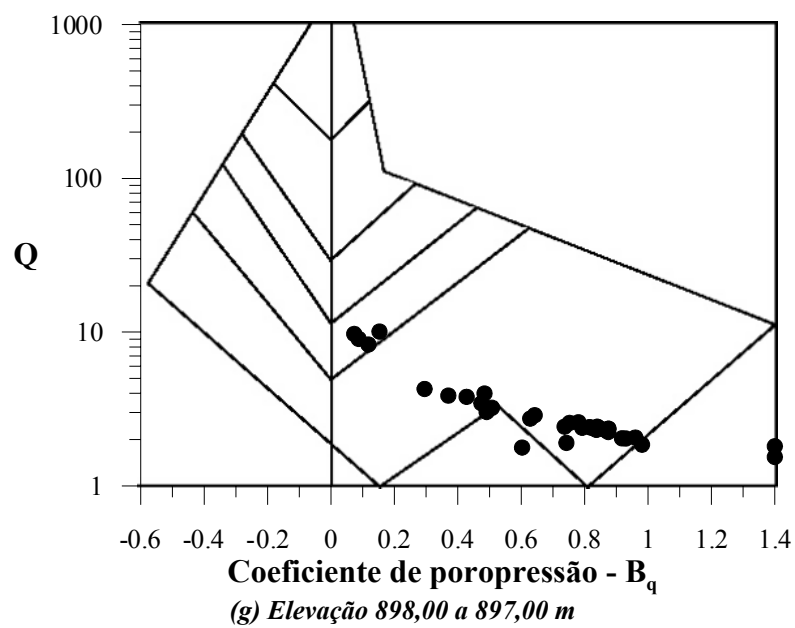


- Classificação de solo segundo a proposta de Robertson (1990)

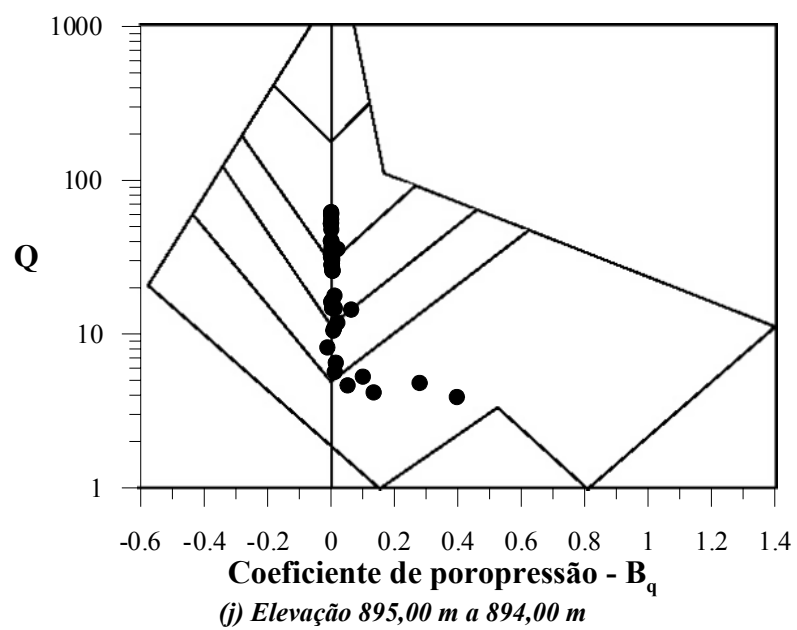
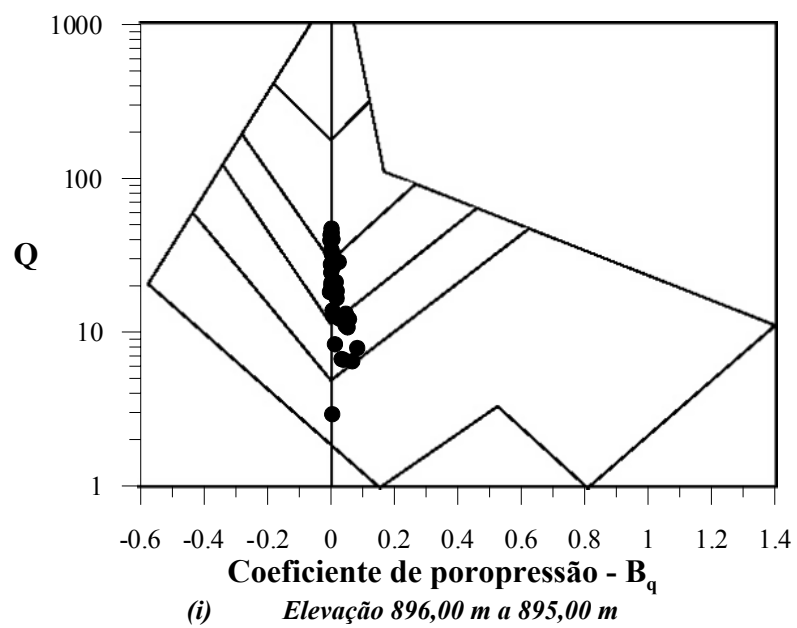


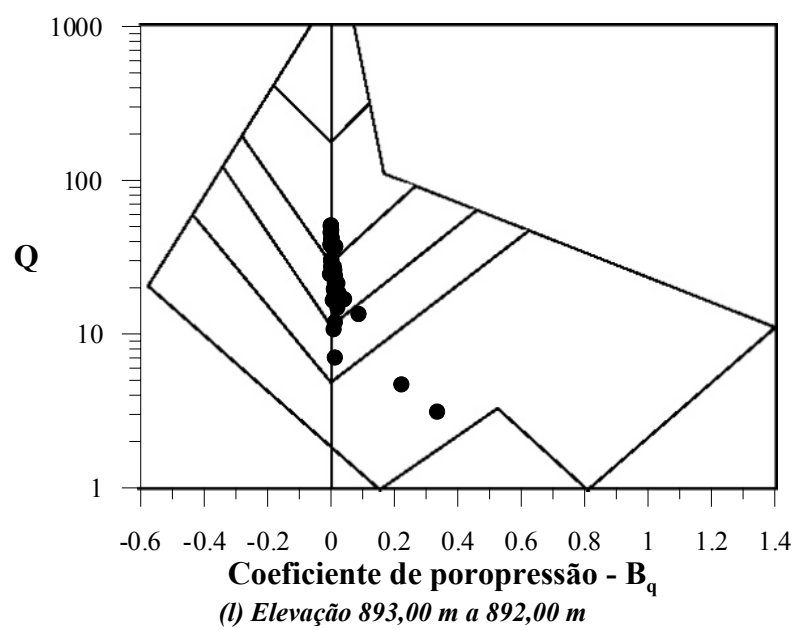
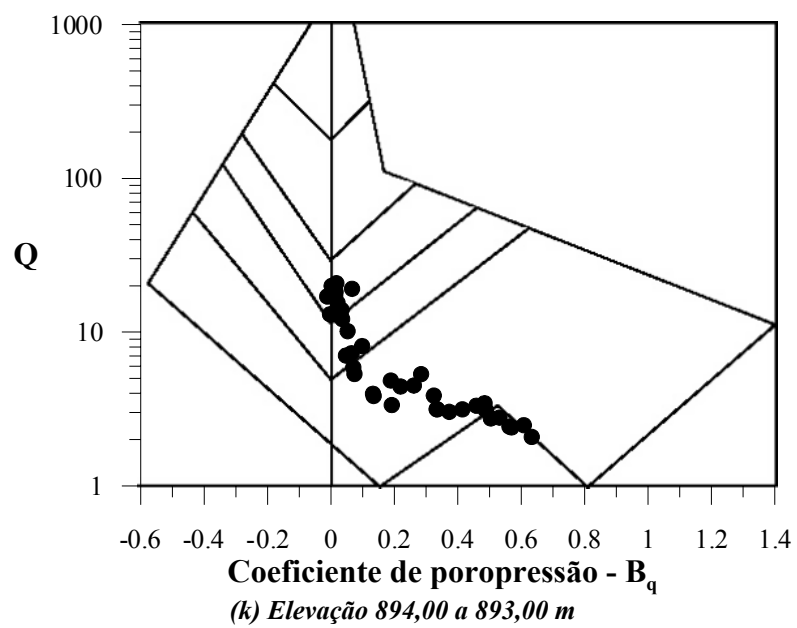


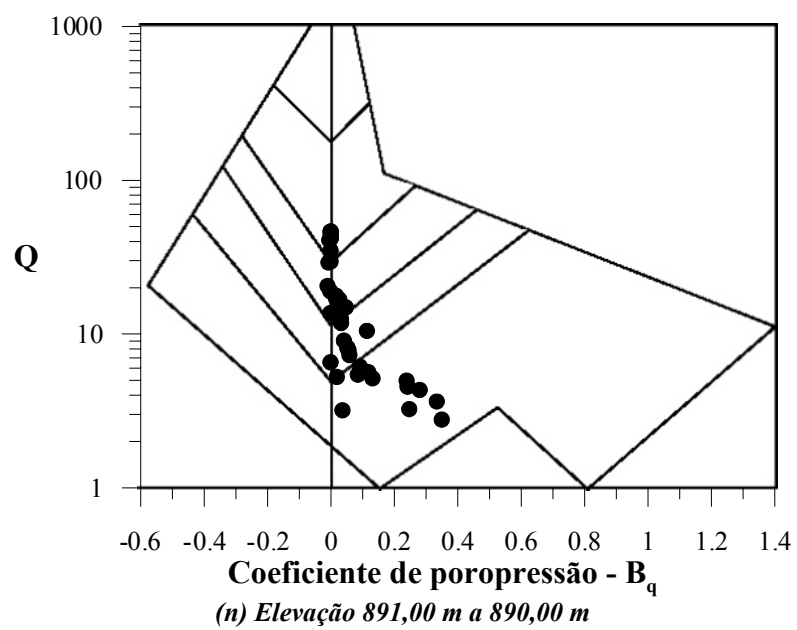
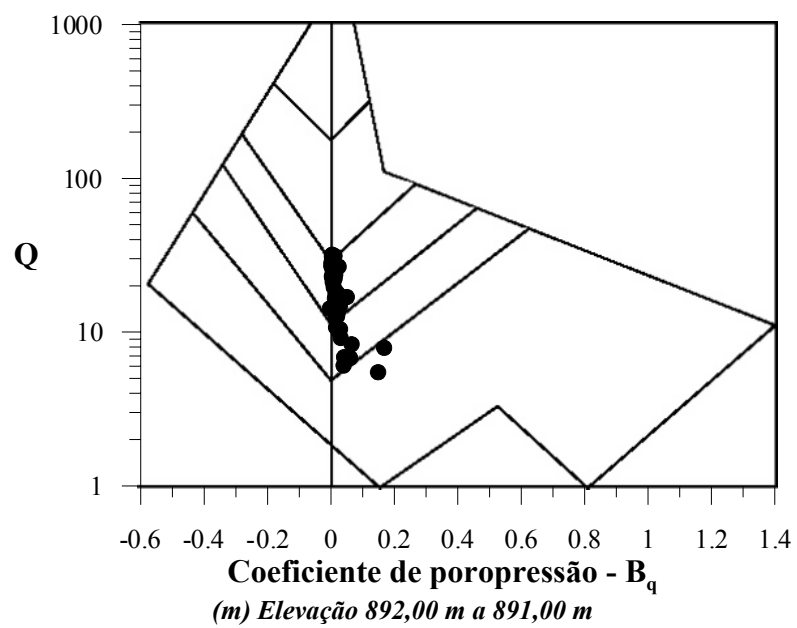


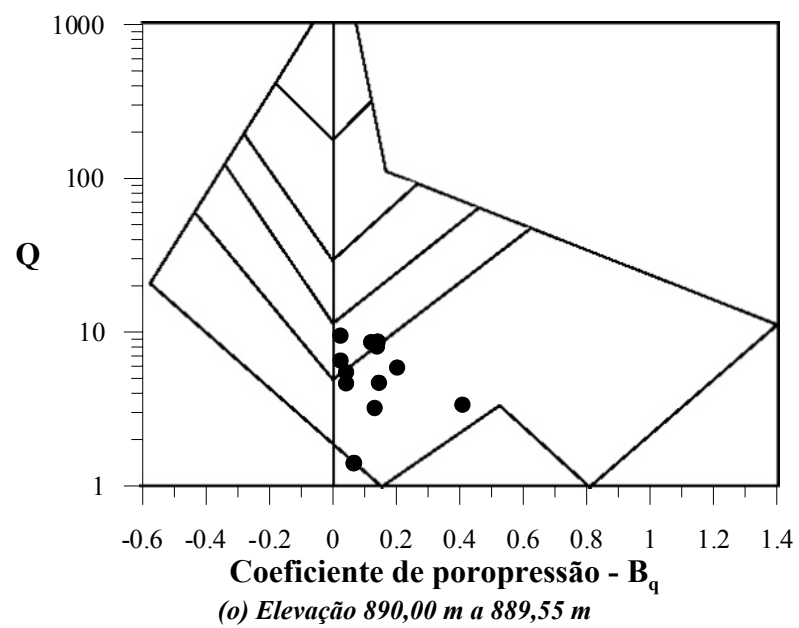






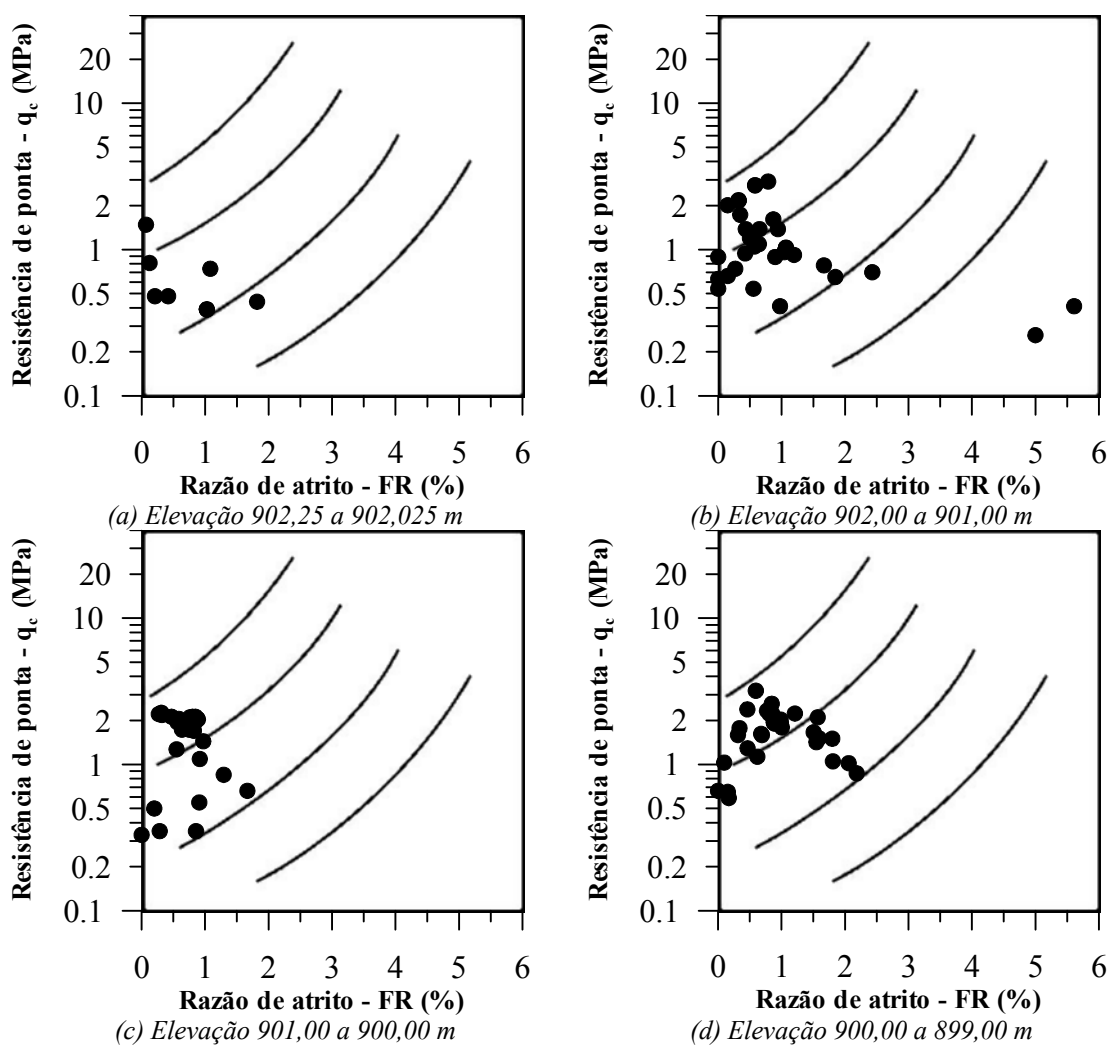


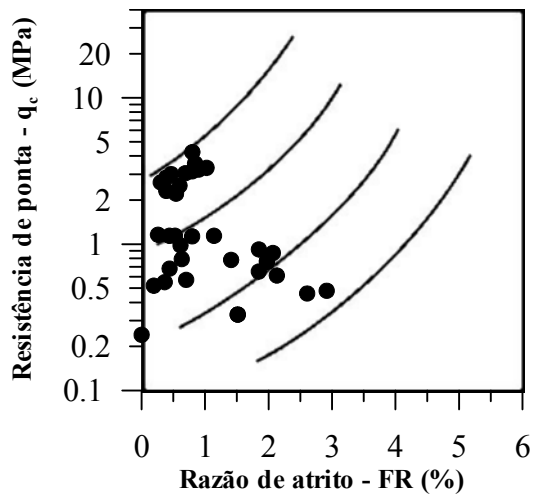




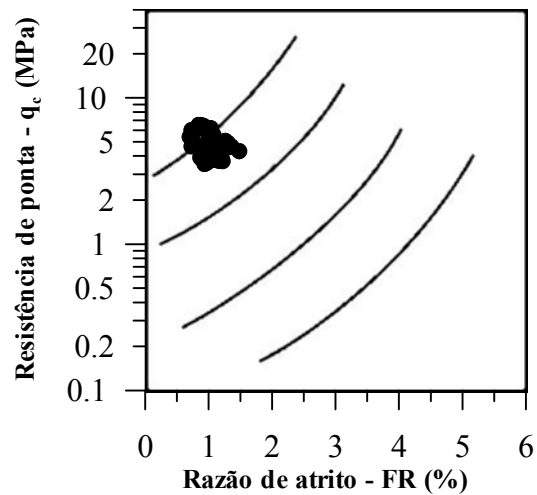
## CLASSIFICAÇÃO DO PERFIL DE SOLO INVESTIGADO NO DIQUE

- Classificação de solo segundo a proposta de Robertson & Capanella (1983)

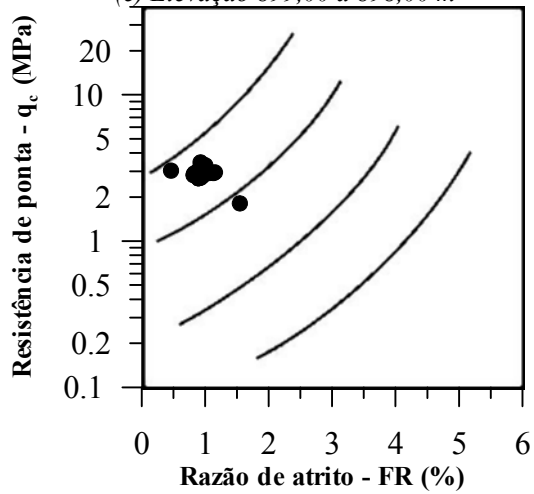




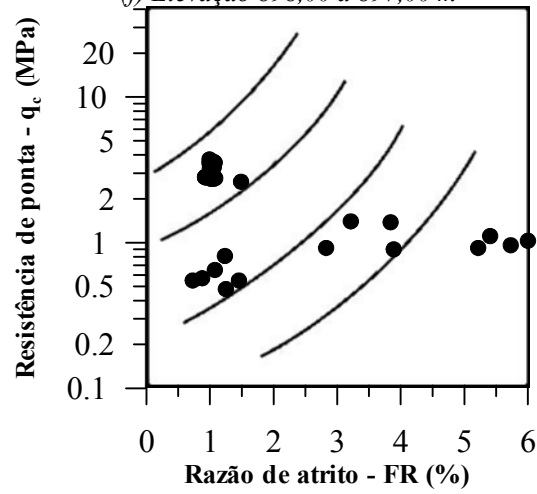
(e) Elevação 899,00 a 898,00 m



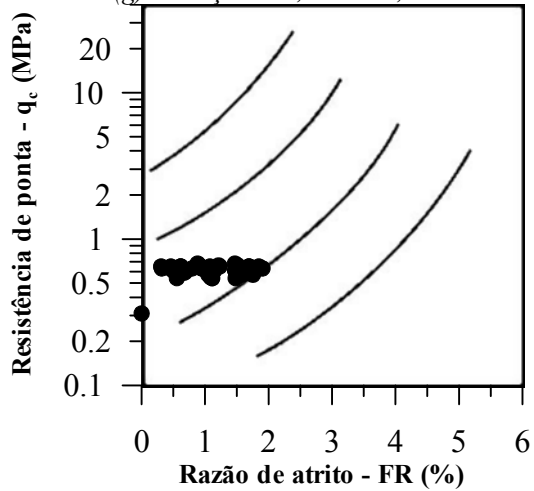
(f) Elevação 898,00 a 897,00 m



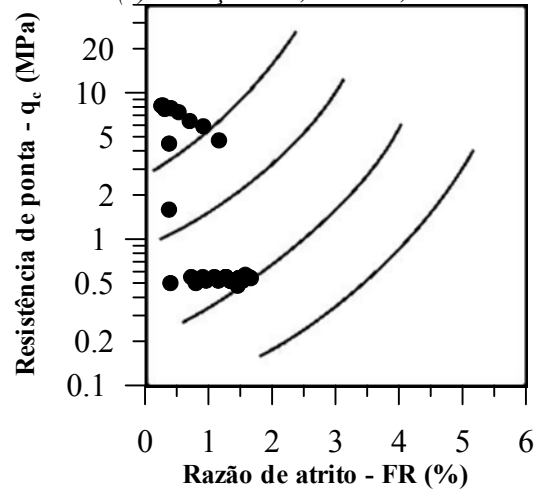
(g) Elevação 897,00 a 896,00 m



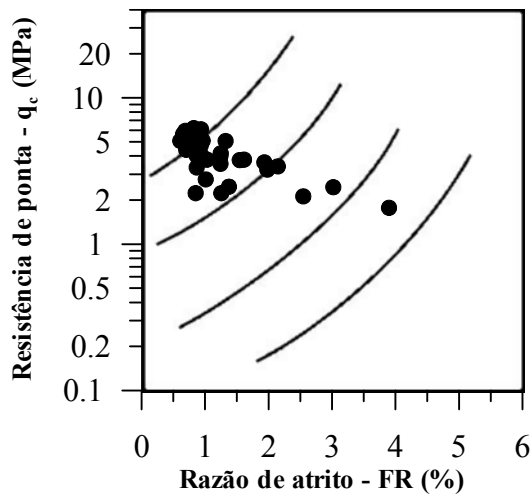
(h) Elevação 896,00 a 895,00 m



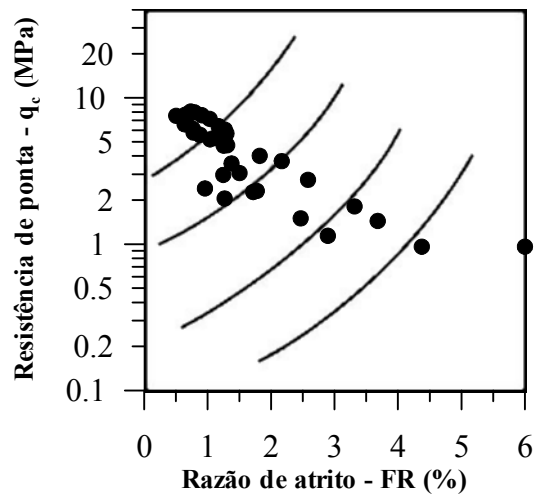
(i) Elevação 895,00 a 894,00 m



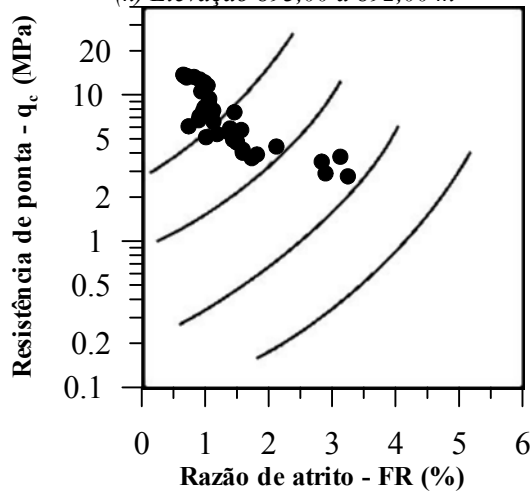
(j) Elevação 894,00 a 893,00 m



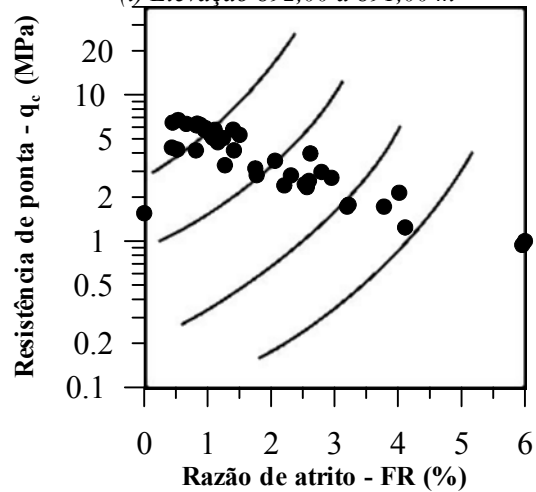
(k) Elevação 893,00 a 892,00 m



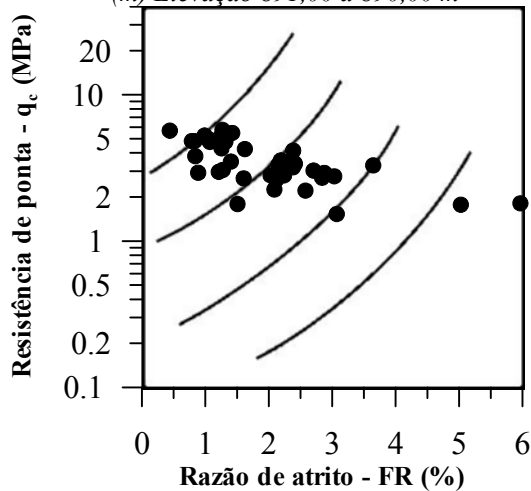
(l) Elevação 892,00 a 891,00 m



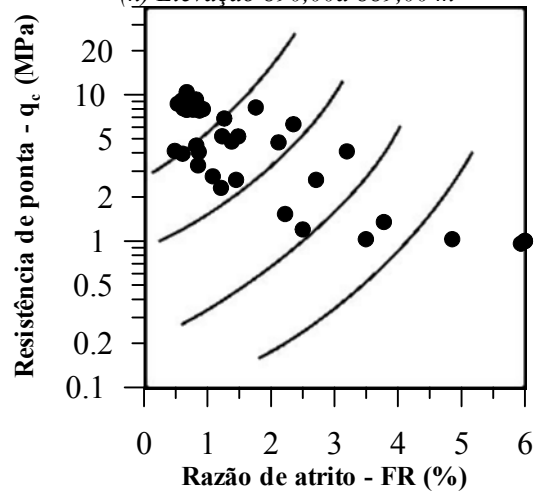
(m) Elevação 891,00 a 890,00 m



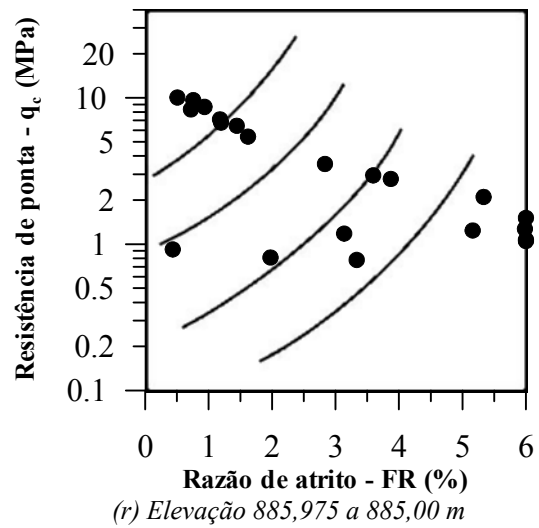
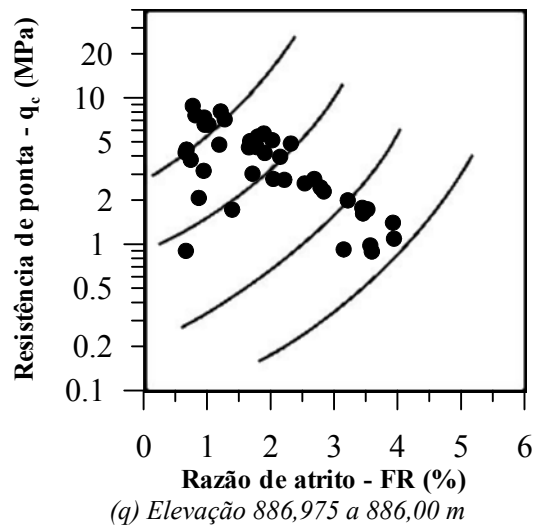
(n) Elevação 890,00 a 889,00 m



(o) Elevação 889,00 a 888,00 m

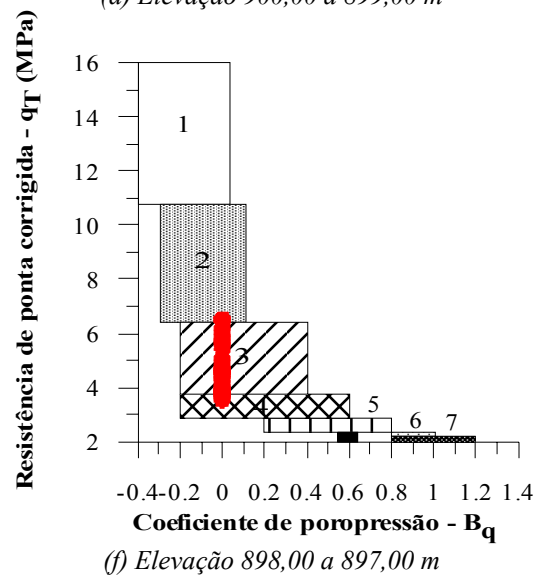
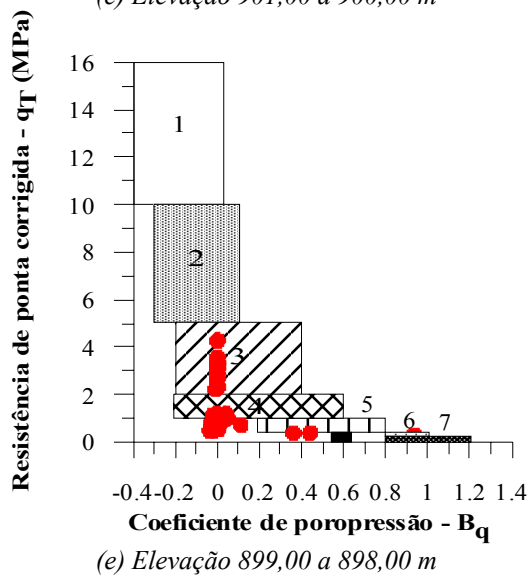
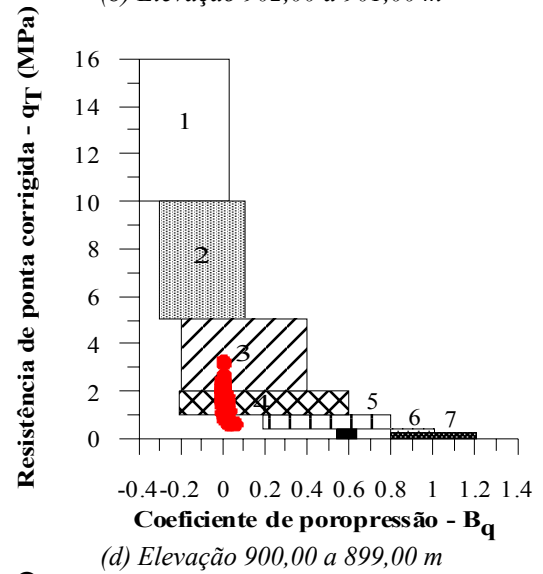
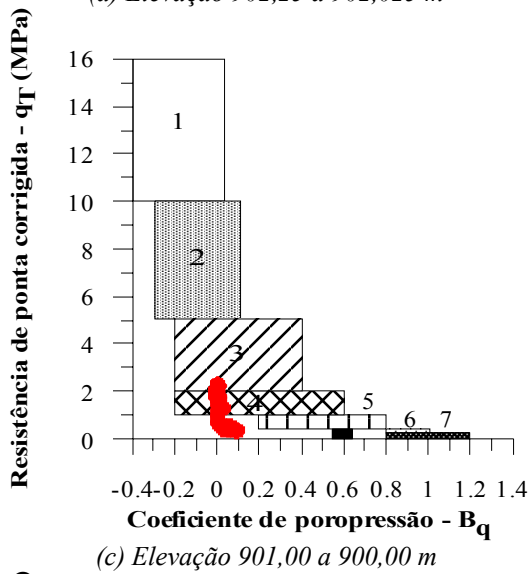
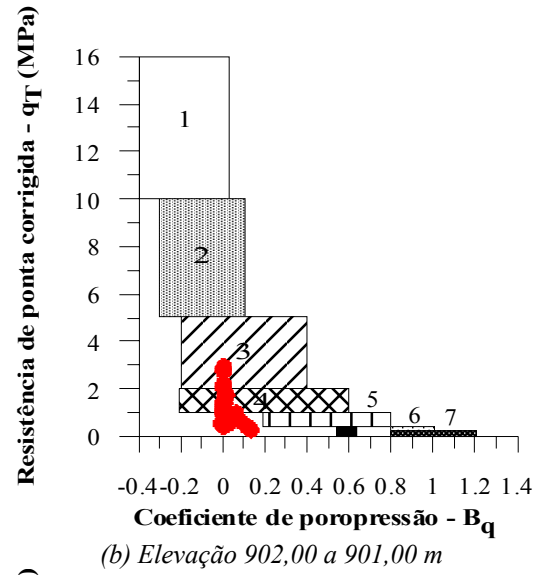
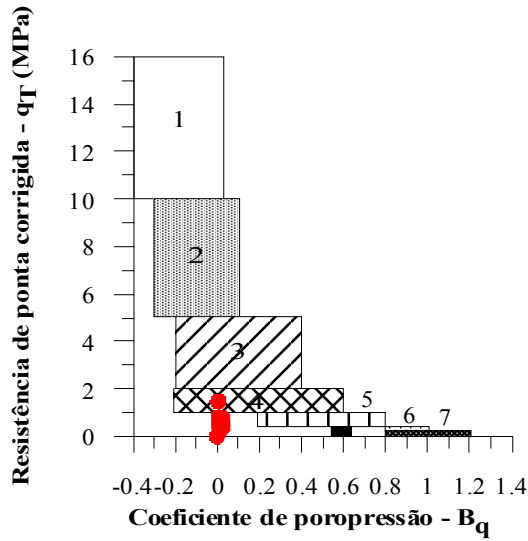


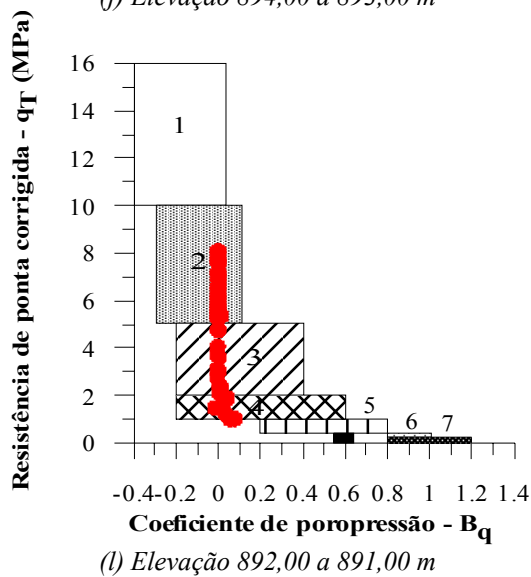
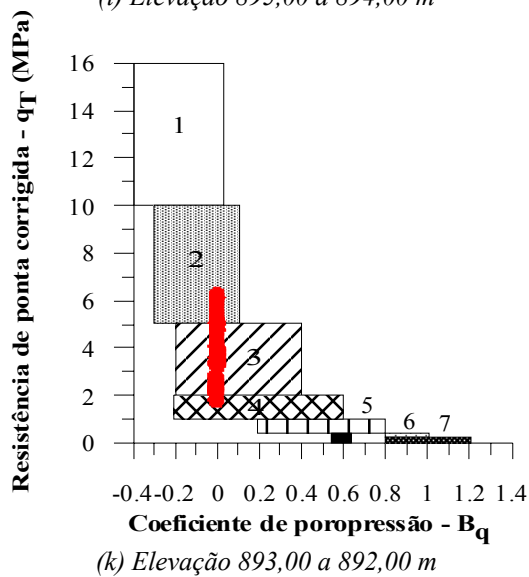
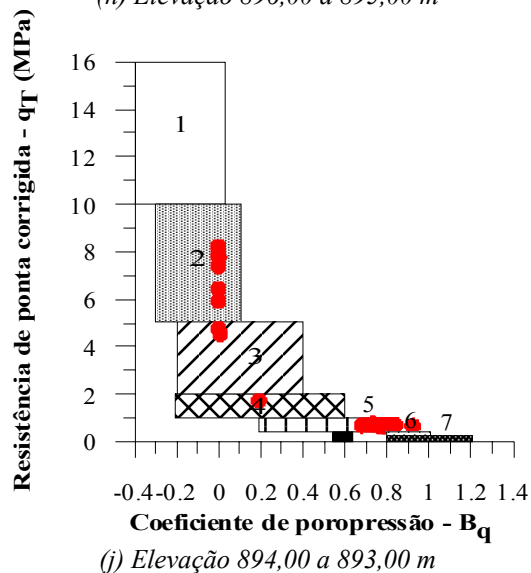
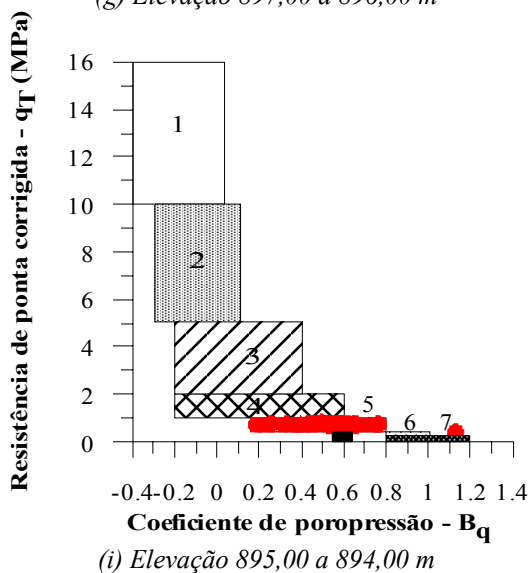
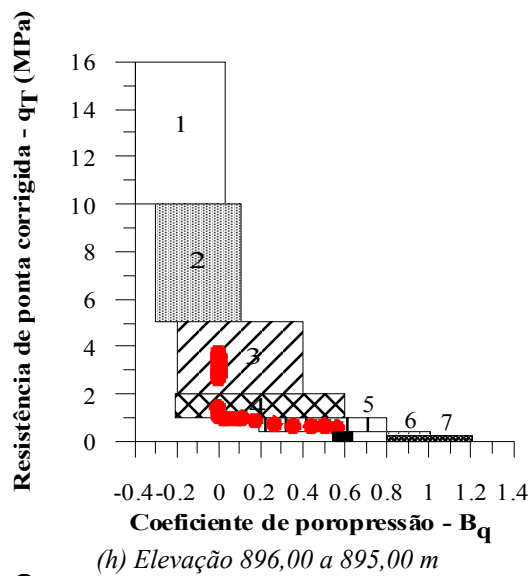
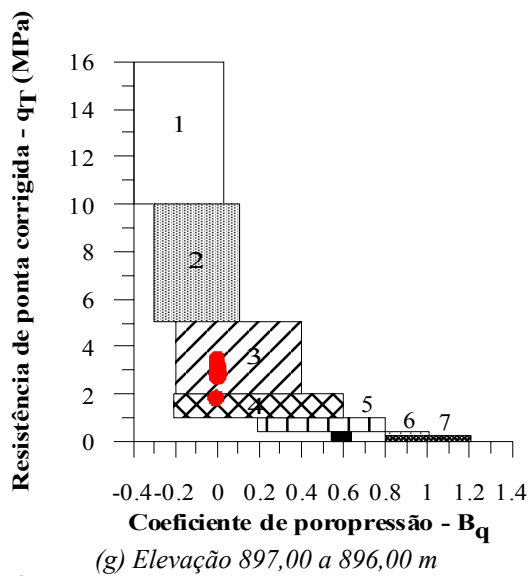
(p) Elevação 888,00 a 887,00 m

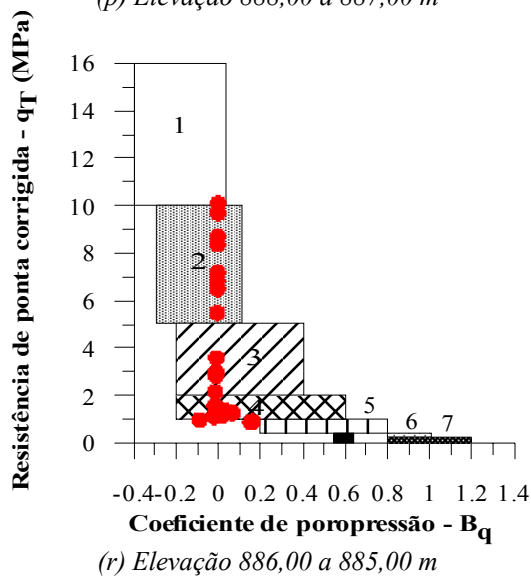
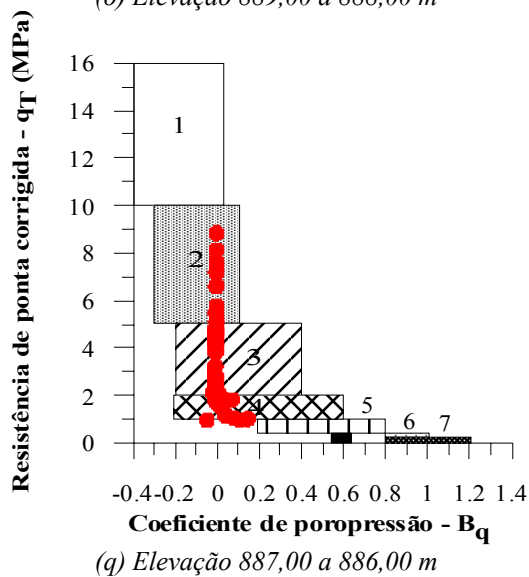
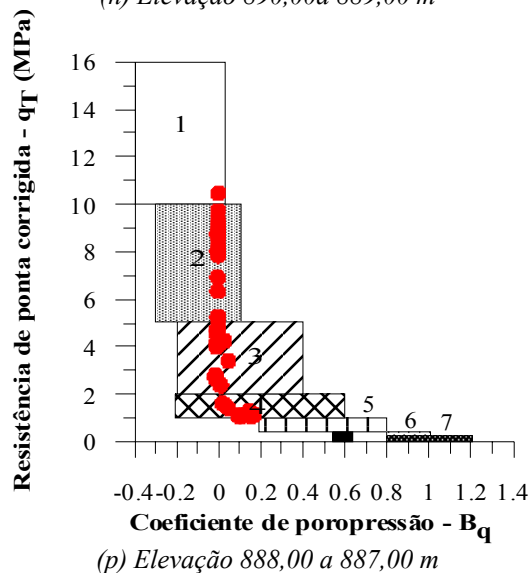
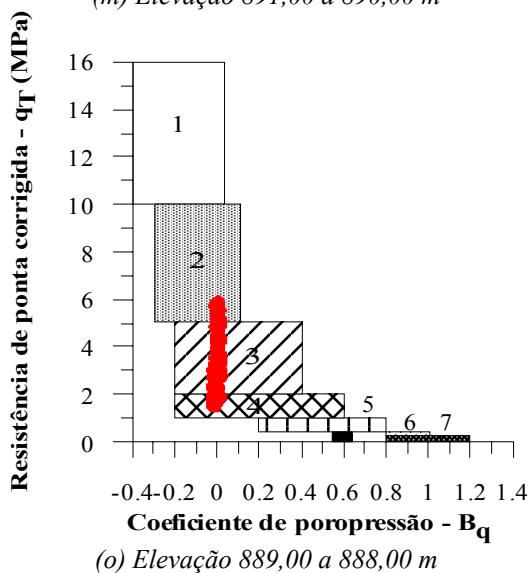
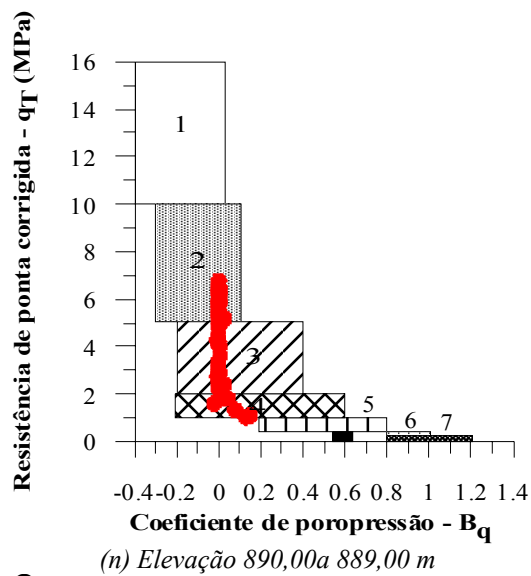
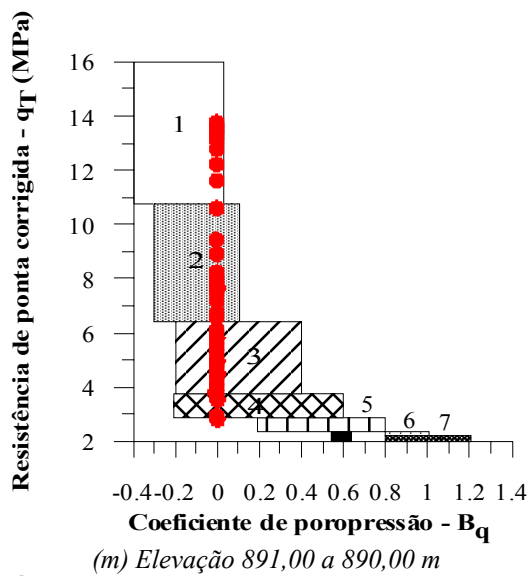




- Classificação de solo segundo a proposta de Senneset et al. (1989)







- Classificação de solo segundo a proposta de Robertson. (1990)

