

CRITÉRIOS DE PROJETO PARA INSTRUMENTAÇÃO  
PIEZOMÉTRICA DE DIVERSAS ESTRUTURAS  
GEOTÉCNICAS EM MINERAÇÃO

Helio Cerqueira

Orientador: Prof. Luis de A. P. Bacellar

Ouro Preto / MG

2017

C416c Cerqueira, Helio Marcio Lopes de.  
Critérios de projeto para instrumentação piezométrica de diversas estruturas geotécnicas em mineração [manuscrito] / Helio Marcio Lopes de Cerqueira. - 2017.  
166f.: il.: color; grafs; quadros orientativos.

Orientador: Prof. Dr. Luis de Almeida Prado Bacellar.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Núcleo de Geotecnia. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia.  
Área de Concentração: Engenharia Geotécnica.

1. Monitoramento. 2. Piezometria. 3. Estruturas Geotécnicas. 4. Critérios de Projeto. 5. Propósito de Monitoramento. I. Bacellar, Luis de Almeida Prado. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 624.13

Catálogo: [www.sisbin.ufop.br](http://www.sisbin.ufop.br)

# PROPOSTA DE CRITÉRIOS DE PROJETO PARA INSTRUMENTAÇÃO PIEZOMÉTRICA DE DIVERSAS ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS EM MINERAÇÃO

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica do Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Geotécnica**, área de concentração em *Geotecnia de Aplicada à Mineração*.

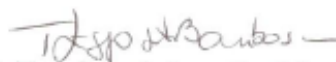
Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 20 de março de 2017, pela Banca Examinadora composta pelos membros:



Prof. Dr. Luis de Almeida Prado Bacellar (Orientador – UFOP)



Prof. Dr. Romero César Gomes (UFOP)



Profª. Drª. Terezinha de Jesus Espósito Barbosa (UFMG)

Para Kim, Penélope e Valentina com amor e carinho.

## **AGRADECIMENTOS**

As minhas lindas meninas, Penélope e Valentina, pelo amor, pela satisfação e pelo sacrifício em dividir o papai com livros e com o computador.

A Kim Louise pelo amor, apoio incondicional e pela compreensão.

Aos meus pais, Maria Helena e Jader pelo amor e pela constante valorização ao conhecimento, e aos meus irmãos, João e Pedro, pelo companheirismo e apoio sempre quando necessário.

Ao meu professor orientador, Luis Bacellar, pela dedicação, pelo profissionalismo e pelo apoio incansável.

A VALE, na pessoa do Geólogo Henry Galbiatti, Eng<sup>o</sup> Germano Araújo e Eng<sup>a</sup> Marilene Lopes, pela confiança e pela contribuição ao aperfeiçoamento do conhecimento técnico de suas equipes.

Ao engenheiro geotécnico especialista Peter Lamb (Coffey), pela orientação, pelos ensinamentos e pela valorosa troca de informações e experiências.

A todos os professores do NUGEO pela dedicação e interesse.

Aos colegas do curso de mestrado pelo companheirismo, amizade e pela afinidade.

Aos colegas da VALE pela amizade, pelo coleguismo, pelo apoio e pelo alegre convívio.

## RESUMO

Instrumentação piezométrica, como indicadores de nível d'água e piezômetros de todo tipo, são empregados no monitoramento piezométrico das variações de poro-pressão e nível do lençol freático em formações geológicas e em estruturas geotécnicas como barragens, pilhas de estéril e cavas de mineração. Em muitas ocasiões, estes instrumentos não fornecem dados confiáveis ou adequados às análises e aos dimensionamentos necessários e aos quais foram propostos. Observa-se também que o projeto de construção e instalação de um instrumento piezométrico vem sendo concebido e detalhado de forma genérica, e com isto, o propósito do monitoramento necessário não vem sendo alcançado. Este estudo propõe critérios de projeto e orientações para especificação técnica de instrumentação piezométrica em diversas estruturas geotécnicas encontradas na indústria da mineração. O mesmo correlaciona os critérios de projeto propostos a um ou mais propósitos clássicos de monitoramento das variações de poro-pressão e nível do lençol freático, visando assim orientar as equipes de projeto na busca da concepção e detalhamento de instrumentos piezométricos que irão adquirir dados adequados e compatíveis com a análise ou dimensionamento necessários. Para isto, foi realizada uma consolidação das melhores práticas em monitoramento piezométrico, procedimentos de instalação e experiências de laboratório e campo, além de uma análise da especificação técnica de instrumentação e do monitoramento necessários nos diversos elementos das estruturas geotécnicas mais importantes no âmbito da mineração considerando sua função e o propósito de monitoramento.

**Palavras-chave:** Monitoramento, piezometria, estruturas geotécnicas, critérios de projeto e propósito de monitoramento.

## **ABSTRACT**

Piezometric instrumentation, such as observation wells and piezometers, are used in piezometric monitoring of pore-pressure variation and water table fluctuation in geological formations and geotechnical structures including dams, waste dumps, and open pit walls. On many occasions these instruments do not provide data of suitable quality for the analyses and calculations for which they were initially intended. It is observed that design for construction and installation of piezometric instruments is being developed and detailed in a generic fashion, hence, the purpose of monitoring is not being achieved. This study proposes design criteria and orientation for technical specification of piezometric instrumentation in several geotechnical structures generally found in mining. The study correlates the design criteria to one or more classic purpose of pore-pressure variations and water table fluctuation monitoring, aiming to guide design teams in the quest of developing instrumentation design that will provide data of suitable quality for the analyses and calculations needed. To achieve this, a consolidation of the best piezometric monitoring practices, installation procedures and laboratory and field experiences were undertaken, besides an analyses of the instrumentation and monitoring needed in several elements of the most important geotechnical structures generally found in mining, considering their function and the purpose of monitoring.

**Key-words:** Monitoring, piezometry, geotechnical structures, design criteria and purpose of monitoring.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2-1 - FLUXOGRAMA DA GERAÇÃO DE RESÍDUOS DE MINERAÇÃO (FONTE: NOTAS DE AULA "DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS DE MINERAÇÃO AULA 1: PRODUÇÃO DE RESÍDUOS DE MINERAÇÃO" UFOP 2014).....	23
FIGURA 2-2 - MÉTODOS DE DISPOSIÇÃO DE REJEITOS (FONTE: NOTAS DE AULA "DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS DE MINERAÇÃO – AULA 2: PLANEJAMENTO DE SISTEMAS DE DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS" UFOP 2014).....	24
FIGURA 2-3 - MÉTODOS DE ALTEAMENTO DE BARRAGENS DE REJEITO (FONTE: VALE, 2016) .....	25
FIGURA 2-4 - ESQUEMA ILUSTRATIVO DE UM DIQUE DE CONTENÇÃO DE SEDIMENTOS IMPLANTADO NO PÉ DE UMA PILHA DE ESTÉRIL (FONTE: NOTAS DE AULA "DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS DE MINERAÇÃO – AULA 3: DISPOSIÇÃO DE ESTÉRIL " UFOP 2014). .....	26
FIGURA 2-5 - BARRAGEM DE CAPTAÇÃO DE ÁGUA DA MINA CAPANEMA/MG (FONTE: O AUTOR, 2014) .....	28
FIGURA 2-6 - PILHA DE ESTÉRIL PELO MÉTODO DESCENDENTE (FONTE: NOTAS DE AULA "DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS DE MINERAÇÃO – AULA 3: DISPOSIÇÃO DE ESTÉRIL " UFOP, 2014) .....	29
FIGURA 2-7 - PILHA DE ESTÉRIL PELO MÉTODO ASCENDENTE (FONTE: NOTAS DE AULA "DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS DE MINERAÇÃO – AULA 3: DISPOSIÇÃO DE ESTÉRIL " UFOP, 2014). .....	29
FIGURA 2-8 - EXEMPLOS DE TALUDE (FONTE: NOTAS DE AULA "ESTABILIDADE DE TALUDES – AULA 13: TALUDES REFORÇADOS" - UFOP, 2014).....	31
FIGURA 2-9 - DIFERENÇAS DE INCLINAÇÃO DOS TALUDES DE BANCADA E TALUDE FINAL DA CAVA (FONTE: SOUZA, 2001) .....	31
FIGURA 2-10 - EXEMPLO DE ENCOSTA NATURAL (FONTE: WEBSITE PEDRO HAUCK).....	32
FIGURA 2-11 - PERCOLAÇÃO DA ÁGUA EM UM TALUDE DE CAVA (FONTE: READ & STACEY, 2009).....	33
FIGURA 2-12 - DEFINIÇÕES BÁSICAS E EQUAÇÃO DO TEMPO DE RESPOSTA (FONTE: HVORSLEV, 1951).....	35



FIGURA 2-13 - TAXA DE TEMPO DE RESPOSTA VS. TAXA DE EQUALIZAÇÃO (FONTE: HVORSLEV, 1951).....	36
FIGURA 2-14 - TEMPOS DE RESPOSTA ESTIMADOS PARA VÁRIOS MÉTODOS DE INSTALAÇÃO DE PIEZÔMETROS (FONTE: MCKENNA, 1995) .....	37
FIGURA 2-15 - PERFIL TÍPICO DE UM INDICADOR DE NÍVEL D'ÁGUA (FONTE: VALE / COFFEY, 2016).....	39
FIGURA 2-16 – PERFIL TÍPICO DE UM INSTRUMENTO DE MEDIÇÃO DE NÍVEL D'ÁGUA AUTOMATIZADO (FONTE: VALE / COFFEY, 2016).....	43
FIGURA 2-17 - PERFIL TÍPICO DE UM PIEZÔMETRO CASAGRADE (FONTE: VALE / COFFEY 2016).....	45
FIGURA 2-18 - TABELA DE DIMENSIONAMENTO DE CÉLULA DE AREIA (VAZÃO DE ADMISSÃO E FATORES DE FORMATO) – (FONTE: HVORSLEV, 1951).....	46
FIGURA 2-19 - PIEZÔMETRO DE CORDA VIBRANTE (FONTE: GEOKON, 2014).....	51
FIGURA 2-20 - PERFIL DE INSTALAÇÃO DA INSTRUMENTAÇÃO DE UM EXPERIMENTO DE CAMPO REALIZADO EM EGNA - ITÁLIA (FONTE: SIMEONE <i>ET AL.</i> 2011).....	53
FIGURA 2-21 - CARGA HIDRÁULICA MEDIDA NOS PIEZÔMETROS E NÍVEL DO RIO NO PERÍODO DE 19/05 À 31/05/11 (FONTE: SIMEONE <i>ET AL.</i> 2011) .....	53
FIGURA 2-22 - PERFIL TÍPICO DE UM PIEZÔMETRO DE CORDA VIBRANTE PELO MÉTODO CONVENCIONAL (FONTE: VALE / COFFEY, 2016).....	56
FIGURA 2-23 - PERFIL TÍPICO DE UM PIEZÔMETRO DE CORDA VIBRANTE PELO MÉTODO COMPLETAMENTE GRAUTEADO “FULLY GROUTED” (FONTE: VALE / COFFEY, 2016) .....	59
FIGURA 2-24 - PIEZÔMETROS INSTALADOS NO MESMO FURO DE SONDAÇÃO EM DIFERENTES ELEVÇÕES (FONTE: MIKKELSEN, 2003) .....	62
FIGURA 2-25 - PERFIL TÍPICO DO PIEZÔMETRO DE CORDA VIBRANTE EM MÚLTIPLOS NÍVEIS (FONTE: VALE / COFFEY 2016) .....	63
FIGURA 2-26 - MODELO COMPUTACIONAL PARA SIMULAR PERCOLAÇÃO ENTRE UM PIEZÔMETRO "FULLY GROUTED" E O SOLO (FONTE: CONTRERAS <i>ET AL.</i> 2008) .....	65
FIGURA 2-27 - GRÁFICO ERRO NORMALIZADO VS. RAZÃO DE PERMEABILIDADE DO GRAUTE E DO SOLO (CONTRERAS <i>ET AL.</i> 2008) .....	65
FIGURA 2-28 - MISTURAS DE GRAUTE CIMENTO-BENTONITA USADAS NO ESTUDO (FONTE: CONTRERAS <i>ET AL.</i> 2008).....	66

FIGURA 2-29 - VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO VS. RAZÃO ÁGUA-CIMENTO (FONTE: CONTRERAS <i>ET AL.</i> 2008) .....	67
FIGURA 2-30 - VARIAÇÃO DA PERMEABILIDADE VS. PRESSÃO CONFINANTE À 28 DIAS DE CURA (CONTRERAS <i>ET AL.</i> 2008). .....	67
FIGURA 2-31 - PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO PIEZÔMETRO PNEUMÁTICO (FONTE: DUNNICLIFF, 1988 APUD FRANÇA 2008).....	72
FIGURA 2-32 – EXEMPLO DE PLACA DE AÇO DO VERTEDOR TRIANGULAR (FONTE: O AUTOR, 2016) .....	76
FIGURA 2-33 – EXEMPLO DE PLACA DE AÇO DO VERTEDOR TRAPEZOIDAL (FONTE: COSTA, 2005) .....	77
FIGURA 2-34 – EXEMPLO DE VERTEDOR RETANGULAR (FONTE: WEBSITE SANECOMFIBRA) .....	77
FIGURA 2-35 – EXEMPLO DE CALHA PARSHALL (FONTE: WEBSITE: DIGIFLOW) .....	78
FIGURA 2-36 – EXEMPLO DE RÉGUAS LINIMÉTRICAS PARA MONITORAMENTO DO NÍVEL D’ÁGUA DE UM RESERVATÓRIO (FONTE: O AUTOR, 2016) .....	79
FIGURA 2-37 - PIEZÔMETROS GRAUTEADOS EM LAMA LACUSTRE NO CANADÁ (FONTE: MCKENNA 1995) .....	83
FIGURA 2-38 - PIEZÔMETROS INSTALADOS PELOS MÉTODOS CONVENCIONAL E GRAUTEADO PARA AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES PIEZOMÉTRICAS E DE ESTABILIDADE DE TALUDE (MCKENNA 1995) .....	84
FIGURA 2-39 - MUDANÇAS TRANSITÓRIAS EM COEFICIENTE DE VAZIOS (FONTE: HVORSLEV, 1951).....	86
FIGURA 2-40 – GRÁFICOS MOSTRANDO A VARIAÇÃO DE COTA PIEZOMÉTRICA AO LONGO DE 10 MESES COM FOCO NA VARIABILIDADE DOS DADOS COM E SEM A CORREÇÃO BAROMÉTRICA (FONTE: VALE/COFFEY, 2016) .....	88
FIGURA 2-41 - REGRESSÃO LINEAR PZ01: MÉDIA MÓVEL DIÁRIA DA LEITURA BRUTA DO SENSOR (DIGITS – UNIDADE RELACIONADA À FREQUÊNCIA DE VIBRAÇÃO DO SENSOR DE CORDA-VIBRANTE) VS. MÉDIA MÓVEL DIÁRIA DA PRESSÃO BAROMÉTRICA (MBARS) (FONTE: VALE/COFFEY 2016) .....	89
FIGURA 2-42 - GRÁFICO CONTENDO LEITURAS BRUTAS SOBREPOSTAS ÀS LEITURAS TRATADAS COM DESTAQUE NA FACILIDADE DE SE ANALISAR AS LINHAS DE DADOS TRATADOS (FONTE: VALE/COFFEY, 2016) .....	89

FIGURA 3-1 - ILUSTRAÇÃO EXEMPLIFICANDO UM TALUDE SUBMETIDO À PERCOLAÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA (FONTE: NOTAS DE AULA "ESTABILIDADE DE TALUDES – AULA 2: SUPERFÍCIE PLANA DE RUPTURA" - UFOP, 2014) .....	93
FIGURA 3-2 – ILUSTRAÇÃO EXEMPLIFICANDO O MONITORAMENTO DA EFICIÊNCIA DE POÇOS DE REBAIXAMENTO (FONTE: WEBSITE DEPARTMENT OF WATER AND SANITATION / SOUTH AFRICA).....	95
FIGURA 3-3 – ILUSTRAÇÃO EXEMPLIFICANDO UM SISTEMA DE DRENAGEM INTERNA DE BARRAGEM (FONTE: MECASOLO LTD).....	96
FIGURA 3-4 – ILUSTRAÇÃO EXEMPLIFICANDO RESULTADOS DE MODELAGEM NUMÉRICA (FONTE: WEBSITE USGS MODFLOW).....	97
FIGURA 3-5 – ILUSTRAÇÃO EXEMPLIFICANDO O MECANISMO DE LIQUEFAÇÃO, PERDA MOMENTÂNEA DO CONTATO/INTERAÇÃO EM GRÃOS DO SOLO (FONTE: SOPHIEBRAEM, 2015) .....	99
FIGURA 3-6 - PRAÇA DE SONDAÇÃO COM FURO EXECUTADO EM FUNDAÇÃO DE BARRAGEM (BARRAGEM PRINCIPAL DA MINA CAPANEMA – FONTE: O AUTOR, 2015).....	102
FIGURA 3-7 - LANÇAMENTO DA AREIA PARA CONFECÇÃO DA CÉLULA DE AREIA. ....	104
FIGURA 3-8 - POSICIONAMENTO DA LINHA FREÁTICA EM UMA BARRAGEM DE REJEITOS (FONTE: VICK, 1983 APUD SANTOS, 2004). ....	106
FIGURA 3-9 - INTERFACE DA DRENAGEM INTERNA E A INSTRUMENTAÇÃO EM MACIÇO DE REJEITO (FONTE: NOTAS DE AULA "DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS DE MINERAÇÃO – AULA 7: ENGENHARIA DA DISPOSIÇÃO DE REJEITOS" - UFOP, 2014).....	107
FIGURA 3-10 – ILUSTRAÇÃO EXEMPLIFICANDO UMA SEÇÃO TRANSVERSAL DO MACIÇO DE UMA BARRAGEM COM NÚCLEO IMPERMEÁVEL (CARVALHO & SILVA, 2006) .....	114
FIGURA 3-11 - PERCOLAÇÃO NA INTERFACE OMBREIRA E MACIÇO (FONTE: WEBSITE - US DEPARTMENT OF AGRICULTURE).....	115
FIGURA 3-12 - SONDAÇÃO PIEZOMÉTRICA EM LAMA DEPOSITADO NO FUNDO DE RESERVATÓRIO (FONTE: NOTAS DE AULA "DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS DE MINERAÇÃO – AULA 7: ENGENHARIA DE DISPOSIÇÃO DE REJEITOS" UFOP, 2014).....	116
FIGURA 4-1 - PERFIL CONSTRUTIVO TÍPICO DE UM PIEZÔMETRO CASAGRANDE INSTALADO NA FUNDAÇÃO DE BARRAGEM (FONTE: O AUTOR, 2016). ....	129
FIGURA 4-2 - PERFIL CONSTRUTIVO TÍPICO DE UM PIEZÔMETRO DE CORDA VIBRANTE INSTALADO PELO MÉTODO CONVENCIONAL EM FUNDAÇÃO DE BARRAGEM (FONTE: O AUTOR, 2016). ....	130

FIGURA 4-3 - PERFIL CONSTRUTIVO TÍPICO DE UM PIEZÔMETRO CASAGRANDE INSTALADO EM MACIÇO DE BARRAGEM DE REJEITO (O AUTOR, 2016). .....	131
FIGURA 4-4 - SEQUÊNCIA DE INSTALAÇÃO DO PIEZÔMETRO DE CORDA-VIBRANTE PELO MÉTODO CONVENCIONAL (FONTE: VALE / COFFEY, 2016).....	132
FIGURA 4-5 - DETALHE DO PERFIL CONSTRUTIVO TÍPICO DE UM PIEZÔMETRO DE CORDA VIBRANTE INSTALADO PELO MÉTODO CONVENCIONAL EM MACIÇO DE BARRAGEM DE REJEITO (FONTE: O AUTOR, 2016).....	133
FIGURA 4-6 - “DATALOGGER” VS. CLP – OS “DATALOGGERS” SÃO MENOS GERENCIÁVEIS QUE OS CLPs E, PORTANTO NÃO VIABILIZAM O ALERTA EM MASSA SEM A DECISÃO HUMANA (FONTE: ADAPTADO DO WEBSITE CAMPBELL). .....	134
FIGURA 4-7 - PERFIL CONSTRUTIVO TÍPICO DE UM PIEZÔMETRO DE CORDA VIBRANTE INSTALADO PELO MÉTODO CONVENCIONAL EM MACIÇO DE BARRAGEM DE REJEITO (FONTE: O AUTOR, 2016).....	135
FIGURA 4-8 - DETALHE DA FIXAÇÃO DO SENSOR NO LADO EXTERNO DO TUBO (FONTE: O AUTOR, 2015). .....	136
FIGURA 4-9 - PERFIL CONSTRUTIVO TÍPICO DE UM INA OU PIEZÔMETRO CASAGRANDE INSTALADO EM MACIÇO DE BARRAGEM DE TERRA. ....	137
FIGURA 4-10 - DETALHE DE UM PERFIL CONSTRUTIVO TÍPICO DE UM PIEZÔMETRO DE CORDA VIBRANTE INSTALADO PELO MÉTODO CONVENCIONAL EM MACIÇO DE TERRA (FONTE: O AUTOR, 2016).....	138
FIGURA 4-11 - MEDIDOR DE VAZÃO E PLUVIÔMETRO INSTALADOS EM MINA (FONTE: O AUTOR, 2015). .....	139
FIGURA 4-12 - PERFIL CONSTRUTIVO TÍPICO DE UM PIEZÔMETRO DE CORDA VIBRANTE INSTALADO EM NÚCLEO IMPERMEABILIZANTE DURANTE SUA CONSTRUÇÃO (FONTE: O AUTOR, 2016).....	140
FIGURA 4-13 - SENSOR PIEZOMÉTRICO INSTALADO DURANTE CONSTRUÇÃO DO ATERRO (FONTE: YASSUDA, 2008). .....	140
FIGURA 4-14 - DETALHE DA CONDUÇÃO DOS CABOS NO SENTIDO JUSANTE (FONTE: YASSUDA, 2008) – PREFERENCIALMENTE, A CONDUÇÃO DOS CABOS DEVE SER DIRECIONADA PARA AS OMBREIRAS DE FORMA A NÃO FAVORECER A PERCOLAÇÃO DE ÁGUA E SUBSEQUENTE SURGÊNCIA NO TALUDE JUSANTE. ....	141
FIGURA 4-15 - DETALHE DE UM PERFIL CONSTRUTIVO TÍPICO DE UM PIEZÔMETRO CASAGRANDE INSTALADO NA INTERFACE ENTRE OMBREIRA E MACIÇO. ....	142

FIGURA 4-16 - PERFIL CONSTRUTIVO TÍPICO DE UM PIEZÔMETRO CASAGRANDE INSTALADO EM FUNDAÇÃO DE PDE (FONTE: O AUTOR, 2016).....	143
FIGURA 4-17 - PERFIL CONSTRUTIVO TÍPICO DE UM PIEZÔMETRO DE CORDA VIBRANTE INSTALADO PELO MÉTODO CONVENCIONAL EM FUNDAÇÃO DE PDE (FONTE: O AUTOR, 2016). .....	144
FIGURA 4-18 - INJEÇÃO DE GRAUTE SOB BAIXA PRESSÃO E DETALHE DA CONEXÃO DA MANGUEIRA (FONTE: O AUTOR, 2015).....	145
FIGURA 4-19- PERFIL CONSTRUTIVO TÍPICO DE UM PIEZÔMETRO DE CORDA VIBRANTE INSTALADO PELO MÉTODO CONVENCIONAL NO CORPO DE PDE (O AUTOR, 2016).	146
FIGURA 4-20 - DETALHE DE UM PERFIL CONSTRUTIVO TÍPICO DE PIEZÔMETRO CASAGRANDE INSTALADO NO CORPO DE PDE (O AUTOR, 2016). .....	147
FIGURA 4-21 - DETALHE DO PERFIL CONSTRUTIVO DE UM PIEZÔMETRO CASAGRANDE INSTALADO NA INTERFACE ENTRE OMBREIRA E CORPO DE PDE (FONTE: O AUTOR, 2016). .....	148
FIGURA 4-22 - DETALHE DO PERFIL CONSTRUTIVO TÍPICO DE UM PIEZÔMETRO DE CORDA VIBRANTE INSTALADO PELO MÉTODO CONVENCIONAL EM TALUDE DE CAVA A CÉU ABERTO (FONTE: O AUTOR, 2016). .....	150
FIGURA 4-23 - DETALHE DO PERFIL CONSTRUTIVO TÍPICO DE UMA PIEZÔMETRO DE CORDA VIBRANTE INSTALADO PELO MÉTODO COMPLETAMENTE GRAUTEADO EM TALUDE DE CAVA A CÉU ABERTO (FONTE: O AUTOR, 2016). .....	151
FIGURA 4-24 - SEQUÊNCIA DE INSTALAÇÃO DO PIEZÔMETRO PELO MÉTODO TOTALMENTE GRAUTEADO (FONTE: VALE / COFFEY, 2016). .....	153
FIGURA 4-25 - PERFIL CONSTRUTIVO TÍPICO DE UM PIEZÔMETRO DE CORDA VIBRANTE INSTALADO PELO MÉTODO COMPLETAMENTE GRAUTEADO PARA MONITORAMENTO DA EFETIVIDADE DE POÇOS DE REBAIXAMENTO DO N.A (FONTE: O AUTOR, 2016).	153
FIGURA 4-26 - PERFIL CONSTRUTIVO TÍPICO DE UM PIEZÔMETRO CASAGRANDE INSTALADO EM TALUDES DE INFRA-ESTRUTURA OU ENCOSTAS NATURAIS (FONTE: O AUTOR, 2016). .....	154

## **LISTA DE ANEXOS**

ANEXO I - QUADRO RESUMO DE ORIENTAÇÃO ÀS ESPECIFICAÇÕES  
TÉCNICAS DE PROJETO DE INSTRUMENTAÇÃO PIEZOMÉTRICA –  
BARRAGENS DE MINERAÇÃO

ANEXO II - QUADRO RESUMO DE ORIENTAÇÕES ÀS ESPECIFICAÇÕES  
TÉCNICAS DE PROJETO DE INSTRUMENTAÇÃO PIEZOMÉTRICA – PILHAS  
DE ESTÉRIL E TALUDES

## SUMÁRIO

### 1. INTRODUÇÃO

- 1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO ..... 18
- 1.2. RELEVÂNCIA DO TEMA A INDÚSTRIA DA MINERAÇÃO..... 19
- 1.3. OBJETIVOS E DEFINIÇÃO DA METODOLOGIA DO ESTUDO..... 20

### 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- 2.1. VISÃO GERAL DAS ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS E SUAS FUNÇÕES  
21
  - 2.1.1. BARRAGENS ..... 21
  - 2.1.2. PILHA DE ESTÉRIL ..... 28
  - 2.1.3. TALUDES ..... 30
- 2.2. DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE MEDIÇÃO ..... 33
  - 2.2.1. CARGA PIEZOMÉTRICA; ..... 33
  - 2.2.2. CARGA ALTIMÉTRICA ..... 33
  - 2.2.3. CARGA HIDROSTÁTICA; ..... 34
  - 2.2.4. CARGA TOTAL; ..... 34
  - 2.2.5. PORO-PRESSÃO; ..... 34
  - 2.2.6. TEMPO DE RESPOSTA..... 35
  - 2.2.7. NÍVEL DO LENÇOL FREÁTICO; ..... 37
- 2.3. TIPOS DE INSTRUMENTOS PIEZOMÉTRICOS E INSTALAÇÃO ..... 38
  - 2.3.1. INDICADOR DE NÍVEL D'ÁGUA (INA) ..... 38
  - 2.3.2. PIEZÔMETRO DE CASAGRANDE ..... 44
  - 2.3.3. PIEZÔMETRO ELÉTRICO DE CORDA VIBRANTE; ..... 50
  - 2.3.4. PIEZÔMETROS PNEUMÁTICOS ..... 71
  - 2.3.5. OUTROS INSTRUMENTOS RELACIONADOS À PIEZOMETRIA ... 74
- 2.4. MÉTODOS DE AQUISIÇÃO DE DADOS ..... 79
  - 2.4.1. MANUAL ..... 79
  - 2.4.2. SEMI-AUMOMATIZADO ..... 80
  - 2.4.3. AUTOMATIZADO ..... 80
- 2.5. FATORES QUE INFLUENCIAM A LEITURA ..... 81

2.5.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS EQUIPAMENTOS EMPREGADOS .....	82
2.5.2. PROCEDIMENTOS DE INSTALAÇÃO .....	82
2.5.3. INFLUENCIAS EXTERNA.....	84
2.5.4. CONFORMIDADE DO EQUIPAMENTO.....	85
2.5.5. MUDANÇAS NO COEFICIENTE DE VAZIOS DO SOLO.....	85
2.5.6. PROCEDIMENTOS DE TRATAMENTO DE DADOS.....	87
2.5.7. ERRO HUMANO DO OBSERVADOR.....	90
<b>3. IDENTIFICAÇÃO DO PROPÓSITO DO MONITORAMENTO</b>	
<b>PIEZOMÉTRICO NAS ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS E PROPOSTA DE</b>	
<b>CRITÉRIOS DE PROJETO</b>	
3.1. PROPÓSITO DO MONITORAMENTO PIEZOMÉTRICO .....	91
3.1.1. CARACTERIZAÇÃO DOS ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS.....	91
3.1.2. MONITORAMENTO DA POROPRESSÃO NA AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DE TALUDES .....	92
3.1.3. MONITORAMENTO DA DISSIPACÃO DO EXCEDENTE DE POROPRESSÃO GERADA DURANTE AS FASES DE CONSTRUÇÃO DE ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS .....	93
3.1.4. MONITORAMENTO DA EFETIVIDADE DAS INSTALAÇÕES E TRABALHOS DE REBAIXAMENTO DO LENÇOL FREÁTICO E DE DESPRESSURIZAÇÃO .....	94
3.1.5. MONITORAMENTO DO NÍVEL DO LENÇOL FREÁTICO E DO FUNCIONAMENTO DE SISTEMAS DE DRENAGEM INTERNA EM ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS .....	95
3.1.6. MONITORAMENTO DA PRESSÃO LATERAL DO SOLO E EMPUXO PARA DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS DE CONTENÇÃO E PARA ACOMPANHAMENTO PÓS-CONSTRUTIVO.....	96
3.1.7. LEVANTAMENTO DE DADOS PARA CALIBRAÇÃO E VERIFICAÇÃO DE MODELOS NUMÉRICOS .....	97
3.1.8. MONITORAMENTO DA DISSIPACÃO DA POROPRESSÃO EM PROCESSOS DE ADENSAMENTO OU EXPANSIVIDADE DO SOLO .....	98
3.1.9. MONITORAMENTO DA DISSIPACÃO DO EXCEDENTE DE POROPRESSÃO DURANTE E LOGO APÓS EVENTOS SISMOLÓGICOS....	98



3.2. CRITÉRIOS PARA ATENDIMENTO AO PROPÓSITO DE  
MONITORAMENTO PIEZOMÉTRICO EM CADA ESTRUTURA GEOTÉCNICA

99

- 3.2.1. MONITORAMENTO PIEZOMÉTRICO EM BARRAGENS DE  
MINERAÇÃO ..... 100
- 3.2.2. MONITORAMENTO PIEZOMÉTRICO EM PILHAS DE ESTÉRIL . 116
- 3.2.3. MONITORAMENTO PIEZOMÉTRICO EM TALUDES ..... 121

**4. RESULTADOS E PROPOSTA DE CONCEITO DE PROJETO PARA  
INSTRUMENTAÇÃO PIEZOMÉTRICA**

- 4.1. RESULTADOS..... 127
- 4.2. PROPOSTA DE CONCEITO DE PROJETO PARA INSTRUMENTAÇÃO  
PIEZOMÉTRICA EM BARRAGENS DE MINERAÇÃO ..... 127
- 4.2.1. FUNDAÇÃO DA BARRAGEM..... 127
- 4.2.2. MACIÇO CONSTRUÍDO COM O REJEITO ARENOSO ..... 130
- 4.2.3. MACIÇO DE TERRA ..... 135
- 4.2.4. MACIÇO DE ENRONCAMENTO..... 138
- 4.2.5. NÚCLEO IMPERMEÁVEL ..... 139
- 4.2.6. INTERFACE OMBREIRA E MACIÇO ..... 141
- 4.2.7. RESERVATÓRIO DE BARRAGEM ..... 142
- 4.3. PROPOSTA DE CONCEITO DE PROJETO PARA INSTRUMENTAÇÃO  
PIEZOMÉTRICA EM PILHAS DE ESTÉRIL..... 143
- 4.3.1. FUNDAÇÃO DA PILHA DE ESTÉRIL ..... 143
- 4.3.2. ATERRO ..... 145
- 4.3.3. INTERFACE OMBREIRA E ATERRO ..... 148
- 4.4. PROPOSTA DE CONCEITO DE PROJETO PARA INSTRUMENTAÇÃO  
PIEZOMÉTRICA EM TALUDES ..... 149
- 4.4.1. TALUDE DE CAVA A CÉU ABERTO ..... 149
- 4.4.2. TALUDES DE INFRAESTRUTURA E ENCOSTAS NATURAIS ..... 154
- 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISA FUTURA**
- 5.1. CONCLUSÕES..... 155
- 5.2. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS ..... 157
- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 159**

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

Estruturas geotécnicas como barragens, pilhas de estéril, taludes de cava, etc., são estruturas integrantes do processo produtivo de uma mina. Funções como a disposição e contenção segura de rejeitos de mineração, a contenção de sedimentos gerados em áreas operacionais ou áreas de grandes aterros (pilhas de estéril), a armazenagem de água para captação e o balanço hídrico regional da mina, a estabilidade dos taludes das cavas de mineração e a contenção de encostas nas diversas plataformas de infraestrutura de uma mina são essenciais para viabilização de um projeto minerário, e portanto, a importância no desenvolvimento de cada etapa de investigação, projeto, implantação, monitoramento e operação deve ser reconhecida, e logo, estas diversas etapas devem ser exercidas por equipes de profissionais especializados em cada área de atuação.

O monitoramento geotécnico da performance e da segurança de estruturas geotécnicas como barragens, pilhas de estéril, taludes de cava, etc., é uma atividade essencial da gestão de segurança destas estruturas. Este monitoramento é, de forma geral, estruturado no controle dos deslocamentos de superfície e em profundidade, no controle da variação dos níveis, vazões e pressões da água represada em reservatórios e percolada através dos maciços, dos aterros, do solo natural e das diversas formações geológicas no subsolo, e no controle das variações em tensões vs. deformação às quais estas estruturas estão submetidas ao longo do tempo.

O monitoramento piezométrico trata da aquisição de dados e leituras de campo, e do controle e da avaliação das variações dos níveis, vazões e pressões da água percolada através dos poros, vazios e discontinuidades dos maciços, dos aterros, do solo natural e das diversas formações geológicas no subsolo, buscando relacionar estas variações com os modelos e as análises de percolação e de estabilidade física das estruturas geotécnicas, acompanhando a performance de elementos drenantes dimensionados em uma etapa anterior, e acompanhamento também o comportamento de solos e rochas frente à estas variações.

O projeto de instrumentação piezométrica, em geral, é parte integrante do projeto de implantação ou construção de uma estrutura geotécnica, e visa dimensionar os diversos elementos constituintes dos instrumentos, orientar sua instalação, calibração e operação,

e visa também especificar tecnicamente os materiais e equipamentos que serão empregados na aquisição de dados e leituras de campo. Estes dimensionamento e especificações são, em muitos projetos, negligenciados e apresentados de forma genérica em textos curtos e seções típicas também genéricas. Esta falha de projeto proporciona a instalação de um instrumento que irá gerar um dado, na maioria das vezes, diferente do qual se pretende analisar para avaliação da performance e da segurança das estruturas geotécnicas. Assim, as condições de segurança e o comportamento do solo/rocha frente às variações piezométricas não são controlados de forma correta ou eficiente, proporcionando às equipes de monitoramento a insegurança frente ao dado adquirido em campo. O projeto de instrumentação de uma estrutura necessita da análise e da avaliação dos especialistas e projetistas no sentido do propósito de monitoramento, ou seja, do fim daquele monitoramento proposto. A especificação dos equipamentos e a definição do método de instalação de um piezômetro ou de um indicador de nível d' água devem ser definidos com base na qualidade do dado adquirido para um determinado propósito de monitoramento.

## 1.2. RELEVÂNCIA DO TEMA A INDÚSTRIA DA MINERAÇÃO

As estruturas geotécnicas são parte integrante de um projeto minerário, e sem elas os processos de extração, beneficiamento e transporte do minério não seriam viáveis. A garantia da estabilidade física destas estruturas é fundamental para a garantia da continuidade dos processos produtivos de uma mina, e as consequências de falhas e rupturas são, na maioria das vezes, desastrosas e impactantes envolvendo perda de vidas humanas, impacto ao meio ambiente, impactos financeiros e interrupção da operação da mina.

Os diversos elementos constituintes das estruturas geotécnicas estão diretamente susceptíveis às mudanças e variações nas condições piezométricas do solo/rocha em uma região. O monitoramento desta condição piezométrica é essencial para a avaliação periódica da segurança destas estruturas geotécnicas empregadas na indústria da mineração. Esta avaliação periódica é realizada empregando-se ferramentas e métodos de análise de estabilidade de taludes e de análise do funcionamento de sistemas de drenagem, os quais, na maioria dos casos, avaliam o equilíbrio de massas de uma seção bidimensional da estrutura ou de uma unidade dela. Esta avaliação do equilíbrio de

massas consiste no somatório dos esforços estabilizantes (parâmetros de resistência como atrito, coesão, etc.) e esforços desestabilizantes (força gravitacional, sobrecargas, poro-pressão, etc.). Desta forma, a variação da condição piezométrica, ou seja, a variação da carga piezométrica e da poro-pressão atuante nos poros e descontinuidades do solo/rocha, têm influência direta no equilíbrio de massas, e portanto, na estabilidade física destas estruturas geotécnicas.

A medição e acompanhamento da variação das condições piezométricas nas estruturas geotécnicas de uma mina é viabilizado pela correta especificação, instalação e operação de instrumentos de piezometria como indicadores de nível d'água, medidores de vazão e piezômetros dos mais variados tipos e tecnologias. Wahlstrom (1974) afirma: *“Barragens e reservatórios e as fundações as quais elas assentam, inevitavelmente sofrem mudanças ao longo do tempo. Algumas dessas mudanças são lentas e sutis e não revelam sua existência a não ser que sejam precisamente e constantemente monitoradas.”*

### 1.3. OBJETIVOS E DEFINIÇÃO DA METODOLOGIA DO ESTUDO

A proposta deste estudo é avaliar os diversos propósitos de monitoramento piezométrico da performance e segurança das estruturas geotécnicas comumente empregadas na indústria da mineração (barragens, pilhas de estéril, taludes de cava, etc.), e propor critérios de projeto de instrumentação piezométrica que atendam à cada um destes propósitos, orientando assim os profissionais de geotecnia na escolha e na especificação dos equipamentos e materiais empregados, bem como no método de instalação e construção destes instrumentos.

Na primeira seção (revisão bibliográfica) os conceitos e definições gerais de cada estrutura geotécnica são apresentados, bem como as definições dos parâmetros de medição (grandezas físicas) à serem medidas. Os tipos de instrumentos, suas funções, princípio de funcionamento, métodos de instalação/construção são detalhados e os métodos de aquisição de dados apresentados. Ainda nesta seção, uma revisão dos fatores que normalmente influenciam as leituras dos instrumentos, bem como da forma à qual estes dados são validados e preparados para alimentar os modelos são apresentados. Experimentos anteriores em instrumentação piezométrica, de diversos autores ao longo de seis décadas, foram considerados nesta seção e consolidam os

melhores exemplos práticos para o entendimento da das melhores técnicas desde a escolha do instrumento até sua instalação, passando pela fidelidade ao objetivo do monitoramento proposto.

Em seguida, na seção de identificação dos propósitos de monitoramento e proposta de critérios para atendimento, os diversos propósitos de monitoramento piezométrico são apresentados com ênfase nos objetivos do monitoramento. A partir daí, vários critérios de escolha, especificação e metodologias de instalação são propostos separadamente para cada elemento de cada estrutura geotécnica. Como resultado, conceitos de soluções para projeto de instrumentação piezométrica são propostos para cada estrutura geotécnica considerando os critérios analisados na seção anterior, e dois quadros resumo destes critérios de projeto de instrumentação piezométrica são apresentados nos anexos 01 e 02.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. VISÃO GERAL DAS ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS E SUAS FUNÇÕES**

#### **2.1.1. BARRAGENS**

Barragens são barreiras construídas para armazenamento de água ou contenção de rejeitos e sedimentos. Barragens podem ser construídas utilizando-se solo compactado, concreto armado, enrocamento ou a parte granular do próprio material à ser contido. No Brasil, a elaboração de projetos de barragens de mineração é normatizada pela NBR 13.028 de 2006, e a lei Nº 12.334 de 20 de setembro de 2010, estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB), e define barragem como: *“qualquer estrutura em um curso permanente ou temporário de água para fins de contenção ou acumulação de substâncias líquidas ou de misturas de líquidos e sólidos, compreendendo o barramento e as estruturas associadas;”*. Esta mesma lei ainda estabelece limites para caracterização de barramento: *“Esta Lei aplica-se a barragens destinadas à acumulação de água para*

*quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais que apresentem pelo menos uma das seguintes características:*

*I - altura do maciço, contada do ponto mais baixo da fundação à crista, maior ou igual a 15m (quinze metros);*

*II - capacidade total do reservatório maior ou igual a 3.000.000m<sup>3</sup> (três milhões de metros cúbicos);*

*III - reservatório que contenha resíduos perigosos conforme normas técnicas aplicáveis;*

*IV - categoria de dano potencial associado, médio ou alto, em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perda de vidas humanas, conforme definido no art. 6º.”*

#### 2.1.1.1. BARRAGEM DE REJEITO

Barragens de rejeito são estruturas idealizadas, projetadas e construídas para armazenar os rejeitos gerados a partir de um processo de beneficiamento do minério. As características do rejeito de mineração dependem do processamento ao qual o minério passa ao longo de seu trajeto na usina de beneficiamento. Estes processos de beneficiamento visam elevar o teor e melhorar a qualidade dos diversos produtos oferecidos na indústria da mineração. A figura 1 mostra um fluxograma de processo de beneficiamento de minério com foco na geração de resíduos, onde a partir da frente de lavra, a rocha segue para as usinas de peneiramento e moagem e o produto é gerado. Além do produto, são gerados também resíduos que passam pela ciclonagem, espessadores e flotação antes de seguirem para as barragens de rejeito. De forma geral, o rejeito de polpa pode sair da usina em duas diferentes formas:

- **Lama:** Porção sólida do rejeito é muito fina, fazendo com que este material não se adense facilmente quando lançado na barragem;
- **Arenoso:** Porção sólida do rejeito é predominante quartzo, possibilitando seu empilhamento quando segregado.

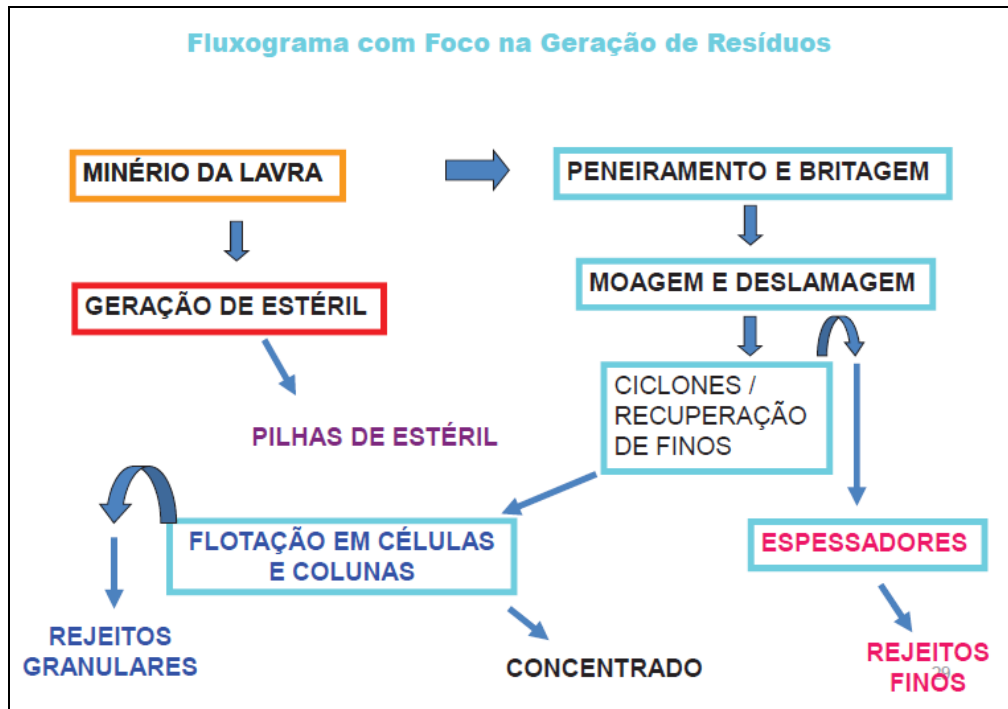
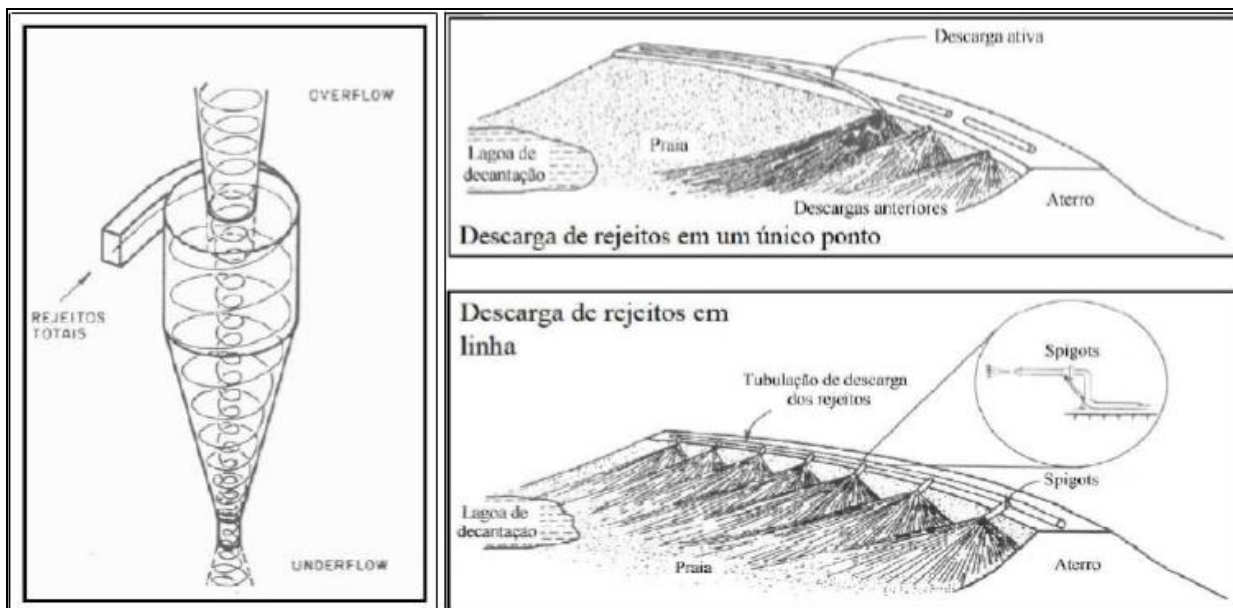


Figura 2-1 - Fluxograma da geração de resíduos de mineração (Fonte: Notas de aula "Disposição de resíduos de mineração Aula 1: Produção de Resíduos de Mineração" UFOP 2014)

O transporte do rejeito da usina para seu destino final, a barragem, é viabilizado por tubulações e canais chamados rejeitodutos, e o lançamento do rejeito na barragem pode ser realizado por três formas básicas (figura 2):

- **Sistema de espigotes:** Lançamento pontual em um único braço ou margem do reservatório onde a porção mais grossa (arenosa) do rejeito acaba se acomodando próximo ao espigote;
- **“Spray bar”:** Lançamento em tubo perfurado posicionado no sentido longitudinal em relação à praia. Este método de disposição abrange uma área maior e, portanto, resulta em uma disposição mais uniforme;
- **Hidrociclones:** Dispositivo que separa o rejeito em duas fases, porção fina (“overflow”) e porção grossa (“underflow”). A porção grossa (arenosa) é utilizada na construção dos maciços de alteamento.

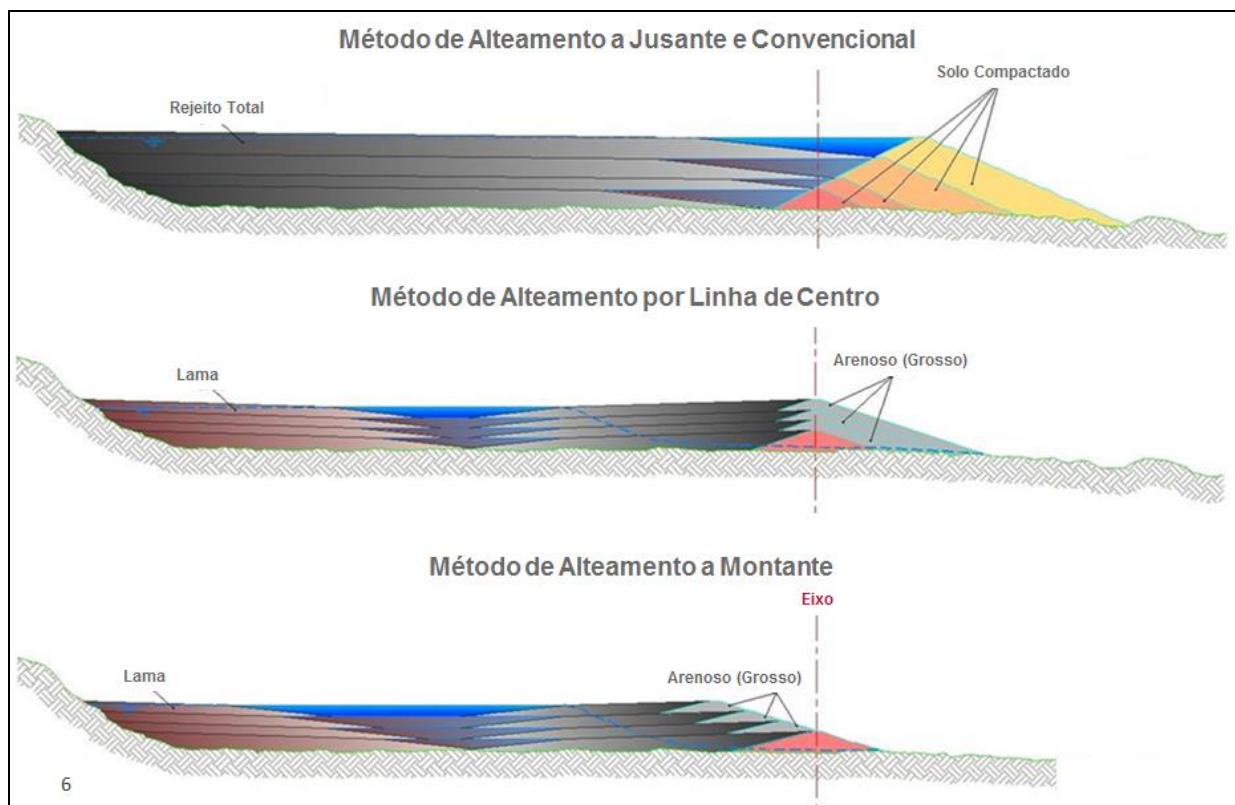


**Figura 2-2 - Métodos de disposição de rejeitos (Fonte: Notas de aula "Disposição de resíduos de mineração – Aula 2: Planejamento de Sistemas de Disposição de Resíduos" UFOP 2014)**

As barragens de rejeito podem ter seu maciço constituído de terra (aterro compactado) ou constituído pela própria porção arenosa do rejeito. Os subsequentes alteamentos também podem ser constituídos de terra ou do próprio rejeito. Existem basicamente três métodos de alteamento de uma barragem de rejeito (figura 3):

- **Alteamento à jusante (ou Convencional):** Execução de aterro compactado sobre o talude jusante da barragem existente.
- **Alteamento em linha de centro:** Lançamento de rejeito arenoso sobre a crista e o talude jusante da barragem existente.
- **Alteamento à montante:** Lançamento de rejeito arenoso sobre o rejeito depositado no reservatório da barragem existente.





**Figura 2-3 - Métodos de alçamento de barragens de rejeito (Fonte: VALE, 2016)**

O Comitê Internacional de Grandes Barragens - ICOLD (2004) descreve este tipo de barragem como sendo barragens construídas para contenção do lançamento de rejeitos, podendo ser construída com o próprio rejeito (contenção de materiais indesejáveis ao mínimo custo) ou como barragens convencionais de terra onde há sinergia da disposição dos rejeitos com o armazenamento de água para recirculação ou para isolamento do contato direto do rejeito com o ar (geralmente construídas em sua altura máxima durante um único período de construção).

#### 2.1.1.2. BARRAGEM DE CONTENÇÃO DE SEDIMENTOS

Barragens de contenção de sedimento, como o próprio nome define, são estruturas implantadas com a função de contenção e controle de sedimentos gerados em uma área operacional ou uma obra de terraplenagem, ou mesmo logo à jusante da área de implantação de um grande aterro, como por exemplo, uma pilha de estéril (figura 4).

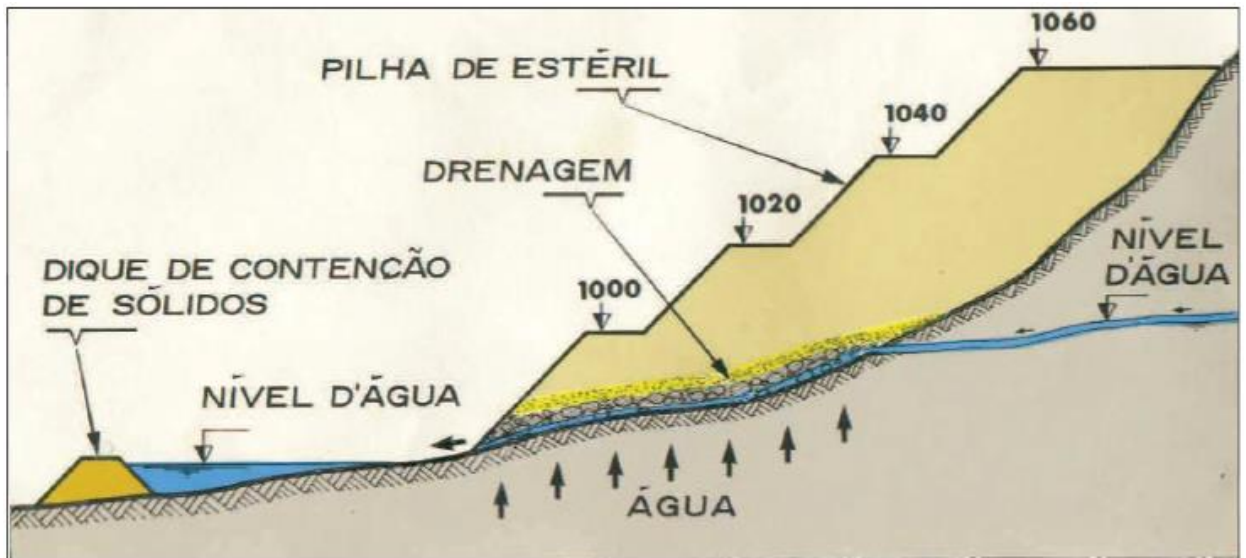


Figura 2-4 - Esquema ilustrativo de um dique de contenção de sedimentos implantado no pé de uma pilha de estéril (Fonte: Notas de aula "Disposição de resíduos de mineração – Aula 3: Disposição de Estéril" UFOP 2014).

As barragens de contenção de sedimento, assim como a maioria das demais barragens destinadas a outros usos, são compostas pelos seguintes elementos:

- **Fundação da barragem:** É a formação geológica que irá suportar o maciço e o material depositado durante e depois de sua construção.
- **Sistema de drenagem interna:** Sistema de drenagem constituído de drenos de fundo, colchões drenantes e drenos verticais, que irá manter baixo o nível freático da barragem.
- **Corpo da barragem/macício:** Material compactado ou simplesmente lançado depositado de forma a constituir a barreira física ao fluxo do líquido represado.
- **Ombreiras:** Contato lateral do maciço com o solo/rocha in-situ existente na área de implantação do maciço.
- **Drenagem superficial:** Sistema de drenagem constituído de valetas, canaletas, descidas d'água e canais necessários para o controle do escoamento de água pluvial.
- **Cobertura vegetal:** Vegetação composta geralmente por gramíneas com a função de evitar a ativação de processos erosivos nos taludes do maciço, quando este for construído com o emprego de material fino (solo).

- **Sistema extravasor:** Sistema, geralmente composto por canal ou galeria, com a função de transportar com segurança as cheias ocorridas na bacia de contribuição da barragem, desviando-as do maciço para que não ocorra o galgamento do reservatório.

Morris (1998) relaciona a questão de entrada e saída de sedimentos em um curso d'água com a velocidade de fluxo da água e com a necessidade de gerenciamento da sedimentação. Segundo Morris (1998), a maioria dos trechos naturais dos cursos d'água é balanceada no que se refere à entrada e saída de sedimentos, e a construção de barragens cria um trecho represado neste curso d'água de baixa velocidade de fluxo. Este trecho represado acumula sedimentos ao longo do tempo até ficar completamente assoreado e entrar em equilíbrio novamente.

#### 2.1.1.3. BARRAGEM DE ARMAZENAGEM E CAPTAÇÃO DE ÁGUA

Em muitos projetos minerários o estudo de disponibilidade e de balanço hídrico aponta a necessidade de se implantar barragens de armazenagem e captação de água para promover o correto manejo da água disponível em nascentes, poços artesianos e/ou poços de rebaixamento do nível d'água do subsolo. Esta armazenagem de água, de forma geral, busca regular a vazão das fontes de água citadas acima com a necessidade de alimentação das plantas de beneficiamento do minério, de forma que não haja necessidade de implantação de uma nova estrutura de captação e fornecimento de água oriunda de outra bacia adjacente.

As barragens de armazenagem e captação de água empregadas na indústria da mineração são geralmente pequenas em comparação com as barragens empregadas para acúmulo, tratamento e fornecimento de água para populações ou para geração de energia elétrica (figura 5).



**Figura 2-5 - Barragem de captação de água da Mina Capanema/MG (Fonte: O autor, 2014)**

As barragens de armazenagem e captação de água possuem os mesmos componentes das demais barragens, porém, adicionalmente estas barragens contam também com sistema de captação e condução de água compostos geralmente por tubulação de sucção, casa de bombas e tubulação de recalque.

### 2.1.2. PILHA DE ESTÉRIL

Pilhas de estéril são grandes aterros construídos com todo material sem valor econômico que precisa ser removido para permitir o acesso aos corpos de minério. Por ser destino de materiais de toda procedência, diferentes litologias e granulometrias, estas pilhas são bastante heterogêneas e de difícil setorização. No Brasil, a elaboração de projetos de pilhas de estéril é normatizada pela NBR 13.029 de 2006. As pilhas e estéril podem ser construídas por, basicamente, dois métodos:

- **Método Descendente:** Executadas sem nenhum controle tecnológico em pontas de aterro (Figura 6 – Este método não é mais empregado, pois não permite a adequada compactação do aterro);

- **Método Ascendente:** Executadas em camadas, de baixo para cima, conforme um projeto geotécnico pré-concebido (figura 7).

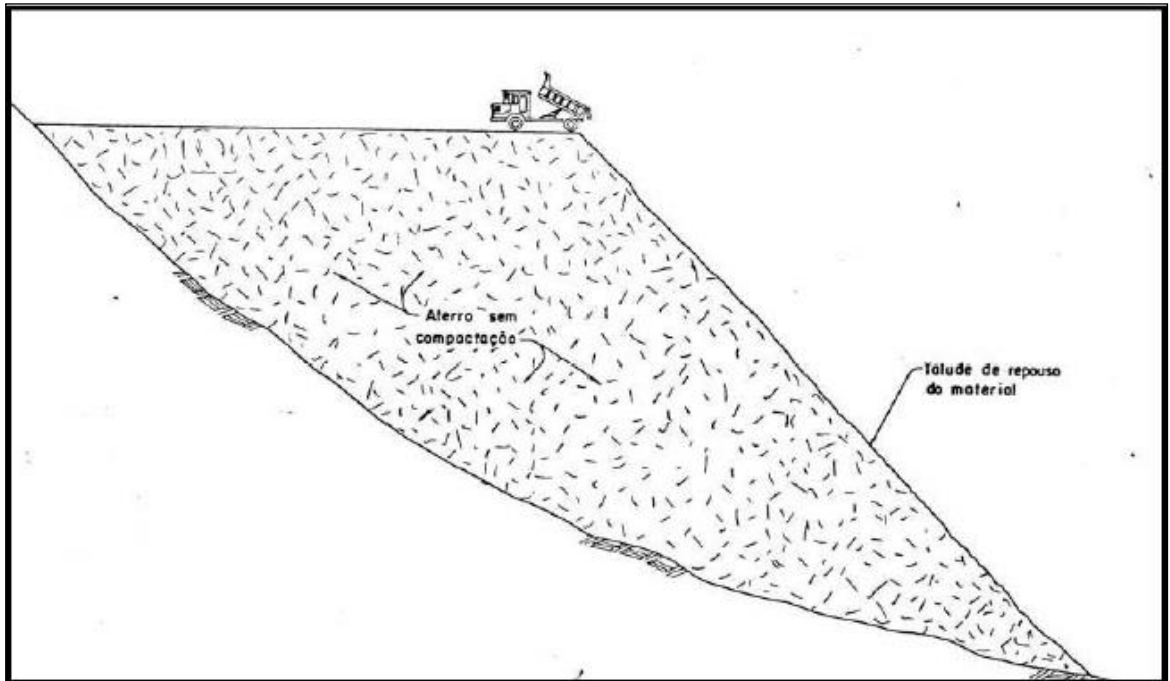


Figura 2-6 - Pilha de estéril pelo método Descendente (Fonte: Notas de aula "Disposição de resíduos de mineração – Aula 3: Disposição de Estéril " UFOP, 2014)

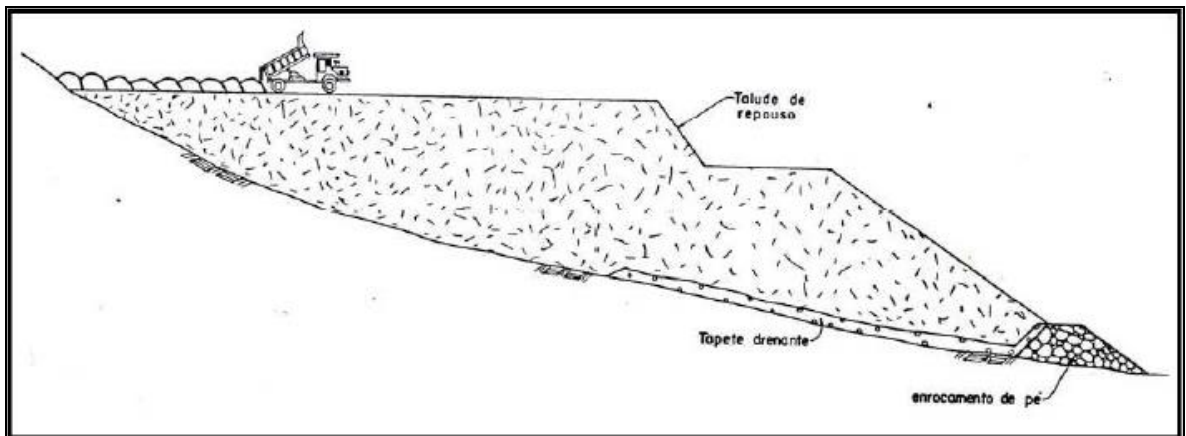


Figura 2-7 - Pilha de estéril pelo método Ascendente (Fonte: Notas de aula "Disposição de resíduos de mineração – Aula 3: Disposição de Estéril " UFOP, 2014).

A construção das pilhas de estéril deve seguir critérios pré-determinados em sua fase de projeto, e deve contar com os seguintes elementos:



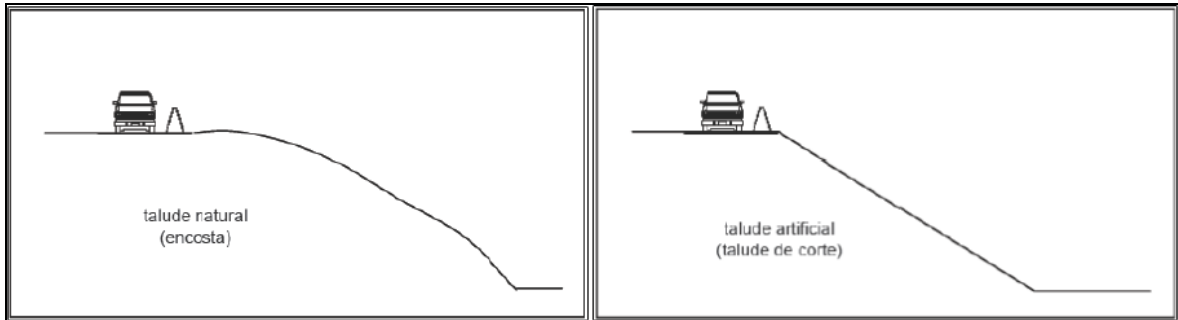
- **Fundação:** É a formação geológica que irá suportar a pilhas de estéril durante e depois de sua construção.
- **Drenagem interna:** Sistema de drenagem constituído de drenos de fundo e colchões drenantes que irá manter baixo o nível freático da área de implantação da pilha.
- **Corpo do aterro:** Material estéril depositado oriundo da cava.
- **Ombreiras:** Contato lateral do corpo do aterro com o solo/rocha in-situ existente na área de implantação da pilha.
- **Drenagem superficial:** Sistema de drenagem constituído de valetas, canaletas, descidas d'água e canais necessários para o controle do escoamento de água pluvial.
- **Cobertura vegetal:** Vegetação composta geralmente por gramíneas com a função de evitar o carreamento da porção fina depositada.

O comitê de pesquisa em pilhas de rocha e resíduos de mina da British Columbia - BC Mine Waste Rock Pile Research Committee (1991) faz uma breve descrição geral das pilhas de estéril e relata a preocupação com a estabilidade física. Segundo o comitê, as pilhas de estéril podem ser estruturas gigantescas, algumas já alcançam até 400 metros de altura e podem armazenar um volume de 1 bilhão de metros cúbicos de material, e por esta magnitude, instabilizações nestas estruturas vem causando preocupação às mineradoras e às agencias de regulamentação dos governos devido ao potencial impacto ao meio ambiente e ao risco às equipes de trabalho que atuam em sua operação.

### 2.1.3. TALUDES

Talude, de forma geral, é a porção inclinada na geometria da superfície natural ou modificada por meio de obras de terraplenagem (figura 8). Esta inclinação dos taludes varia de acordo com a altura do desnível do terreno e com a distância entre estes diversos desníveis presentes ou disponíveis em uma determinada área. Desta forma, um talude é íngreme se a altura dos desníveis for elevada e/ou a distância entre estes desníveis for curta, e no contrário, um talude é suave se a altura dos desníveis for baixa e/ou a distância entre estes desníveis for longa.

Forças gravitacionais, escoamento superficial de água e percolação da água subterrânea e tempo de exposição do material às intempéries tendem a causar instabilidade em taludes de todo tipo.

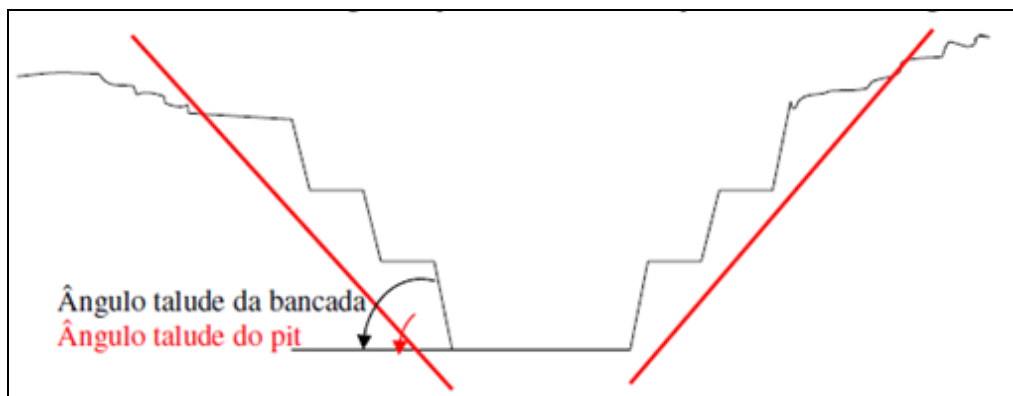


**Figura 2-8 - Exemplos de talude (Fonte: Notas de aula "Estabilidade de Taludes – Aula 13: Taludes Reforçados" - UFOP, 2014)**

### 2.1.3.1. TALUDE DE CAVA A CÉU ABERTO

Taludes de cava a céu aberto são os taludes de corte realizados nos corpos de minério extraídos para beneficiamento e/ou em seu entorno (encaixantes). Stacey *et al.* (2009) afirmam que os taludes de cava são construídos para níveis menores de estabilidade levando em consideração seu curto tempo de vida operacional e o alto nível de monitoramento que é normalmente disponível na mina.

O ângulo do talude da cava é um fator crítico e de difícil determinação nos estágios iniciais do projeto de cava. Para otimizar a relação estéril/minério o talude deve ser o mais íngreme possível sem prejuízo à sua estabilidade (figura 9).



**Figura 2-9 - Diferenças de inclinação dos taludes de bancada e talude final da cava (Fonte: Souza, 2001)**

### 2.1.3.2. TALUDES DE INFRAESTRUTURA E ENCOSTAS NATURAIS

Taludes de infraestrutura são taludes artificiais de corte ou aterro executados por meio de obras de terraplenagem e com o objetivo de adequar a topografia do terreno natural para a implantação das estruturas prediais e das plantas e usinas de beneficiamento e equipamentos industriais de uma mina.

Taludes de infraestrutura são, em sua maioria, projetados e dimensionados conforme critérios de segurança preconizados na NBR 11.682. Desta forma, estes taludes são constituídos de materiais selecionados e implantados de forma controlada por um laboratório de campo, alcançando assim maior homogeneidade e confiabilidade.

Encostas naturais são taludes naturais formados pela ação das intempéries e pelos movimentos na superfície do planeta. Taludes naturais são, de forma geral, mais complexo por serem constituídos por diferentes unidades geológicas (heterogêneo) e apresentarem comportamento anisotrópico (figura 10).



**Figura 2-10 - Exemplo de encosta natural (Fonte: Website Pedro Hauck)**



## 2.2. DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE MEDIÇÃO

### 2.2.1. CARGA PIEZOMÉTRICA;

Carga piezométrica em um determinado ponto é a porção da carga total referente à contribuição da pressão do líquido naquele ponto. É a altura da coluna de um líquido que pode ser suportada pela pressão em um ponto específico. A figura 11 mostra dois exemplos de carga piezométrica; a leitura do piezômetro A representa uma carga piezométrica mais baixa em relação ao nível freático (linhas de fluxo divergentes), e a leitura do piezômetro C representa uma carga piezométrica mais alta em relação ao nível freático (linhas de fluxo convergentes).

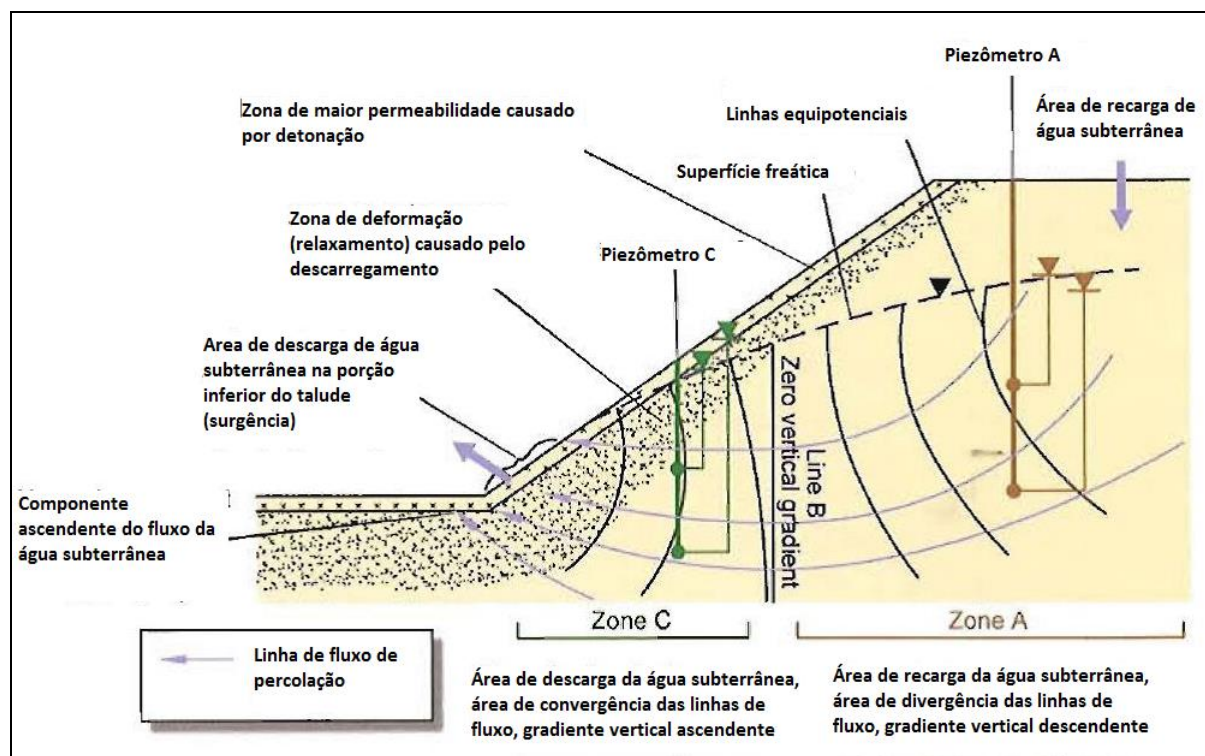


Figura 2-11 - Percolação da água em um talude de cava (Fonte: Read & Stacey, 2009)

### 2.2.2. CARGA ALTIMÉTRICA

Carga altimétrica em um determinado ponto é a porção da carga total referente à contribuição da elevação altimétrica daquele ponto, acima de um datum pré-determinado, geralmente o nível do mar.

### 2.2.3. CARGA HIDROSTÁTICA;

Carga hidrostática é uma medida específica da pressão de um líquido acima de um datum, e é definido como a soma da carga altimétrica com a carga piezométrica.

Carga é uma medida amplamente utilizada em problemas relacionados à água subterrânea, com a vantagem de serem diretamente medidas em um furo de sondagem. O ponto de referencia da medição, geralmente a cota da boca do furo, deve ser registrado cuidadosamente, e em seguida este ponto deve ser referenciado a um datum conhecido.

### 2.2.4. CARGA TOTAL;

A carga total consiste na soma de três componentes, carga de altimétrica, carga piezométrica e carga cinética. A carga cinética é a contribuição da energia cinética cujo líquido detém por estar em movimento, porém, como a água subterrânea se move tão vagarosamente, esta contribuição pode ser omitida.

### 2.2.5. PORO-PRESSÃO;

Poropressão é definida como a pressão da água subterrânea atuantes nos poros do solo e da rocha. Em qualquer ponto abaixo do lençol freático, a poropressão é o resultado do peso da coluna de água atuando naquele ponto contra os grãos interconectados ou fraturas. Poropressão é positiva nos pontos abaixo do lençol freático, nula nos pontos de mesmo nível que o nível do lençol freático e negativa nos pontos acima do lençol freático.

Deve ser observado que sensores de corda vibrante não diferenciam poropressão da porção líquida dos poros e poropressão da porção vazia dos poros. Portanto, se forem instalados na zona parcialmente saturada, a leitura indicada será uma combinação de poropressão da água e poropressão do ar. A respeito da capacidade de contabilizar a poropressão do ar, Mikkelsen (2003) afirma que um piezômetro instalado pelo método completamente grauteado é capaz de medir poropressões negativas (sucção), pois a mistura de graute quando curada torna-se um material poroso sujeito às variações do nível de água do solo

### 2.2.6. TEMPO DE RESPOSTA

Tempo de resposta é o intervalo de tempo necessário para a equiparação da variação de pressão piezométrica ocorridas no ponto alvo na formação geológica e a pressão efetivamente medida no piezômetro. Hvorslev (1951) define tempo de resposta como sendo o tempo necessário para a praticável eliminação das diferenças entre pressões hidrostáticas na água subterrânea e as pressões dentro do equipamento de medição da pressão. A figura 12 mostra a equação do tempo básico de resposta (T) como sendo a razão da área da seção do piezômetro (A) pelo produto do fator de formato da célula (F) com o coeficiente de permeabilidade do solo (k).

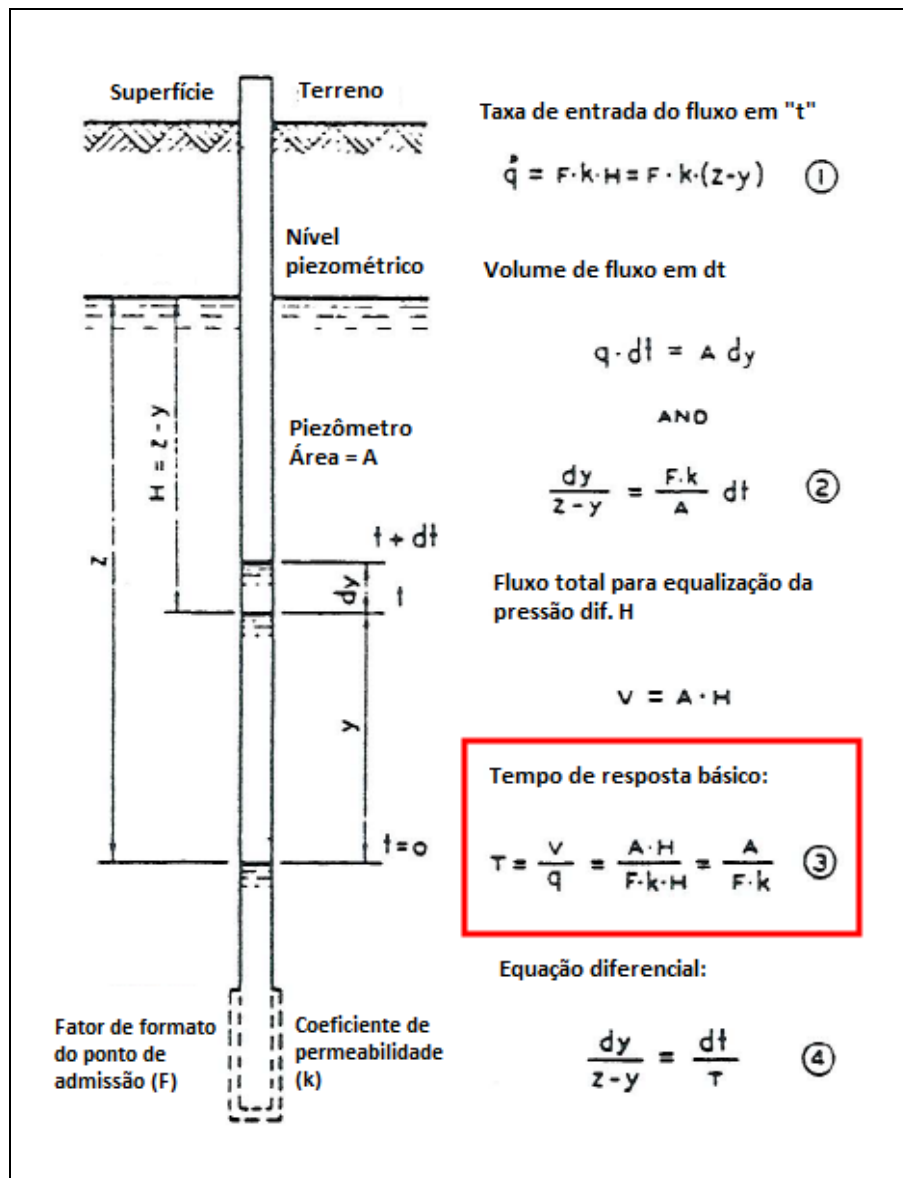


Figura 2-12 - Definições básicas e equação do tempo de resposta (Fonte: Hvorslev, 1951)

Hvorslev (1951) ainda define o conceito de Tempo Básico de Resposta (“Basic Time Lag”), como tempo necessário para uma equalização de 63% do total da equalização possível praticável. A figura 13 mostra dois diagramas de equalização da pressão piezométrica: No primeiro o eixo das abscissas representa a taxa de variação do tempo de resposta ( $t/T$ ), o eixo esquerdo das ordenadas representa a taxa de variação da equalização ( $y/H_0=1-H/H_0$ ) e o eixo direito das ordenadas representa a taxa de variação da carga ( $H/H_0$ ), nota-se que o tempo básico de resposta corresponde à uma taxa equalização de 0,63 e taxa de carga de 0,37. No segundo diagrama, o eixo das abscissas representa o tempo de equalização ( $t$ ) em horas, o eixo esquerdo das ordenadas representa a taxa de variação da carga ( $H/H_0$ ) e o eixo direito das ordenadas representa a taxa de equalização ( $y/H_0=1-H/H_0$ ), nota-se que taxa de equalização de 0,90 deve ser considerada adequada para muitos propósitos práticos e corresponde a um tempo de resposta igual a 2,3 vezes o tempo básico de resposta. Uma equalização de 0,99 requer um intervalo de tempo duas vezes maior que uma equalização de 90%.

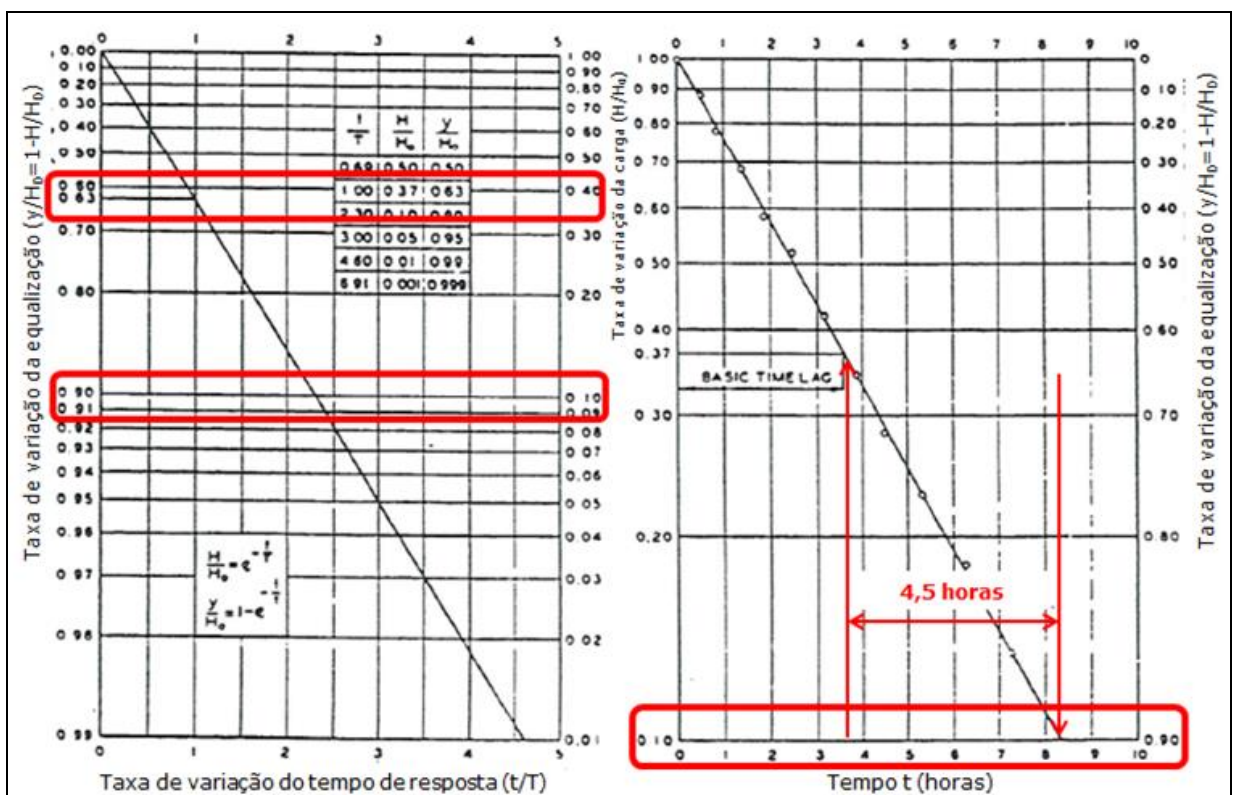


Figura 2-13 - Taxa de Tempo de Resposta vs. Taxa de Equalização (Fonte: Hvorslev, 1951)

Hvorslev (1951) descreve também as variações em poro-pressão e carga piezométrica em condições normais de operação, ou seja, com o aumento da poro-pressão ou elevação do nível de um reservatório. Segundo Hvorslev (1951) em condições normais de operação a pressão da água do solo muda primeiro, e o nível do piezômetro acompanha estas mudanças com uma certa diferença de pressão ou um atraso. Quando o nível de água do solo ou a poro-pressão muda, o índice de vazios do solo também tende-se à mudar, mas a taxa destas mudanças geralmente decai nos arredores imediatos da célula do piezômetros ou do ponto de admissão do sensor por conta da diferença de pressão e do tempo de resposta.

Mckenna (1995), em seu estudo sobre piezômetros grauteados, apresenta estimativas de tempo de reposta para vários tipos de piezômetros e métodos de instalação. Esta estimativa é baseada nas equações de Hvorslev (1951) e considera misturas de graute com permeabilidade na ordem de  $10^{-8}$  cm/s (figura 14).

Tipo de piezômetro	Método de Instalação	Altura típica da célula (cm)	Diâmetro da célula (cm)	Volume de equalização aproximado para 100 cm de carga (cm <sup>3</sup> )	Tempo aproximado de 99% de equalização da pressão
Piezômetro pneumático Sinco	Convencional		17	$10^{-4}$	<1 s
	Grauteado		5	$10^{-4}$	10 s
Piezômetro de corda vibrante Geokon	Convencional		17	$10^{-5}$	<<1 s
	Grauteado		5	$10^{-5}$	1 s
Piezômetro pneumático Sinco	Convencional		7.5	$10^{-4}$	1 s
	Grauteado		5	$10^{-4}$	10 s
Piezômetro Casagrande diâmetro = 2,5cm	Convencional		17	500	10 days
	Grauteado		2.5	500	10 months

Nota: Baseado em formações de permeabilidade na ordem de  $10^{-7}$  cm/s e graute de permeabilidade na ordem de  $10^{-8}$  cm/s

Figura 2-14 - Tempos de resposta estimados para vários métodos de instalação de piezômetros  
(Fonte: McKenna, 1995)

### 2.2.7. NÍVEL DO LENÇOL FREÁTICO;

O nível do lençol freático é definido como o nível da superfície de um corpo d'água, que apresenta pressão atmosférica.

Definições de nível do lençol freático não devem ser referidas à saturação. O topo da zona de saturação pode estar abaixo, no mesmo nível ou acima do nível do lençol freático.

Da mesma forma, o nível do lençol freático não deve ser confundido com a carga piezométrica. Condições regulares (com o nível de pressão do piezometro igual ao nível da água subterrânea livre em qualquer profundidade) são exceções ao invés da regra. Hvorslev (1951) lista os fatores causadores desta desigualdade (ou destas mudanças em nível de pressão piezométrica com aumento da profundidade) como sendo causado devido à: (a) lençol freático elevado ou corpos de água subterrânea isolados por camadas impermeáveis de solo; (b) percolação descendente em direção à camadas mais permeáveis e/ou camadas mais drenantes; (c) percolação ascendente partindo de camadas sob pressão artesianas ou por evaporação e transpiração; e (d) processos incompletos de adensamento ou expansão causados por mudanças no carregamento e no estado de tensão.

## 2.3. TIPOS DE INSTRUMENTOS PIEZOMÉTRICOS E INSTALAÇÃO

### 2.3.1. INDICADOR DE NÍVEL D'ÁGUA (INA)

O indicador de nível d'água consiste em um tubo em PVC, tubo metálico ou tubo geomecânico, ranhurado ou perfurado na totalidade ou na grande maioria de seu comprimento, inserido em um furo de sondagem. A água subterrânea percola através das ranhuras do tubo, e o nível da água do solo é medido pelo nível da água dentro deste tubo. Pela simplicidade em sua concepção, este instrumento mede somente o nível médio da água do solo, já que permite a comunicação vertical entre dois ou mais aquíferos, ou até num mesmo aquífero, quando há fluxos ascendentes ou descendentes (figura 15).

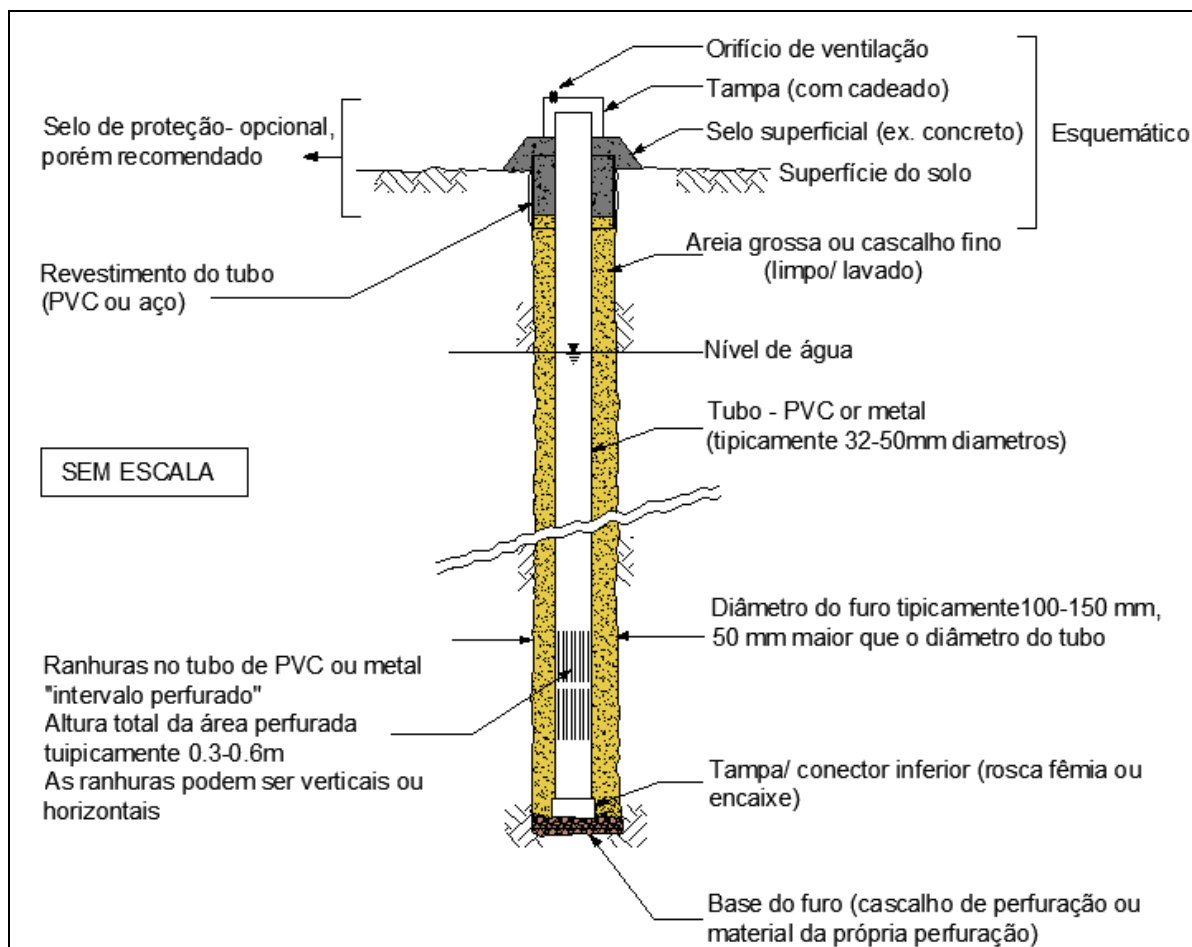


Figura 2-15 - Perfil típico de um indicador de nível d'água (Fonte: VALE / Coffey, 2016)

### 2.3.1.1. PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO

O nível de água dentro do tubo varia conforme a variação média do nível de água das camadas saturadas em que o furo de sondagem interceptou.

A profundidade, ou a elevação, do nível d'água em relação a uma referência (boca do furo, por exemplo), pode ser determinada por meio de um equipamento chamado medidor de nível d'água. O medidor de nível d'água consiste em uma trena graduada acoplada em um apito (pio) ou em uma sonda elétrica que emite sinais sonoros em contato com a água.

### 2.3.1.2. MÉTODO DE INSTALAÇÃO

Por se tratar de um instrumento que oferece somente uma média do nível do lençol freático, e conseqüentemente, precisa de uma célula de areia extensa para comportar as variações de subida e descida do nível de água, o método de instalação

mais adequado é o emprego da coluna de tubulação. Segue abaixo a sequencia de instalação de um Indicador de Nível D'água:

- **Pré-Furo:** Perfurar o solo ou rocha a partir do ponto na superfície do terreno especificado em projeto até atingir a profundidade alvo, registrando toda observação pertinente e relacionada à descrição dos materiais, níveis de água encontrados, umidade e plasticidade e resistência das camadas, etc.;
- **Coluna da tubulação:** Montar, em uma área próxima à praça de sondagem, a coluna do tubo a ser inserido no furo de sondagem, realizando a conexão dos tubos com o uso do adesivo especificado pelo fabricante (no caso de tubulação soldável) ou por meio das conexões (no caso de tubulação rosqueável). O diâmetro da tubulação utilizada deve ser a mesma dimensionada e especificada em projeto;
- **Perfuração da tubulação:** Caso não se adote tubos geomecânicos próprios para este fim, perfurar o trecho da tubulação indicado em projeto com a ajuda de uma furadeira, no caso do INA este trecho será bem maior que a perfuração nos piezômetros. O diâmetro dos furos deve estar de acordo com o especificado em projeto. Ranhuras podem ser empregadas no lugar de furos, executadas com o uso de um arco de serra, e seu tamanho e espaçamento devem ser os especificados em projeto. Tubos filtro prontos de PVC ou metálicos também podem ser utilizados.
  - A NBR 12.212 estabelece diretrizes para o dimensionamento e construção do filtro: A velocidade de entrada de água no filtro deve ser ficar entre 0,03m/s e 0,08m/s; O diâmetro interno do filtro deve ser compatível com o tubo liso, porém a velocidade vertical máxima não deve exceder 1,5m/s; O dimensionamento da abertura dos filtros (ranhuras) é estabelecido com base na granulometria do aquífero e do pré-filtro (célula de areia); O filtro deve reter no mínimo 85% do material do pré-filtro;
- **Proteção do trecho perfurado:** O trecho perfurado/ranhurado deve ser envolto em tela geotêxtil de malha especificada em projeto para mitigar o assoreamento do instrumento pela ação da passagem dos grãos de areia ou outros materiais para dentro da tubulação. Caso o filtro (trecho perfurado/ranhurado do tubo) e o



pré-filtro (célula de areia) tenha sido dimensionado e especificado de acordo com as diretrizes da NBR 12.212, a tela geotêxtil deve ser dispensada;

- **Selagem/preenchimento do fundo do furo de sondagem:** Somente no caso do furo ser mais profundo que as camadas alvo do instrumento, deve-se preencher todo trecho em excesso abaixo da cota de instalação do instrumento utilizando uma mistura de água, cimento e bentonita na proporção em peso (quilogramas) especificada em projeto. Esta mistura pode ser realizada em um reservatório ou um tonel, utilizando a própria bomba disponível na perfuratriz para recircular a mistura até que fique homogênea (alternativamente pode-se utilizar também um misturador mecânico). Com a mistura pronta, esta deve ser injetada, por meio de um conjunto de mangueiras, de baixo para cima em baixa pressão até que se atinja a cota especificada em projeto. Esta argamassa, quando curada, tem o objetivo de simular a permeabilidade e a resistência à compressão da formação geológica adjacente, evitando assim que se ocorra um aumento da contribuição das condições piezométricas das camadas inferiores nas camadas alvo, proporcionada pela intercomunicação causada pelo furo de sondagem;
- **Posicionamento da coluna da tubulação no furo de sondagem:** Elevar a coluna da tubulação com a ajuda do sistema “wireline” da perfuratriz, e desce-la ao longo do furo revestido. No caso de perfurações profundas, a conexão dos tubos deve ser realizada próximo à boca do furo. Nesta etapa, a profundidade de instalação deve ser acompanhada de forma que a base do tubo fique posicionada no nível especificado em projeto. Ao se atingir este nível, trava-se o “wireline”. As etapas seguintes são executadas concomitantemente com a elevação e retirada do revestimento da sondagem;
- **Lançamento da areia:** Para a confecção da célula de areia (ou pré-filtro), esta pode ser cuidadosamente lançada a partir da boca do furo. A altura do preenchimento de areia e sua granulometria devem estar de acordo com o especificado em projeto (procedimento para dimensionamento de pré-filtro), e uma trena graduada fixada no zero a um pedaço de vergalhão pode ser usado para controle desta cota.
  - A NBR 12.212 estabelece diretrizes para o dimensionamento e construção do pré-filtro: O diâmetro do furo de sondagem deve ser adotado levando em consideração também a granulometria do pre-filtro,

com espaço anular mínimo de 75mm; o material adotado deve ser de constituição quartzosa, com granulometria tal que 70% sejam retido na peneira de abertura entre 4 e 6 vezes a que reteria 70% do material friável; coeficiente de uniformidade inferior a 2,5;

- **Selagem/preenchimento do topo do furo de sondagem:** Preencher todo trecho restante acima da cota superior do trecho perfurado utilizando uma mistura de água, cimento e bentonita na proporção em peso (quilogramas) especificada em projeto. Esta mistura pode ser realizada em um reservatório ou um tonel, utilizando a própria bomba disponível na perfuratriz para recircular a mistura até que fique homogênea (alternativamente pode-se utilizar também um misturador mecânico). Com a mistura pronta, esta deve ser injetada, por meio de um conjunto de mangueiras, de baixo para cima em baixa pressão até que se atinja a cota especificada em projeto. Esta argamassa, quando curada, tem o objetivo de simular a permeabilidade e a resistência à compressão da formação geológica adjacente, evitando assim que se ocorra uma alteração na contribuição das condições piezométricas das camadas superiores nas camadas alvo, proporcionada pela intercomunicação causada pelo furo de sondagem;
- **Acabamento e proteção:** Visando aumentar a durabilidade e viabilizar a confortável leitura manual do instrumento, um tubo metálico de 4" (dependendo do número de câmaras que equiparem o instrumento) deve ser instalado sobre a boca do furo para proteção dos tubos de PVC. Uma base de concreto deve ser empregada no engaste do tubo metálico com a superfície do terreno;
- **Automação do instrumento:** Por se tratar de um INA, que oferece somente uma média do nível do lençol freático, os benefícios da automação podem ser alcançados simplesmente descendo um transdutor de pressão ou um sensor de corda-vibrante previamente saturado e calibrado pelo interior do tubo até atingir uma profundidade de 30cm acima da base do instrumento (figura 16). Esta cota deve ser registrada para tratamento dos dados obtidos, o transdutor ou o sensor piezométrico devem ser conectados a um sistema de proteção contra descargas atmosféricas, e finalmente conectados a uma unidade de armazenamento de dados ("datalogger") via cabeamento ou tecnologia "wireless".

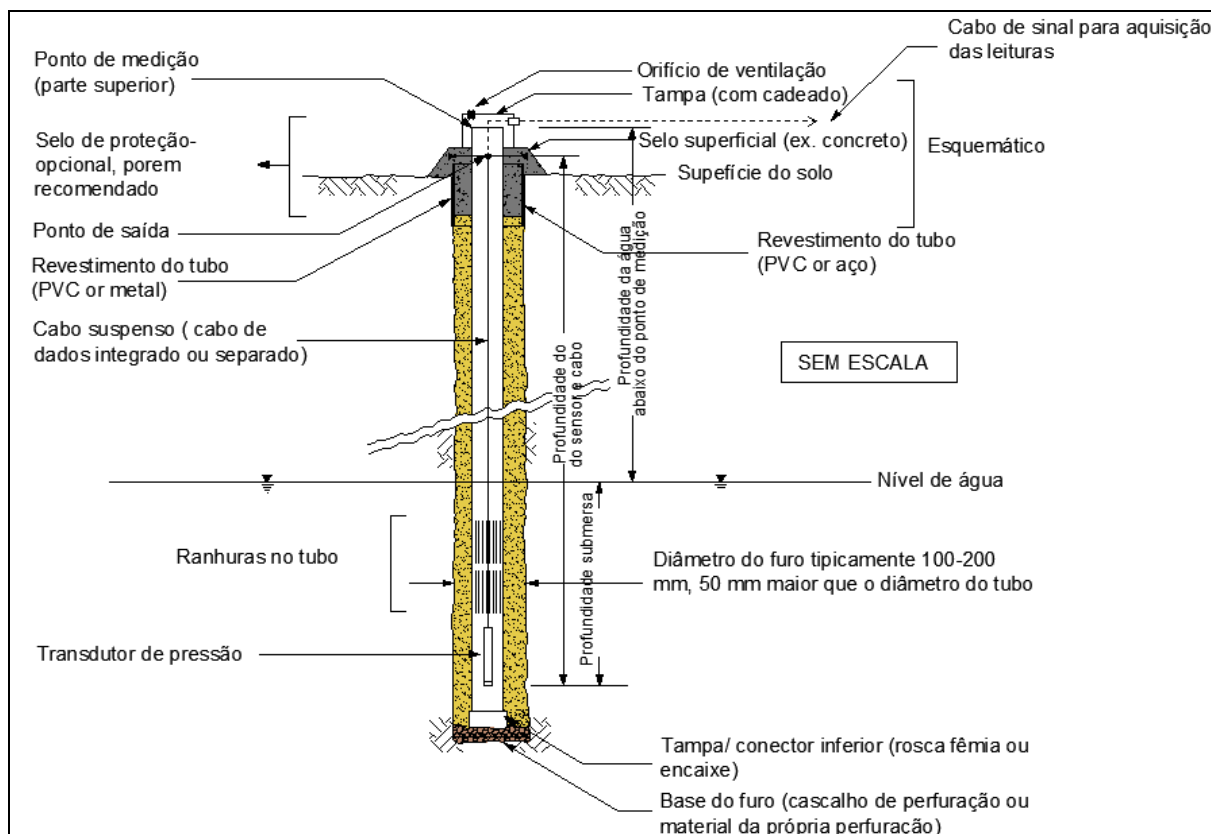


Figura 2-16 – Perfil típico de um instrumento de medição de nível d'água automatizado (Fonte: VALE / Coffey, 2016)

### 2.3.1.3. VANTAGENS E LIMITAÇÕES

#### VANTAGENS:

- Método de instalação e construção simples, e, portanto, não requer emprego de mão-de-obra especializada ou de materiais e equipamentos complexos;
- Instrumento sólido, robusto e durável, necessitando de quase nenhuma manutenção de rotina;
- Construção econômica;
- Pode ser instalado de forma que a boca do instrumento fique posicionada dentro de uma caixa de passagem enterrada, tampada e com acesso restrito à equipe de monitoramento.

#### LIMITAÇÕES:

- Este instrumento não mede poro-pressão ou carga piezométrica;

- Nível do lençol freático é, geralmente, uma representação pobre do ambiente de águas subterrâneas, já que o INA cria uma conexão vertical indesejável entre as diferentes camadas;
- É somente útil para leitura de nível d'água em materiais homogêneos, onde não haja fluxos ascendentes ou descendentes;
- Grande chance do nível d'água ser mal interpretado;
- Medidores de nível d'água, mesmo das melhores marcas e modelos, são reconhecidamente sujeitos à pobre repetitividade e acurácia. A ocorrência de interferência do sensor com a umidade do interior da tubulação não é rara, além do erro do operador;
- Requer acesso direto do operador ao instrumento para sua leitura (exceto se automatizado por meio de um sensor de piezometria).

### 2.3.2. PIEZÔMETRO DE CASAGRANDE

O piezômetro de Casagrande consiste em um tubo em PVC, tubo metálico ou tubo geomecânico, ranhurado ou perfurado em um ou mais trechos de geralmente 1 metro cada, inserido em um furo de sondagem. O fluxo da água subterrânea através das ranhuras do tubo submetida à uma determinada carga piezométrica faz com que o nível da água no interior da tubulação suba ou desça conforme a variação das condições deste fluxo. O nível da água no interior desta tubulação representa a carga piezométrica na posição da célula de areia. Um selo de bentonita evita que a leitura seja influenciada pelas condições piezométricas das camadas superiores à célula de areia. Esta célula de areia fica conectada à superfície do terreno por meio da tubulação e, portanto, tem suas variações medidas sujeitas às condições barométricas (figura 17).

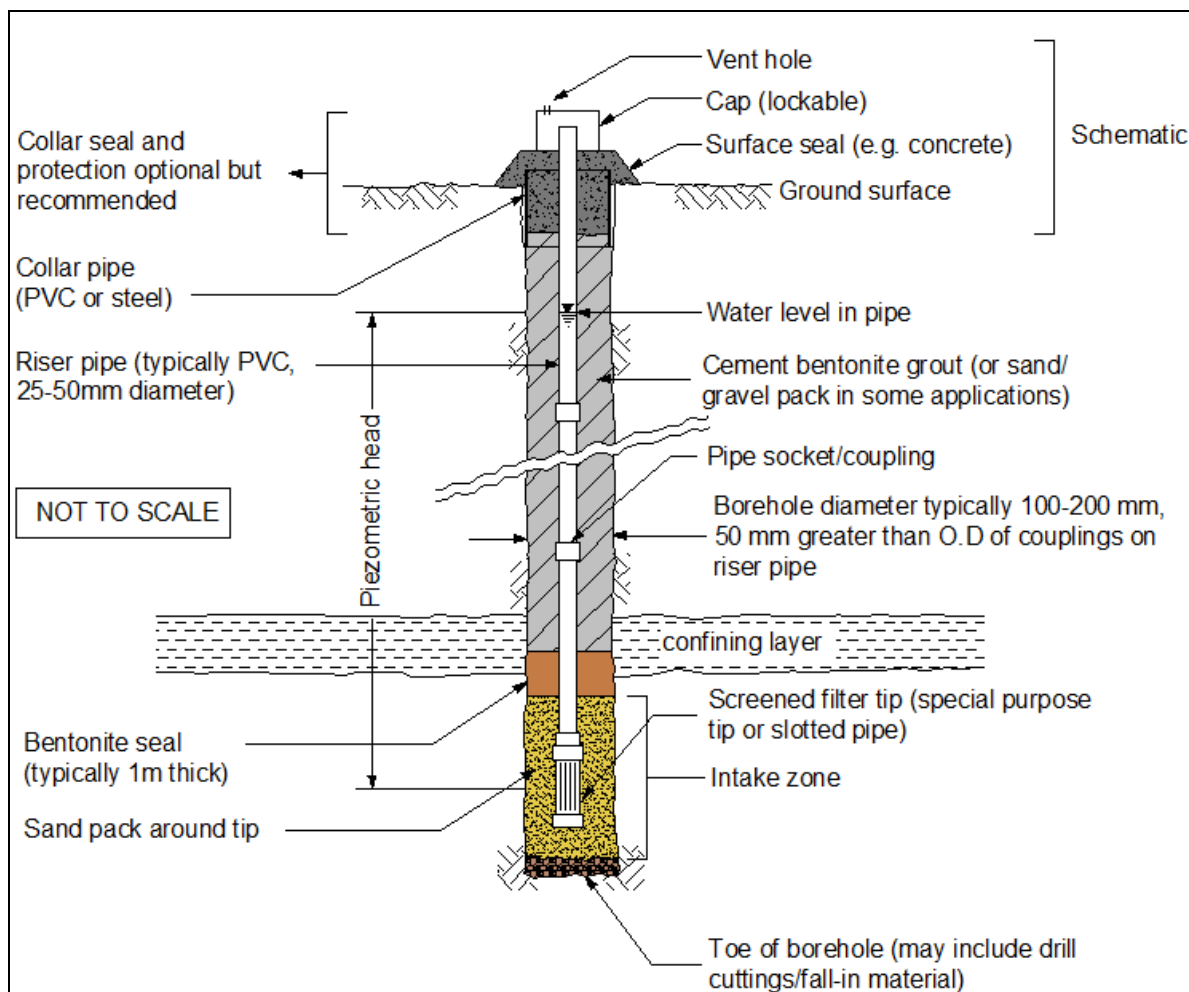


Figura 2-17 - Perfil típico de um piezômetro Casagrande (Fonte: VALE / Coffey 2016)

### 2.3.2.1. PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO

O nível de água dentro do tubo varia conforme a variação da carga piezométrica da camada saturada em que a célula de areia foi posicionada.

A profundidade, ou a elevação, do nível d'água em relação a uma referência (boca do furo, por exemplo), pode ser determinada por meio de um equipamento chamado medidor de nível d'água. O medidor de nível d'água pode ser o mesmo empregado nos INAs.

Na fase de projeto e especificação técnica de um piezômetro, mais especificamente no dimensionamento da célula de areia, deve-se observar as características do material constituinte da camada alvo e o tempo de resposta necessário à equalização das variações nas condições de fluxo da água. O formato da célula de areia tem uma significativa influencia na relação solo/tempo de resposta, e objetivando a

simplificação dos cálculos para dimensionamento da célula, Hvorslev (1951) propõe o emprego de uma tabela prática com nove diferentes formatos de célula de areia e suas respectivas fórmulas para vazão durante a equalização das cargas nos instrumentos (ver figura 18).

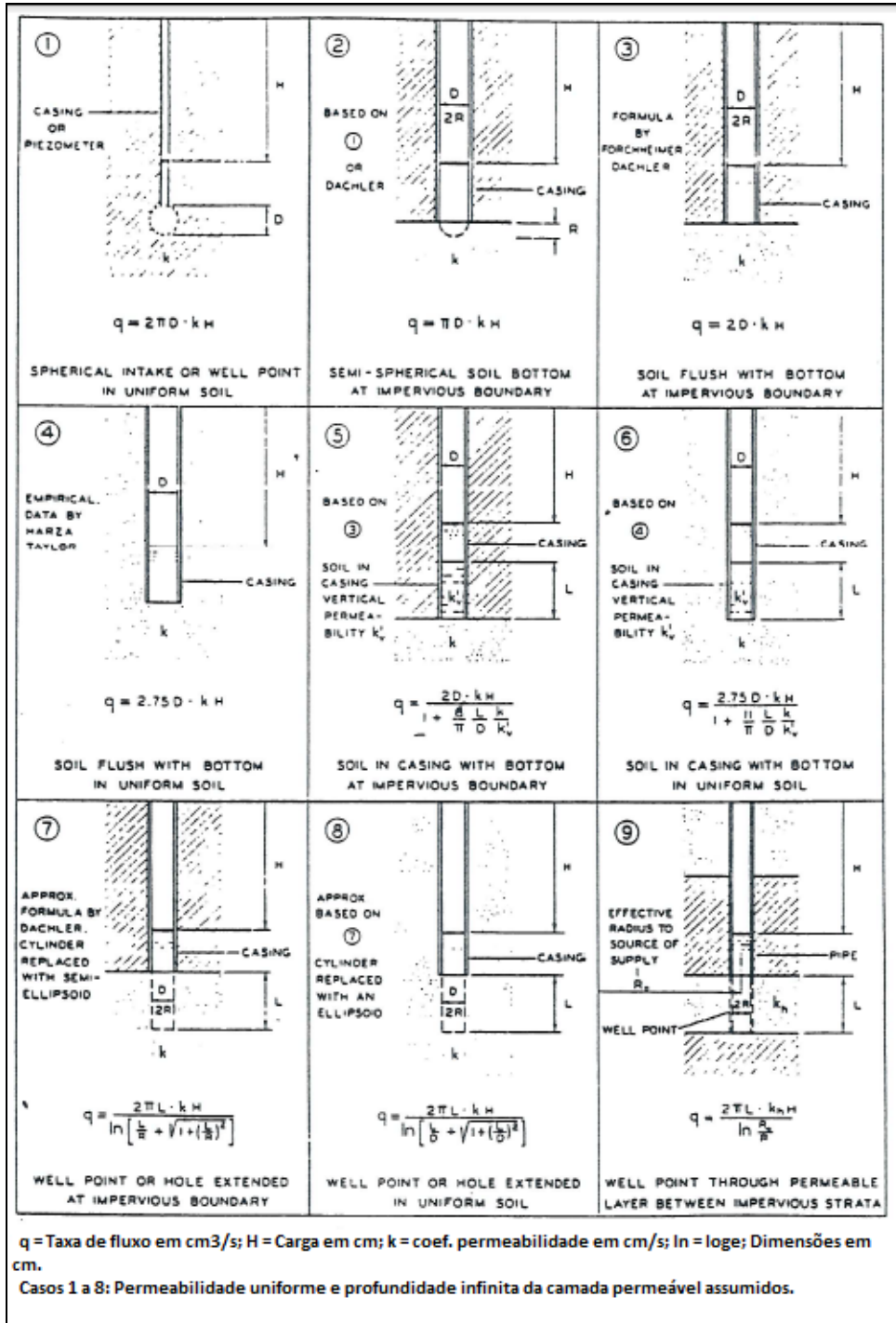


Figura 2-18 - Tabela de dimensionamento de célula de areia (vazão de admissão e fatores de formato) – (Fonte: Hvorslev, 1951)

A figura 18 apresenta nove equações para cálculo da vazão durante a equalização das cargas em um piezômetro, dependendo do formato de concepção de sua célula de areia ou ponto de admissão:

1. Filtro esférico em solo uniforme:  $Q = 2\pi DkH$ ;
2. Filtro semi-esférico em camada impenetrável:  $Q = \pi DkH$ ;
3. Ponto de admissão em camada impenetrável:  $Q = 2DkH$ ;
4. Ponto de admissão em camada uniforme:  $Q = 2,75DkH$ ;
5. Ponto de admissão com trecho de solo no interior do tubo de comprimento  $L$  em camada impenetrável:  $Q = 2DkH / (1+6/\pi*L/D*k/kv)$ ;
6. Ponto de admissão com trecho de solo no interior do tubo de comprimento  $L$  em camada uniforme:  $Q = 2,75DkH / (1+11/\pi*L/D*k/kv)$ ;
7. Célula cilíndrica em camada impenetrável:  $Q = 2\pi LkH / \ln(L/R+\sqrt{1+(L/R)^2})$ ;
8. Célula cilíndrica em camada uniforme:  $Q = 2\pi LkH / \ln(L/D+\sqrt{1+(L/D)^2})$ ;
9. Célula cilíndrica em camada permeável entre camadas impenetráveis (selos):  $Q = 2\pi LkH / \ln(R_0/R)$ .

Ainda sobre as fórmulas apresentadas na figura 18, Hvorsley (1951) faz a seguinte consideração: *“Estas formulas são todas derivadas da hipótese que a camada do solo a qual a célula do piezômetro é posicionada é de espessura infinita e que condições artesianas prevalecem, ou que afluxo ou escoamento é tão pequeno que não provoca qualquer mudança em pressão ou nível de de água do solo. Exceto quando, de outra forma, é notado por subscritos como  $k_v$  e  $k_h$ , assume-se que a permeabilidade do solo,  $k$ , é uniforme ao longo da camada e igual em todas as direções.”*

### 2.3.2.2. MÉTODO DE INSTALAÇÃO

Por se tratar de um instrumento que oferece a medida da carga piezométrica atuante na camada alvo, e conseqüentemente, precisa de uma célula de areia local para equalizar as variações de subida e descida da carga piezométrica, o método de instalação mais adequado é o emprego da coluna de tubulação. A sequencia de instalação de um piezômetro Casagrande é muito parecida com o procedimento de instalação do indicador de nível d'água (INA – ver item 2.3.1.2), seguem abaixo

algumas ressalvas especificadas do procedimento de instalação do piezômetro Casagrande:

- **Perfuração da tubulação:** No caso do piezômetro Casagrande, o trecho perfurado do tubo é bem menor que o trecho perfurado do INA. Geralmente adota-se 1 metro de comprimento para cada célula de areia, porém, se o tempo de resposta do instrumento for um critério importante do propósito de monitoramento, este comprimento deve ser avaliado com base nas equações apresentadas na figura 18. As diretrizes da NBR 12.212 também se aplicam para o projeto do piezômetro Casagrande;
- **Selagem/preenchimento do furo de sondagem:** Para a confecção do selo, a bentonita pode ser simplesmente lançada à partir da boca do furo em forma de lascas ou pelotas (se o furo for raso), ou diluída em água e conduzidos por meio de mangotes (no caso de furos profundos) até o nível correto do selo (logo acima da célula de areia). A espessura do selo deve seguir a especificada em projeto. Preencher todo trecho restante acima da cota superior do selo de bentonita utilizando o solo disponível nos arredores da praça de sondagem, ou utilizando uma mistura de água, cimento e bentonita na proporção em peso (quilogramas) especificada em projeto (ver item 2.3.1.2);
- **Automação do instrumento:** Por se tratar de um piezômetro Casagrande, que oferece uma medida da carga piezométrica influenciada pelas condições barométricas, os benefícios da automação podem ser alcançados simplesmente descendo um transdutor de pressão ou um sensor de corda-vibrante previamente saturado e calibrado pelo interior do tubo até que atinja uma profundidade de 30cm acima da base do instrumento, conforme descrito para o INA (ver item 2.3.1.2).

### 2.3.2.3. VANTAGENS E LIMITAÇÕES

VANTAGENS:

- Método de instalação e construção simples, e, portanto, não requer emprego de mão-de-obra especializada ou de materiais e equipamentos complexos;
- Instrumento sólido, robusto e durável, necessitando de quase nenhuma manutenção de rotina;



- Construção econômica e instrumento confiável;
- Pode ser instalado de forma que a boca do instrumento fique posicionada dentro de uma caixa de passagem enterrada, tampada e com acesso restrito à equipe de monitoramento;
- Elimina sozinho bolhas de ar formadas durante instalação ou bolhas de gás em instalações em solos/rochas reagentes;
- Não há risco de defeito por descargas atmosféricas ou interferências elétricas/magnéticas (exceto quando automatizado via transdutor de pressão ou sensor piezométrico);
- Não precisa ser calibrado (embora o medidor de nível d'água precise);
- Pode ser utilizado para amostragem de água para análise da qualidade (neste caso seria necessário atendimento à norma específica da ABNT).

Hvorslev (1951) considera uma das vantagens do piezômetro de Casagrande a sua tendência a não formação de bolhas de ar. Segundo Horslev (1951) bolhas de ar em um instrumento de observação do nível d'água ou em um piezômetro pode influenciar o tempo de resposta e provocar a elevação do nível indicado no tubo. Portanto, o interior do tubo deve ser liso, protuberanças direcionadas para baixo ou juntas devem ser evitadas, e o diâmetro do tubo deve ser grande o suficiente para fazer com que as bolhas subam para a superfície (mínimo 3/8 de polegada).

#### LIMITAÇÕES:

- Este instrumento não mede poro-pressão, e sim a carga piezométrica em um ponto;
- Tempo de resposta muito longo;
- Sujeito a dano devido à terraplenagem;
- Acurácia da medida depende da habilidade e experiência do operador;
- Necessidade de se manter a verificação da elevação do ponto de referência (normalmente o topo do tubo metálico);
- Poros da célula de areia e perfurações no tubo podem se colmatar;
- As versões cravadas são suscetíveis à colmatação;

- A aparente simplicidade do instrumento muitas vezes resulta em atenção insuficiente dada às fases de projeto, instalação ou até mesmo na leitura;
- Necessidade de correção do tempo de resposta para se alcançar adequada utilização dos dados em materiais de baixa permeabilidade;
- Medidores de nível d'água, mesmo das melhores marcas e modelos, são reconhecidamente sujeitos à pobre repetitividade e acurácia. A ocorrência de interferência do sensor com a umidade do interior da tubulação não é rara, além do erro do operador;
- Requer acesso direto do operador ao instrumento para sua leitura (exceto quando automatizado via transdutor de pressão ou sensor piezométrico).

Yungwirth (2013) considera o longo tempo de resposta uma das desvantagens do piezômetro Casagrande: *“O projeto tradicional do poço de monitoramento da água subterrânea tem a desvantagem da necessidade de um volume finito de água fluir adentro ou afora do furo de sondagem para se registrar uma mudança em níveis de água. Isto cria um tempo de resposta entre a pressão piezométrica da camada e o poço de monitoramento. Em camadas de baixa condutividade hidráulica, a taxa de equilíbrio pode ser devagar demais para propiciar uma informação útil dentro de um intervalo de tempo razoável.”*

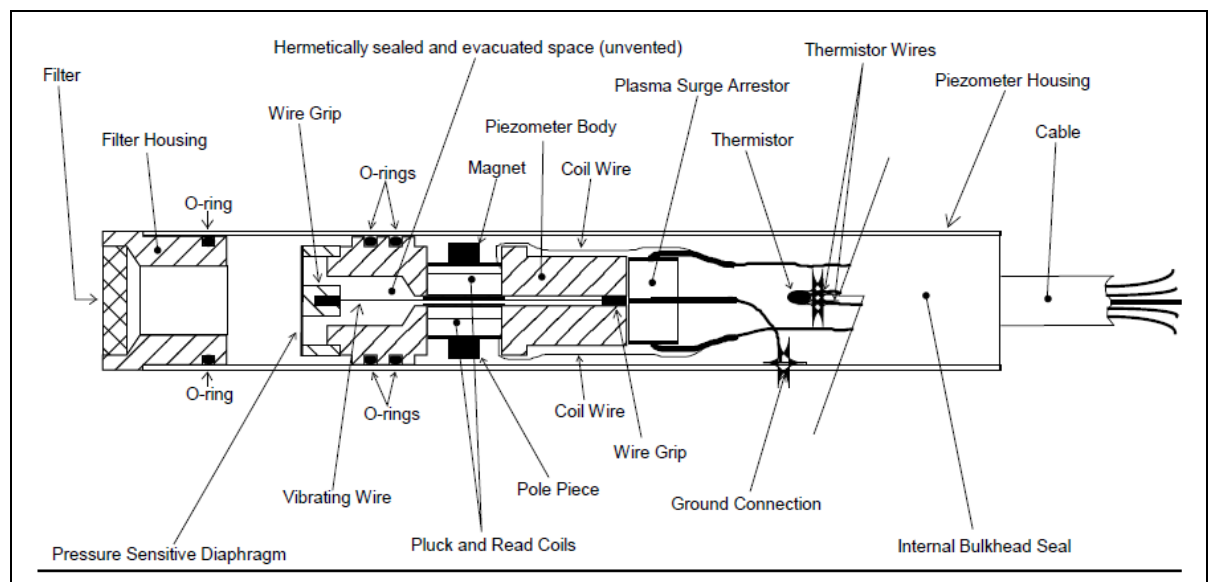
### 2.3.3. PIEZÔMETRO ELÉTRICO DE CORDA VIBRANTE;

O uso de piezômetros de Casagrande vem sendo substituído pelo emprego dos piezômetros de corda vibrante. Este instrumento consiste em um sensor piezométrico de corda vibrante, inserido em um furo de sondagem pré-perfurado por meio de uma estrutura de suporte, ou até mesmo, em determinadas ocasiões, cravados em solo mole. O sensor pode (método convencional de instalação) ou não ser envolto em areia, por onde o fluxo da água subterrânea percola até atuar também no sensor, que por sua vez é submetido a uma determinada poro-pressão. No caso de se empregar a célula de areia, um selo de bentonita evita que a leitura seja influenciada pelas condições piezométricas das camadas superiores à célula de areia. A inexistência do tubo de PVC ou tubo Geomecânico conectando a célula à superfície do terreno é que confere ao sensor a característica de estar confinado e, portanto, não terem suas variações sujeitas às condições barométricas.

### 2.3.3.1. PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO

O sensor de corda vibrante, em linhas gerais, mede a frequência da tensão de um arame fixo a um diafragma e submetido às variações da poro-pressão da camada alvo. O instrumento utiliza um diafragma de aço inox conectado a um elemento de arame vibrante. As mudanças de pressão no diafragma faz com que ele se esvazie e esticando o arame, mudando também a tensão e frequência de vibração do elemento de arame vibrante.

O funcionamento do sensor é explicado com mais detalhe no Manual de Instruções do Piezômetro Modelo 4500 da Geokon (figura 19).



**Figura 2-19 - Piezômetro de Corda Vibrante (Fonte: Geokon, 2014)**

Existem várias marcas e modelos de sensores de corda vibrante no mercado. A questão da escolha do correto modelo para sua instalação vai depender basicamente da pressão em que este sensor será submetido. Yungwirth (2013) orienta a observância da pressão de alcance vs. a profundidade de instalação de um sensor. Segundo Yungwirth (2013), os sensores devem ser escolhidos baseado no alcance da pressão que o sensor deve medir quando instalado, com alcance suficiente para resistir a pressão adicional aplicada durante o grauteamento. Quando a pressão esperada é desconhecida, pode-se aproximá-la à partir da profundidade de instalação. Quanto maior o alcance do sensor maior será o potencial de erro sistemático nas leituras. Portanto, para leituras mais

acuradas, sensores devem ser escolhidos para terem o menor alcance adequado, mas que possam ainda resistir a pressão adicional aplicada durante o grauteamento. A natureza dos sensores de corda vibrante permite que o comprimento dos cabos serem ajustados sem qualquer degradação do sinal.

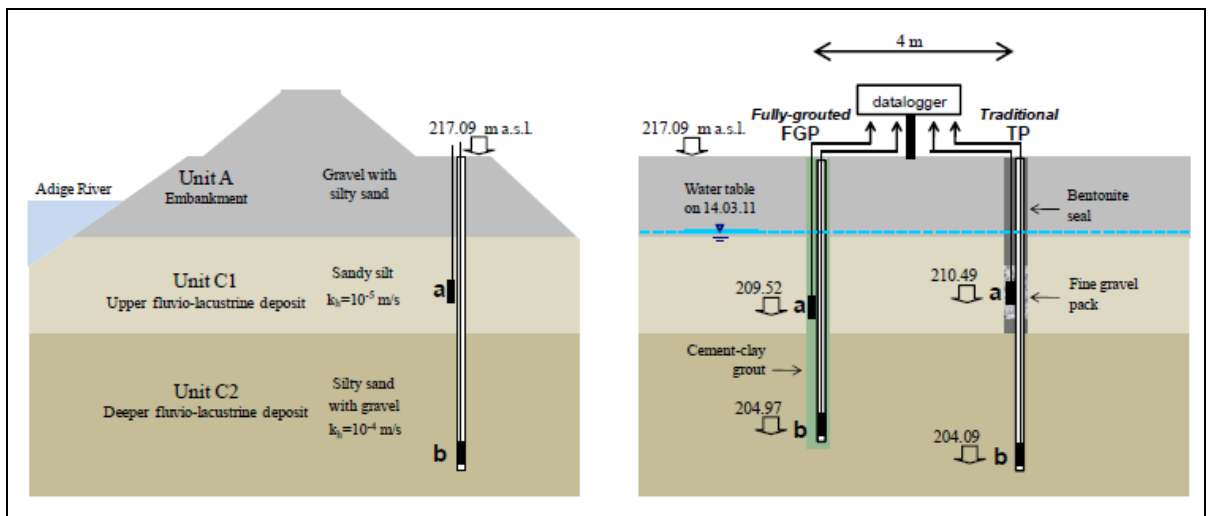
Existem também no mercado, marcas mais e menos duráveis, sendo esta questão definida basicamente pela qualidade dos componentes dos sensores e da tecnologia de sua montagem. Portanto, o critério de escolha da marca deve estar de acordo com o tempo em que se espera que estes sensores realizem o monitoramento necessário, por exemplo, piezômetros instalados com o propósito de monitorar os níveis de segurança de uma estrutura permanente, ou que irá operar por vários anos, devem ser duráveis, ao contrário de piezômetros instalados para monitorar uma determinada região por um ou dois períodos chuvosos.

#### 2.3.3.2. MÉTODOS DE INSTALAÇÃO

Existem na indústria basicamente dois métodos bem estabelecidos de se instalar um sensor de corda vibrante, o método convencional, onde o sensor fica posicionado em uma célula de areia idêntica a do piezômetro Casagrande, e o método completamente grauteado (“Fully Grouted”), onde o sensor é grauteado em conjunto com todo restante do furo de sondagem.

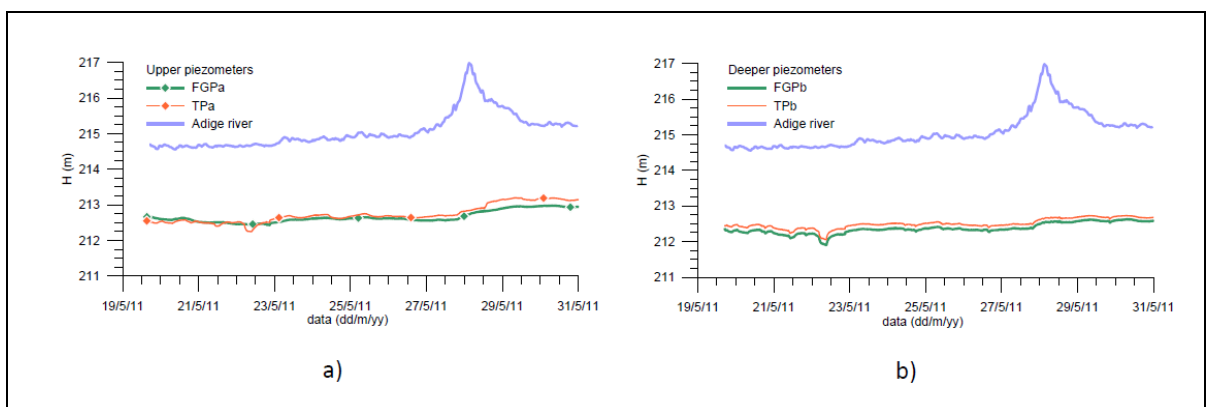
Simeone *et al.* (2011), em seu experimento de campo nas margens do Rio Adige em Egna (norte da Itália), instalaram 4 sensores de piezometria em 2 furos de sondagem de 15 metros de profundidade cada um e com 4 metros de espaçamento entre os furos (dois sensores por furo). Os dois sensores da porção superior foram instalados em um depósito aluvionar constituído basicamente de silte arenoso, porém, foram diferenciados no método de instalação: Um foi instalado pelo método “completamente grauteado” e o outro pelo método convencional (ambos são descritos à seguir).

Os dois sensores da porção inferior foram instalados em uma camada mais profunda e permeável deste mesmo depósito aluvionar, constituída basicamente por uma areia siltosa. Estes dois sensores também se diferem pelo método de instalação (“completamente grauteado” e convencional), de forma que as leituras pudessem ser comparadas e os resultados avaliados (figura 20).



**Figura 2-20 - Perfil de instalação da instrumentação de um experimento de campo realizado em Egna - Itália (Fonte: Simeone *et al.* 2011)**

A análise comparativa mostrou leituras bem próximas entre os sensores instalados pelos diferentes métodos, e ambos apropriadamente seguindo a variação do nível do Rio Adige. A figura 21 mostra as leituras no período de 19/05/11 à 31/05/11, a linha azul representa a variação do nível do Rio Adige, a linha verde representa a variação das leituras do piezômetro instalado pelo método “completamente grauteado” já convertidas em carga total, e a linha vermelha representa a variação das leituras do piezômetro instalado pelo método convencional também já convertidas em carga total (figura 21).



**Figura 2-21 - Carga hidráulica medida nos piezômetros e nível do rio no período de 19/05 à 31/05/11 (Fonte: Simeone *et al.* 2011)**

Os resultados deste experimento mostram que há diferenças nas leituras adquiridas de acordo com o método de instalação adotado. Simeone *et al.* (2011) afirmam: “*Mesmo que cuidados tiveram sido tomados durante a instalação, diferenças de até 1m em elevação de piezômetros correspondentes foram obtidos. Consequentemente, diferenças em carga hidráulica foram encontradas.*” O método de instalação deve levar em conta as propriedades e o comportamento do material no qual o sensor está sendo instalado, além do propósito de monitoramento o qual se deseja alcançar.

Ambos os métodos, “completamente grauteado” e “convencional”, são detalhados a seguir.

#### ➤ MÉTODO CONVENCIONAL:

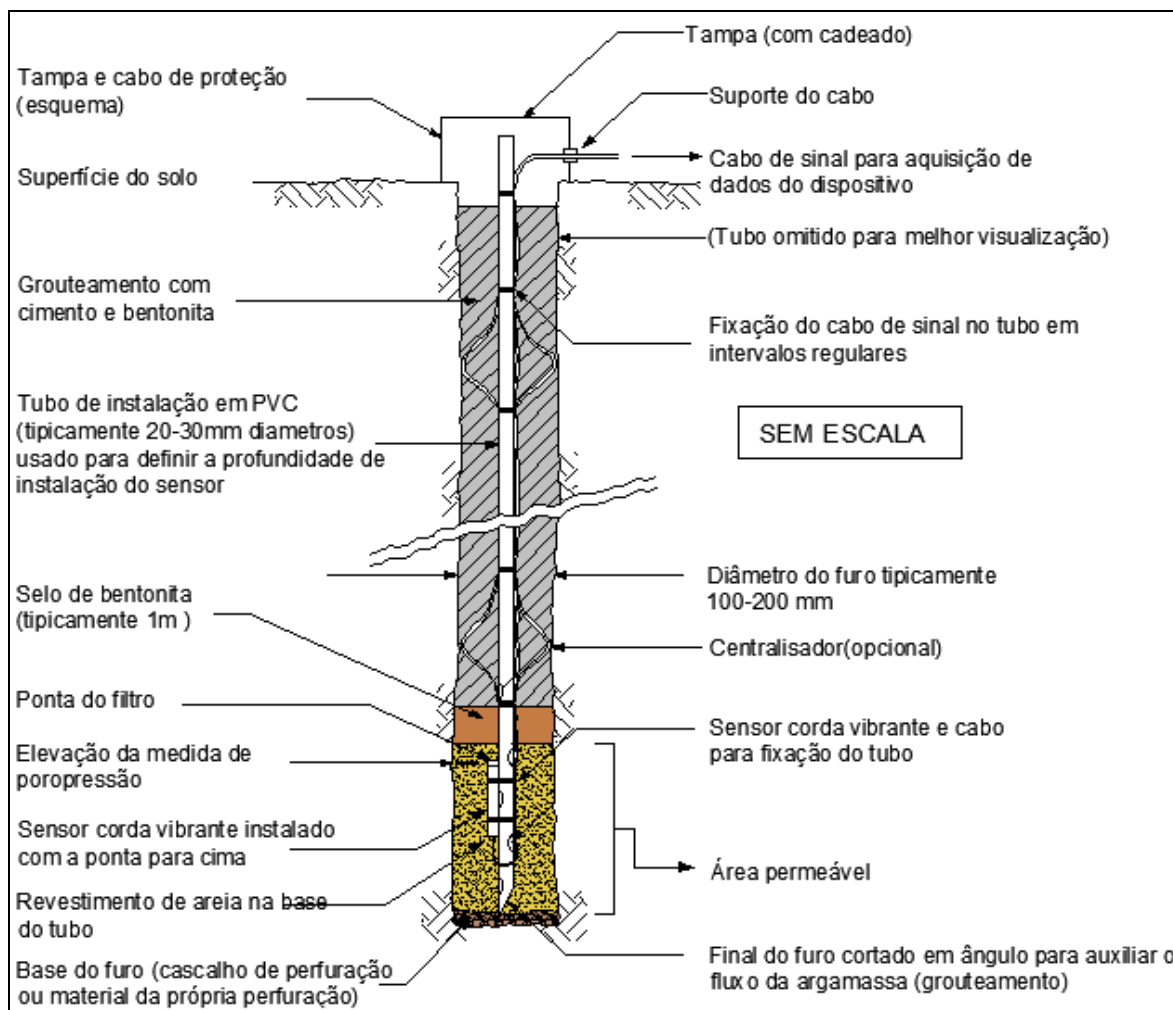
O piezômetro de corda vibrante instalado pelo método convencional conta com a maioria das etapas de execução de um piezômetro de Casagrande (célula de areia, selo de bentonita, aterro do furo, etc.). Porém, ao invés de um tubo de PVC ou geomecânico com a função de conduzir e representar uma variação da carga piezométrica na célula de areia, o sensor de corda vibrante é posicionado e envolto em areia lançada a partir da boca do furo. Desta forma, o parâmetro a ser medido deixa de ser a carga piezométrica (nível ao qual a água no interior do tubo subiu ou desceu) e passa a ser a média da poro-pressão equalizada na célula de areia (figura 22).

Segue abaixo a sequência de instalação de um piezômetro de corda vibrante pelo método convencional:

- **Pré-furo:** Ver item 2.3.1.2;
- **Preparação do sensor:** Realizar uma leitura do sensor com a ajuda de um equipamento de leitura instantânea (“readout”), e em seguida colocar o sensor imerso em água de um dia para outro. Na manhã da instalação, realizar mais uma leitura do sensor utilizando-se do “readout”;
- **Estrutura de suporte:** Montar, em uma área próxima à praça de sondagem, a estrutura de suporte do sensor a ser inserido no furo de sondagem. Materiais semirrígidos podem ser utilizados para esta estrutura: Tubulação de PVC (que terão seu interior também selados para o confinamento da célula de areia);

Barras de aço (vergalhão), hastes plásticas; etc. Marcar a posição em que a ponta do sensor irá ser posicionada, mas não o fixar ainda (deixa-lo imerso em água até o momento de instalação do instrumento no furo). Fixar todo o cabo ao longo da estrutura de suporte com a ajuda de abraçadeiras de modo a evitar com o que o cabo se enrosque com as paredes do furo durante descida do instrumento;

- **Selagem/preenchimento do fundo do furo de sondagem:** Ver item 2.3.1.2;
- **Fixação do sensor na estrutura:** O sensor deverá ser fixado em uma extremidade da estrutura de suporte utilizando-se fita adesiva e/ou abraçadeiras de forma que a ponta do sensor fique virada para cima (o intuito desta prática é mitigar a perda de saturação no sensor durante sua instalação);
- **Descida do instrumento no furo de sondagem:** Elevar a estrutura de suporte com a ajuda do sistema “wireline” da perfuratriz, e desce-la ao longo do furo de sondagem revestido. No caso de perfurações profundas, a conexão deve ser realizada próximo à boca do furo. Nesta etapa, a profundidade de instalação deve ser acompanhada de forma que a base da estrutura de suporte fique posicionada no nível especificado em projeto. Ao se atingir este nível, trava-se o “wireline”. As etapas seguintes são executadas concomitantemente com a elevação e retirada do revestimento da sondagem;
- **Lançamento da areia:** Ver item 2.3.1.2;
- **Selagem/preenchimento do furo de sondagem:** Ver item 2.3.2.2;
- **Acabamento e proteção anti-surto:** O cabo elétrico do instrumento deve ser ligado a um dispositivo de proteção contra descargas atmosféricas devidamente aterrado por meio de hastes de cobre cravadas no solo. Este dispositivo pode ser alojado em uma caixa de passagem selada e enterrada para mitigar vandalismo, a partir daí o cabo segue para a estação de monitoramento (“datalogger”) da maneira descrita no projeto de instalação. Um marco de concreto contendo uma placa de identificação do instrumento deve ser posicionado logo acima do instrumento instalado.



**Figura 2-22 - Perfil típico de um piezômetro de corda vibrante pelo método Convencional (Fonte: VALE / Coffey, 2016)**

As questões de dimensionamento e formato da célula de areia seguem as mesmas apresentadas para o piezômetro Casagrande. Em relação ao tempo de resposta, Mikkelsen (2003) afirma que quanto maior a célula de areia, mais rapidamente a água chegará ao tubo do piezômetro: *“O volume de areia envolvendo a entrada do filtro é parte necessária e integral do piezômetro. Quanto maior o volume de areia, mais rapidamente a água poderá chegar ao tubo de Casagrande para equalização da mudança das pressões. Quanto menor for o diâmetro do tubo de Casagrande, mais rápido a equalização acontece. Em contraste, quando piezômetros de diafragma são utilizados para medir carga piezométrica, somente um volume infinitamente pequeno de água é necessário para ativar o diafragma do sensor.”*



## VANTAGENS

- Pode ser instalado de forma totalmente camuflada, onde o protetor anti-surto fique posicionado em uma caixa de passagem enterrada, e o cabo siga para a estação de monitoramento (“datalogger”) por meio de uma trincheira também aterrada;
- Mede a média da poro-pressão na célula de areia;
- Tempo de resposta mais curto que o piezômetro Casagrande (água não precisa se deslocar pelo tubo de PVC);
- Não fica sujeito a dano devido à terraplenagem se cabeado para fora da praça de aterro;
- Acurácia da medida não depende da habilidade e experiência do operador;
- As versões cravadas não são suscetíveis à colmatação;
- Não requer acesso direto do operador ao instrumento para sua leitura.

## LIMITAÇÕES

- Há risco de defeito por descargas atmosféricas ou interferências eletromagnéticas;
- Poros da célula de areia podem se colmatar;
- Confecção do selo de bentonita por meio do lançamento de lascas e pelotas é complexa e suscetível a falhas. Mikkelsen *et al.* (2003) questionam o uso do selo de bentonita em seu estudo. Segundo Mikkelsen *et al.* (2003), para se obter uma medida correta de poro-pressão, é necessário um isolamento adequado da célula do sensor piezométrico ao longo do comprimento do furo de sondagem. O selamento de um piezômetro convencional pode ainda ser alcançado pelo completo grauteamento do furo de sondagem acima da areia, eliminando o selamento convencional. O graute, por si só, forma um selo adequado e de baixa permeabilidade.
- Selo de bentonita não é volumetricamente estável se instalado em determinadas formações. Mikkelsen *et al.* (2003) descrevem este fenômeno e sua consequência: “*Um preenchimento de argamassa de bentonita feita somente com bentonita e água pode não ser volumetricamente estável e introduz incertezas sobre poropressões localmente induzidas pelo processo de*

*hidratação. Introduzindo cimento, mesmo em quantidade pequena, neutraliza-se as propriedades expansivas do componente bentonita, uma vez que o graute de cimento-bentonita adquire uma cura inicial. A resistência da argamassa pode ser especificada a ser similar ao meio através do controle do teor de cimento e ajustando as proporções da mistura.”*

➤ MÉTODO COMPLETAMENTE GRAUTEADO:

O piezômetro de corda vibrante instalado pelo método completamente grauteado (“Fully grouted”) consiste no preenchimento total do furo de sondagem, do sensor piezométrico e de seu cabo até a boca do furo, com uma mistura de cimento, água e bentonita (figura 23). Teoricamente, se a mistura for realizada adequadamente e com as proporções especificadas, o piezômetro deve responder adequadamente de acordo com as mudanças em poro-pressão mesmo que sua ponta esteja envolta em uma argamassa de graute curada. O que proporciona este funcionamento é o tipo de diafragma empregado na construção destes sensores, que requer somente um volume muito pequeno de fluido para equalização da variação da poro-pressão. A mistura de graute curada é capaz de transmitir este pequeno volume através de uma pequena distância - distância entre a parede do furo (contato com a formação) e a ponta do sensor) – de forma rápida. Para ilustrar, enquanto uma variação de 1 psi necessita de 240ml de fluxo água para se equalizar em um piezômetro Casagrande, em um piezômetro de corda vibrante são necessários somente 0,00002 ml de fluxo de água para a equalização da mesma variação de poro-pressão (1 psi). Contreras (2008) explica porque o método funciona: *“O alto índice de vazios e a baixa permeabilidade são duas razões para o método completamente grauteado funcionar; isto permite a percolação de um pequeno volume de água por uma curta distância, mantendo uma baixa permeabilidade global na direção vertical.”*

Desta forma, o parâmetro a ser medido deixa de ser a média da poro-pressão equalizada em uma célula de areia ou a carga piezométrica (nível ao qual a água sobe ou desce no interior do tubo geomecânico) e passa a ser a poro-pressão equalizada do bulbo adjacente à ponta do sensor.

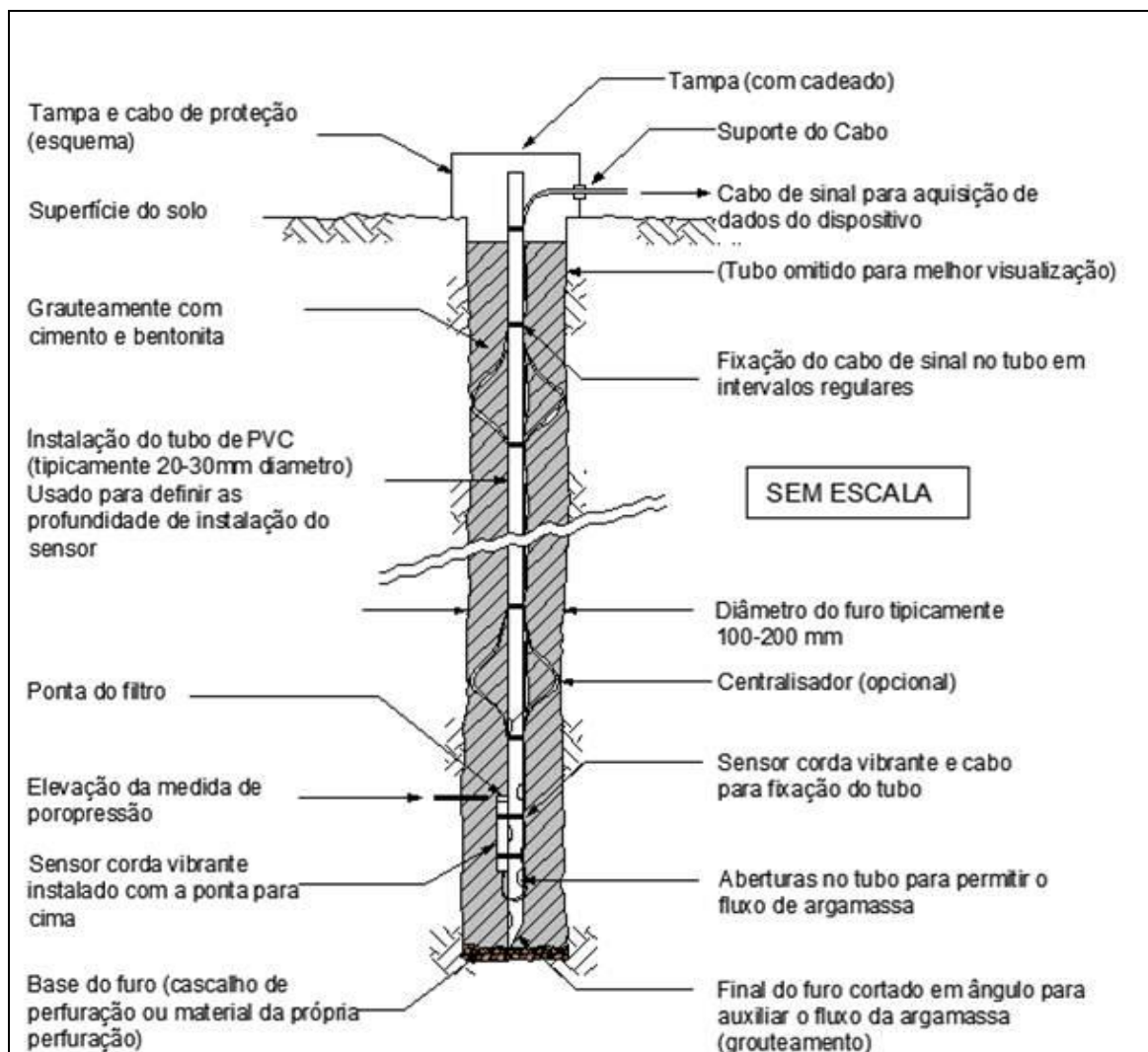


Figura 2-23 - Perfil típico de um piezômetro de corda vibrante pelo método Completamente Grauteado "Fully Grouted" (Fonte: VALE / Coffey, 2016)

Mikkelsen (2003) lista as principais formas de instalação dos piezômetros de corda vibrante completamente grauteados de acordo com o método de perfuração como em resumo sendo:

- Instalar piezômetros, um por um, da base para o topo, em um furo aberto. Grautear e retirar o tubo de PVC na medida que o grauteamento avança. Alternativamente, fixar piezômetros no tubo rígido e deixá-lo instalado;
- Instalar piezômetros, um por um, da base para o topo, no interior da haste da sonda ou no interior do trado oco. Fixar piezômetro ao tubo rígido e deixá-lo instalado enquanto se puxa e recupera as hastes;

- Perfurar, grautear o furo e puxar haste. Instalar um por um, do topo para a base no furo preenchido pelo graute. Adicionar um lastro à cada piezometro para vencer a resistencia demandada pela viscosidade ao descer o piezômetro;
- Fixar o sensor de piezometria diretamente à face externa do tubo de um inclinometro, centralizando entre juntas (quando instalados em conjunto ao inclinômetro);
- Fixar o sensor de piezometria diretamente à face externa de um tubo corrugado de polietileno (sondex) ou fixar similarmente à um tubo magnético/reed, entre sensores magnéticos de forma que a poro-pressão e o recalque sejam medidos ao longo do mesmo furo de sondagem (quando instalados em conjunto ao medidor de recalque);
- Montar um série de piezômetros em tubos de PVC gêmeos de 2 pol., de forma que os piezômetros e cabos fiquem dentro do tubo. Util em instalações em profundidade dentro das hastes ou trados para se prevenir avaria nos cabos durante a extração das hastes. Perfurar o tubo para entrada do graute. Juntas telescópicas podem ser inseridas para acomodar recalque.

Yungwirth (2013) lista alguns desafios na instalação de piezômetros completamente grauteados como sendo basicamente:

- Questões de estabilidade do furo de sondagem: Onde possível, sensores devem ser instalados por meio dos cabos de aço da perfuratriz, que por sua vez sustenta as paredes do furo por meio das hastes durante a instalação. Subsequentemente, as hastes são removidas, deixando os sensores nos locais de instalação;
- Cabos danificados durante a instalação dos sensores: Além de se testar os sensores de corda vibrante na superfície, um robusto procedimento de controle de qualidade deve exigir que estes sensores sejam testados uma vez instalados no local, dentro do furo de sondagem, porém, antes de se iniciar as atividades de grauteamento. É possível que cabos de sensores de corda vibrante venham a ser cortados ou danificados durante a instalação. Se isto for identificado durante o controle de qualidade e antes do grauteamento, a instalação pode ser removida e o cabo danificado pode também ser removido e reparado antes do grauteamento;

- Dificuldades em fixar os sensores e cabos nas estruturas de suporte sob altas temperaturas e condições de profundidade: Para instalações rasas (acima de 300m), normalmente é suficiente fixar sensores nas estruturas de suporte com o uso de fitas. Porém, em condições onde alta temperatura e profundidades mais elevadas são aguardadas, a fita pode não ser forte o suficiente para suportar o peso do cabo, e um método de fixação mais robusto deve ser considerado;
- Resistência do tubo ou da estrutura de suporte: Cuidados devem ser tomados para certificar que o tubo utilizado no instrumento seja robusto o suficiente para suportar seu próprio peso, o peso da instrumentação e a pressão do grauteamento. Isto é particularmente relevante para instalações verticais profundas.

A mistura de graute deve seguir uma proporção (em quilogramas) de cimento, água e bentonita determinada na fase de projeto, e baseada em um traço que simule a resistência e a permeabilidade da formação geológica adjacente ao furo. Mikkelsen (2003) lembra que a permeabilidade da mistura curada pode ser mais alta do que a do meio, desde que esta diferença seja no máximo de duas ordens de magnitude: *“Com a ajuda da Lei de Darcy, Vaughan (1969, 1973) estabeleceu que para piezômetros com diâmetro bem pequeno a seção do furo de sondagem grauteada pode ter uma permeabilidade maior que uma ou mesmo duas ordens de magnitude que o meio, sem degradação da medição da poropressão. Isto é particularmente significativo em argilas espessas, com permeabilidade de  $10^{-8}$  cm/s, ou menor. O uso de selos de mais alta permeabilidade é possível devido ao gradiente hidráulico horizontal (curto trecho grauteado entre a parede do furo e o sensor) ser muito mais alto que o gradiente hidráulico vertical (ao longo do furo de sondagem grauteado).”*

Conforme ilustrado na figura 24, o gradiente hidráulico radial da parede do furo de sondagem até o piezômetro instalado é várias ordens de magnitude maior que aqueles gradientes produzidos verticalmente à partir de um ponto em uma camada acima até o sensor instalado ( $R_d \gg L_d$ ). Gradiente hidráulico radial controla a resposta do piezômetro. O piezômetro A irá medir a poropressão corretamente na argila siltosa adjacente, e o piezômetro B irá medir corretamente a poropressão na areia siltosa adjacente.

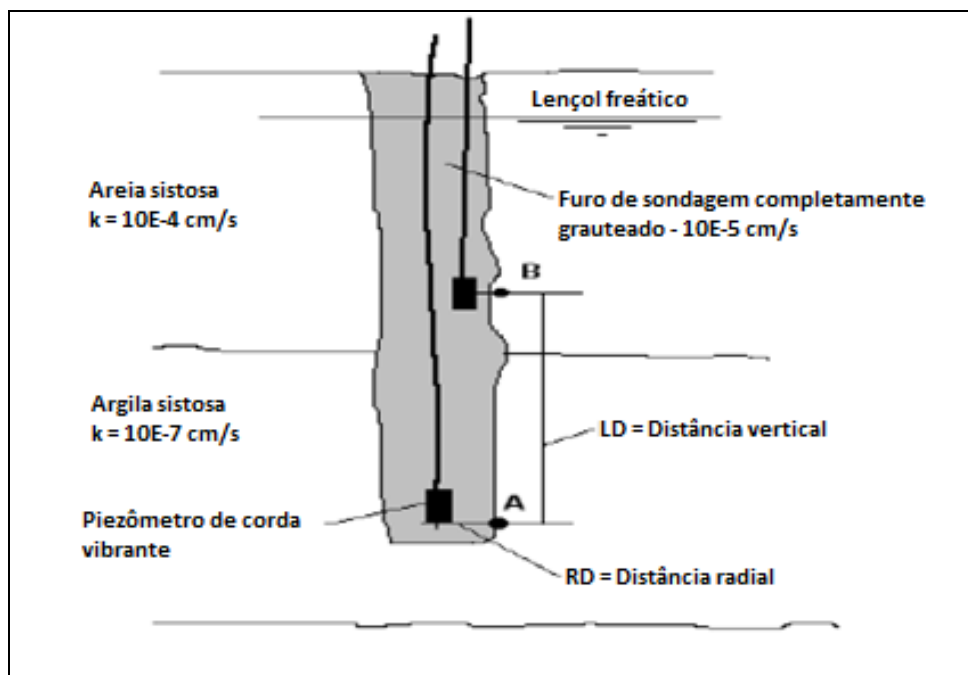


Figura 2-24 - Piezômetros instalados no mesmo furo de sondagem em diferentes elevações (Fonte: Mikkelsen, 2003)

Apesar da questão da permeabilidade versus gradiente hidráulico vertical e horizontal, Mikkelsen (2003) reconhece a dificuldade de simular a permeabilidade em traços de mistura de graute, e sugere a resistência como o parâmetro a ser considerado para esta correlação: *“A regra geral para grauteamento de qualquer tipo de instrumento em um furo de sondagem é simular as características de resistência e deformação do solo ao redor, ao invés da permeabilidade. Entretanto, embora seja viável combinar as resistências à compressão do solo e da mistura do graute curada, é inviável combinar também o módulo de deformação no mesmo projeto de mistura com aquela da argila por exemplo. O prático a se fazer então é aproximar a resistência dos materiais e minimizar a área da parede do furo grauteado. Desta forma, a coluna de graute iria contribuir somente com uma pequena força nas situações onde isso pode ser um problema.”*

Contreras *et al.* (2008) fazem uma análise das funções do cimento e da bentonita na mistura de graute: *“Nas misturas de graute, o cimento tem uma influencia maior no indice de vazios que a bentonita e é considerado o fator controlador na permeabilidade do graute.”*

“Bentonita tem uma pequena influencia na permeabilidade da mistura, mas ao invés disso, ela aparece para estabilizar-la, mantendo o cimento em suspensão e reduzindo a quantidade de água livre remanecente no final do processo de cura (bleed water).”

Uma importante característica da instalação de piezômetros pelo método completamente grauteado é a simplificação da instalação de vários sensores em níveis diferentes no mesmo furo de sondagem (figura 25). O método mitiga os erros e falhas suscetíveis à difícil tarefa de se confeccionar células de areia e selos de bentonita no interior do furo de sondagem.

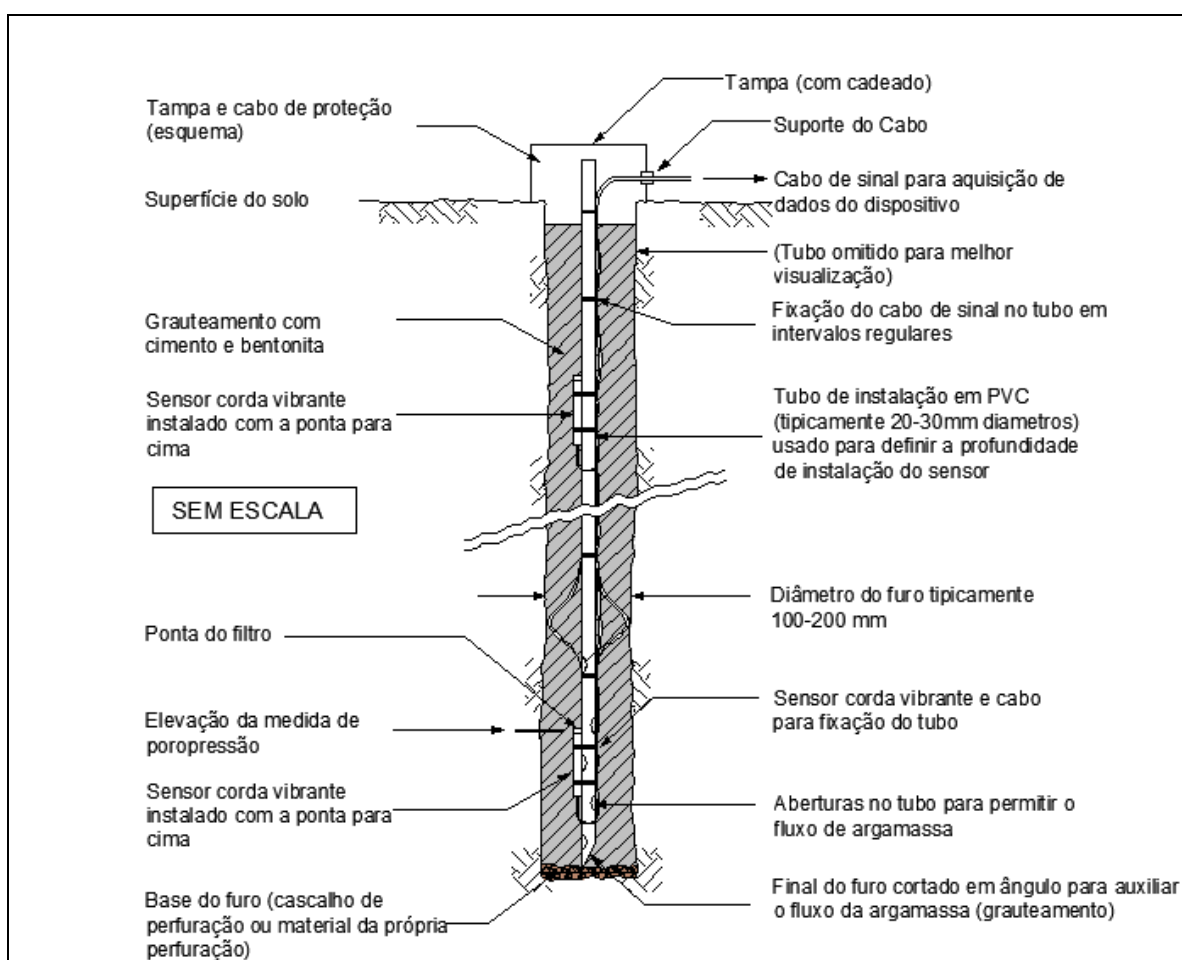


Figura 2-25 - Perfil típico do piezômetro de corda vibrante em múltiplos níveis (Fonte: VALE / Coffey 2016)

Mikkelsen *et al.* (2003) valorizam a facilidade de instalação de múltiplos sensores: “O furo de sondagem é o componente de maior custo na instalação de instrumentos,

*portanto existe um grande incentivo em se posicionar mais de um sensor ou mais tipos de instrumentos no mesmo furo de sondagem. Discussões neste tópico ocorreram no passado devido a percepção da falta de habilidade em selar entre vários cabos, canos e tubos em uma perfuração. É a opinião do autor que a maioria das dificuldades levantadas foram sobre lidar com tubos rígidos e tentativas de posicionar múltiplas células de areia e selos de bentonita. Eliminação de múltiplos tubos rígidos, de células de areia lançadas e de camadas de bentonita e a oportunidade de medições múltiplas em profundidade, são considerados benefícios.”*

Contreras *et al.* (2008) comprovam, por meio de análises computacionais, ensaios de laboratório e ensaios de campo, a viabilidade de se obter uma mistura de graute com propriedades similares à do meio onde os instrumentos necessitam ser instalados. Primeiramente, Contreras *et al.* (2008) desenvolveram um modelo computacional em elementos finitos no software SEEP/W da GEO-Slope International onde foram simuladas as condições de percolação entre um piezômetro instalado pelo método completamente grauteado (coluna com 14 cm de diâmetro) e o material a qual a instalação foi executada. Parâmetros reais de permeabilidade foram dados à coluna de graute e ao material adjacente, e o objetivo foi avaliar o impacto da permeabilidade do graute na acurácia da medição de poro-pressão no piezômetro. A razão da permeabilidade do graute e do solo ( $k_{\text{grout}} / k_{\text{soil}}$ ) foi variada de 1 à  $10^{-7}$ , e as análises foram realizadas contemplando fluxos ascendente e descendente em dois valores diferentes de carga total, 10m e 20m (Figura 26) . Os resultados foram apresentados em um gráfico que relaciona a razão de permeabilidade (eixo das abscissas) com o erro normalizado (eixo das ordenadas), e mostra que existe diferença significativa das medições de poropressão entre o piezômetro e o solo somente à partir de uma razão de permeabilidade igual à  $10^{-3}$  (Figura 27).

Contreras *et al.* (2008) conclui: “O modelo computacional de elementos finitos revelou que a permeabilidade da mistura de graute pode ser até três ordens de magnitude maior que a permeabilidade do solo do entorno sem introduzir erros significantes.”



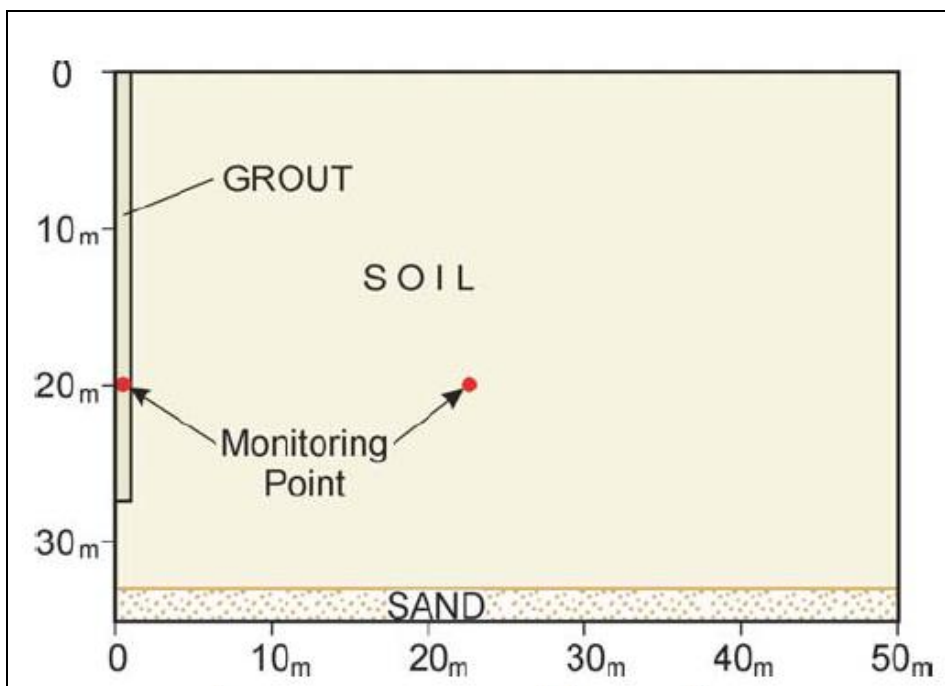


Figura 2-26 - Modelo computacional para simular percolação entre um piezômetro "fully grouted" e o solo (Fonte: Contreras *et al.* 2008)

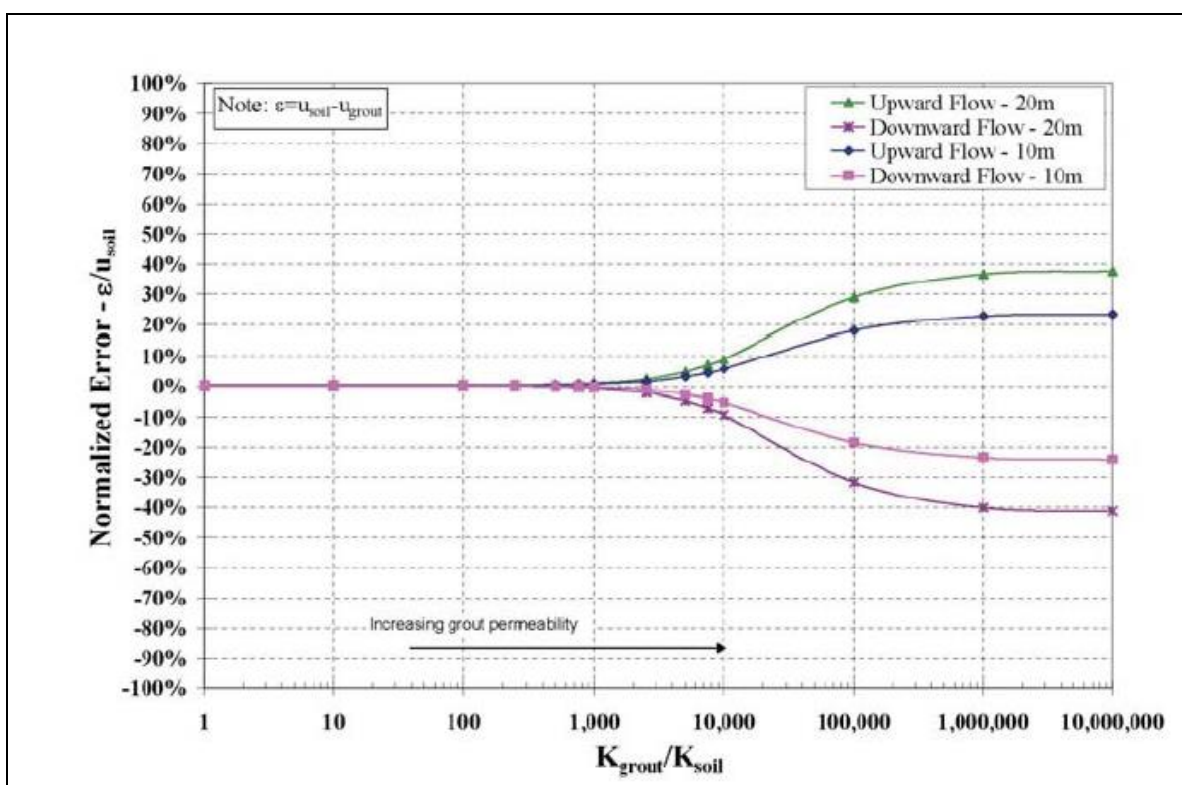


Figura 2-27 - Gráfico erro normalizado vs. razão de permeabilidade do graute e do solo (Contreras *et al.* 2008)

Contreras *et al.* (2008) também realizou uma série de ensaios de permeabilidade, umidade, peso específico do sólido e de resistência à compressão em corpos de prova moldados em laboratório de acordo com seis traços diferentes de mistura propostos (figura 28).

Mix	Water : Cement : Bentonite by Weight	Marsh Funnel Viscosity (sec)	Bentonite Type
1	2.5 : 1: 0.35	50	Quickgel
2	6.55 : 1: 0.40	54	Quickgel
3	3.99 : 1: 0.67	60	Quickgel
4	2.0 : 1: 0.36	360	Quickgel
5	2.49 : 1: 0.41	56	Aquagel Gold Seal
6	6.64 : 1: 1.19	60	Aquagel Gold Seal

Figura 2-28 - Misturas de graute cimento-bentonita usadas no estudo (Fonte: Contreras *et al.* 2008)

Os resultados mostraram uma correlação entre a resistência a compressão uniaxial e a razão água-cimento das várias misturas propostas, proporcionando um bom indicador para avaliação do traço correto para cada tipo de solo/rocha (Figura 29). Ainda como resultado, o experimento mostra que amostras com maior razão água-cimento (ou índice de vazios) apresentam maior permeabilidade que as amostras com menor razão água-cimento, que a permeabilidade decai levemente com o aumento da pressão confinante, e que mesmo após 28 dias a permeabilidade continua decaindo levemente (Figuras 29 e 30).

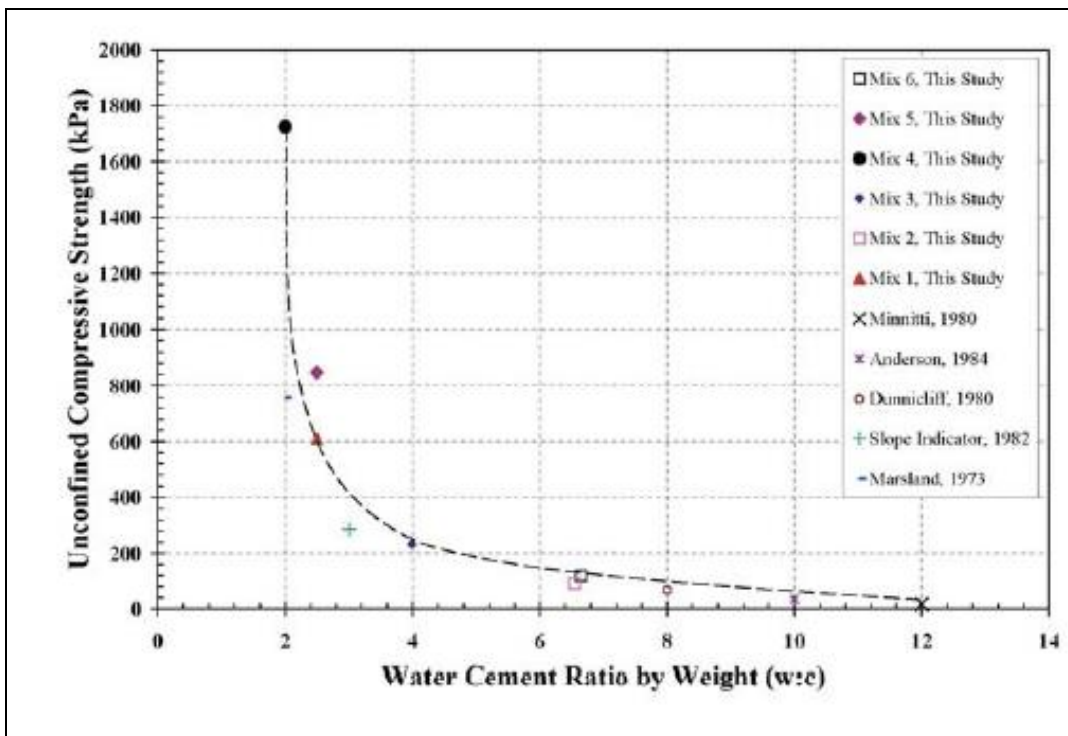


Figura 2-29 - Variação da resistência à compressão vs. razão água-cimento (Fonte: Contreras *et al.* 2008)

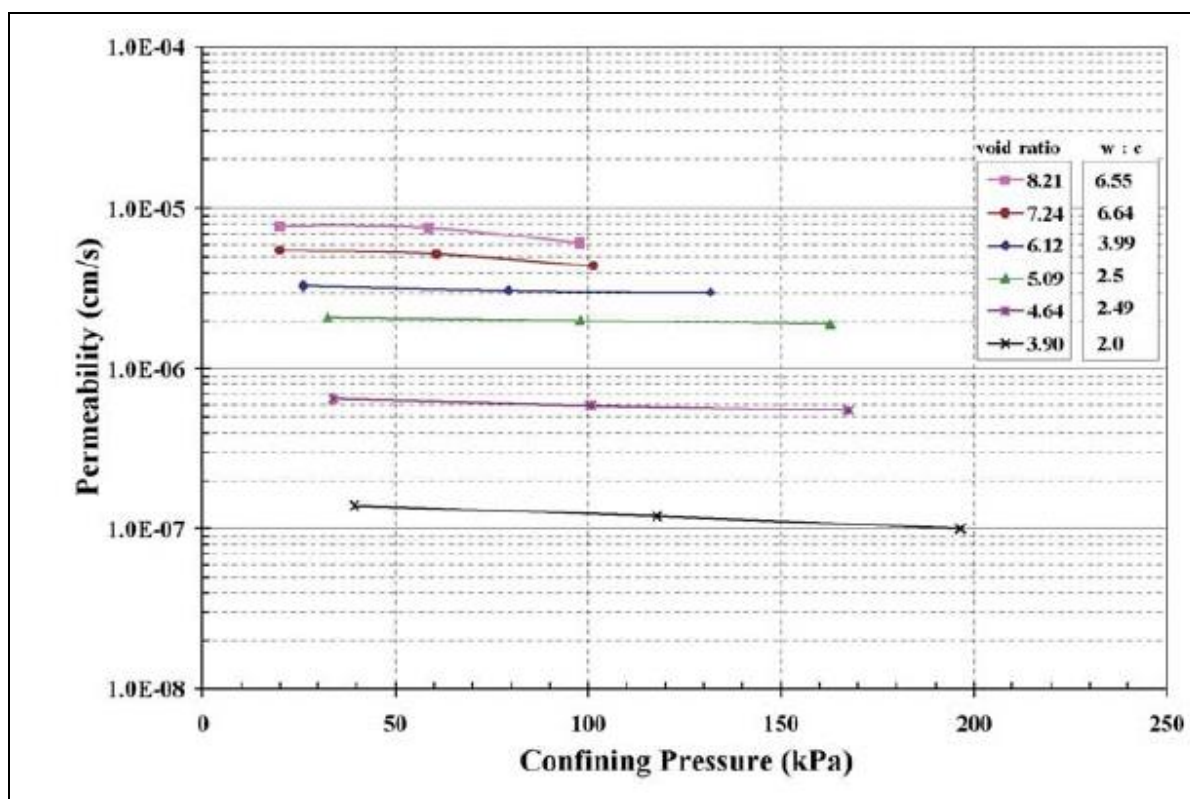


Figura 2-30 - Variação da permeabilidade vs. pressão confinante à 28 dias de cura (Contreras *et al.* 2008).

Yungwirth *et al.* (2013) listam as aplicações mais adequadas para o método completamente grauteado como sendo:

- Monitoramento em formações de baixa condutividade hidráulica onde um curto tempo de resposta hidrodinâmico é desejado;
- Monitoramento em locais que podem ser afetados pelas condições de congelamento da superfícies, contanto que sensores sejam instalados abaixo da profundidade de congelamento do solo;
- Instalações profundas, inclinadas ou horizontais nas quais uma sequencia de células de areia poderiam ser difíceis de serem implantadas;
- Condições de furo de sondagem com artesianismo nas quais células de areia e lascas de bentonita seriam difíceis de serem implantadas;
- Furos de sondagem de diâmetros pequenos onde múltiplos pontos de monitoramento são desejáveis. Múltiplos sensores podem ser instalados no mesmo furo de sondagem onde o espaço deve limitar o número e a quantidade de tubos de piezômetro que poderiam ser instalados no mesmo furo de sondagem.

Yungwirth *et al.* (2013) abordam a questão do uso da estrutura de suporte dos sensores (tubos de PVC ou barras de aço utilizadas para posicionar e suportar o sensor no correto local de instalação até seu grauteamento) em solos moles: *“O uso da coluna de tubo de sacrifício pode não ser adequada para uso em solos moles onde uma elevada compressão vertical é prevista. Contreras (et al. 2012) mostraram que o comportamento da instalação completamente grauteada usando o tubo de sacrifício em solos moles é adequado somente quando a contribuição deste tubo no valor da compressão vertical prevista for menor que 15%.”*

Yungwirth *et al.* (2013) alertam sobre a importância de se controlar a pressão de grauteamento: *“Sobreprensão durante o grauteamento é uma das causas chave para o mal funcionamento de sensores de corda vibrante (Marcil 2006). Pressões de injeção do graute podem ser minimizadas através da redução da velocidade do grauteamento.”*

## VANTAGENS

- Pode ser instalado de forma totalmente camuflada, onde o protetor anti-surto fique posicionado em uma caixa de passagem enterrada, e o cabo siga para a estação de monitoramento (“datalogger”) por meio de uma trincheira também aterrada;
- Mede a poro-pressão equalizada do bulbo adjacente à ponta do sensor;
- Tempo de resposta mais curto que o piezômetro Casagrande (água não precisa se deslocar pelo tubo de PVC) e mais curto que o piezômetro de corda vibrante instalado pelo método convencional (pressão não precisa ser equalizada no grande volume da célula de areia);
- Não fica sujeito a dano devido à terraplenagem se cabeado para fora da praça de aterro;
- Acurácia da medida não depende da habilidade e experiência do operador;
- Não requer acesso direto do operador ao instrumento para sua leitura;
- Não há selo de bentonita por meio do lançamento de lascas e pelotas (atividade complexa e suscetível a falhas).

Mikkelsen *et al.* (2003) apontam uma vantagem do sensor de conta vibrante em relação ao piezômetro pneumático: *“Contudo, deve ser reconhecido que sensores elétricos e de corda vibrante possuem um vantagem sobre sensores pneumáticos. O volume do fluido deslocado em um diafragma de corda vibrante durante um mudança de pressão é extremamente pequeno, de modo que o equilíbrio do sistema seja rápido. Durante a leitura, nenhum deslocamento real do diafragma ocorre. Em contraste, o diafragma de um sensor pneumático deve deslocar uma pequena quantidade de fluido toda vez que é ativado à coletar leituras.”*

## LIMITAÇÕES

- Há risco de defeito por descargas atmosféricas ou interferências eletromagnéticas;
- Não pode ser utilizado para amostragem de água para análise da qualidade.
- Não é recomendado em instrumentação adjacente à formações geológicas suscetíveis à liberação de gases. McKenna (1995) aponta esta limitação do método completamente grauteado: *“Como parte da investigação geotecnica de*

*rotina da estrutura, mais de 200 piezômetros já foram grauteados. Todos os piezômetros apresentaram resultados razoáveis, e onde dois ou mais piezômetros foram instalados no mesmo furo de sondagem, nenhum deles apresentaram conexão hidráulica entre sí, exceto em duas instalações onde gás dissolvido rapidamente criou micro tuneis através do graute (até a superfície do terreno). Instalações convencionais nestes solos gasosos também falham frequentemente. Devido ao fato destes micro tuneis frequentemente não serem detectados depois da instalação, o método de instalação grauteado não deve ser empregado nestes solos de liberação rápida de gases.”*

McKenna (1995) também aponta outras sete limitações do método:

- (1) *“A permeabilidade do graute deve ser igual à ou mais baixa que a permeabilidade da formação para quase todas as situações.”*
- (2) *“O método de instalação grauteado pode não ser prático para um solo de permeabilidade muito alta onde excesso da mistura de graute pode ser perdida através dos vazios. O método grauteado, no entanto, é adequado para solos de permeabilidade moderadamente alta como areias e pedregulhos arenosos.”*
- (3) *“Transferencia de tensões ao longo de uma coluna rígida de graute em um solo mole ou em processo de adensamento pode causar um erro piezométrico. Quando medimos mudanças em poropressão em resposta à mudança nas condições de tensão vertical, cuidados devem ser tomados para alcançar uma conformidade razoável com a formação (Dunnicliff, 1988).”*
- (4) *“Graute pode fissurar devido à movimentação do solo, o que poderia levar ao aumento de uma macro-permeabilidade. Isto é especialmente verdadeiro em piezômetros cujo sensores são instalados próximos de zonas de cisalhamento. No Canadá, o método de instalação convencional é ainda empregado nas leituras próximas de zonas de movimento caso a poropressão pós-deformação for solicitada. O graute de cimento-bentonita é um pouco ductil (se mantém úmido e é facilmente marcado por um canivete), e alguma deformação em profundidade é provavelmente tolerável.”*
- (5) *“Nas instalações em áreas remotas, pode ser mais fácil transportar areia e lascas de bentonita ao invés de reservatórios e bombas.”*
- (6) *“Empregando este método, a amostragem de água do solo é impraticável.”*

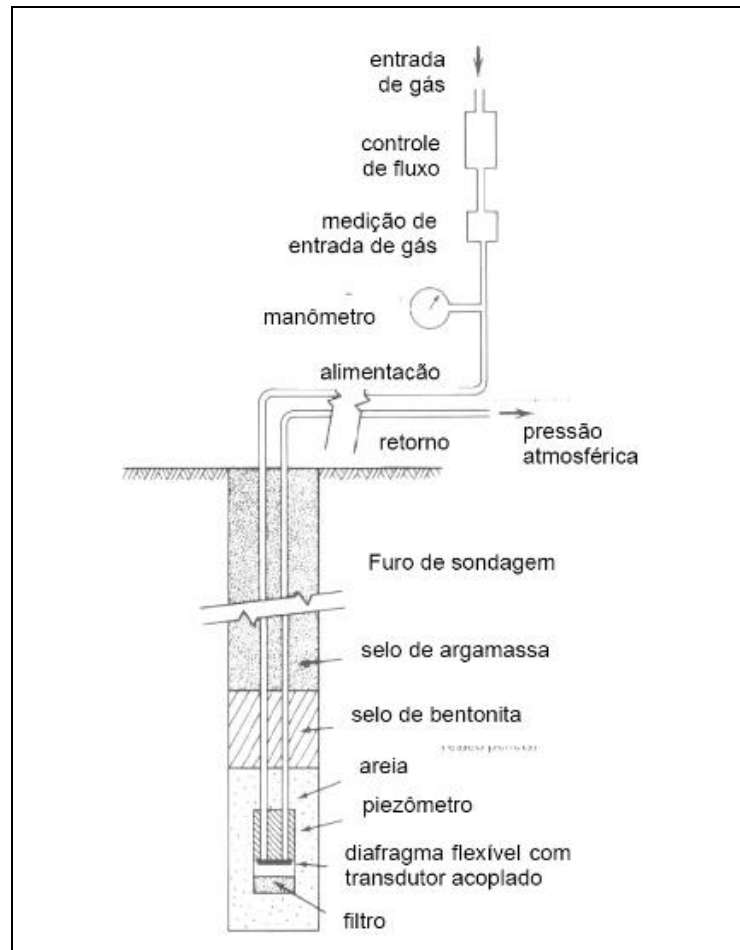
(7) *“Contaminantes químicos no solo (ou água intersticial extremamente salina) podem interferir com as propriedades mecânicas de longo-prazo dos grautes ou selos de bentonita, e selos alternativos para furos de sondagem como polímeros (Senger e Perpich, 1983) ou selos mecânicos poderão ser necessários nestes ambientes.”*

#### 2.3.4. PIEZÔMETROS PNEUMÁTICOS

Este instrumento consiste em um sensor piezométrico pneumático, inserido em um furo de sondagem pré-perfurado por meio de uma estrutura de suporte, ou até mesmo, em determinadas ocasiões, cravados em solo mole. O sensor é envolto em areia, por onde o fluxo da água subterrânea percola até atuar também no sensor, que por sua vez é submetido à uma determinada poro-pressão. Da mesma forma como os piezômetros de corda vibrante instalados pelo método convencional, um selo de bentonita evita que a leitura seja influenciada pelas condições piezométricas das camadas superiores à célula de areia. Como a exemplo do piezômetro de corda-vibrante, a inexistência do tubo de PVC ou tubo Geomecânico conectando a célula à superfície do terreno confere ao sensor a característica de estar confinado e, portanto, não terem suas variações sujeitas às condições barométricas.

##### 2.3.4.1. PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO

Estes sensores efetuam as leituras de poro-pressão a partir da equalização da pressão de um gás injetado no sistema com a pressão da água intersticial do solo ou rocha. Esta equalização é atingida por meio de uma membrana posicionada no interior do sensor, cuja deflexão indica uma pressão do gás de maior magnitude que a pressão da água do solo. Após a deflexão da membrana, o fluxo de gás (que entra no sensor pela “tubulação de alimentação” e retorna à origem pela “tubulação de retorno”) é interrompido e a equalização das pressões internas no sensor se inicia. Esta equalização das pressões internas é atingida quando a pressão da água intersticial “empurra” a membrana de volta à posição inicial (ver figura 31).



**Figura 2-31 - Princípio de funcionamento do piezômetro pneumático (Fonte: Dunnycliff, 1988 apud França 2008)**

#### 2.3.4.2. MÉTODO DE INSTALAÇÃO

O método de instalação do piezômetro pneumático é bastante similar ao método de instalação do piezômetro de corda vibrante convencional, porém, cuidados em relação à descida dos tubos de alimentação e de retorno são imprescindíveis.

Segue abaixo a sequência de instalação de um piezômetro pneumático:

- **Pré-furo:** Ver item 2.3.1.2;
- **Estrutura de suporte:** Esta etapa é idêntica ao item 2.3.3.2.1, porém, ao invés de fixar os cabos do sinal do sensor de corda-vibrante, o que é fixado ao longo da tubulação são as tubulações de alimentação e de retorno (mangueiras de nylon) com o cuidado de não “enforçar-las” e evitando que elas se enrosquem com as paredes do furo durante descida do instrumento;
- **Selagem/preenchimento do fundo do furo de sondagem:** Ver item 2.3.1.2;



- **Fixação do sensor na estrutura:** O sensor deverá ser fixado em uma extremidade da estrutura de suporte utilizando-se fita adesiva e/ou abraçadeiras;
- **Descida do instrumento no furo de sondagem:** Ver item 2.3.1.2;
- **Lançamento da areia:** Ver item 2.3.3.2.1;
- **Selagem/preenchimento do furo de sondagem:** Ver item 2.3.2.2;
- **Acabamento e proteção:** Este dispositivo pode ser alojado em uma caixa de passagem selada e enterrada para mitigar vandalismo, a partir daí as tubulações de alimentação e retorno ficam prontas para conexão ao módulo de leitura do piezômetro pneumático. Um marco de concreto contendo uma placa de identificação do instrumento deve ser posicionado logo acima do instrumento instalado.

As questões de dimensionamento e formato da célula de areia seguem as mesma apresentadas para o piezômetro Casagrande.

#### 2.3.4.3. VANTAGENS E LIMITAÇÕES

##### VANTAGENS

- Mede a média da poro-pressão atuante na célula de areia;
- Não fica sujeito a dano devido à terraplenagem se as mangueiras forem instaladas horizontalmente para fora da praça de aterro;
- Acurácia da medida não depende da habilidade e experiência do operador, isso depende somente de bom treinamento;
- Não há risco de defeito por descargas atmosféricas ou interferências eletromagnéticas;
- Tempo de resposta mais curto que o piezômetro Casagrande (água não precisa se deslocar pelo tubo de PVC);

McKenna (1995) quantifica e exemplifica o pequeno volume necessário à equalização da pressão interna de um piezômetro pneumático. Este pequeno volume garante um rápido tempo de resposta às variações piezométricas: *“Para um piezômetro pneumático com uma escala de leitura e alcance de 700 kPa, o volume para deflexão da escala completa é 0,01cm<sup>3</sup>. O volume de equalização necessário é aproximadamente*

*linear com a mudança em carga, portanto para uma variação de 100cm em carga (~10 kPa), o volume de equalização é somente  $1,4 \times 10^{-4} \text{ cm}^3$ .*”

## LIMITAÇÕES

- Não pode ser instalado de forma totalmente camuflada, pois as mangueiras de alimentação e retorno devem estar disponíveis para a conexão ao módulo de leitura;
- Requer acesso direto do operador ao instrumento para sua leitura;
- Poros da célula de areia podem se colmatar;
- Confecção do selo de bentonita por meio do lançamento de lascas e pelotas é complexa e suscetível a falhas;
- Selo de bentonita não é volumetricamente estável se instalado em determinadas formações;
- Suscetível a erros de leitura e aumento do tempo de resposta por ocasião de formação de bolhas de ar do sistema.

Hvorslev (1951) descreve as implicações da presença de bolhas de ar no sistema de piezômetros fechados, diferenciando as influências de acordo com a posição e tamanho das bolhas. Segundo Hvorslev (1951), bolhas de ar ou gás em um tubo fechado e conectado à um manômetro ou sensor de pressão iriam aumentar o tempo de resposta, porém, bolhas presas na tubulação de retorno não afetariam a pressão estabilizada e indicada pelo sensor. Bolhas presas abaixo da conexão com o sensor (tubulação de alimentação) e preenchendo a totalidade de uma seção transversal do tubo iriam influenciar a pressão estabilizada indicada. O tubo deve ser fornecido com uma armadilha de ar e uma válvula de retirada do ar no topo, e deve ser liso e sem juntas salientes, e com diâmetro grande o suficiente para permitir a subida livre de bolhas de gás. Um acessório para uma ocasional descarga pode ser fornecido e a totalidade da instalação deve ser composta por materiais que não provoquem formação de gás via eletrose.

### 2.3.5. OUTROS INSTRUMENTOS RELACIONADOS À PIEZOMETRIA

Parâmetros de medição como a precipitação, a vazão de um sistema de drenagem interna e o nível d'água de um reservatório são fundamentais para a complementação do monitoramento piezométrico na avaliação da performance e/ou da segurança de uma estrutura geotécnica. A correlação das variações de precipitação na bacia de contribuição com as variações do nível d'água do reservatório, variações da vazão da vazão do dreno de fundo e variações piezométricas (poro-pressão e nível do lençol freático) devem ser monitoradas e avaliadas rotineiramente no intuito de avaliar a performance dos elementos componentes da estrutura geotécnica (dreno de fundo, maciço, reservatório, etc.). No caso de alguma incoerência for identificada, uma análise mais detalhada deve ser realizada tentando diagnosticar qualquer anomalia no comportamento dos materiais constituintes da estrutura. Os modelos das análises de percolação e do dimensionamento hidráulico das estruturas devem ser calibrados de acordo com os dados de monitoramento de campo.

#### 2.3.5.1. MEDIDORES DE PRECIPITAÇÃO

Os medidores de precipitação são instrumentos que medem a quantidade de chuva precipitada na região onde foi instalada. Esta medição pode ser realizada em diferentes intervalos de tempo, e este fator é que diferencia o tipo de medidor a ser instalado.

- **Pluviômetro:** É um instrumento que registra a altura de chuva total acumulada num dado período de tempo. Esse aparelho é mais utilizado para totalizar a precipitação diária;
- **Pluviógrafo:** É um instrumento que registra automaticamente as variações de precipitação ao longo do tempo mais curto. Pode ser gráfico ou digital, automatizado ou semi-automatizado. Como seu registro é contínuo, possibilita a medição da intensidade da chuva.

#### 2.3.5.2. MEDIDORES DE VAZÃO

A vazão é um parâmetro utilizado nas correlações e nas análises da performance e da segurança de estruturas geotécnicas como barragens e pilhas de estéril. Medidores de vazão são instrumentos construídos para a medida da vazão de um fluido e são posicionados geralmente na saída de sistemas de drenagem interna ou na calha de um curso d'água. Estes medidores, quando construídos na saída de drenos de fundo, são

constituídos de uma bacia para estabilização do fluxo, um vertedor (geralmente uma placa de aço com abertura triangular ou trapezoidal), e uma régua ou sensor para medição do nível da água da bacia (o nível d'água da bacia é convertido à vazão por meio de fórmulas específicas para cada tipo de medidor de vazão). Quando instalados em um curso d'água, os medidores de vazão podem ser constituídos de uma calha longa o suficiente para estabilizar o fluxo d'água e com dimensões previamente conhecidas, e uma régua ou sensor para medição do nível d'água e da vazão da calha.

Existem basicamente três tipos de medidores de vazão, cuja vazão é determinada com o emprego da equação de regime de escoamento uniforme em dutos livres:

- **Vertedor triangular (figura 32):** A equação abaixo deve ser empregada na conversão do nível d'água na bacia (h) em vazão (Q) do dreno ou do curso d'água.

$$Q = 1,427 \times h^{5/4} \text{ (m}^3/\text{s) - Fórmula de Thompson}$$



Figura 2-32 – Exemplo de placa de aço do vertedor triangular (Fonte: O autor, 2016)

- **Vertedor trapezoidal (figura 33):** A equação abaixo deve ser empregada na conversão do nível d'água na bacia (h) em vazão (Q) do dreno ou do curso d'água.

$$Q = 1,861 \times L \times H^{3/2} \text{ (m}^3/\text{s) – Fórmula de Francis}$$



Figura 2-33 – Exemplo de placa de aço do vertedor trapezoidal (Fonte: Costa, 2005)

- **Vertedor retangular (figura 34):** A equação abaixo deve ser empregada na conversão do nível d'água na bacia (h) em vazão (Q) do dreno ou do curso d'água.

$$Q = 1,833 \times b \times h^{3/2} \text{ (m}^3/\text{s) - Fórmula de Bazin}$$



Figura 2-34 – Exemplo de vertedor retangular (Fonte: Website Sanecomfibra)

- **Calhas Parshall (figura 35):** Este medidor de vazão, desenvolvido pelo engenheiro Ralph L. Parshall na década de 1920, consiste em uma calha aberta de paredes verticais com dimensões previamente conhecidas e selecionadas conforme utilização, e equipada com uma régua ou um sensor para medição da altura d'água / vazão. A equação abaixo deve ser empregada na conversão da altura d'água na calha (h) em vazão (Q) do curso d'água.

$$Q = K \times H^n \text{ (m}^3/\text{s) - Fórmula de Parshall}$$

Onde: K = Constante dependendo das dimensões da calha empregada

H = Altura da água na calha

N = Constante próxima de 3/2, mas que também varia de acordo com as dimensões da calha empregada.



Figura 2-35 – Exemplo de calha Parshall (Fonte: Website: Digiflow)

### 2.3.5.3. RÉGUAS LINIMÉTRICAS

As réguas linimétricas são réguas graduadas fixadas em pontos de fácil acesso no reservatório próximo às margens (figura 36). A graduação destas réguas devem ser correlacionadas à um marco topográfico implantado na estrutura geotécnica ou à um ponto onde a cota de elevação é conhecida. As leituras destas réguas podem ser diretas em campo ou automatizadas por meio de um transdutor de pressão o qual correlacione a altura da coluna d'água acima dele com uma cota de elevação conhecida. Estas leituras podem ser complementadas com levantamentos batimétricos eventuais realizados na estrutura.



**Figura 2-36 – Exemplo de réguas linimétricas para monitoramento do nível d'água de um reservatório (Fonte: O autor, 2016)**

## 2.4. MÉTODOS DE AQUISIÇÃO DE DADOS

### 2.4.1. MANUAL

Indicadores de nível d'água e piezômetros Casagrande ainda são lidos de forma manual, mesmo com a disponibilidade de várias marcas e modelos de transdutores de pressão no mercado. O equipamento usado na leitura manual é o medidor de nível

d'água, que consiste em uma trena graduada acoplada em um apito (pio) ou em uma sonda elétrica que emite sinais sonoros em contato com a água.

Dados de saída de sensores de corda vibrante podem também serem adquiridos manualmente por meio de um equipamento leitor de dados (“readout”). A maioria dos fabricantes de sensores disponibilizam estes equipamentos no mercado, e alguns deles são compatíveis a mais de um fabricante, desde que o princípio de operação e a equação de conversão sejam as mesmas.

#### 2.4.2. SEMI-AUMOMATIZADO

O método semi-automático de aquisição de dados é aquele onde os dados dos sensores são lidos, registrados e armazenados em um equipamento de memória permanente, como um “datalogger”, porém, não são transmitidos. Este método requer sensores que podem ser deixados no local de instalação para medição de nível do lençol freático, carga piezométrica ou poro-pressão, conectados à “dataloggers” que realizem a emissão do pulso necessário para a leitura ou para a vibração do arame.

No caso de sensores de corda vibrante, a maioria dos “dataloggers” requer um equipamento de interface conectado entre os sensores e o “datalogger”, para a conversão dos dados brutos de saída para um tipo de sinal que pode ser lido pelo “datalogger”.

#### 2.4.3. AUTOMATIZADO

Métodos automatizados de aquisição de dados consistem na incorporação de um sistema de telemetria e um software especialista de gerenciamento de dados na instalação descrita no item acima (método semi-automatizado). Estes sistemas irão transmitir os dados convertidos e tratá-los de forma à facilitar a análise das variações de cada grandeza física. Na maioria dos casos o sistema de telemetria é instalado entre o “datalogger”, equipamento de armazenagem, e o software especialista, porém, em alguns casos onde o cabeamento possa ser um desafio, a telemetria é instalada entre os sensores e o “datalogger” (sistemas “wireless”).

Este método dispensa por completo a necessidade de visita à campo para aquisição das leituras, reduzindo a exposição de equipes de monitoramento aos diversos riscos relacionados à condução de veículos e caminhamento, além de permitir o monitoramento à tempo real e a introdução de alarmes de segurança. Este método



também oferece menor risco de perda dos dados, uma vez que são salvos no “datalogger” e em um servidor onde o software especialista os acessa.

## 2.5. FATORES QUE INFLUENCIAM A LEITURA

Há diversos fatores que podem influenciar a leitura de um piezômetro. McKenna (1995) aponta alguns deles: *“Erros piezométricos podem surgir de diversas condições: (i) erros aleatórios e sistemáticos relacionados à erro de letura, erro de medida durante instalação, e erros de calibração; (ii) tempo de resposta hidrodinamica; (iii) onde uma zona de admissão de um piezômetro não esta confinado à formação alvo; e (iv) onde um piezômetro é selado de forma inapropriada.”*

Hvorslev (1951) apresenta as fontes de erro na determinação das pressões de água subterrânea como sendo:

1. Tempo de resposta hidroestático: Tempo necessário à água percolar para dentro ou para fora do tubo;
2. Tempo de resposta para ajuste da tensão: Tempo necessário à conclusão de processos de adensamento ou expansão do solo;
3. Fontes gerais de erro:
  - a. Erros na medição do nível da água no interior do tubo;
  - b. Erros na construção do instrumento ou na calibração de sensores;
  - c. Vazamentos na tubulação do instrumento;
  - d. Falhas ou deteriorização da conexão dos cabos elétricos ou condensação de valor;
  - e. Falhas devido à variação excessiva da temperatura ou falha relacionada ao congelamento de sensores.
4. Conexão hidráulica entre camadas ocasionada pelo furo de sondagem;
5. Interface de diferentes líquidos: Instrumentos equipados com líquidos de menor temperatura de congelamento e logo com diferentes superfícies de tensão;
6. Bolhas de ar ou gás em sistemas abertos: As bolhas afetam na medida do nível de água no interior do tubo;
7. Bolhas de ar ou gás em sistemas fechados: Aumento no tempo de resposta;
8. Bolhas de ar ou gás no solo: Aumento no tempo de resposta;

9. Sedimentação e colmatação: Aumento do tempo de resposta até a completa inutilização do instrumento;
10. Erosão interna do solo adjacente à célula de areia: Diminuição inicial do tempo de resposta e subsequente sedimentação do instrumento até sua completa inutilização.

Hvorslev (1951) afirma que na maioria dos casos temos que escolher qual fonte de erro é mais significativa e logo necessita mitigação: *“Deve ser notado que várias fontes de erro mencionadas acima requerem medidas de remediação conflitantes, e para cada instalação deve ser determinado quais destas fontes de erro são mais sérias. Aquelas listadas nos itens 3, 4, 5 e 6 afetarão os resultados das leituras, mesmo quando estas leituras forem realizadas após o término da equalização entre as pressões no lado de dentro e no lado de fora. Aquelas descritas nos itens 7, 8, 9 e 10 ,primeiramente, influenciam o tempo de resposta, mas elas podem afetar também o resultado final quando as leituras finais de campo forem corrigidas pela influencia do tempo de resposta. É possível que estas fontes de erro possam evoluir ou possam desaparecer e que suas influencias nas leituras possam variar dentro de um amplo limite durante a vida útil de uma determinada instalação.”*

#### 2.5.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS EQUIPAMENTOS EMPREGADOS

Características intrínsecas dos sensores, como a qualidade dos componentes de sensores de corda-vibrante ou a existência de emendas no cabeamento, controlam a acurácia das leituras. Da mesma forma, o equipamento de interface de leitura (“readout”) também influencia na leitura do piezômetro, já que mais de um fabricante/modelo pode ser usado para o mesmo sensor.

#### 2.5.2. PROCEDIMENTOS DE INSTALAÇÃO

Sensores podem ser danificados durante algumas etapas de instalação. Danos deste tipo podem fazer com o que o sensor pare de funcionar, ou que o sensor ofereça leituras de poro-pressão não representativas. Esta última situação pode ser crítica, pois, na ausência de referências de piezometria, o erro pode não ser identificado.

Mesmo tomado os cuidados necessários à instalação de sensores e equipamentos, o procedimento de instalação de um instrumento piezométrico proposto pode estar equivocado para o meio o qual o monitoramento se faça necessário. A constituição geológica dos materiais do subsolo, suas respectivas características de permeabilidade, bem como o contexto hidrogeológico da região devem ser levados em consideração quando o perfil de instalação do instrumento é projetado, e os vários componentes construtivos do instrumento especificados. McKenna (1995), em uma de suas experiências de campo em instrumentação nos depósitos de petróleo nas areias de Athabasca (Canadá), relata deficiências no projeto e na instalação de piezômetros grauteados que permitiram a conectividade hidráulica entre duas formações geológicas, e a necessidade de reposição do instrumento considerando cuidados específicos no selamento. A conectividade hidráulica foi detectada na segunda semana de dezembro, quando ocorreu uma elevação da leitura de pressão na ordem de 6 m.c.a. por influencia do artesianismo à que uma mesmo sensor era submetido na formação geológica logo abaixo (Figura 38).

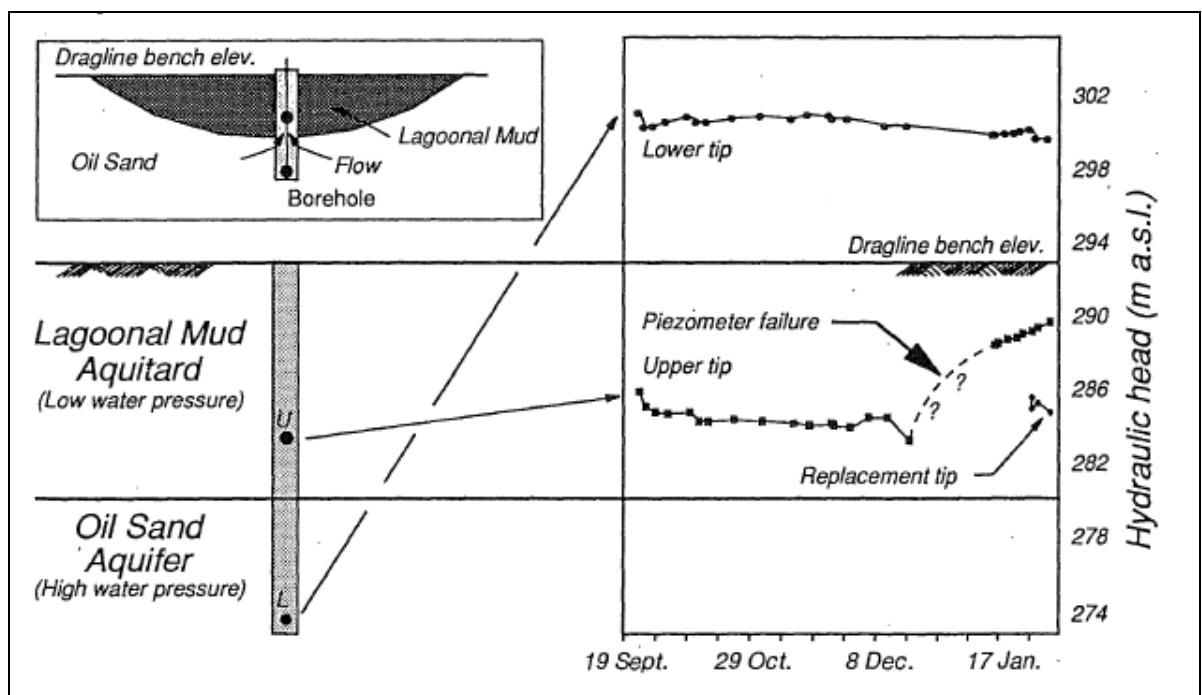


Figura 2-37 - Piezômetros grauteados em lama lacustre no Canadá (Fonte: McKenna 1995)

McKenna (1995) relata mais uma experiência em instrumentação em depósitos de petróleo nas areias de Athabasca (Canadá), onde seis piezômetros foram instalados

pelos métodos convencionais e grauteados para avaliação das condições piezométricas e de estabilidade do talude sudeste da área operacional de exploração deste material. Um dos piezômetros grauteados (136M-G) apresentou também conectividade hidráulica a partir do início de maio daquele ano, e registrou uma elevação na carga hidráulica na ordem de 1,5 m.c.a em comparação com seu par instalado pelo método convencional. A conectividade hidráulica foi permitida pela falta de bentonita na mistura do graute (Figura 39).

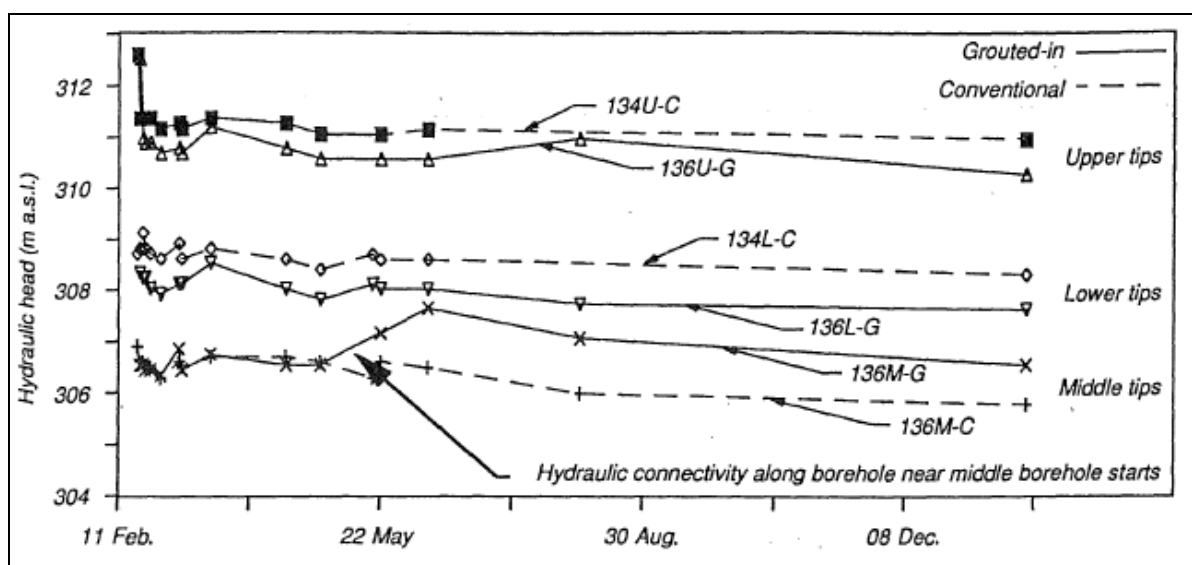


Figura 2-38 - Piezômetros instalados pelos métodos convencional e grauteado para avaliação das condições piezométricas e de estabilidade de talude (McKenna 1995)

### 2.5.3. INFLUENCIAS EXTERNA

Os efeitos da temperatura, do congelamento, das marés, da corrosão, das perturbações de construção, das detonações, das vibrações e das movimentações de taludes são exemplos de fatores que podem influenciar as leituras piezométricas.

Os efeitos da temperatura em sensores de corda-vibrante são reconhecidos pela totalidade dos fabricantes. O manual de instruções do sensor PW da Roctest (2014) faz a uma distinção entre sensores instalados de forma confinada e não-confinada. Segundo Roctest (2014), os sensores de piezometria padrões são selados e não-ventilados. Consequentemente eles respondem à mudanças barométricas. Porém, esta resposta varia dependendo de como eles forem instalados. Se eles são enterrados ou instalados em furos de sondagem selados, é provável que os efeitos das mudanças barométricas não

sejam sentidos imediatamente. Se os sensores são instalados em um tubo de PVC ou um poço aberto à atmosfera, mudanças barométricas serão sentidas diretamente. Nestes casos, uma correção barométrica sistemática é recomendada. Ainda segundo Roctest (2014), os sensores de piezometria de alcance muito baixo são ventilados, isto é, eles são projetados para eliminar os efeitos barométricos. Neste caso, a cavidade do sensor é conectada à atmosfera via um tubo integral com um cabo.

Segundo Geokon (2014), além da interferência da pressão atmosférica, variações das marés, ou seja, variações de força gravitacional em função do movimento relativo do sol e da lua em relação à superfície da Terra, podem exercer interferências no sinal do sensor.

#### 2.5.4. CONFORMIDADE DO EQUIPAMENTO

Mesmo quando bem preparados, calibrados e instalados, sensores, “dataloggers” e “readouts” podem apresentar não-conformidades e mau funcionamento. Este é talvez a fonte de erro mais difícil de ser identificada, envolvendo o grau que um sensor responde às variações piezométricas no subsolo. Mais uma vez, a ausência de referências de piezometria dificulta a identificação de um possível erro.

A maioria dos fabricantes de sensores piezométricos disponibiliza uma metodologia de diagnóstico de falhas à qual, por meio de unidades de leitura (“readouts”) específicas, avaliam cada variável medida pelo sensor e seus respectivos coeficientes de calibração. Esta avaliação tem como objetivo a identificação de uma possível falha do princípio de funcionamento do sensor, e visa responder se a leitura pode ser considerada no programa de monitoramento da estrutura geotécnica.

#### 2.5.5. MUDANÇAS NO COEFICIENTE DE VAZIOS DO SOLO

Mudanças nas condições de adensamento ou expansão dos solos fazem com que o índice de vazios também se altere, e conseqüentemente o fluxo de percolação da água pelo solo é percebida nos piezômetros, que respondem à variação da poro-pressão ou carga piezométrica. A figura 40 ilustra esta resposta dos piezômetros às mudanças no índice de vazios do solo.

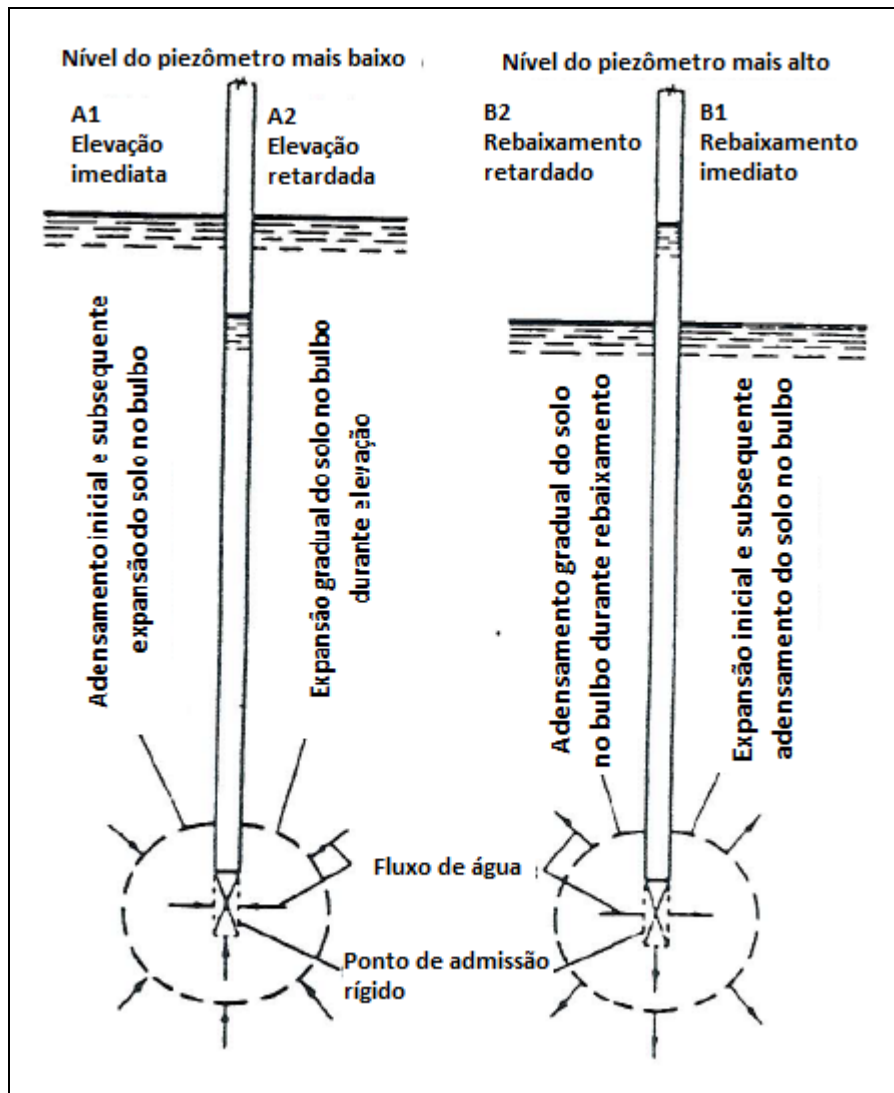


Figura 2-39 - Mudanças transitórias em coeficiente de vazios (Fonte: Hvorslev, 1951)

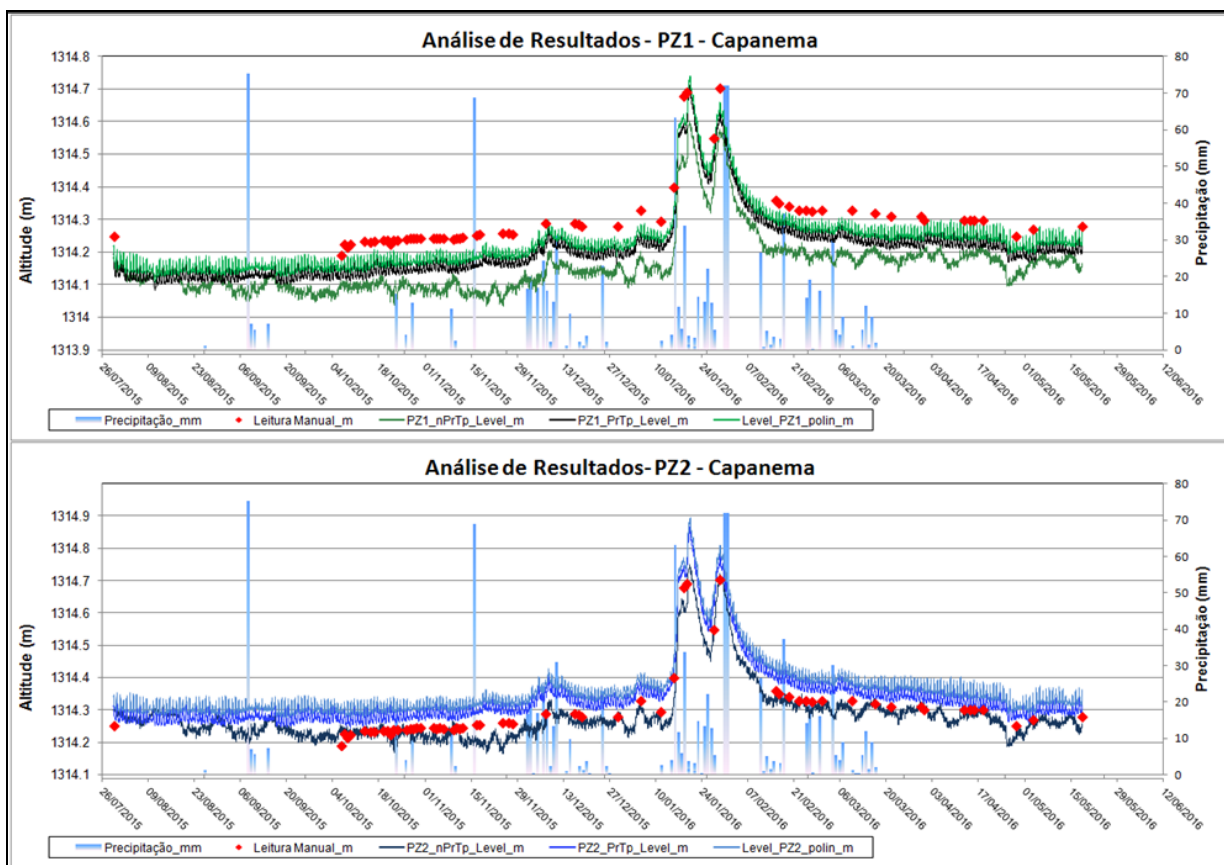
Hvorslev (1951) descreve esta mudança transitória nos índices de vazios como um sequenciamento que se inicia com a mudança do índice de vazios do solo (adensamento ou expansibilidade), seguido do fluxo de água através da célula do piezômetro, passando por mudanças transitórias na tensão efetiva e na poro-pressão do solo do bulbo e na conseqüente alteração do diagrama de equalização do tempo de resposta: *“Quando água esta fluindo para ou à partir de um sensor de medição de pressão, as poropressões, as tensões efetivas internas e o índice de vazios do solo na vizinhança da célula do piezômetro ou no ponto de admissão do sensor serão submetidos a mudanças. Como conseqüencia, a taxa de percolação de água para ou à partir do ponto de admissão do sensor será aumentada ou diminuída, e isso irá*

*influenciar o formato do diagrama de equalização. As mudanças mencionadas acima são de certa forma transitórias, e com diferenças cada vez menores entre o piezômetro e a pressão da água do solo, as condições de tensão e o índice de vazios irão se aproximar daqueles correspondentes à poropressão da massa de solo como um todo.”* .

#### 2.5.6. PROCEDIMENTOS DE TRATAMENTO DE DADOS

Alguns procedimentos de tratamento de dados que envolvam a determinação de médias, ajustes, correção ou redução do volume de dados disponíveis de medições brutas podem influenciar nas leituras factuais dos instrumentos. Estes procedimentos, quando realizados de forma criteriosa, ajudam bastante na interpretação dos dados, principalmente quando o conjunto de dados tem grande variabilidade.

Em um estudo comparativo de leituras entre vários métodos de instalação de piezômetros desenvolvido pela VALE/Coffey (2016), verificou-se que a utilização da correção barométrica e de temperatura, como indicado no manual do fabricante do sensor piezométrico, proporcionou o aumento da variabilidade das medidas (figura 41). O PZ1 e o PZ 2 foram instalados no mesmo furo de sondagem, porém, o PZ1 (posicionado do lado de fora do tubo de PVC) ficou envolto na areia saturada da célula do piezômetro Casagrande, e o PZ2 (posicionado no interior do tubo de PVC) ficou livre e envolto em água. Em ambos os gráficos, as linhas identificadas como “PZx\_nPrTp” (linhas verde e azul escuro) representam os dados de pressão sem aplicação da correção barométrica. As linhas identificadas como “PZx\_PrTp” (linhas preta e azul) representam os dados de pressão com a aplicação da correção barométrica. E por fim, as linhas identificadas como “Level\_PZx\_polin\_m” representam os dados de pressão com a aplicação da correção barométrica polinomial (fórmula indicada no manual do sensor piezométrico). Em ambos os gráficos, observa-se que os dados sem a correção barométrica são menos variáveis que os dados tratados com a correção barométrica necessária neste tipo de instalação (figura 41).



**Figura 2-40 – Gráficos mostrando a variação de cota piezométrica ao longo de 10 meses com foco na variabilidade dos dados com e sem a correção barométrica (Fonte: VALE/Coffey, 2016)**

Além de correções barométricas, a regressão linear é outro método de tratamento de dados comumente empregado no monitoramento piezométrico. A regressão linear é uma ferramenta estatística comumente utilizada para balancear as variações, resultando em gráficos mais fáceis de serem interpretados. Neste mesmo estudo, foi realizada uma regressão linear entre as variáveis de média móvel diária das leituras piezométricas brutas dos piezômetros e a pressão barométrica. Para isto, foi realizado um estudo de correlação multivariada entre as médias móveis no intervalo de um dia (24 h) dos valores da leitura piezométrica (digits) e das médias móveis da pressão barométrica (mbars) e temperatura do painel (°C). A figura 42 mostra o padrão de variação dos dados de pressão (linhas vermelhas), e a reta obtida que representa esta variação. A partir do resultado desta regressão linear realizada nos dados do PZ-01, a variação dos dados é reduzida e os gráficos se tornam mais claros e fáceis de serem interpretados.



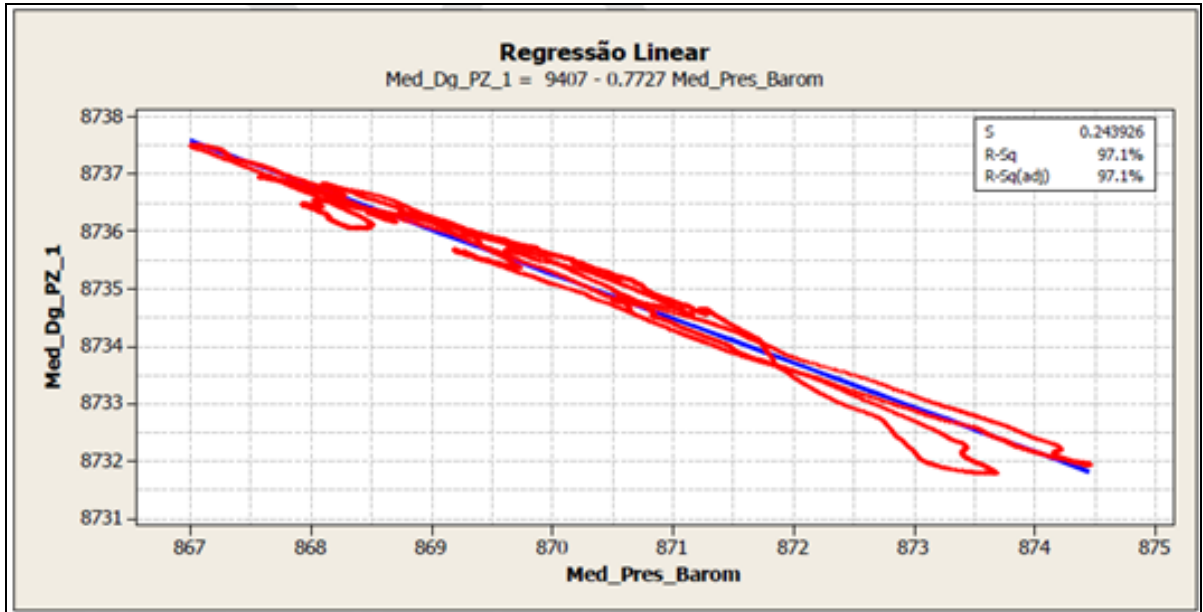


Figura 2-41 - Regressão linear PZ01: Média móvel diária da leitura bruta do sensor (digits – unidade relacionada à frequência de vibração do sensor de corda-vibrante) vs. Média móvel diária da pressão barométrica (mbars) (Fonte: VALE/Coffey 2016)

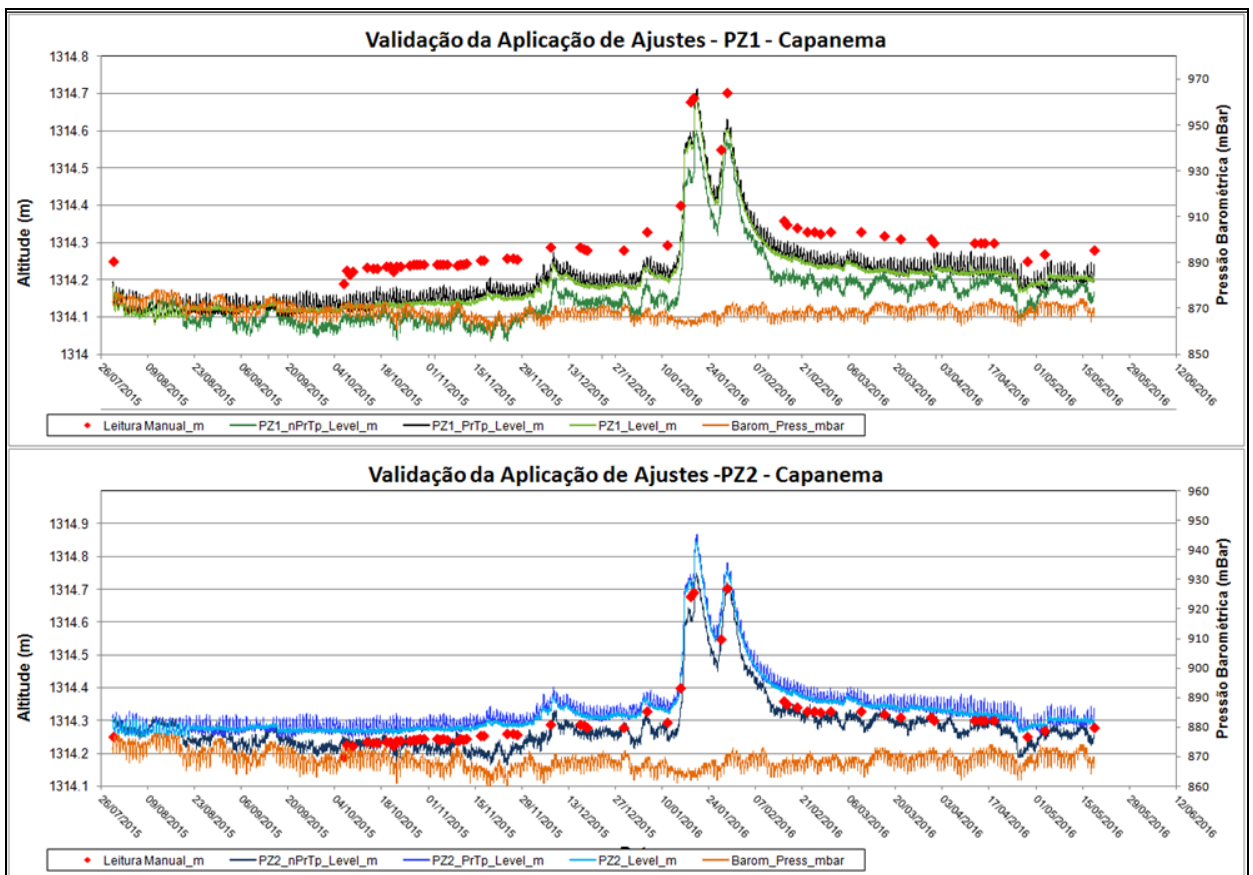


Figura 2-42 - Gráfico contendo leituras brutas sobrepostas às leituras tratadas com destaque na facilidade de se analisar as linhas de dados tratados (Fonte: VALE/Coffey, 2016)

A figura 43 mostra o mesmo gráfico carga piezométrica vs. tempo contendo as leituras de pressão brutas sobrepostas às leituras tratadas pela regressão linear. Observa-se que as linhas identificadas como “PZn\_Level\_m” (linhas verde e azul claro), referentes aos dados tratados pela regressão linear, podem representar os dados de pressão com a vantagem de filtrar a variação dos dados brutos.

#### 2.5.7. ERRO HUMANO DO OBSERVADOR

Medidas via qualquer método ou equipamento necessitam de certo grau de cuidado, julgamento, habilidade ou destreza do observador. Erros pessoais são frequentemente a causa de variação difícil de ser reconhecida.

Leituras manuais por meio de medidores de nível d’água (pio) são, em muitas ocasiões, equivocadas pelo fato do sensor deste equipamento emitir o sinal sonoro quando em contato com a umidade excessiva do interior do tubo (condensação), ao invés de somente sinalizar a altura d’água dentro do tubo geomecânico.

Mesmo em instrumentos automatizados, a dificuldade em se controlar a profundidade de instalação do sensor no momento de sua descida junto à perfuratriz, faz com que esta profundidade seja registrada de forma equivocada ou com pouca acurácia, ocasionando assim medições pouco acuradas de carga hidrostática.

### **3 IDENTIFICAÇÃO DO PROPÓSITO DO MONITORAMENTO PIEZOMÉTRICO NAS ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS E PROPOSTA DE CRITÉRIOS DE PROJETO**

Este capítulo decorre primeiramente sobre os diversos propósitos de monitoramento aos quais uma estrutura geotécnica requer para avaliação da performance de seu funcionamento e/ou de sua segurança física e hidráulica. Antes do projeto ou da instalação da instrumentação geotécnica de uma estrutura, é necessário avaliar quais parâmetros devem ser monitorados e a interface destes parâmetros com o comportamento dos vários materiais e elementos constituintes da estrutura. Além dos parâmetros a serem monitorados, existem diversos elementos a serem levados em

consideração para aquisição da grandeza física adequada para cada análise. Dentre estes elementos, pode-se destacar a análise do exato local onde as leituras serão adquiridas, bem como as premissas e o método de instalação aos quais o instrumento geotécnico será construído. Estes critérios para atendimento ao propósito de monitoramento, a escolha dos métodos de instalação e algumas especificações gerais de projeto completam este capítulo, estabelecendo uma referência para os profissionais projetistas na tarefa de propor soluções e projetos de monitoramento e instrumentação geotécnica. No capítulo subsequente, são apresentadas propostas de conceito para instrumentação piezométrica considerando todos os critérios avaliados.

### 3.1. PROPÓSITO DO MONITORAMENTO PIEZOMÉTRICO

O monitoramento e observações de magnitude e variação da piezometria em um determinado meio podem ser vistos e especificados considerando várias diferentes abordagens. Cada uma destas abordagens de observação do comportamento do fluxo da água subterrânea é caracterizada pela adoção de diferentes parâmetros de medição, diferentes tecnologias de aquisição das leituras e dos dados, diferentes métodos de instalação dos instrumentos e diferentes tempos de resposta às variações.

Hvorslev (1951), em seu experimento junto ao Corpo de Engenheiros do Exército Norte Americano (US Army Corps of Engineers) faz a seguinte afirmação: *“Acurada determinação dos níveis e pressão das águas subterrâneas é solicitada não somente em levantamentos de fontes de captação e movimentos, mas também para adequado projeto e construção da maioria das grandes fundações e estruturas de terra.”*

#### 3.1.1. CARACTERIZAÇÃO DOS ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS

Uma das abordagens do monitoramento piezométrico é a caracterização dos diversos elementos dos estudos hidrogeológicos na compreensão do comportamento da percolação das águas subterrâneas em uma determinada região. Este tipo de estudo, pela sua natureza ampla, é utilizado para nortear qualquer intervenção que possa ser realizada na região, como por exemplo a implantação de aterros sanitários, implantação de projetos minerários ou mesmo a construção de edificações.

Uma rede de monitoramento pode, juntamente com o mapeamento geológico, fomentar a maioria dos dados necessários para determinação do sentido da percolação, os níveis de carga piezométrica em cada formação geológica ao longo da profundidade e das vazões hidrogeológicas desta região. Hvorslev (1951) afirma que as pressões atuantes na água subterrânea são raramente constantes ao longo de períodos de tempo significantes, e aponta os principais fatores às quais estas pressões são submetidas:

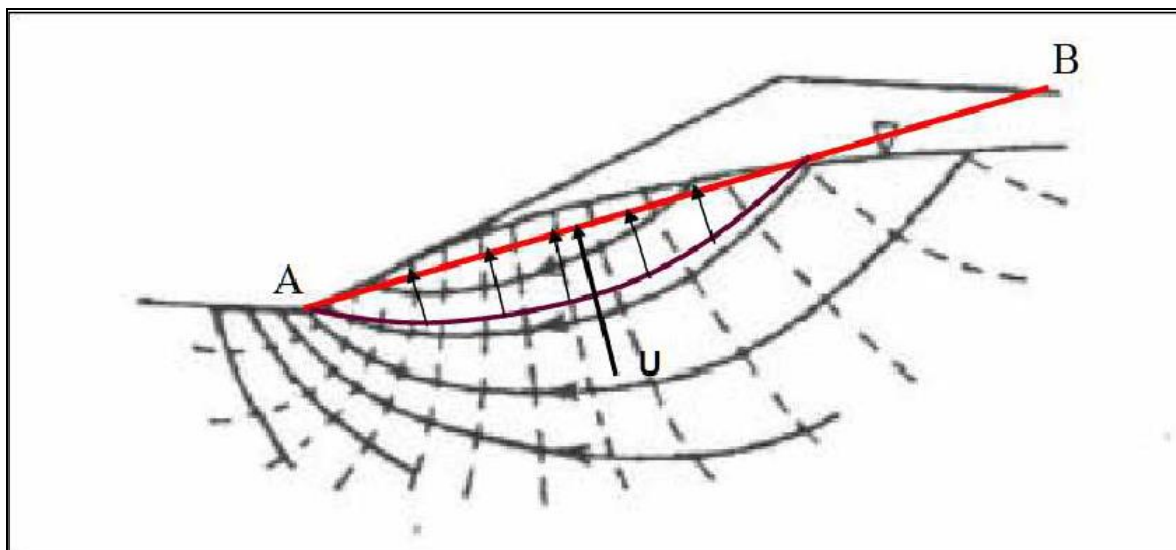
- Precipitação, infiltração, evaporação, e drenagem;
- Mudanças no carregamento e no estado de tensão, e/ou percolação devido à variações sazonais e diárias em níveis de água dos rios, lagos e estuários da região, e nos níveis do mar;
- Operações de construção envolvendo acréscimo ou decréscimo em sobrecarga na superfície e remoção ou deslocamento de solo;
- Bombeamento e lançamento de água;
- Variação em temperatura e especialmente congelamento e descongelamento de da camada superior de solo; e
- Variação em pressão atmosférica e umidade. A última variação mencionada pode causar apreciáveis e rápidas mudanças nos níveis de água do solo, mas a inter-relação entre condições atmosféricas e de água subterrânea não é ainda completamente explorada e entendida.

### 3.1.2. MONITORAMENTO DA POROPRESSÃO NA AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DE TALUDES

O nível de pressão da água subterrânea atuante dentro dos poros do solo e das rochas contribui significativamente na condição de estabilidade de taludes em diversas estruturas geotécnicas ou encostas naturais. O monitoramento da variação desta poro-pressão em uma determinada formação é fundamental para avaliação da estabilidade local e global, tanto em estruturas existentes quanto em projetos à serem implantados.

A condição de artesianismo ou de fluxo ascendente da percolação em uma determinada massa de solo ou rocha deve ser observada de forma criteriosa já que provoca uma redução das tensões efetivas e conseqüentemente uma redução da resistência ao cisalhamento (figura 45). Hvorslev (1951) faz a seguinte afirmação: “*A existência de pressão artesianas ou excesso de poro-pressão influencia enormemente a*

*estabilidades de solos; A determinação da poro-pressão permite uma estimativa do estado ou progresso do adensamento do solo, e é frequentemente essencial para a verificação da segurança de taludes, aterros e estruturas de fundação. ”.*



**Figura 3-1 - Ilustração exemplificando um talude submetido à percolação da água subterrânea (Fonte: Notas de aula "Estabilidade de Taludes – Aula 2: Superfície Plana de Ruptura" - UFOP, 2014)**

### 3.1.3. MONITORAMENTO DA DISSIPAÇÃO DO EXCEDENTE DE POROPRESSÃO GERADA DURANTE AS FASES DE CONSTRUÇÃO DE ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS

A velocidade do avanço de aterros e/ou escavações deve ser controlada com base na dissipação das variações de poro-pressão exercidas nas camadas adjacentes à estrutura em construção.

O peso próprio de um aterro compactado ou lançado sobre uma camada de solo ou rocha exerce uma sobrecarga nas camadas inferiores. Este carregamento extra aplicado sobre o terreno é suportado pela porção correspondente aos sólidos do solo (grãos) e pela porção correspondente à água do solo, provocando a elevação nas tensões totais do solo. Segundo Terzaghi (1925), as tensões totais são constituídas da soma das tensões efetivas com as poro-pressões, e desta forma, há um aumento tanto da tensão efetiva (tensão atuante nos grãos do solo) quanto da poro-pressão (pressão atuante na água contida nos vazios do solo). A porção sólida do solo (grãos) responde rapidamente a

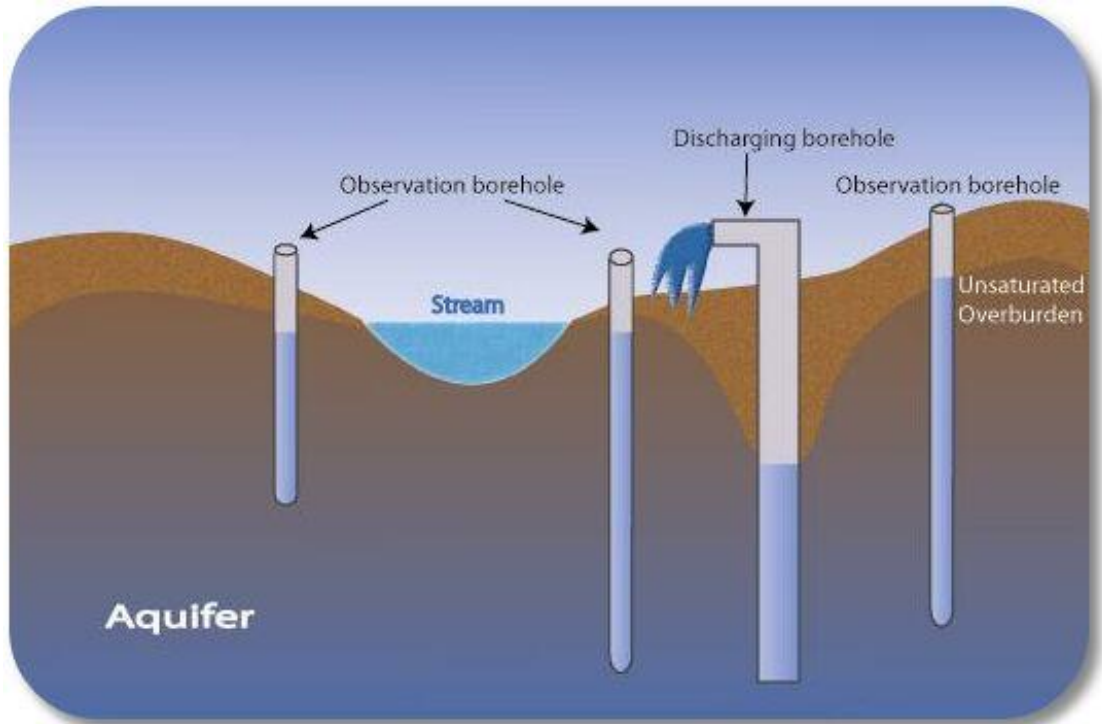
este incremento na sobrecarga, suportando ou não o carregamento. Porém, a água contida no volume decrescente dos vazios do solo, passa à percolar através da camada até que a pressão correspondente ao carregamento extra seja dissipada. Esta percolação da água do solo não é imediata, e pode durar um tempo maior ou menor dependendo do coeficiente de permeabilidade do solo. Esta velocidade de dissipação do incremento da poro-pressão deve ser observada continuamente durante o avanço do aterro.

Da mesma forma, o descarregamento das camadas adjacentes a uma escavação, provoca o relaxamento das tensões totais e conseqüentemente o fluxo de água através do solo em direção às paredes e ao fundo da escavação. Este fluxo ascendente provoca a redução das tensões efetivas do solo adjacente à escavação, e conseqüentemente a redução da resistência do solo até que se alcance novamente a equalização das relações entre tensão, deformação e poro-pressão. Assim, a taxa de avanço da escavação deve ser controlada com base no monitoramento da poro-pressão. Mikkelsen (2003) faz a seguinte afirmação: *“Princípios de tensão efetiva e de adensamento são bem compreendidas e aceitas em práticas de mecânica dos solos em longa data. Uma camada de argila saturada responde à um incremento de tensão aplicado,  $\Delta\sigma$ , através de um incremento em poropressão,  $\Delta u = \Delta\sigma$  ao longo da camada.”*

#### 3.1.4. MONITORAMENTO DA EFETIVIDADE DAS INSTALAÇÕES E TRABALHOS DE REBAIXAMENTO DO LENÇOL FREÁTICO E DE DESPRESSURIZAÇÃO

Atividades de rebaixamento do lençol freático e despressurização de formações rochosas e terrosas envolvem um alto custo de implantação e operação. Contudo, o resultado destas atividades é fundamental para viabilizar a operação de cavas à céu aberto e galerias, além de permitir a otimização da geometria das paredes das formações encaixantes, melhorando a relação estéril / minério em um projeto minerário.

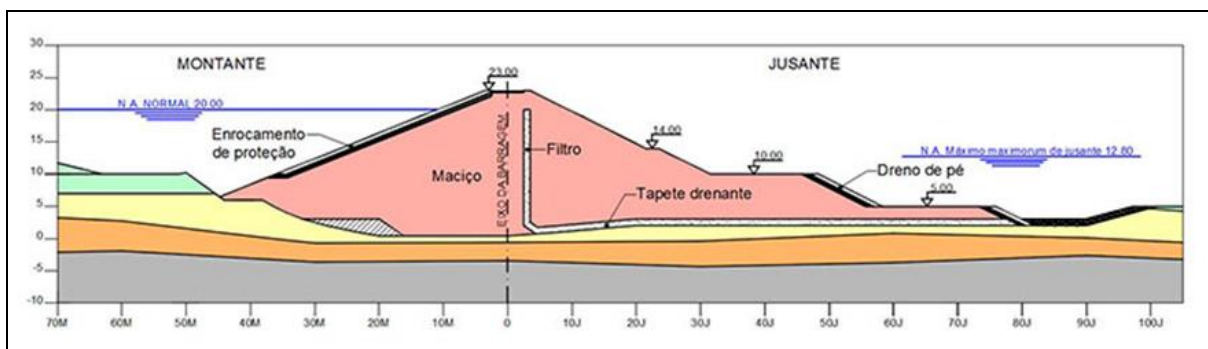
O monitoramento piezométrico proporciona a possibilidade de se verificar se um sistema de rebaixamento do lençol freático funciona satisfatoriamente ou se pode ser melhorado (ver exemplo na figura 47). Da mesma forma, uma rede de piezômetros pode indicar se houve uma redução da carga piezométrica em uma determinada formação/profundidade após instalados drenos horizontais de despressurização.



**Figura 3-2 – Ilustração exemplificando o monitoramento da eficiência de poços de rebaixamento**  
 (Fonte: Website Departament of Water and Sanitation / South Africa)

### 3.1.5. MONITORAMENTO DO NÍVEL DO LENÇOL FREÁTICO E DO FUNCIONAMENTO DE SISTEMAS DE DRENAGEM INTERNA EM ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS

Piezômetros e instrumentos de indicação do nível d'água (INAs) instalados logo acima de tapetes ou trincheiras drenantes, e monitorados frequentemente, tem a função de verificar o correto funcionamento e dimensionamento do sistema de drenagem interna de uma barragem, pilhas de estéril ou aterro (ver exemplo de um sistema de drenagem interna de uma barragem na figura 48). Para atender este propósito de monitoramento, é necessário a adoção de sensores automáticos de aquisição da leitura e equipamentos para o armazenamento dos dados, já que os sistemas de drenagem interna são demandados de forma transitória durante as chuvas e cheias dos reservatórios, e portanto, torna-se difícil a leitura manual durante estes eventos.



**Figura 3-3 – Ilustração exemplificando um sistema de drenagem interna de barragem (Fonte: Mecasolo Ltd)**

### 3.1.6. MONITORAMENTO DA PRESSÃO LATERAL DO SOLO E EMPUXO PARA DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS DE CONTENÇÃO E PARA ACOMPANHAMENTO PÓS-CONSTRUTIVO

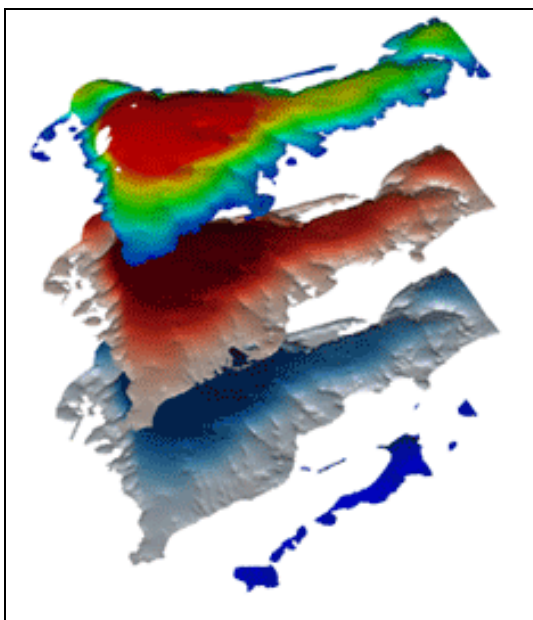
Estruturas de contenção do solo, como muros de contenção e cortinadas atirantadas, são dimensionadas considerando os empuxos de terra que a massa de solo diretamente atrás delas exerce. Estes empuxos de terra, ou pressões laterais exercidas na contra-face das estruturas, são potencializadas quando existe uma diferença entre o nível de água na massa à montante da estrutura e o nível de água no terreno à jusante da estrutura. Neste caso, a distribuição de pressões de água nos dois lados do muro estará desequilibrada, e logo haverá um acréscimo à resultante de empuxo que o muro ou a cortina deve suportar.

Estruturas de contenção de terra como muros gravidade e muros “cantilever”, na maioria dos casos, são equipados com sistema de drenagem interna executado durante a fase de reaterro da porção logo atrás do muro. Porém, estes drenos, se não projetados, especificados e executados com critério, podem não ser dimensionados adequadamente para aliviar a pressão da água atrás do muro, ou pode simplesmente se colmatar fazendo com que o sistema perca eficiência. Piezômetros instalados neste dreno, e na massa de solo à qual o muro está assentado, viabilizariam o monitoramento e a avaliação da performance do sistema, identificando falhas de maneira antecipada à completa falha do sistema de drenagem ou da estrutura de contenção.



### 3.1.7. LEVANTAMENTO DE DADOS PARA CALIBRAÇÃO E VERIFICAÇÃO DE MODELOS NUMÉRICOS

Estruturas geotécnicas, em sua fase de projeto, têm seus diversos elementos (fundações, estruturas de contenção, recalque e deformações horizontais admissíveis, ângulos de talude propostos, etc.) dimensionados considerando seu modelamento teórico baseado em resultados de ensaios de campo e laboratório, experiência anterior do especialista e demais fatores que, por mais representativo que se alcance na amostragem, não retratam a variabilidade, incerteza e escala da condição real da estrutura ou do subsolo (ver exemplo na figura 49).



**Figura 3-4 – Ilustração exemplificando resultados de modelagem numérica (Fonte: Website USGS Modflow)**

Desta forma, o monitoramento piezométrico antes, durante e após a construção de uma barragem ou pilhas de estéril, por exemplo, coletam dados reais da magnitude, variação e comportamento das cargas piezométricas e poro-pressões durante as diversas fases de construção e eventos naturais. Estes dados reais podem atualizar os dados de entrada nos modelos numéricos e de equilíbrio limite, calibrando as análises e possibilitando a avaliação da performance da estrutura. Yungwirth *et al.* (2013) descrevem uma situação na qual um determinado método de instalação de piezômetro poderia calibrar zonas fraturadas em um modelo: “Os sensores registram a poropressão

*no local do diafragma do piezômetro de corda vibrante. Isto cria um específico ponto no qual a poro-pressão pode ser monitorada, ao invés do monitoramento da poropressão média ao longo do intervalo da célula de um piezômetro Casagrande ou um sensor instalado em uma célula de areia. Isto permite a determinação em projeto de zonas de resposta bem específicas, como por exemplo focar em zonas fraturadas em sistemas de rocha fraturadas, ou em litologias de solos e rochas complexas, variando ao longo de distâncias curtas.”*

### 3.1.8. MONITORAMENTO DA DISSIPACÃO DA POROPRESSÃO EM PROCESSOS DE ADENSAMENTO OU EXPANSIVIDADE DO SOLO

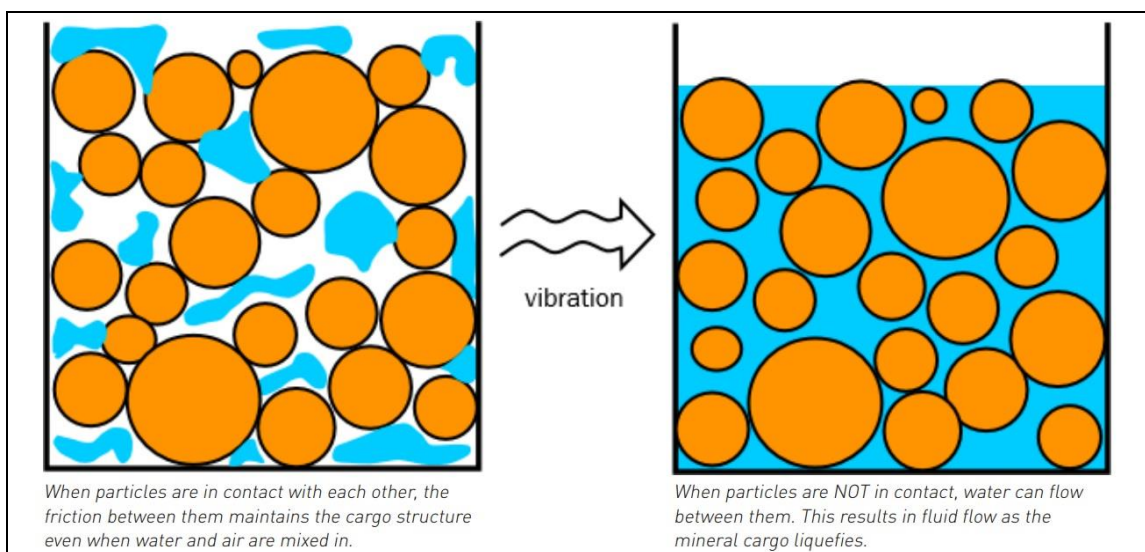
O processo de adensamento de um solo está diretamente ligado à drenagem da água intersticial deste solo, até a dissipação total do excesso de poro-pressão induzido pelo carregamento natural ou externo aplicado à superfície, e conseqüente redução do volume de toda massa de solo. A avaliação do avanço deste processo é fundamental para o planejamento de uma eventual estrutura, ou conjunto de estruturas, que por sua vez possa ser implantada sobre o solo em adensamento. Este monitoramento deve ser realizado por meio de medidores de recalque acompanhando a deformação vertical, e uma rede de piezômetros acompanhando a dissipação do excesso de poro-pressão.

Da mesma forma, depósitos de solos com características expansíveis, precisam ser monitorados para controle das variações em deformação volumétrica. Piezômetros podem prever estes eventos, e as variações em poro-pressão podem ser cruzadas com as medidas das variações de deslocamento. Hvorslev (1951) faz a seguinte afirmação: *“Uma recente queda ou elevação do lençol freático pode ser a causa do adensamento ou da expansividade de solos com conseqüente recalque ou levantamento da superfície do terreno ou de fundações.”*

### 3.1.9. MONITORAMENTO DA DISSIPACÃO DO EXCEDENTE DE POROPRESSÃO DURANTE E LOGO APÓS EVENTOS SISMOLÓGICOS

Barragens de rejeito, principalmente as barragens alteadas pelo método à montante, estão sujeitas aos efeitos da liquefação dinâmica. Liquefação dinâmica de um depósito aluvionar ou artificial saturado é a mudança brusca de comportamento de uma massa

sólida e estável para uma massa fluida em função do rearranjo que a porção sólida da massa sofre em virtude da passagem de ondas mecânicas oriundas de um sismo natural, induzido ou provocado por detonações (desmonte de rocha) ou grandes rupturas de estruturas adjacentes (figura 51). As fontes de vibração são chamadas de gatilho do processo de liquefação. Este rearranjo da porção sólida do solo/rejeito provoca um aumento brusco da poro-pressão atuante nos vazios, e caso a dissipação deste incremento de poro-pressão não ocorra rapidamente este material sofre uma perda brusca de sua resistência ao cisalhamento e passa a ter comportamento fluido, causando movimentos de massa. Depósitos como siltes, areia fina e rejeito são susceptíveis à liquefação quando saturados, e portanto, barragens de rejeito com alteamento à montante construídos com o próprio rejeito devem ser operadas com a linha freática baixa, de forma que eventos sismológicos não sirva de gatilho ao processo de liquefação.



**Figura 3-5 – Ilustração exemplificando o mecanismo de liquefação, perda momentânea do contato/interação em grãos do solo (Fonte: Sophiebraem, 2015)**

### 3.2. CRITÉRIOS PARA ATENDIMENTO AO PROPÓSITO DE MONITORAMENTO PIEZOMÉTRICO EM CADA ESTRUTURA GEOTÉCNICA

Os critérios de projeto apresentados neste estudo focam no atendimento de cada propósito de monitoramento em separado, porém, apesar disto, a instrumentação

piezométrica instalada pode ser combinada ao atendimento de mais de um propósito. Por exemplo: O instrumento indicado para monitoramento da poro-pressão na avaliação de rotina da estabilidade da fundação de uma barragem pode ser um piezômetro Casagrande automatizado por meio de um sensor piezométrico, e o instrumento indicado para monitoramento da dissipação da poro-pressão na fundação durante etapas de alteamento desta mesma barragem pode ser um sensor piezométrico instalado pelo método convencional. A segunda instrumentação citada também é adequada no monitoramento rotineiro da estabilidade da fundação e, portanto, uma única instrumentação pode ser instalada na barragem para o atendimento de ambos propósitos. Esta combinação deve ser feita com cuidado, e o entendimento da razão de cada critério de projeto em cada caso é fundamental. No exemplo de combinação citado acima (instalação de um piezômetro de corda vibrante pelo método convencional ao invés de um piezômetro Casagrande), algumas vantagens do piezômetro Casagrande seriam perdidas (a possibilidade de simples troca do sensor caso necessário, possibilidade do instrumento ser utilizado para amostragem de água, construção econômica, etc.). O projetista deve estar ciente destes fatores quando propor este tipo de combinação de instrumentação.

Da mesma forma, a instalação piezométrica pode ser combinada de forma a atender mais de um elemento da estrutura. O método “completamente grauteado” para instalação de sensores piezométricos de corda-vibrante permite o aproveitamento do mesmo furo de sondagem para instalação de vários sensores em diferentes profundidades. Neste caso, atenção especial deve ser dada ao isolamento de cada camada e cada elemento em uma estrutura.

### 3.2.1. MONITORAMENTO PIEZOMÉTRICO EM BARRAGENS DE MINERAÇÃO

O monitoramento piezométrico em uma barragem de mineração é uma tarefa complexa e sua eficiência é alcançada por meio da abordagem distinta de cada elemento e sua funcionalidade na estrutura, considerando sempre um propósito de monitoramento específico.

#### 3.2.1.1. FUNDAÇÃO DA BARRAGEM

Uma barragem, geralmente, é implantada sobre fundação de material competente, porém, em alguns casos há presença de solos, rochas fraturadas, falhas geológicas e/ou zonas de cisalhamento que podem potencializar a passagem de uma superfície de ruptura por sua fundação. Após construção da barragem, e depois do reservatório estar cheio por algum tempo, a nova rede de fluxo de percolação da água subterrânea já está redefinida, estável e constante, sendo que na região da fundação (especialmente próximo ao pé da barragem – figura 52) o fluxo de percolação é ascendente, e portanto, com poro-pressão mais elevada atuando na fundação em relação à poro-pressão equivalente ao nível freático. É necessário monitorar a variação desta poro-pressão atuante na fundação de acordo com as variações de fluxo de percolação controlados pela infiltração da água de precipitação de chuva na bacia de contribuição à qual a barragem esta inserida, e pela variação dos níveis de água do reservatório da barragem.

Para atendimento ao propósito de monitoramento apresentado no item 3.1.2, a estabilidade dos taludes de uma barragem passando por sua fundação frente às variações de poro-pressão mencionadas deve ser avaliada na condição drenada comparando o nível piezométrico considerado no modelo com o nível real medido pela instrumentação de campo. Esta comparação pode ser realizada por meio da determinação de níveis de controle, onde análises para 3 diferentes fatores de segurança e seus respectivos níveis piezométricos são levantados ( $FS > 1.5$ ,  $1.3 < FS < 1.5$  e  $1.1 < FS < 1.3$ ). A instrumentação para atendimento a este propósito de monitoramento deve observar os seguintes critérios em sua fase de projeto:

- **Necessidade de leituras de poro-pressão ou carga piezométrica ao invés da média do nível do lençol freático:** Indicadores de nível d'água ou piezômetros convencionais com células de areia com altura maior que 2 metros não são adequados ao monitoramento do incremento de poro-pressão, pois medem, respectivamente, o nível do lençol freático e a média da carga piezométrica no trecho da célula de areia.
- **Leitura de poro-pressão adquirida deve representar aquela atuante próxima à superfície de ruptura:** Indicadores de nível d'água e piezômetros com célula de areia muito longa não são indicados pelos mesmos motivos descritos acima. O posicionamento da célula de areia proposta deve considerar as análises de estabilidade realizadas para a barragem, com suas superfícies de ruptura mais críticas. Além disso, atenção

especial deve ser dada ao isolamento do fluxo de percolação do dreno de fundo durante a perfuração do furo de sondagem para instalação do instrumento, já que o fluxo do sistema de drenagem interna não deve influenciar nas leituras do piezômetro.



**Figura 3-6 - Praça de sondagem com furo executado em fundação de barragem (Barragem Principal da Mina Capanema – Fonte: O autor, 2015).**

Nas fases de construção ou alteamento das barragens, o acréscimo das tensões totais na fundação provoca um aumento de poro-pressão decorrente do lançamento e/ou compactação de camadas adicionais na superfície. Este incremento de poro-pressão é dissipado a uma taxa (velocidade) maior ou menor dependendo da permeabilidade do material de fundação.

No atendimento ao propósito de monitoramento apresentado no item 3.1.3, a taxa de avanço do alteamento, ou seja, a velocidade de construção de uma camada até o início da próxima, deve ser menor que a taxa de dissipação total do incremento de poro-pressão desenvolvido na ocasião da construção da camada anterior. Desta forma, cria-se condições de se avaliar a estabilidade da fundação da barragem em seu estado de

tensões efetivas durante sua operação sem o acúmulo de dois ou mais incrementos de poro-pressão atuantes na superfície de ruptura da fundação. Uma análise de estabilidade da fundação em seu estado de tensões totais é necessária na avaliação desta estabilidade logo no momento final de construção/alteamento e antes da dissipação do incremento de poro-pressão atuante na fundação. Neste momento a condição de pressão de água é considerada não-drenada, e logo, os parâmetros de resistência devem ser a resistência ao cisalhamento não-drenada ( $S_u$ , no caso de solos coesivos) e os parâmetros totais de resistência ao cisalhamento, ângulo de atrito e coesão do solo ( $\phi$  e  $c$ , no caso de solos não coesivos). Com o objetivo de agregar produtividade e segurança à construção, eliminando esperas desnecessárias para a realização da próxima camada e assegurando a medição da dissipação completa do incremento de poro-pressão, é necessária a observância dos seguintes critérios de projeto:

- **Necessidade de leituras de poro-pressão ao invés de carga piezométrica média de um trecho da célula ou da média do nível freático:** Indicadores de nível d'água ou piezômetros convencionais com células de areia com altura maior que 1 metro não são adequados à avaliação da taxa de dissipação de poro-pressão, pois medem, respectivamente, o nível do lençol freático e a média da carga piezométrica no trecho da célula de areia.
- **Necessidade de tempo de resposta curto:** Para viabilizar a medição acurada e precisa da taxa de dissipação, é necessário que o tempo de resposta seja separado do tempo realmente necessário para dissipação do incremento de poro-pressão. Desta forma, instrumentos de leitura manual, especialmente aqueles com uso de tubulação de PVC ou geomecânico de diâmetro muito grande (maior que  $\frac{3}{4}$ " ), não são os mais adequados para este fim, pois o tempo necessário para o deslocamento da água dentro da tubulação durante a equalização das variações seria computado como tempo necessário para a dissipação da variação de poro-pressão. Sensores piezométricos instalados pelo método completamente grauteado podem atender este fim, porém, não são os mais adequados, devido ao seu tempo de resposta pouco mais longo que sensores instalados pelo método convencional (A figura 53 mostra a confecção da célula de areia à partir da boca do furo de sondagem).
- **Necessidade de aquisição de dados de forma automática (armazenagem e telemetria):** Sempre quando a instrumentação piezométrica requerer um



tempo de resposta curto, cria-se a necessidade dos dados serem adquiridos e transmitidos de forma automática, caso contrário, o esforço em se separar o tempo de resposta do tempo de dissipação da variação de poro-pressão é perdido na espera da leitura pelos métodos manuais ou semi-automáticos, e o controle desta dissipação ao longo do tempo não é viabilizado.



**Figura 3-7 - Lançamento da areia para confecção da célula de areia.**

### 3.2.1.2. MACIÇO CONSTRUÍDO COM O REJEITO ARENOSO

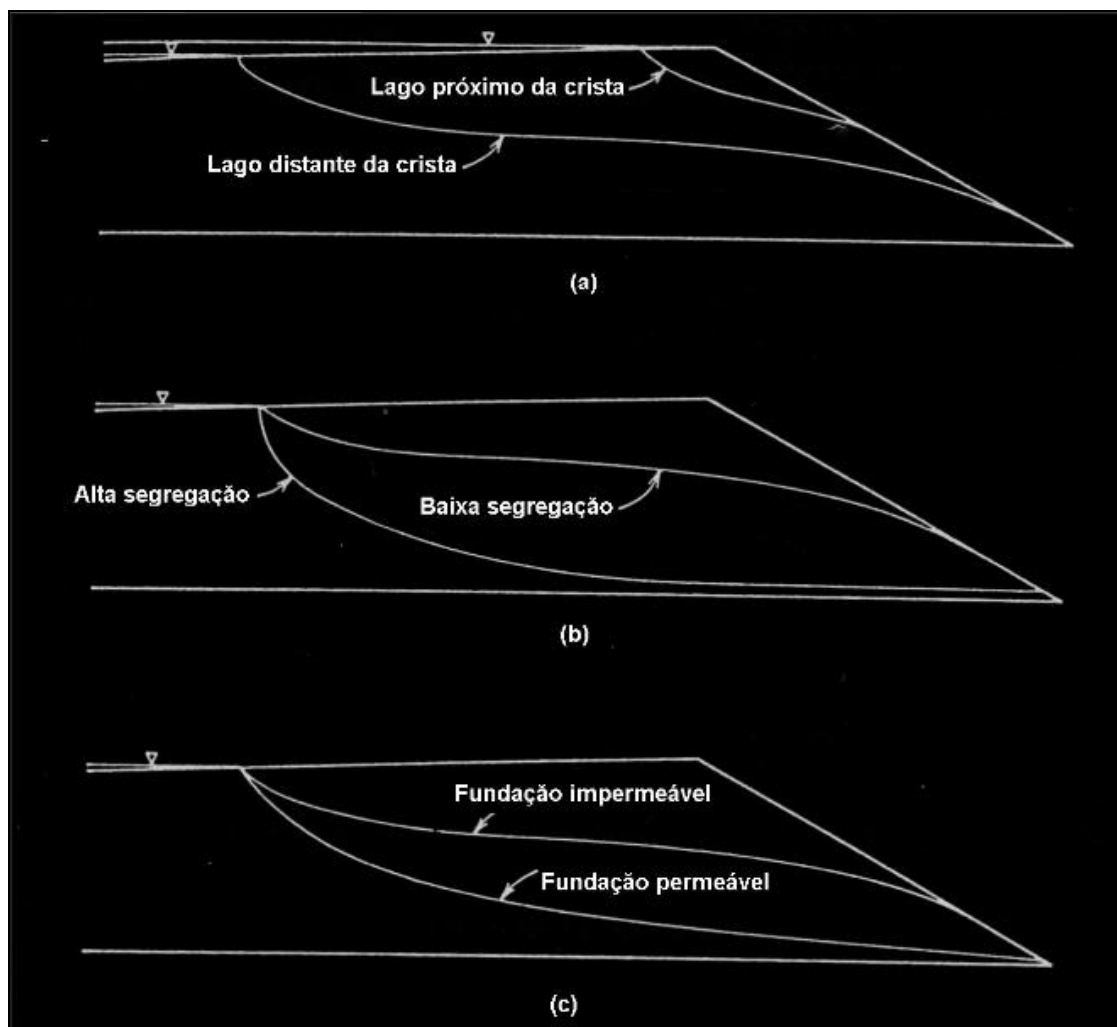
Obter um monitoramento piezométrico eficiente em barragens de rejeito alteadas com o próprio rejeito é uma tarefa difícil e complexa devido à variabilidade no comportamento geotécnico que este tipo de deposição proporciona. Os rejeitos são, na maioria dos casos, depositados pelo método do aterro hidráulico. Este método de disposição consiste no lançamento do rejeito arenoso oriundo das plantas de beneficiamento, e dividido por meio de hidrociclones entre “overflow”, porção fina direcionada para o reservatório, e “underflow”, porção arenosa usada na construção dos maciços nos diversos alteamentos.



Esta variabilidade no comportamento geotécnico neste tipo de depósito dá-se pelos efeitos da segregação hidráulica do rejeito. Segregação hidráulica, segundo Ribeiro (2000), é a tendência dos grãos de rejeito a se depositarem de forma variável na praia de deposição, interferindo diretamente na composição granulométrica ao longo do depósito. O método de disposição proporciona uma separação das partículas que são lançadas de forma variável em granulometria e composição mineralógica do rejeito, resultando assim em grande variabilidade dos parâmetros de resistência, na deformabilidade e na condutividade hidráulica (Ribeiro, 2000).

A posição da linha freática no interior da praia de rejeitos determina a condição de segurança que esta barragem apresenta, sendo que uma linha freática muito alta e próxima da crista da barragem pode causar modos de ruptura como liquefação estática, “piping” e/ou instabilização pelo aumento da poro-pressão e decorrente ruptura por cisalhamento de algum plano. A posição desta linha freática depende de três fatores: Da extensão da praia (distância entre o reservatório e a crista), dos efeitos da segregação hidráulica e dos efeitos proporcionados pela permeabilidade da fundação (ver figura 54). Dentre estes três fatores, os efeitos da segregação hidráulica é o de maior imprevisibilidade e, portanto, é aquele que merece maior atenção.

Levando-se em conta os efeitos da segregação hidráulica nas praias de rejeito, e sua grande variabilidade em condutividade hidráulica, para se alcançar um eficiente programa de monitoramento piezométrico é necessária uma ampla malha de instrumentos instalados de forma adequada e correlacionados a um procedimento robusto de análise dos dados. Esta ampla malha de instrumentos irá proporcionar dados para avaliação de condições críticas mesmo de zonas de pequena área e baixa representatividade ao longo da praia de rejeitos. A partir desta premissa, outros critérios de projeto de instrumentação piezométrica podem ser dados atendendo aos diversos propósitos de monitoramento estabelecidos neste estudo.

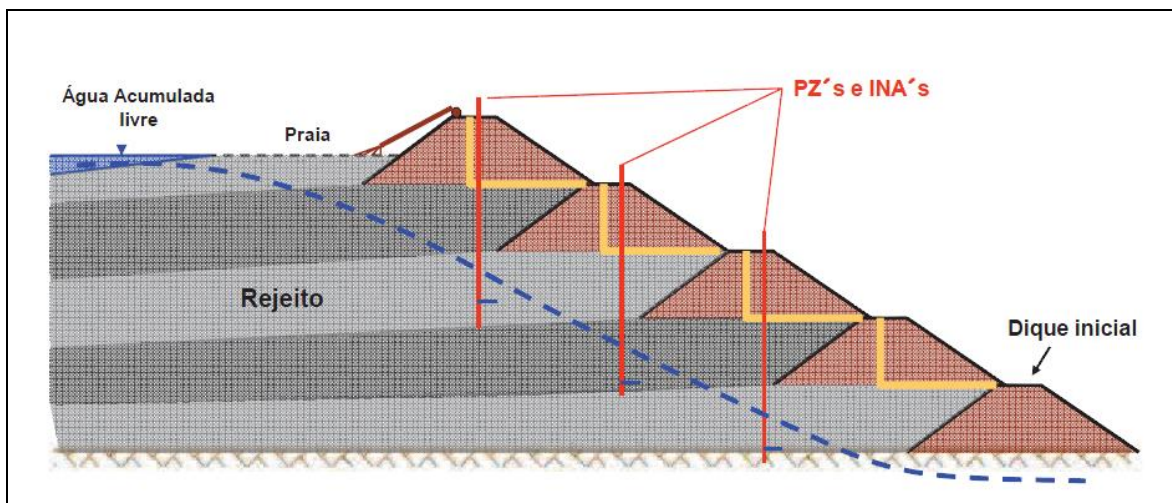


**Figura 3-8 - Posicionamento da linha freática em uma barragem de rejeitos (Fonte: Vick, 1983 apud Santos, 2004).**

É necessário monitorar a variação da poro-pressão atuante no maciço de uma barragem de rejeitos de acordo com as variações de fluxo de percolação controlados principalmente pela variação do nível do reservatório, mas também influenciados pela contribuição do lençol freático nas ombreiras e fundação.

Para atendimento ao propósito de monitoramento apresentado no item 3.1.2, a estabilidade do talude jusante de uma barragem de rejeitos frente às variações de poro-pressão mencionadas deve ser avaliada na condição drenada comparando o nível piezométrico considerado no modelo com o nível real medido pela instrumentação de campo. Esta comparação pode ser realizada por meio de níveis de controle como descrito no item 3.2.1.1. A instrumentação para atendimento a este propósito de monitoramento deve observar os seguintes critérios em sua fase de projeto:

- **Necessidade de leituras de poro-pressão ou carga piezométrica ao invés da média do nível do lençol freático:** Indicadores de nível d'água ou piezômetros convencionais com células de areia com altura maior que 2 metros não são adequados ao monitoramento do incremento de poro-pressão pelos mesmos motivos descritos no item 3.2.1.1.
- **Leitura de poro-pressão adquirida deve representar aquela atuante próxima à superfície de ruptura:** Indicadores de nível d'água e piezômetros com célula de areia muito longo não são indicados pelos mesmos motivos descritos acima. O posicionamento da célula de areia proposta deve considerar as análises de estabilidade realizadas para a barragem e os trechos das superfícies de ruptura críticas que passam pelo maciço. Além disso, atenção especial deve ser dada ao isolamento do furo de sondagem com eventuais camadas drenantes implantadas no maciço em alteamentos anteriores, já que o fluxo do sistema de drenagem interna não deve influenciar nas leituras do piezômetro. A figura 55 mostra a interface entre o sistema de drenagem interna e o maciço da barragem.



**Figura 3-9 - Interface da drenagem interna e a instrumentação em maciço de rejeito (Fonte: Notas de aula "Disposição de resíduos de mineração – Aula 7: Engenharia da Disposição de Rejeitos" - UFOP, 2014)**

Maciços de barragens de rejeito, durante sua operação, são constantemente alteados, provocando assim o aumento das tensões verticais nas camadas inferiores. Este acréscimo das tensões totais no maciço provoca o surgimento de um incremento de

poro-pressão que se dissipa à uma taxa (velocidade) maior ou menor dependendo da permeabilidade do material constituinte do maciço.

No atendimento ao propósito de monitoramento apresentado no item 3.1.3, a taxa de avanço do alteamento do maciço, ou seja, a velocidade de construção de uma camada até o início da próxima, deve ser menor que a taxa de dissipação total do incremento de poro-pressão desenvolvido na ocasião da construção da camada anterior. Desta forma, cria-se condições de se avaliar a estabilidade do aterro em seu estado de tensões efetivas durante sua operação sem o acúmulo de dois ou mais incrementos de poro-pressão atuantes na superfície de ruptura do maciço. Uma análise de estabilidade do maciço em seu estado de tensões totais, como a descrita no item 3.2.1.1, é necessária na avaliação da segurança em diversas elevações durante alteamento e no final de operação/construção, sempre antes da dissipação do incremento de poro-pressão atuante no aterro em cada fase. Com o objetivo de agregar produtividade e segurança à operação da barragem, eliminando esperas desnecessárias para a realização do próximo alteamento e assegurando a medição da dissipação completa do incremento de poro-pressão, é necessária a observância dos seguintes critérios de projeto:

- **Necessidade de leituras de poro-pressão ao invés de carga piezométrica média de um trecho da célula ou da média do nível freático:** Indicadores de nível d'água ou piezômetros convencionais com células de areia com altura maior que 1 metro não são adequados à avaliação da taxa de dissipação de poro-pressão, pois medem, respectivamente, o nível do lençol freático e a média da carga piezométrica no trecho da célula de areia.
- **Necessidade de tempo de resposta curto:** Para viabilizar uma medição acurada e precisa da taxa de dissipação, é necessário que o tempo de resposta seja separado do tempo realmente necessário para dissipação do incremento de poro-pressão. Desta forma, como descrito no item 3.2.1.1, os instrumentos de leitura manual não são adequados para este fim, e os sensores instalados pelo método completamente grauteado atendem mas oferece tempo de resposta pouco mais longo que sensores de corda vibrante instalados pelo método convencional.
- **Necessidade de aquisição de dados de forma automática (armazenagem e telemetria):** Pelo mesma razão descrita no item 3.2.1.1, sempre quando a

instrumentação piezométrica requerer um tempo de resposta curto, cria-se a necessidade dos dados serem adquiridos e transmitidos de forma automática.

- **Instrumentação deve empregar sensores com cabeamento capaz de ser prolongado de acordo com o avanço do alteamento:** O avanço do alteamento é realizado de baixo para cima à medida que as camadas são espalhadas. Os instrumentos instalados no maciço devem constantemente serem alteados conforme este avanço. Para assegurar um histórico contínuo de dados piezométricos, os piezômetros mais indicados nesta ocasião são os sensores piezométricos de corda-vibrante fabricados por empresas que também disponibilizam kits especiais para emendas do cabeamento inserido nos furos de sondagem, desta forma, antes de iniciado o espalhamento de uma camada, o cabeamento pode ser prolongado e conduzido novamente à unidade de armazenamento de dados (“datalogger”) para prosseguimento do registro das medições (o cadastro do instrumento deve ser atualizado com a nova cota da barragem).

Além do risco de liquefação estática, este tipo de barragem é sujeito à ruptura por liquefação dinâmica decorrentes da elevação da poro-pressão no maciço pelo rearranjo da porção sólida do rejeito ocasionado por vibrações oriundas de sismos naturais, induzidos pela implantação da estrutura e/ou provocados por detonações para desmonte de rocha. A evolução da liquefação dinâmica em uma estrutura deste tipo é muito rápida, e desta forma o monitoramento piezométrico passa a ter uma função de detecção do início deste processo e acionamento automático de um sistema de alerta às instalações e comunidades à jusante da barragem e inseridas na mancha de inundação da análise de ruptura hipotética.

No atendimento ao propósito de monitoramento apresentado no item 3.1.9, uma dissipação rápida do incremento de poro-pressão provocado pelo sismo no rejeito do maciço da barragem deve acontecer para que o sistema de alerta automático não seja acionado. Para viabilização deste alerta, limites de taxa de dissipação devem ser estipulados antecipadamente com base nos modelos de percolação da barragem. A instrumentação deve ser totalmente preparada para atuar em conjunto com o sistema de alerta, e para isto é necessária a observância dos seguintes critérios de projeto:

- **Necessidade de aquisição de dados de forma automática e em tempo real:** Instrumentos de leitura manual ou com tempo de resposta longo não são indicados para este fim. Além disto, os sistemas de armazenagem e transmissão remota dos dados devem considerar exigências como redundância, robustez e segurança dos dados.
- **Necessidade de sistema de alerta sonoro automático com transmissão redundante de sinal:** O sistema de monitoramento deve ser conectado a um sistema de alerta sonoro que ofereça redundância de sinal, robustez e segurança dos dados e da estrutura.

### 3.2.1.3. MACIÇO DE TERRA

Barragens de diversas finalidades (retenção de rejeito, retenção de sedimentos, armazenamento de água, etc.) possuem seus maciços construídos por meio de terraplenagem, ou seja, o corte de áreas de jazidas de materiais adequados (argilas em sua maioria), transporte do material e aterro compactado e controlado tecnologicamente para formação do barramento. Maciços de barragens de terra devem ser monitorados de acordo com o funcionamento de seu sistema de drenagem interna. Este sistema deve funcionar de forma eficiente, drenando toda contribuição de água infiltrada no maciço a partir do reservatório e/ou percolada pelas ombreiras e fundação, e mantendo o nível freático baixo na região do talude jusante.

No atendimento ao propósito de monitoramento apresentado no item 3.1.5, a estabilidade do talude jusante do maciço de terra frente às variações de nível do lençol freático mencionadas acima deve ser avaliada na condição drenada comparando o nível piezométrico considerado no modelo com o nível real medido pela instrumentação de campo. Esta comparação pode ser realizada por meio de níveis de controle conforme descrito no item 3.2.1.1. Instrumentação para atendimento a este propósito de monitoramento deve observar os seguintes critérios em sua fase de projeto:

- **Necessidade de leituras do nível freático no maciço:** Indicadores de nível d'água ou piezômetros medem, respectivamente, o nível do lençol freático e a média da carga piezométrica no trecho da célula de areia e, portanto, ambos atendem este critério.

- **Necessidade de registro da pluviometria:** O registro, no mínimo horário, das precipitações na região da barragem deve ser realizado para análise da correlação entre chuva precipitada, vazão da drenagem interna e resposta dos piezômetros ou INAs.
- **Necessidade de registro da vazão do sistema de drenagem interna:** O registro, no mínimo horário, da vazão do dreno de fundo da barragem deve ser realizado para análise da correlação entre chuva precipitada, vazão da drenagem interna e resposta dos piezômetros ou INAs. Esta vazão deve também ser comparada com a vazão obtida na análise de percolação na fase de modelagem. A partir daí a calibragem do modelo e o aperfeiçoamento dos parâmetros são viabilizados.

O maciço de terra de uma barragem durante sua vida útil pode ser submetido a fases de alteamento conforme a necessidade de contenção de maior volume de resíduos. Estes alteamentos podem ser realizados pelo método de jusante ou linha de centro, e consistem na execução do aterro compactado de solo sobre o maciço inicial. O aumento de sobrecarga provoca o aumento das tensões verticais atuantes nas camadas inferiores. Este acréscimo das tensões totais no aterro provoca o surgimento de um incremento de poro-pressão que se dissipa à uma taxa (velocidade) maior ou menor dependendo da permeabilidade do material depositado no aterro.

No atendimento ao propósito de monitoramento apresentado no item 3.1.3, a taxa de avanço do alteamento, ou seja, a velocidade de construção de uma camada até o início da próxima, deve ser menor que a taxa de dissipação total do incremento de poro-pressão desenvolvido na ocasião da construção da camada anterior. Desta forma, cria-se condições de se avaliar a estabilidade do aterro em seu estado de tensões efetivas durante sua operação sem o acúmulo de dois ou mais incrementos de poro-pressão atuantes na superfície de ruptura do aterro. Uma análise de estabilidade do maciço em seu estado de tensões totais, como a descrita no item 3.2.1.1, é necessária na avaliação da segurança em diversas elevações durante alteamento e no final de construção, sempre antes da dissipação do incremento de poro-pressão atuante no aterro em cada fase. Com o objetivo de agregar produtividade e segurança a implantação do alteamento do maciço da barragem, eliminando esperas desnecessárias para a realização da próxima camada e

assegurando a medição da dissipação completa do incremento de poro-pressão, é necessária a observância dos seguintes critérios de projeto:

- **Necessidade de leituras de poro-pressão ao invés de carga piezométrica média de um trecho da célula ou da média do nível freático:** Indicadores de nível d'água ou piezômetros convencionais com células de areia com altura maior que 1 metro não são adequados à avaliação da taxa de dissipação de poro-pressão pelo mesmo motivo descrito no item 3.2.1.2.
- **Necessidade de tempo de resposta curto:** Conforme descrito no item 3.2.1.1, instrumentos de leitura manual não são adequados, e sensores instalados pelo método completamente grauteado atende, mas não são os mais adequados para este fim, devido ao seu tempo de resposta pouco mais longo que sensores instalados pelo método convencional.
- **Necessidade de aquisição de dados de forma automática (armazenagem e telemetria):** Ver item 3.2.1.1.
- **Instrumentação deve empregar sensores com cabeamento capaz de ser prolongados de acordo com o avanço do alteamento da barragem:** Ver item 3.2.1.2.

#### 3.2.1.4. MACIÇO DE ENRONCAMENTO

Maciços de enronçamento são barramentos constituídos de blocos de rocha e pedras de mão com a finalidade de dissipação da energia cinética do fluxo d'água, contenção de sedimentos ou mesmo, quando equipada com um núcleo impermeável, armazenamento de água. Maciços de enronçamento devem ser monitorados de acordo com a manutenção se sua permeabilidade ao longo do tempo.

De forma similar, no atendimento ao propósito de monitoramento apresentado no item 3.1.5), o monitoramento da manutenção da permeabilidade do maciço de enronçamento deve contar com instrumentação que observa os seguintes critérios em sua fase de projeto:

- **Necessidade de registro da pluviometria:** O registro, no mínimo horário, das precipitações na região da barragem deve ser realizado para análise da correlação entre chuva precipitada e vazão da drenagem interna.



- **Necessidade de registro da vazão do sistema de drenagem interna:** O registro, no mínimo horário, da vazão do dreno de fundo da barragem deve ser realizado para análise da correlação entre chuva precipitada e vazão da drenagem interna. Esta vazão deve também ser comparada com a vazão obtida na análise de percolação na fase de modelagem. A partir daí a calibragem do modelo e o aperfeiçoamento dos parâmetros são viabilizados.

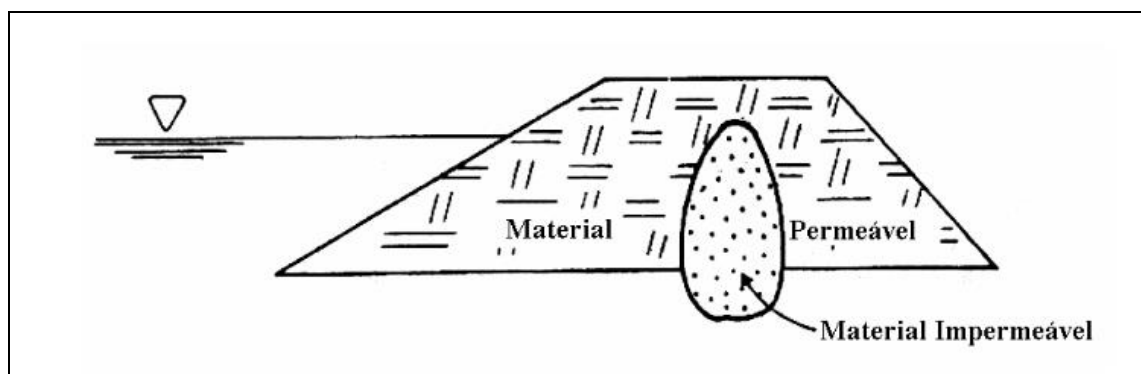
### 3.2.1.5. NÚCLEO IMPERMEÁVEL

Núcleos impermeabilizantes são, geralmente, construídos no interior dos maciços e com emprego de solos argilosos disponível nas jazidas da região (figura 56). Estes elementos tem a função de limitar a percolação da água do reservatório através do maciço, aumentando a estanqueidade da estrutura. Este núcleo, porém, pelo fato de ser construído com solos coesivos, sofre os efeitos do adensamento ou da expansividade (de acordo com a mineralogia da argila) ao longo do tempo. Estes efeitos, caso ocorrido de forma severa, podem acarretar em trincas na interface do núcleo com o restante do maciço da barragem (no caso de adensamento) ou no aumento das tensões totais nesta interface (no caso de expansividade). Trincas no interior do maciço da barragem são caminhos preferenciais de água e evoluem para processos de erosão interna, podendo levar a barragem à ruptura.

No atendimento ao propósito de monitoramento apresentado no item 3.1.8, um monitoramento piezométrico efetivo e acurado nos núcleos impermeabilizantes (em conjunto com monitoramento do recalque) permite a identificação de anomalias na estabilização da dissipação da poro-pressão neste elemento da estrutura, e para isto a instrumentação empregada deve observar os seguintes critérios em sua fase de projeto:

- **Necessidade de leituras de poro-pressão ao invés da média de carga piezométrica em um trecho ou média do nível freático:** Ver item 3.2.1.1.
- **Instalação dos sensores deve ser realizada durante a construção do núcleo, e reaterro das valas deve garantir a estanqueidade do núcleo:** Perfuração para instalação de instrumentação em um núcleo impermeabilizante deve ser evitada ao máximo, devido ao risco de início de um processo de ruptura hidráulica. Mesmo instalado em perfuração seca à trado há muitas dificuldades em se alcançar um reaterro eficiente.

- **Necessidade do registro de pequenas variações de poro-pressão:** A instrumentação deve ser capaz de registrar pequenas variações de poro-pressão ao longo do tempo, pois a dissipação ao longo do adensamento deve ser avaliada.



**Figura 3-10 – Ilustração exemplificando uma seção transversal do maciço de uma barragem com núcleo impermeável (Carvalho & Silva, 2006)**

### 3.2.1.6. INTERFACE OMBREIRA E MACIÇO

As contribuições do lençol freático do terreno natural que as ombreiras exercem no aterro justificam uma atenção específica a esta região da barragem (figura 57). Além disto, recalques excessivos do maciço ou de seu núcleo podem levar a barragem a se arquear sobre as ombreiras, resultando em um aumento nas tensões totais atuantes nestas regiões e consequente abertura de trincas (risco de “piping”). Seções geológicas pelas ombreiras também devem ter sua percolação e estabilidade analisadas, e uma avaliação desta condição de estabilidade deve ser realizada comparando as leituras reais da instrumentação instalada com os dados empregados no modelo.

Para atendimento ao propósito de monitoramento apresentado no item 3.1.2 a estabilidade das áreas de interface ombreira e maciço frente às variações de poro-pressão decorrentes da infiltração de água de chuva deve ser avaliada na condição drenada comparando o nível piezométrico considerado no modelo com o nível real medido pela instrumentação de campo conforme descrito no item 3.2.1.1. A instrumentação para atendimento a este propósito de monitoramento deve observar os seguintes critérios em sua fase de projeto:

- **Necessidade de leituras de poro-pressão ou carga piezométrica ao invés da média do nível do lençol freático:** Ver item 3.2.1.1.
- **Leitura de poro-pressão adquirida deve representar aquela atuante próxima à superfície de ruptura:** Indicadores de nível d'água e piezômetros com célula de areia muito longa não são indicados pelos mesmos motivos descritos. O posicionamento da célula de areia proposta deve considerar as análises de estabilidade realizadas nas seções geológica da ombreira e suas superfícies de ruptura mais críticas.



Figura 3-11 - Percolação na interface ombreira e maciço (Fonte: Website - US Department of Agriculture)

### 3.2.1.7. RESERVATÓRIO DE BARRAGEM

A rotina do monitoramento piezométrico em reservatórios de barragens se limita a medir o nível de água do reservatório e a pluviometria na região da bacia de contribuição. Estes dados são disponibilizados na avaliação de outros elementos da barragem como o sistema de drenagem interna e o sistema extravasor. Ocasionalmente uma sondagem piezométrica pode ser realizada na lama do reservatório de barragens de contenção de rejeitos e sedimentos. A sondagem piezométrica consiste na cravação de uma haste metálica, equipada com um transdutor de pressão, através da lama depositada no fundo do reservatório. Esta operação é realizada a partir de uma balsa (Figura 58) e registra o incremento de poro-pressão à medida que a haste é cravada e sua dissipação ao longo do tempo. A instrumentação para atendimento ao monitoramento em reservatórios deve observar os seguintes critérios em sua fase de projeto:

- **Conveniência do registro das poro-pressões atuantes na lama depositada no fundo do reservatório:** Este registro proporciona o entendimento das variações de tensão total e efetiva de acordo com a profundidade da lama depositada.
- **Necessidade de registro do nível de água do reservatório:** O registro, no mínimo horário, do N.A do reservatório da barragem deve ser realizado para análise da correlação entre chuva precipitada, elevação do N.A, vazão da drenagem interna e vazão do sistema extravasor.
- **Necessidade de registro da pluviometria:** O registro, no mínimo horário, das precipitações na região da bacia de contribuição da barragem deve ser realizado para análise da correlação entre chuva precipitada e vazão da drenagem interna.



**Figura 3-12 - Sondagem piezométrica em lama depositado no fundo de reservatório (Fonte: Notas de aula "Disposição de resíduos de mineração – Aula 7: Engenharia de Disposição de Rejeitos" UFOP, 2014).**

### 3.2.2. MONITORAMENTO PIEZOMÉTRICO EM PILHAS DE ESTÉRIL

A eficiência do monitoramento piezométrico em uma pilha de estéril é alcançada por meio da abordagem distinta de cada elemento, considerando sua função e atendendo à um propósito de monitoramento específico.

#### 3.2.2.1. FUNDAÇÃO DA PILHA DE ESTÉRIL

Pilhas de estéril (PDEs) são implantadas em áreas próximas a cava da mina para reduzir a distância máxima de transporte (DMT) e viabilizar o projeto minerário. Com este critério de escolha de área de implantação, as pilhas de estéril, geralmente, preenchem grotas e/ou vertentes próximas a cava. Assim, em alguns casos, as PDEs são assentadas em rochas fraturadas, falhas geológicas, zonas de cisalhamento ou até mesmo solos coluvionares. Esta condição pode proporcionar a passagem de superfícies de ruptura por sua fundação. Passado um tempo após a construção da PDE, a nova rede de fluxo de percolação da água subterrânea se define e passa a ser estável e constante, sendo que na região da fundação (especialmente próximo ao pé da pilha) o fluxo de percolação tende a ser ascendente e, portanto, com poro-pressão elevada atuando em sua fundação. É necessário monitorar a variação desta poro-pressão atuante na fundação de acordo com as variações de fluxo de percolação controlados pela infiltração da água de precipitação de chuva na bacia de contribuição à qual a PDE esta inserida, e pela variação dos níveis de água de lagos, reservatório e rios adjacentes à PDE.

Para atendimento ao proposito de monitoramento apresentado no item 3.1.2, a estabilidade da fundação de uma PDE frente às variações de poro-pressão mencionadas acima deve ser avaliada na condição drenada comparando o nível piezométrico considerado no modelo com o nível real medido pela instrumentação de campo conforme descrito no item 3.2.1.1. A instrumentação para atendimento a este propósito de monitoramento deve observar os seguintes critérios em sua fase de projeto:

- **Necessidade de leituras de poro-pressão ou carga piezométrica ao invés da média do nível do lençol freático:** Ver item 3.2.1.1.
- **Leitura de poro-pressão adquirida deve representar aquela atuante próxima à superfície de ruptura:** Indicadores de nível d'água e piezômetros com célula de areia muito longo não são indicados pelos mesmos motivos descritos anteriormente. O posicionamento da célula de areia proposta deve considerar as análises de estabilidade realizadas para a pilha de estéril e o trecho de suas superfícies de ruptura mais críticas que passem pela fundação. Além disso, conforme descrito no item 3.2.1.1, atenção especial deve ser dada ao isolamento do fluxo de percolação do dreno de fundo durante a perfuração do furo.

As PDEs, durante sua operação, recebem constantemente material excedente da cava que é espalhado em camadas durante alteamento da estrutura. Este acréscimo das tensões totais na fundação provoca um aumento de poro-pressão decorrente do aumento de peso das camadas adicionais na superfície. Este incremento de poro-pressão é dissipado à uma taxa (velocidade) maior ou menor dependendo da permeabilidade do material de fundação.

No atendimento ao propósito de monitoramento apresentado no item 3.1.3, a taxa de avanço do alteamento, ou seja, a velocidade de construção de uma camada até o início da próxima, deve ser menor que a taxa de dissipação total do incremento de poro-pressão desenvolvido na ocasião da construção da camada anterior. Similar ao descrito no item 3.2.1.1 para barragem, há a necessidade de se avaliar a estabilidade da fundação da PDE em seu estado de tensões efetivas durante sua operação e, portanto uma análise de estabilidade da fundação em seu estado de tensões totais é necessária. Com o objetivo de agregar produtividade e segurança à operação da pilha, eliminando esperas desnecessárias para a realização da próxima camada e assegurando a medição da dissipação completa do incremento de poro-pressão, é necessária a observância dos mesmos critérios de projeto propostos no caso de alteamento de maciço de barragem:

- **Necessidade de leituras de poro-pressão ao invés de carga piezométrica média de um trecho da célula ou da média do nível freático:** Ver item 3.2.1.1.
- **Necessidade de tempo de resposta curto:** Ver item 3.2.1.1.
- **Necessidade de aquisição de dados de forma automática (armazenagem e telemetria):** Ver item 3.2.1.1.

### 3.2.2.2. ATERRO

Material excedente da cava é constantemente espalhado durante a operação das PDEs, provocando assim o aumento das tensões verticais nas camadas inferiores. Este acréscimo das tensões totais no aterro provoca um surgimento de um incremento de poro-pressão que se dissipa a uma taxa (velocidade) maior ou menor dependendo da permeabilidade do material de depositado na pilha.

No atendimento ao propósito de monitoramento apresentado no item 3.1.3, a taxa de avanço do alteamento deve ser menor que a taxa de dissipação total do incremento de

poro-pressão desenvolvido na ocasião da construção da camada anterior. Desta forma, também durante a operação da pilha e conforme descrito no item 3.2.1.1 para barragem, há a necessidade de se avaliar a estabilidade da fundação da PDE em seu estado de tensões efetivas durante a operação e, portanto uma análise de estabilidade da fundação em seu estado de tensões totais é necessária. No caso a taxa de alteamento da pilha justificar este tipo de monitoramento, e com o objetivo de agregar produtividade e segurança à operação da pilha, eliminando esperas desnecessárias para a realização da próxima camada e assegurando a medição da dissipação completa do incremento de poro-pressão, é necessária a observância dos mesmo critérios de projeto propostos para alteamento de maciço de barragem:

- **Necessidade de leituras de poro-pressão ao invés de carga piezométrica média de um trecho da célula ou da média do nível freático:** Ver item 3.2.1.1.
- **Necessidade de tempo de resposta curto:** Ver item 3.2.1.1.
- **Necessidade de aquisição de dados de forma automática (armazenagem e telemetria):** Ver item 3.2.1.1.
- **Instrumentação deve empregar sensores com cabeamento capaz de ser prolongados de acordo com o avanço da operação da pilha de estéril:** O avanço da PDE é realizado de baixo para cima à medida que as camadas são espalhadas. Os instrumentos instalados no aterro devem constantemente ser alteados conforme este avanço. Para assegurar um histórico contínuo de dados piezométricos, os piezômetros mais indicados nesta ocasião são os sensores piezométricos de corda vibrante fabricados por empresas que também disponibilizam kits especiais para emendas do cabeamento inserido nos furos de sondagem, desta forma, antes de iniciado o espalhamento de uma camada, o cabeamento pode ser prolongado e conduzido novamente à unidade de armazenamento de dados (“datalogger”) para prosseguimento do registro das medições (o cadastro do instrumento deve ser atualizado com a nova cota da PDE).

Pilhas de estéril finalizadas, fechadas ou em preparação para seu fechamento, devem ser monitoradas de acordo com o funcionamento de seu sistema de drenagem interna. Este sistema deve funcionar de forma eficiente, drenando toda contribuição de água

infiltrada na pilha e/ou percolada pelas ombreiras e fundação, e mantendo o nível freático baixo no interior do aterro.

No atendimento ao propósito de monitoramento apresentado no item 3.1.5, a estabilidade dos taludes de uma PDE frente às variações de nível do lençol freático mencionadas acima deve ser avaliada na condição drenada comparando o nível piezométrico considerado no modelo com o nível real medido pela instrumentação de campo por meio das níveis de controle conforme descrito anteriormente. A instrumentação para atendimento a este propósito de monitoramento deve observar os seguintes critérios em sua fase de projeto:

- **Necessidade de leituras do nível freático no maciço:** Ver item 3.2.1.3.
- **Necessidade de registro da pluviometria:** O registro, no mínimo horário, das precipitações na região da PDE deve ser realizado conforme descrito no item 3.2.1.3.
- **Necessidade de registro da vazão do sistema de drenagem interna:** O registro, no mínimo horário, da vazão do dreno de fundo da PDE deve ser realizado conforme descrito no item 3.2.1.3.

### 3.2.2.3. INTERFACE OMBREIRA E ATERRO

As contribuições do lençol freático do terreno natural que as ombreiras exercem no aterro justificam uma atenção específica à esta região da pilha de estéril. Seções geológicas passando pelas ombreiras também devem ter sua percolação e estabilidade analisadas, e uma avaliação desta condição de estabilidade deve ser realizada comparando as leituras reais da instrumentação instalada com os dados empregados no modelo.

Para atendimento ao propósito de monitoramento apresentado no item 3.1.2, a estabilidade das áreas de interface ombreira e maciço frente às variações de poro-pressão decorrentes da infiltração de água de chuva deve ser avaliada na condição drenada por meio da carta de risco conforme descrito anteriormente. A instrumentação para atendimento a este propósito de monitoramento deve observar os mesmos critérios propostos para a interface de maciço de barragem e ombreira:

- **Necessidade de leituras de poro-pressão ou carga piezométrica ao invés da média do nível do lençol freático:** Ver item 3.2.1.1.



- **Leitura de poro-pressão adquirida deve representar aquela atuante próxima à superfície de ruptura:** Ver item 3.2.1.6.

### 3.2.3. MONITORAMENTO PIEZOMÉTRICO EM TALUDES

O monitoramento piezométrico em taludes, de forma geral, visa acompanhar as variações piezométricas e compara-las com limites pré-estabelecidos em análises de estabilidade na fase de modelamento. Este monitoramento visa obter um melhor entendimento das condições de interconectividade hidráulica entre as diversas formações rochosas, e com isto realizar uma eficiente operação dos poços de rebaixamento do nível freático.

#### 3.2.3.1. TALUDE DE CAVA A CÉU ABERTO

Taludes de cavas a céu aberto são escavados, e como tal, seu monitoramento deve ser dividido em duas fases distintas de avaliação do comportamento do solo/rocha: a fase de término de escavação e a fase final ou cava final.

Beale *et al.* (2013) reconhecem a importância do monitoramento piezométrico em uma cava a céu aberto tanto na questão da segurança quanto na questão financeira: *“Monitoramento do nível de água em tubos dedicados ou em piezômetros (que pode ser equipado com transdutores de pressão) é uma ferramenta padronizada e essencial para qualquer mina onde a zona de rebaixamento nos arredores de uma cava ativa e seca precisa ser conhecida, bem como a extensão deste rebaixamento ao longo do tempo”*. Beale *et al.* (2013) ainda complementam afirmando que o monitoramento e medição das mudanças em pressão piezométrica induzidas pelo rebaixamento atrás dos taludes de cava é crítico em projeto de mina para garantir condições seguras de trabalho. Monitoramento também oferece dados acurados para avaliação e implementação de opções de intervenções positivas e negativas onde um talude de cava pode passar à ser mais ou menos íngreme respectivamente, o que tem impactos diretos na relação minério-estéril e conseqüentemente no custo de operação.

## ➤ FORMAÇÃO MINERÁRIA

Formações minerárias são aquelas que são removidas para beneficiamento nas plantas e usinas de acordo com o plano de lavra. Taludes de cavas a céu aberto construídos nas formações minerárias são provisórios e, portanto, contam com instrumentação mais provisória e pouco mais rasas, cujo propósito de monitoramento costuma ser o da dissipação do excedente de poro-pressão gerada durante as fases de escavação, e na determinação de taxas de segurança para o avanço da escavação em suas diversas intervenções de avanço da lavra.

A fase de término de escavação é aquela à qual o avanço de lavra acabou de ser realizado, mecanicamente ou por meio de detonação, e um novo talude de berma é criado. Nesta fase, caso o rebaixamento do lençol freático não tenha sido realizado ou a escavação já esteja muito próxima a este nível d'água rebaixado, o alívio das tensões totais na massa de solo/rocha provoca um aumento do poro-pressão desta massa decorrente da mudança na rede de fluxo de percolação da água subterrânea em direção à face e ao pé deste novo talude (fluxo ascendente). A partir daí o fluxo é estabilizado e torna-se constante, e este incremento de poro-pressão é dissipado em uma taxa (velocidade) maior ou menor, dependendo da permeabilidade desta massa de solo/rocha.

No atendimento ao propósito de monitoramento apresentado no item 3.1.3, a taxa de avanço das escavações, ou seja, a velocidade de corte/remoção do material até o início da próxima escavação, deve ser menor que a taxa de dissipação total do incremento de poro-pressão desenvolvido na ocasião do primeiro avanço de lavra. Desta forma, cria-se condições de se avaliar a estabilidade dos taludes de cava em seu estado de tensões efetivas durante sua operação sem o acúmulo de dois ou mais incrementos de poro-pressão atuantes na superfície de ruptura do talude. Uma análise de estabilidade do talude da cava em seu estado de tensões totais é necessária na avaliação desta estabilidade logo no momento de sua escavação e antes da dissipação do incremento de poro-pressão atuante na massa de solo/rocha. Neste momento a condição de pressão de água é considerada não-drenada, e logo, os parâmetros de resistência devem ser a resistência ao cisalhamento não-drenada ( $S_u$ , no caso de solos coesivos) e os parâmetros totais de resistência ao cisalhamento, ângulo de atrito e coesão do solo ( $\phi$  e  $c$ , no caso de solos não coesivos). Com o objetivo de agregar produtividade e segurança à operação de frente de lavra, eliminando esperas desnecessárias para a realização da próxima

intervenção e assegurando a medição da dissipação completa do incremento de poro-pressão, é necessária a observância dos seguintes critérios de projeto:

- **Necessidade de leituras de poro-pressão ao invés de carga piezométrica média de um trecho da célula ou da média do nível freático:** Indicadores de nível d'água ou piezômetros convencionais com células de areia com altura maior que 1 metro não são adequados à avaliação da taxa de dissipação de poro-pressão pelos mesmos motivos descritos no item 3.2.1.1 (Barragens de mineração).
- **Necessidade de tempo de resposta curto:** Para viabilizar uma medição acurada e precisa da taxa de dissipação, é necessário que o tempo de resposta seja separado do tempo realmente necessário para dissipação do incremento de poro-pressão. Desta forma, como descrito no item 3.2.1.1, os instrumentos de leitura manual não são adequados para este fim, e os sensores instalados pelo método completamente grauteado atendem mas oferece tempo de resposta pouco mais longo que sensores de corda vibrante instalados pelo método convencional.
- **Necessidade de aquisição de dados de forma automática (armazenagem e telemetria):** Conforme descrito no item 3.2.1.1, sempre quando a instrumentação piezométrica requerer um tempo de resposta curto, cria-se a necessidade dos dados serem adquiridos e transmitidos de forma automática.

### ➤ FORMAÇÃO ENCAIXANTE

Formações encaixantes são aquelas que fazem interface com as formações minerárias, e após remoção destas, são as encaixantes que ficam e, na maioria dos casos, é com a estabilidade delas que o engenheiro geotécnico ou o geólogo de cava lida com maior frequência. Taludes de cavas a céu aberto construídos nas formações encaixantes, de forma geral, contam com instrumentos mais definitivos e profundos, cujo propósito de monitoramento costuma ser o do monitoramento da poro-pressão na avaliação da estabilidade de taludes.

A fase final é aquela que a geometria final já esta definida e a nova rede de fluxo de percolação da água subterrânea já esta redefinida, estável e constante. Nesta fase, é

necessário somente monitorar a variação da poro-pressão atuante na massa de solo/rocha de acordo com as variações de fluxo de percolação controlados pela infiltração da água de precipitação de chuva na bacia de contribuição à qual o talude de cava esta inserido, e pela variação dos níveis de água de reservatórios, lagos e rios adjacentes à cava.

Para atendimento ao proposito de monitoramento apresentado no item 3.1.2, a estabilidade dos taludes de cava com geometria definida frente às variações de poro-pressão mencionadas acima deve ser avaliada na condição drenada comparando o nível piezométrico considerado no modelo com o nível real medido pela instrumentação de campo. Esta comparação pode ser realizada por meio de níveis de controle conforme descrito anteriormente. A instrumentação para atendimento a este propósito de monitoramento deve observar os seguintes critérios em sua fase de projeto:

- **Necessidade de leituras de poro-pressão ou carga piezométrica ao invés da média do nível do lençol freático:** Ver item 3.2.1.1.
- **Leitura de poro-pressão adquirida deve representar aquela atuante próxima à superfície de ruptura do talude:** Indicadores de nível d'água e piezômetros com célula de areia muito longa não são indicados pelos mesmos motivos descritos anteriormente no caso de barragens e pilhas. O posicionamento da célula de areia proposta deve considerar as análises de estabilidade realizadas para a cava e as superfícies de ruptura mais críticas. Além disso, as interfaces entre as diversas litologias de diferentes permeabilidades também devem ser levadas em consideração.
- **Instrumentação deve empregar sensores com cabeamento capaz de ser encurtado de acordo com o avanço da lavra e rebaixamento das bermas:** O avanço da lavra em uma cava à céu aberto é realizada de cima para baixo, e dentre os instrumentos instalados na formação minerária ou em uma formação encaixante que é removida e se torna estéril, alguns deles são destruídos para a remoção do material à sua volta. Para assegurar um histórico contínuo de dados piezométricos, os piezômetros mais indicados nesta ocasião são os sensores piezométricos de corda vibrante fabricados por empresas que também disponibilizam kits especiais para emendas e cortes do cabeamento inserido nos furos de sondagem, desta forma, depois de concluída a remoção do material (e do trecho do instrumento existente), o

cabeamento pode ser recuperado e conduzido novamente à unidade de armazenamento de dados (“datalogger”) para prosseguimento do registro das medições (o cadastro do instrumento deve ser atualizado com a nova cota do terreno).

- **Necessidade de se mitigar falhas no preenchimento e no selamento:**

Piezômetros para monitoramento de cavas a céu aberto são, geralmente, bem profundos e apresentam dificuldades no controle de qualidade de atividades como confecção de célula de areia, selamento adequado do furo e preenchimento adequado do furo. Estas dificuldades operacionais em instalação de instrumentos são, na maioria dos casos, convertidos em falhas e na inutilização do dado adquirido por meio da instrumentação. Desta forma, o instrumento mais indicado neste caso é o piezômetro de corda vibrante instalado pelo método completamente grauteado que garante o preenchimento e o selamento da totalidade do furo simulando a permeabilidade e a resistência à compressão da formação rochosa presente no meio.

### ➤ POÇOS DE REBAIXAMENTO E MONITORAMENTO

Condições de inundação em uma cava a céu aberto, além de instável e insegura, impossibilita a operação das máquinas, equipamentos e mão-de-obra na frente de lavra. A operação de um conjunto de poços de rebaixamento do lençol freático proporciona a formação de cones de rebaixamento na região da cava, mantendo assim o lençol freático a uma profundidade de aproximadamente 10 metros a partir do fundo da cava. A operação destes poços é constante e ininterrupta durante toda a vida útil da cava, demandando assim uma estrutura cara para manutenção e operação destes equipamentos e tubulações formada por equipes especializadas em cada turno e contratos com fornecedores específicos. Desta forma, toda iniciativa para se otimizar e racionalizar o programa de rebaixamento do lençol freático é bem-vinda e representa uma economia significativa à longo prazo.

Para atendimento ao propósito de monitoramento apresentado no item 3.1.4, piezômetros são instalados em formações geológicas alvo pré-determinadas, e podem auxiliar o hidrogeólogo de cava no entendimento do regime hidrogeológico e na avaliação da performance do programa de rebaixamento. A partir daí, medidas

corretivas podem ser adotadas na operação deste sistema. A instrumentação para atendimento a este propósito de monitoramento deve observar os seguintes critérios em sua fase de projeto:

- **Necessidade de leituras de poro-pressão ou carga piezométrica ao invés da média do nível do lençol freático:** Ver item 3.2.1.1.
- **Necessidade de se mitigar falhas no preenchimento e no selamento:** Ver item acima “Formação Encaixante”.

### 3.2.3.2. TALUDES DE INFRAESTRUTURA E ENCOSTAS NATURAIS

Taludes de infraestrutura, conforme apresentado na revisão bibliográfica, são aqueles taludes artificiais de corte ou aterro executados com o objetivo de adequar a topografia do terreno natural para a implantação das estruturas prediais e plantas de beneficiamento de uma mina. Encostas são taludes naturais formados pela ação das intempéries e pelos movimentos na superfície do planeta. O monitoramento piezométrico nestes taludes e encostas se restringe no controle da variação da poro-pressão atuante na massa de solo/rocha de acordo com as variações de fluxo de percolação induzidos pela infiltração da água de precipitação de chuva na bacia de contribuição à qual o talude / encosta esta inserida, e pela variação dos níveis de água de reservatórios, lagos e rios adjacentes.

Para atendimento ao proposito de monitoramento apresentado no item 3.1.2, a estabilidade dos taludes de cava com geometria definida frente às variações de poro-pressão mencionadas acima deve ser avaliada na condição drenada comparando o nível piezométrico considerado no modelo com o nível real medido pela instrumentação de campo. Esta comparação pode ser realizada por meio de níveis de controle conforme descrito anteriormente em alguns casos de monitoramento de barragens, pilhas de estéril e cavas. A instrumentação para atendimento a este propósito de monitoramento deve observar os seguintes critérios em sua fase de projeto:

- **Necessidade de leituras de poro-pressão ou carga piezométrica ao invés da média do nível do lençol freático:** Ver item 3.2.1.1.
- **Leitura de poro-pressão adquirida deve representar aquela atuante próxima à superfície de ruptura do talude:** Indicadores de nível d’água e piezômetros com célula de areia muito longo não são indicados pelos

mesmos motivos descritos acima. O posicionamento da célula de areia proposta deve considerar as análises de estabilidade realizadas para o talude e as superfícies de ruptura mais críticas. Além disso, as interfaces entre as diversas litologias de diferentes permeabilidades também devem ser levadas em consideração.

## **4 RESULTADOS E PROPOSTA DE CONCEITO DE PROJETO PARA INSTRUMENTAÇÃO PIEZOMÉTRICA**

### **4.1. RESULTADOS**

Como resultado deste estudo, são apresentadas propostas conceituais de instrumentação piezométrica para cada elemento das estruturas geotécnicas comumente encontradas no ambiente de mineração. Estas propostas de instrumentação são baseadas nos critérios de projeto analisados no capítulo 3, que por sua vez consideram os propósitos de monitoramento apresentados no mesmo capítulo. Os anexos I e II (QUADROS RESUMO DE ORIENTAÇÃO ÀS ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DE PROJETO DE INSTRUMENTAÇÃO PIEZOMÉTRICA) apresentam de forma prática os critérios de projeto abordados e as orientações para especificação e instalação dos instrumentos de piezometria para cada elemento de cada estrutura geotécnica.

### **4.2. PROPOSTA DE CONCEITO DE PROJETO PARA INSTRUMENTAÇÃO PIEZOMÉTRICA EM BARRAGENS DE MINERAÇÃO**

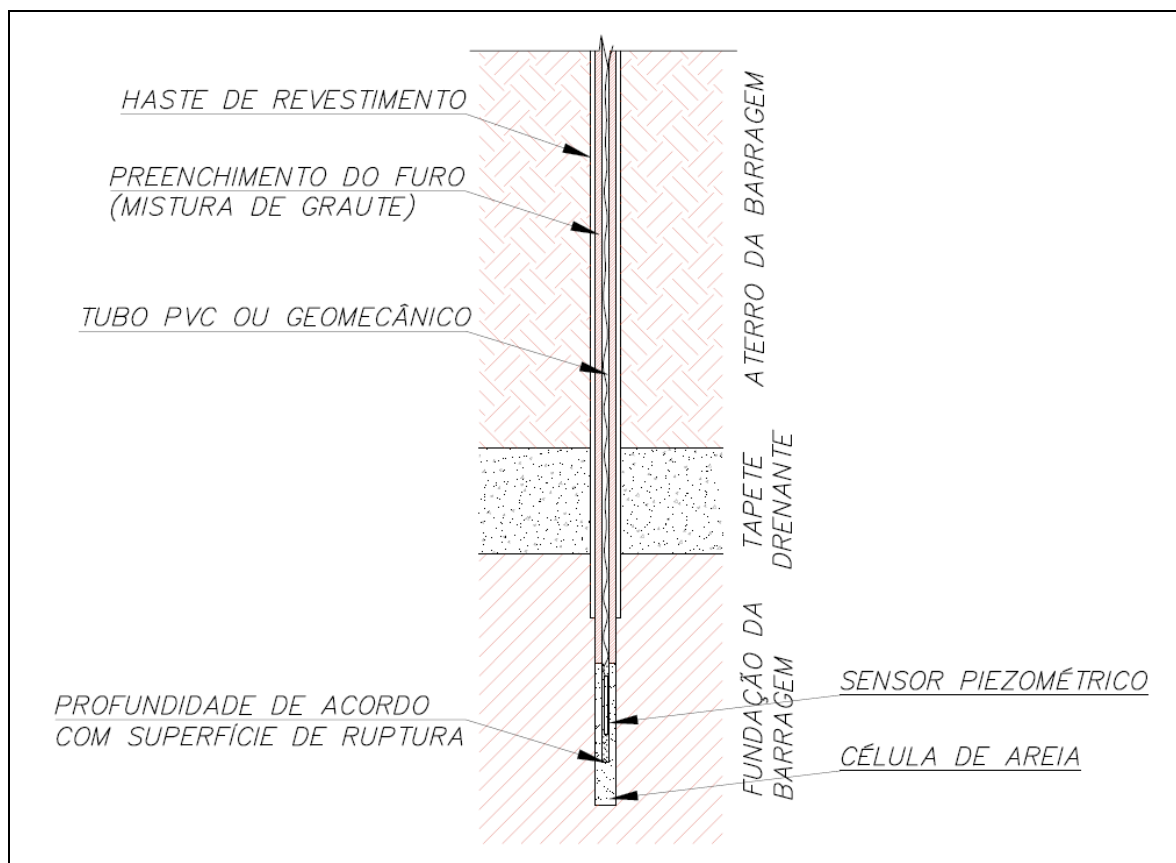
#### **4.2.1. FUNDAÇÃO DA BARRAGEM**

- **Monitoramento de rotina da fundação de barragens:**

Considerando o propósito de monitoramento descrito no item 3.1.2 e os critérios analisados no item 3.2.1.1, a instrumentação mais indicada para avaliação da estabilidade de taludes em superfícies de ruptura que passam pelas fundações de barragens é uma instrumentação composta por piezômetros tipo Casagrande dimensionados conforme a equação 9 do item 2.3.2.1 (Tabela de dimensionamento de célula de areia – Vazão de admissão e fatores de formato) e considerando a vazão

indicada na análise de percolação (Figura 59). Para execução de um isolamento eficiente entre o sistema de drenagem interna e o furo de sondagem, deve-se abandonar as hastes de revestimento do furo à uma profundidade logo acima da célula de areia do instrumento. Preenchimento do furo com argamassa de cimento e bentonita sem a haste de revestimento não é uma opção, pois a mistura iria se desfazer e se diluir no interior do dreno de fundo, contribuindo com sua colmatação. A profundidade de instalação deve ser definida com base nas análises de estabilidade, buscando se atingir a localização das superfícies de ruptura mais críticas. Apesar de não ser essencial para o atendimento a este propósito de monitoramento, a automação da instrumentação traz vários benefícios operacionais à rotina de monitoramento da estrutura, dentre estes se destacam o aumento da confiabilidade do dado, a otimização e racionalização das equipes de monitoramento e a redução da exposição dos membros da equipe aos riscos de tarefas de campo. A automação deste instrumento deve ser realizada posicionando um transdutor de pressão ou um sensor piezométrico no interior do tubo geomecânico até a profundidade da célula de areia (esta profundidade deve ser registrada para realização dos cálculos de conversão, e um cabo de aço deve ser usado para sustentação do sensor).

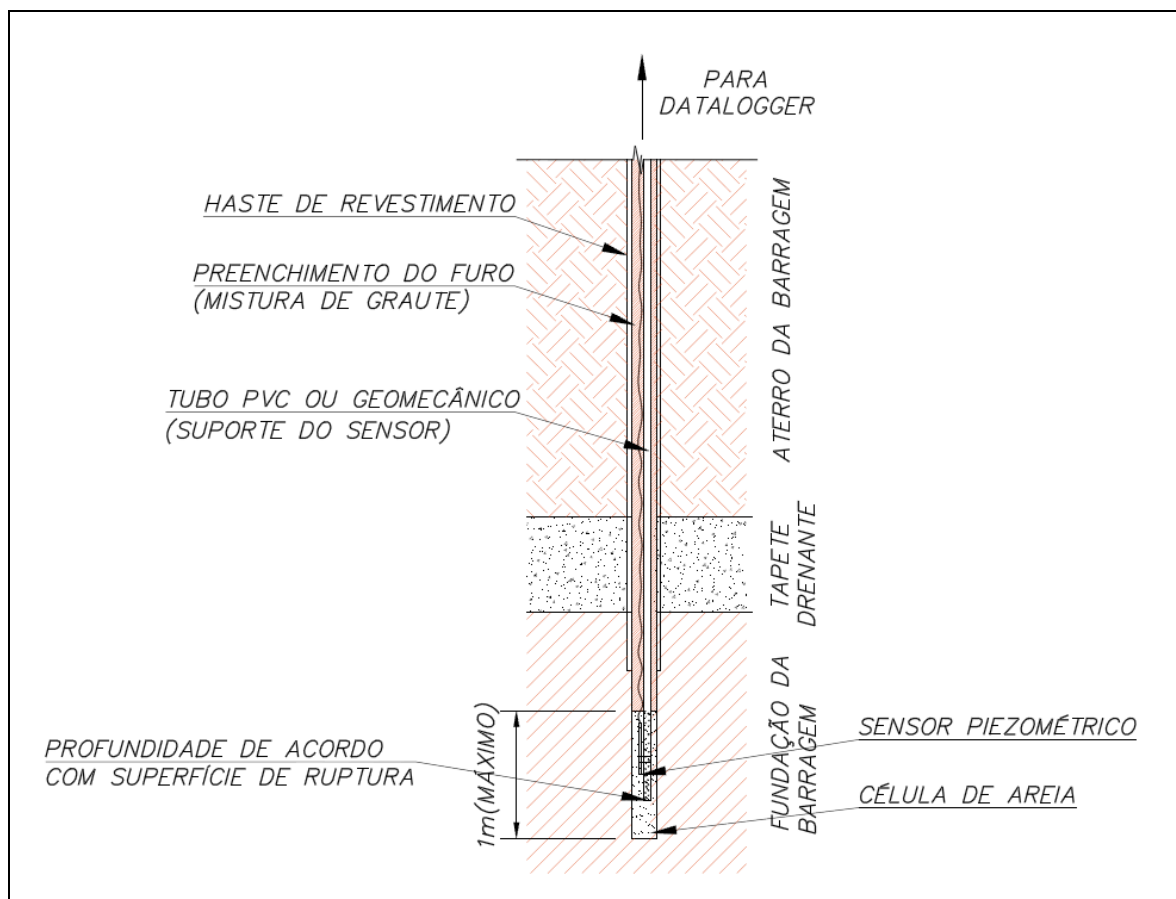




**Figura 4-1 - Perfil construtivo típico de um piezômetro Casagrande instalado na fundação de barragem (Fonte: O autor, 2016).**

- **Monitoramento da fundação durante etapa de alteamento da barragem:**

Considerando o propósito de monitoramento descrito no item 3.1.3 e os critérios analisados no item 3.2.1.1, a instrumentação mais indicada para a avaliação da dissipação do excedente de poro-pressão em fundação de barragem durante fases de alteamento é uma instrumentação composta por sensores piezométricos de corda vibrante instalados pelo método convencional em célula de areia limitada à no máximo 1 metro de altura (Figura 60). Este limite de altura se deve à necessidade de se restringir a extensão do bulbo de pressão do instrumento à região de interesse, ou seja, se a célula de areia for muito grande a leitura adquirida deixará de representar variações de poro-pressão e passará a representar variações de carga piezométrica no trecho. A determinação da altura de 1 metro foi adotada pela facilidade do controle de qualidade na ocasião da construção.



**Figura 4-2 - Perfil construtivo típico de um piezômetro de corda vibrante instalado pelo método convencional em fundação de barragem (Fonte: O autor, 2016).**

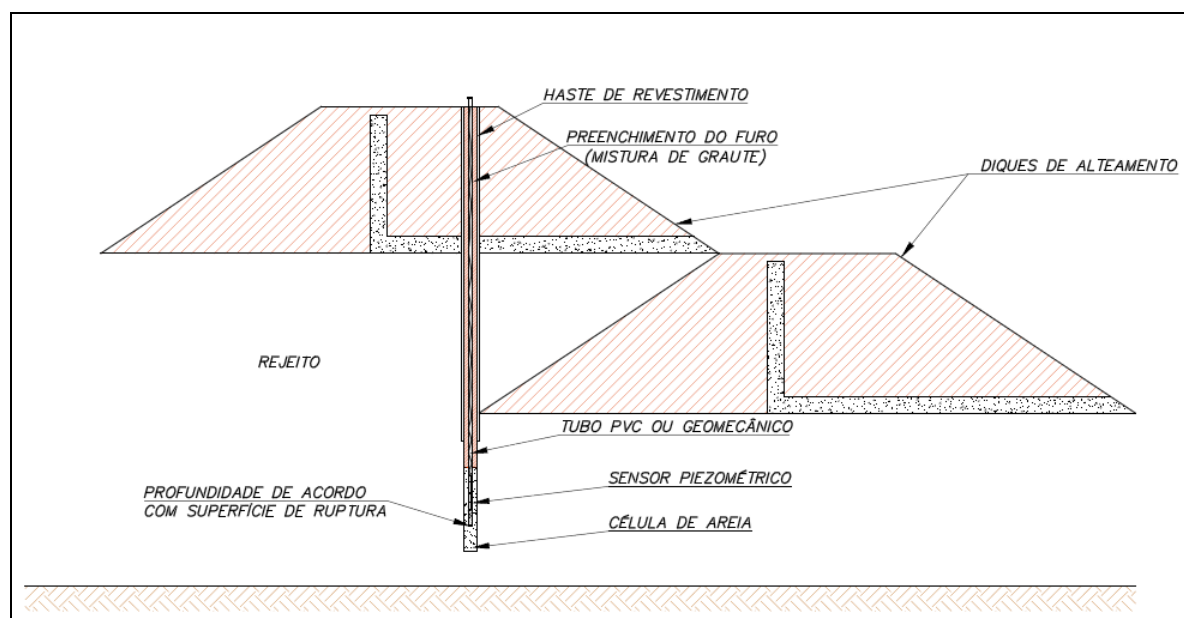
O mesmo procedimento descrito acima para se isolar a camada de dreno de fundo do furo de sondagem deve ser empregado também nesta instalação. A unidade de armazenamento de dados (“datalogger”) e o modem de transmissão remotas dos dados devem ser configuráveis de forma que se permita o registro e a transmissão dados a uma frequência de no mínimo 15 minutos de intervalo.

#### 4.2.2. MACIÇO CONSTRUÍDO COM O REJEITO ARENOSO

- **Monitoramento de rotina do maciço de rejeito:**

Considerando o propósito de monitoramento descrito no item 3.1.2 e os critérios analisados no item 3.2.1.2, e considerando também que os instrumentos não tenham sido instalados ao longo dos diversos alteamentos por restrições operacionais, a instrumentação mais indicada para avaliação da estabilidade de taludes em maciços de barragens de rejeito é composta por piezômetros tipo Casagrande dimensionados

conforme a equação 9 do item 2.3.2.1 (Tabela de dimensionamento de célula de areia – Vazão de admissão e fatores de formato) e considerando a vazão indicada na análise de percolação (Figura 61).



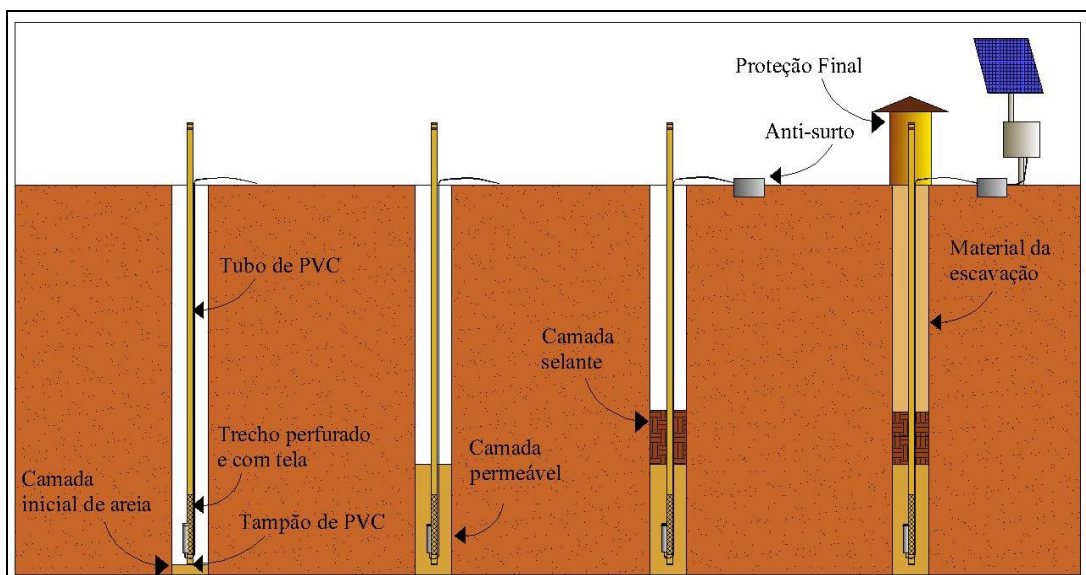
**Figura 4-3 - Perfil construtivo típico de um piezômetro Casagrande instalado em maciço de barragem de rejeito (O autor, 2016).**

Para execução de um isolamento eficiente entre as diversas camadas do sistema de drenagem interna e o furo de sondagem, deve-se abandonar as hastes de revestimento do furo a uma profundidade logo acima da célula de areia. Preenchimento do furo com argamassa de cimento e bentonita sem a haste de revestimento não é uma opção, pois a mistura iria de se desfazer e se diluir no interior das camadas drenantes, contribuindo com sua colmatção. A profundidade de instalação deve ser definida com base nas análises de estabilidade, buscando se atingir a localização das superfícies de ruptura mais críticas. Apesar de não ser essencial para o atendimento a este propósito de monitoramento, a automação da instrumentação traz vários benefícios operacionais à rotina de monitoramento da estrutura, e para tal o mesmo procedimento descrito no item 4.2.1 deve ser observado.

- **Monitoramento do maciço de rejeito durante operação de alteamento:**

Considerando o propósito de monitoramento descrito no item 3.1.3 e os critérios analisados no item 3.2.1.2, e considerando também que os instrumentos não tenham

sido instalados ao longo dos diversos alteamentos por restrições operacionais, a instrumentação mais indicada para a avaliação da dissipação do excedente de poro-pressão no maciço de barragem de rejeito durante fases de alteamento/operação é uma instrumentação composta por sensores piezométricos de corda vibrante fabricados por empresas que também disponibilizam ao mercado conjuntos de emenda de cabeamento, instalados pelo método convencional em célula de areia limitada à no máximo 1 metro de altura (figuras 62 e 63). Este limite de altura, assim como no item anterior, se deve à necessidade de se restringir a extensão do bulbo de pressão do instrumento à região de interesse, ou seja, se a célula de areia for muito grande a leitura adquirida deixará de representar variações de poro-pressão e passará a representar variações de carga piezométrica no trecho. A determinação da altura de 1 metro foi adotada pela facilidade do controle de qualidade na ocasião da construção. A execução de um isolamento eficiente entre o sistema de drenagem interna e o furo de sondagem descrita no item 4.2.1 também é necessária nesta instalação. A unidade de armazenamento de dados (“datalogger”) e o modem de transmissão remota dos dados também devem ser configuráveis de forma que se permita o registro e a transmissão dados a uma frequência de no mínimo 15 minutos de intervalo.



**Figura 4-4 - Sequência de instalação do piezômetro de corda-vibrante pelo método Convencional (Fonte: VALE / Coffey, 2016).**

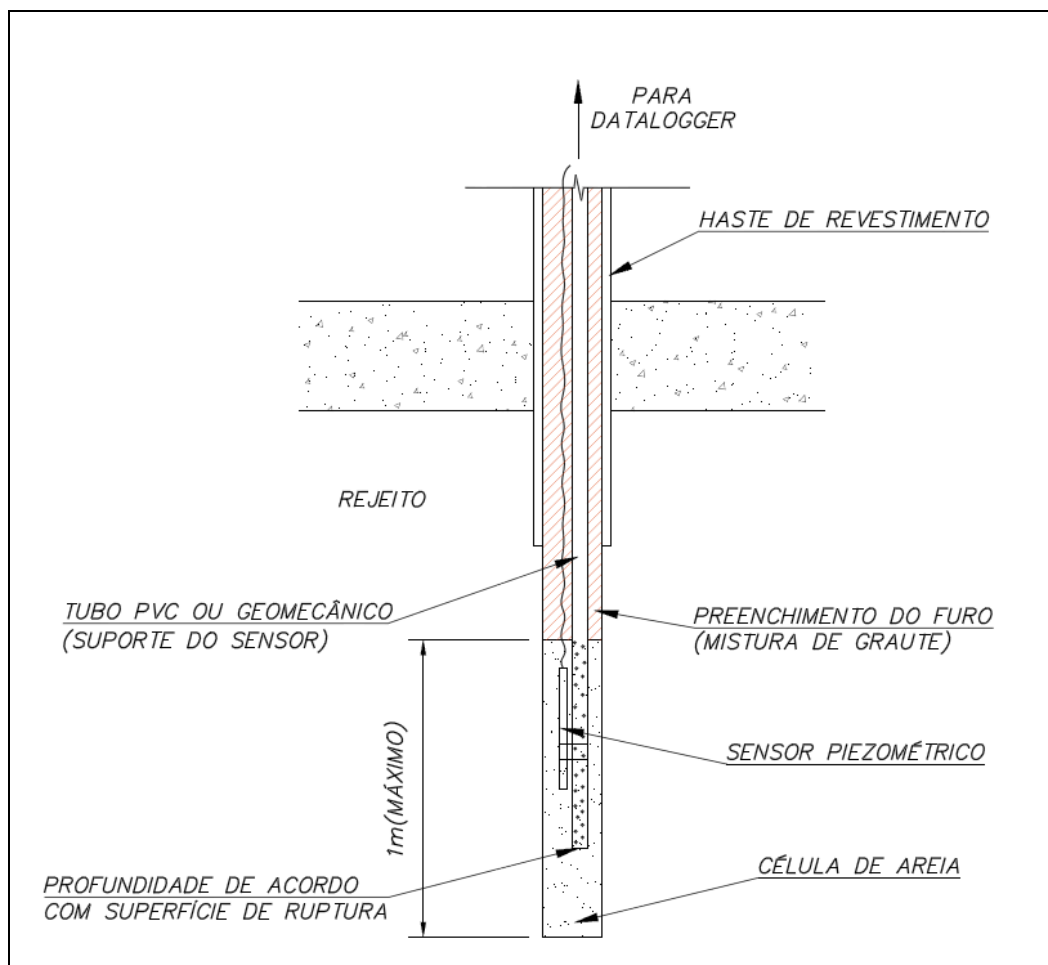


Figura 4-5 - Detalhe do perfil construtivo típico de um piezômetro de corda vibrante instalado pelo método convencional em maciço de barragem de rejeito (Fonte: O autor, 2016).

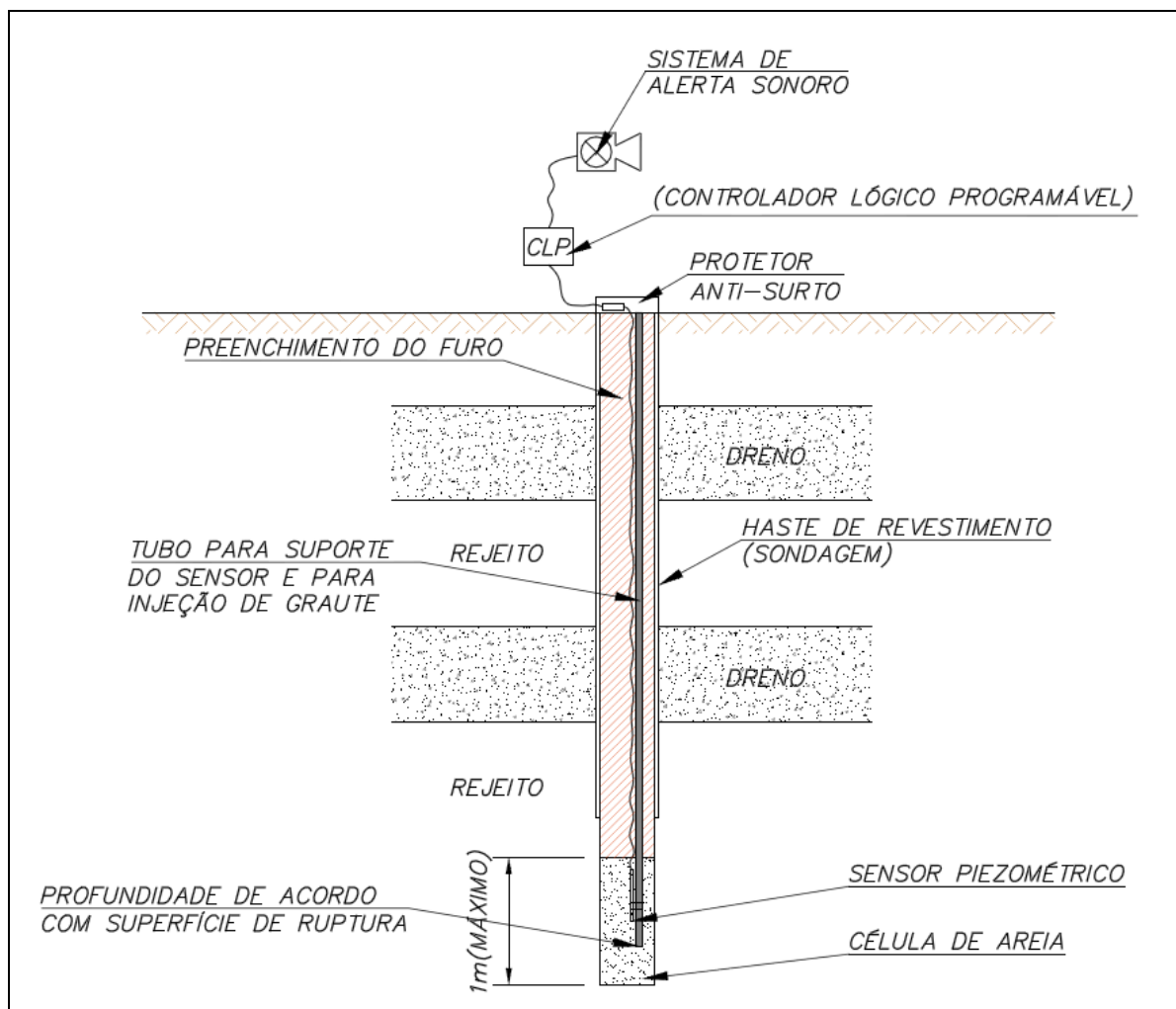
- **Monitoramento do maciço de rejeito considerando efeitos da sismologia regional:**

Considerando o propósito de monitoramento descrito no item 3.1.9 e os critérios analisados no item 3.2.1.2, a instrumentação mais indicada para avaliação da dissipação do excedente de poro-pressão em maciço de barragem de rejeito logo após a ocorrência de um evento sismológico é uma instrumentação composta por sensores piezométricos de corda-vibrante, instalados pelo método convencional em célula de areia limitada à no máximo 0,5 metro de altura (Figura 64). Este limite de altura também se deve à necessidade de se restringir a extensão do bulbo de pressão do instrumento à região de interesse. Especialmente neste caso do monitoramento da dissipação do excedente de poro-pressão após sismos, a célula de areia deve ser pequena para reduzir ao máximo a distância de percolação das variações de poro-pressão, conseqüentemente reduzir ao

máximo o tempo de resposta do instrumento. A determinação da altura de 0,5 metro foi adotada pela facilidade no controle de qualidade na ocasião da construção. O mesmo isolamento entre o sistema de drenagem interna e o furo de sondagem descrito no item 4.2.1 deve ser empregado nesta instalação. O sistema de gerenciamento dos dados deve ser viabilizado por meio de controladores lógico programáveis (CLP) que permita a aquisição e transmissão de dados com uma frequência mínima de 1 leitura por minuto e que realize interfaces com um sistema de monitoramento e com um sistema de alerta sonoro instalado em áreas alvo à jusante da barragem e equipado com sistema de redundância de sinal e com alto-falantes multidirecionais e com tons configuráveis ( “dataloggers”, por não serem capazes de fazer interface direta e automática com os sistemas de monitoramento e alerta, não são adequados para este fim – Figura 65).



**Figura 4-6 - “Datalogger” vs. CLP – Os “dataloggers” são menos gerenciáveis que os CLPs e, portanto não viabilizam o alerta em massa sem a decisão humana (Fonte: Adaptado do website Campbell).**



**Figura 4-7 - Perfil construtivo típico de um piezômetro de corda vibrante instalado pelo método convencional em maciço de barragem de rejeito (Fonte: O autor, 2016).**

#### 4.2.3. MACIÇO DE TERRA

- **Monitoramento de rotina do maciço de terra:**

Considerando o propósito de monitoramento descrito no item 3.1.5 e os critérios analisados no item 3.2.1.3, a instrumentação mais indicada para a avaliação do funcionamento de sistema de drenagem interna em maciços de barragem de terra é uma instrumentação composta por indicadores de nível d'água ou piezômetros tipo Casagrande dimensionados conforme a equação 8 do item 2.3.2.1 (Tabela de dimensionamento de célula de areia – Vazão de admissão e fatores de formato) e considerando a vazão indicada na análise de percolação (Figura 66). A profundidade de instalação deve abranger a altura do maciço no ponto de instalação, porém, sem atingir sua fundação ou dreno de fundo. O selamento e preenchimento do restante do furo de

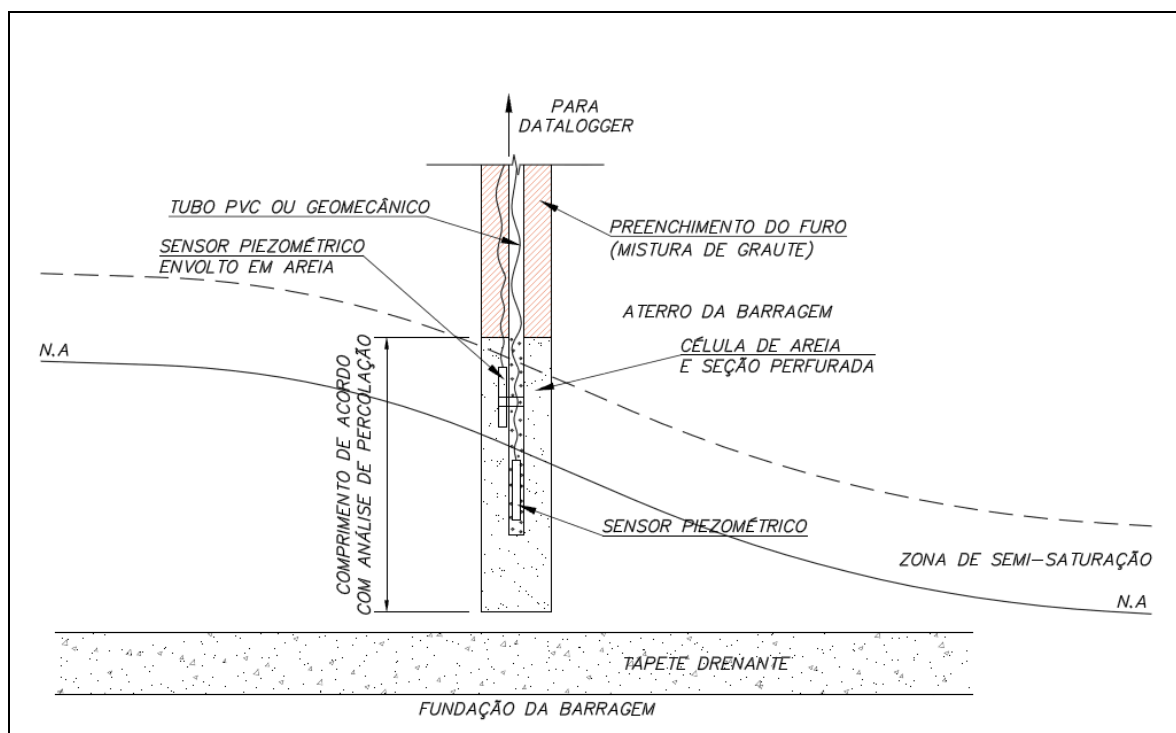


sondagem deve ser realizado com emprego de mistura de cimento, água e bentonita numa proporção equivalente à uma permeabilidade na ordem de  $10^{-10}$  bombeada a baixas pressões de baixo para cima desde o topo da célula de areia. Apesar de não ser essencial para o atendimento a este propósito de monitoramento, a automação da instrumentação traz vários benefícios operacionais à rotina de monitoramento da estrutura, e pode ser viabilizada conforme descrito no item 4.2.1. No caso da célula de areia estiver localizada na zona de semi-saturação, um segundo sensor deverá ser instalado do lado de fora do tubo e envolto em areia, visando assim a leitura da poro-pressão negativa (esta iniciativa deve ser tratada como experimental, já que correlações entre as leituras de poro-pressão negativa provenientes de sensor piezométrico e as provenientes de tensiômetros ainda não foram experimentadas com exatidão – Figura 67). Um pluviógrafo equipado com uma unidade própria de armazenagem de dados (“datalogger”) ou conectado ao “datalogger” da estação de monitoramento deve ser empregado no monitoramento da precipitação. Um medidor de vazão dimensionado conforme o item 2.3.5.2 deste estudo deve ser construído na saída do dreno de fundo da barragem. Este medidor de vazão deve também ser conectado a um “datalogger” para registro horário das vazões.



**Figura 4-8 - Detalhe da fixação do sensor no lado externo do tubo (Fonte: O autor, 2015).**



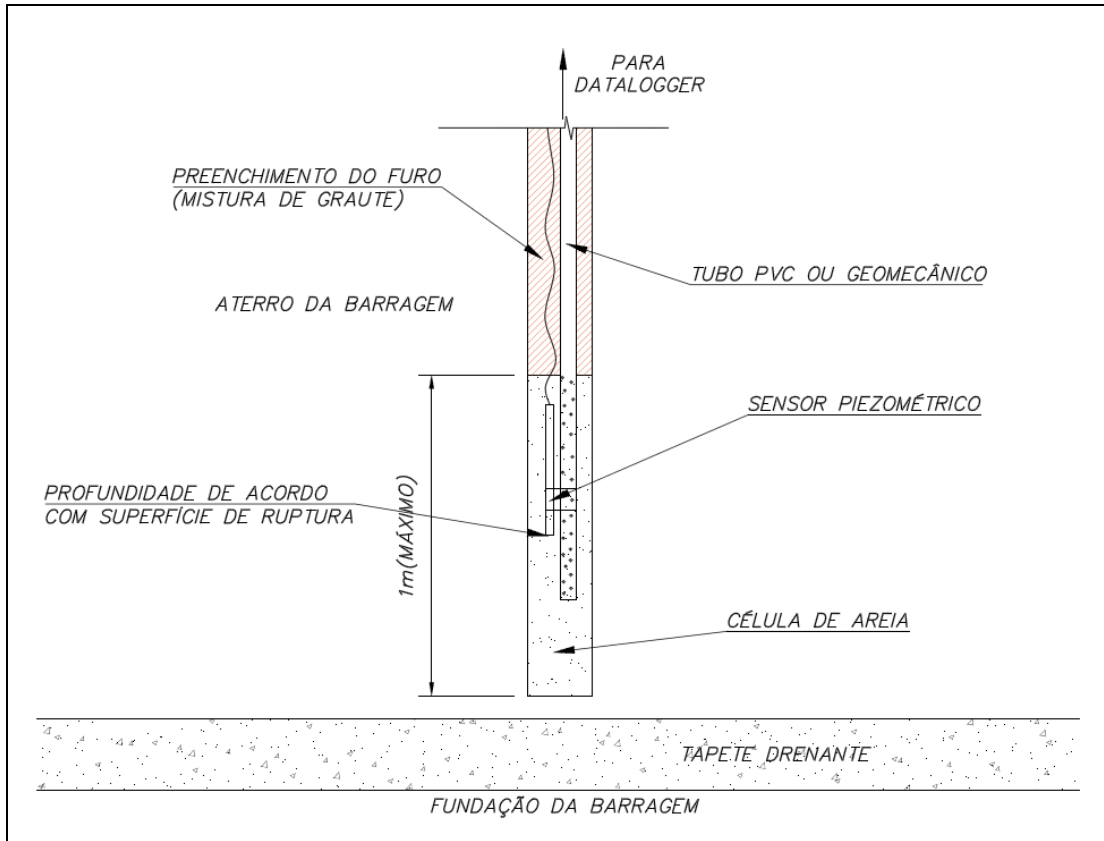


**Figura 4-9 - Perfil construtivo típico de um INA ou piezômetro Casagrande instalado em maciço de barragem de terra.**

- **Monitoramento do maciço de terra durante etapas de alteamento da barragem:**

Considerando o propósito de monitoramento descrito no item 3.1.3 e os critérios analisados no item 3.2.1.3, a instrumentação mais indicada para a avaliação da dissipação do excedente de poro-pressão em maciços de terra durante fases de alteamento é uma instrumentação composta por sensores piezométricos de corda vibrante fabricados por empresas que também disponibilizam ao mercado conjuntos de emenda de cabeamento, instalados pelo método convencional em célula de areia limitada à no máximo 1 metro de altura (Figura 68). Assim como para maciços de rejeito, este limite de altura se deve à necessidade de se restringir a extensão do bulbo de pressão do instrumento à região de interesse. A determinação da altura de 1 metro foi adotada pela facilidade do controle de qualidade na ocasião da construção. O selamento e preenchimento do restante do furo de sondagem deve ser realizado conforme descrito no item acima. A unidade de armazenamento de dados (“datalogger”) e o modem de transmissão remotas dos dados devem ser configuráveis de forma que se permita o

registro e a transmissão dados a uma frequência de no mínimo 15 minutos de intervalo, conforme item 4.2.2.



**Figura 4-10 - Detalhe de um perfil Construtivo típico de um Piezômetro de corda vibrante instalado pelo método convencional em maciço de terra (Fonte: O autor, 2016).**

#### 4.2.4. MACIÇO DE ENRONCAMENTO

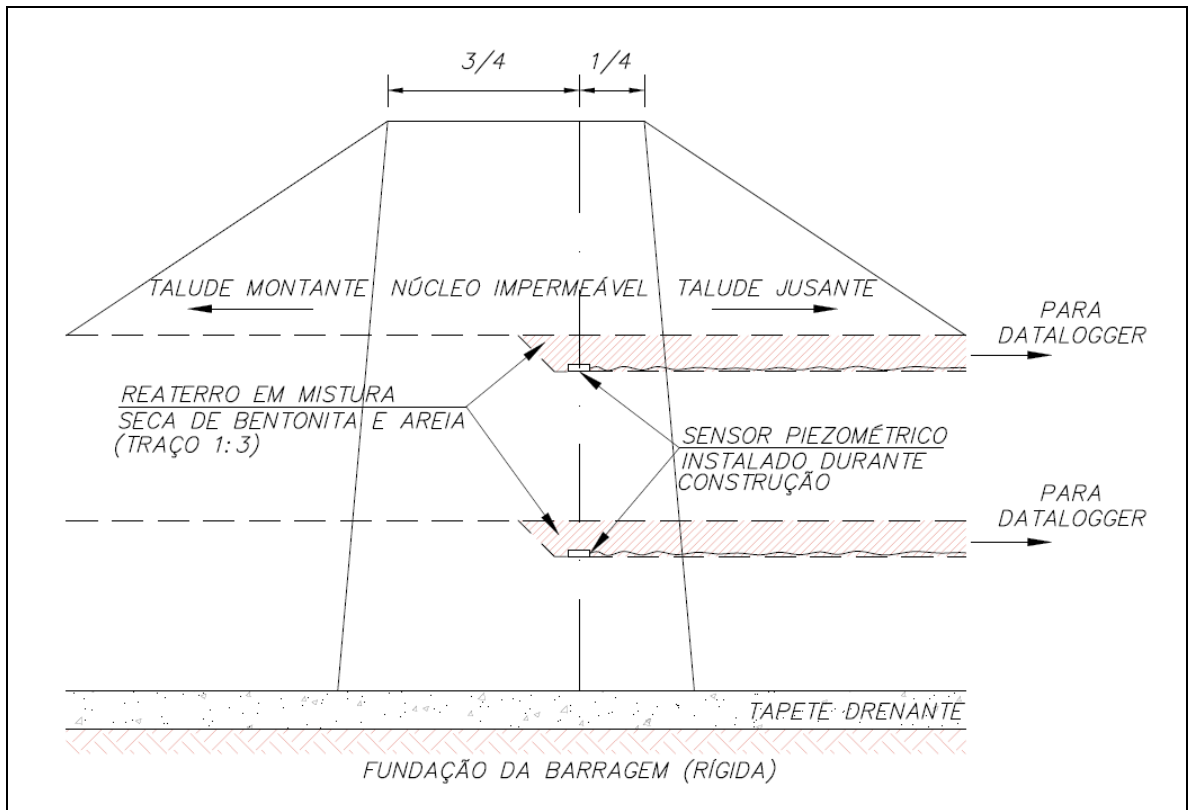
Considerando o propósito de monitoramento descrito no item 3.1.5 e os critérios analisados no item 3.2.1.4, a instrumentação mais indicada para a avaliação do funcionamento das camadas de transição e sistema de drenagem interna em maciços de enrocamento é uma instrumentação composta por um pluviógrafo equipado com uma unidade própria de armazenagem de dados (“datalogger”) ou conectado ao “datalogger” da estação de monitoramento deve ser empregado no monitoramento da precipitação (figura 69). Um medidor de vazão dimensionado conforme o item 2.3.5.2 deste estudo deve ser construído na saída do dreno de fundo da barragem. Este medidor de vazão deve também ser conectado a um “datalogger” para registro horário das vazões (figura 69).



**Figura 4-11 - Medidor de vazão e pluviômetro instalados em mina (Fonte: O autor, 2015).**

#### 4.2.5. NÚCLEO IMPERMEÁVEL

Considerando o propósito de monitoramento descrito no item 3.1.8 e os critérios analisados no item 3.2.1.5, a instrumentação mais indicada para a avaliação da dissipação do excedente de poro-pressão durante processos de adensamento e expansão da argila empregada em núcleos impermeabilizantes é uma instrumentação composta por sensores piezométricos de corda vibrante instalados durante a construção do núcleo (figuras 70, 71 e 72). Segundo Fell *et al.* (2015), os cabos devem ser dispostos em valas não retilíneas, o reaterro deve ser executado com uso de mistura seca de bentonita e areia (traço 1:3 - em peso) compactada no mesmo grau de compactação do núcleo. Um detalhe importante quando se especifica o uso deste tipo de método de preenchimento da vala é a necessidade de se posicionar um sensor piezométrico extra do mesmo modelo do primeiro sensor (duplicado). Trata-se de uma medida preventiva que visa garantir a funcionalidade do instrumento caso ocorra a falha de um dos sensores. Vale lembrar que o custo de se acrescentar mais um sensor piezométrico é irrisório comparado com o todo custo de execução e supervisão de uma instrumentação deste tipo.



**Figura 4-12 - Perfil Construtivo típico de um Piezômetro de corda vibrante instalado em núcleo impermeabilizante durante sua construção (Fonte: O autor, 2016).**



**Figura 4-13 - Sensor piezométrico instalado durante construção do aterro (Fonte: Yassuda, 2008).**

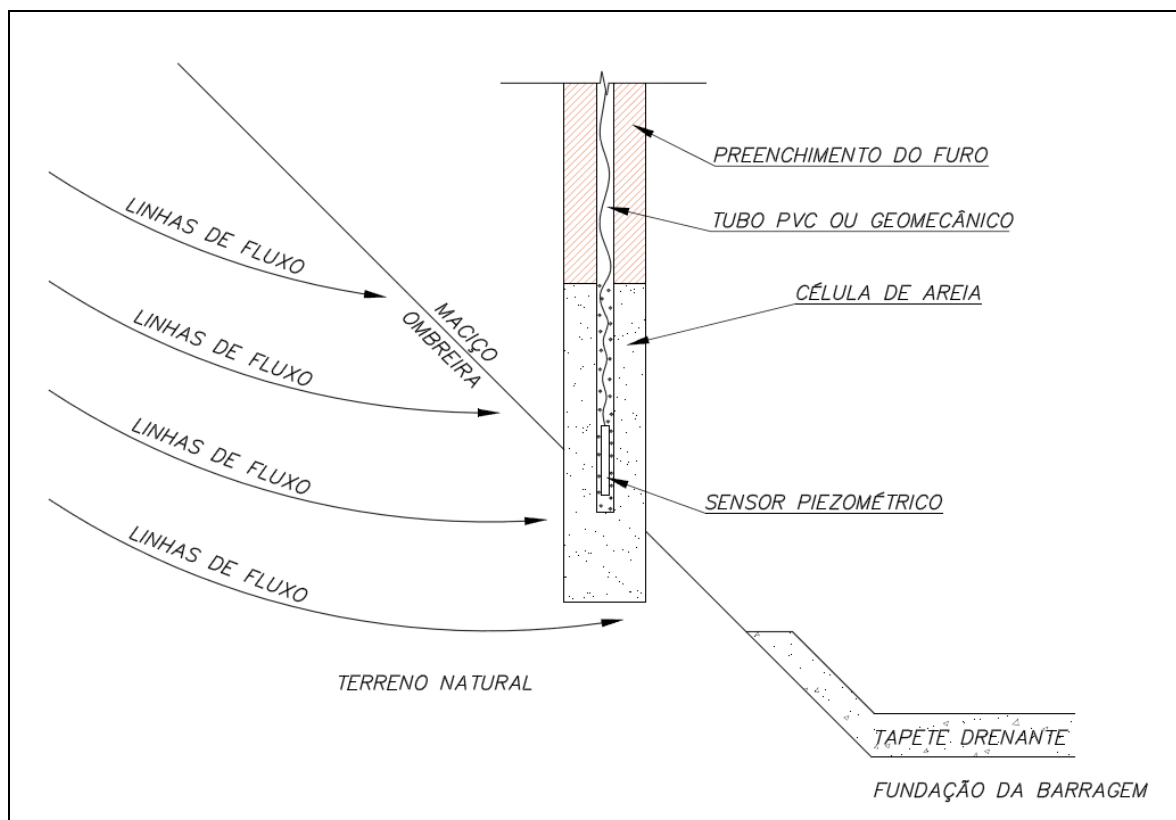




**Figura 4-14 - Detalhe da condução dos cabos no sentido jusante (Fonte: Yassuda, 2008) – Preferencialmente, a condução dos cabos deve ser direcionada para as ombreiras de forma a não favorecer a percolação de água e subsequente surgência no talude jusante.**

#### 4.2.6. INTERFACE OMBREIRA E MACIÇO

Considerando o propósito de monitoramento descrito no item 3.1.2 e os critérios analisados no item 3.2.1.6, a instrumentação mais indicada para a avaliação da estabilidade dos taludes em áreas de interface ombreira e maciço é uma instrumentação composta por piezômetros tipo Casagrande dimensionados conforme a equação 9 do item 2.3.2.1 (Tabela de dimensionamento de célula de areia – Vazão de admissão e fatores de formato) e considerando a vazão indicada na análise de percolação (Figura 73). A profundidade de instalação deve ser definida com base nas análises de estabilidade, buscando se atingir a localização das superfícies de ruptura mais críticas nas seções geológicas das ombreiras. Apesar de não ser essencial para o atendimento a este propósito de monitoramento, a automação da instrumentação traz vários benefícios operacionais à rotina de monitoramento da estrutura, esta automação pode ser viabilizada em observância do procedimento descrito no item 4.2.1.



**Figura 4-15 - Detalhe de um perfil construtivo típico de um Piezômetro Casagrande instalado na interface entre ombreira e maciço.**

#### 4.2.7. RESERVATÓRIO DE BARRAGEM

Considerando os critérios analisados no item 3.2.1.7, a instrumentação mais indicada para atendimento ao monitoramento em reservatórios é uma instrumentação composta por um pluviógrafo equipado com uma unidade própria de armazenagem de dados (“datalogger”) ou conectado ao “datalogger” da estação de monitoramento, que será empregado no monitoramento da precipitação. Uma régua linimétrica equipada com um transdutor de pressão (conforme item 2.3.5.3) instalada em um tubo fixo e perfurado na margem do reservatório também é necessária, este transdutor de pressão (ou sensor piezométrico) deve também ser conectado a um “datalogger” para registro horário do N.A. No caso de barragens de rejeito, o nível de água do reservatório deve ser correlacionado ao comprimento da praia de rejeitos, e é recomendada a realização de conferências regulares por meio de levantamento topográfico.

#### 4.3. PROPOSTA DE CONCEITO DE PROJETO PARA INSTRUMENTAÇÃO PIEZOMÉTRICA EM PILHAS DE ESTÉRIL

##### 4.3.1. FUNDAÇÃO DA PILHA DE ESTÉRIL

- **Monitoramento de rotina da fundação das PDEs:**

Considerando o propósito de monitoramento descrito no item 3.1.2 e os critérios analisados no item 3.2.2.1, a instrumentação mais indicada para a avaliação da estabilidade em fundações de pilhas de estéril é uma composta por piezômetros tipo Casagrande dimensionados conforme a equação 9 do item 2.3.2.1 (Tabela de dimensionamento de célula de areia – Vazão de admissão e fatores de formato) e considerando a vazão indicada na análise de percolação (Figura 74). O isolamento entre o sistema de drenagem interna e o furo de sondagem descrito no item 4.2.1 é necessário também a esta instalação por se tratar de instrumentação instalada em fundação. A profundidade de instalação deve ser definida com base nas análises de estabilidade, buscando se atingir a localização das superfícies de ruptura mais críticas.

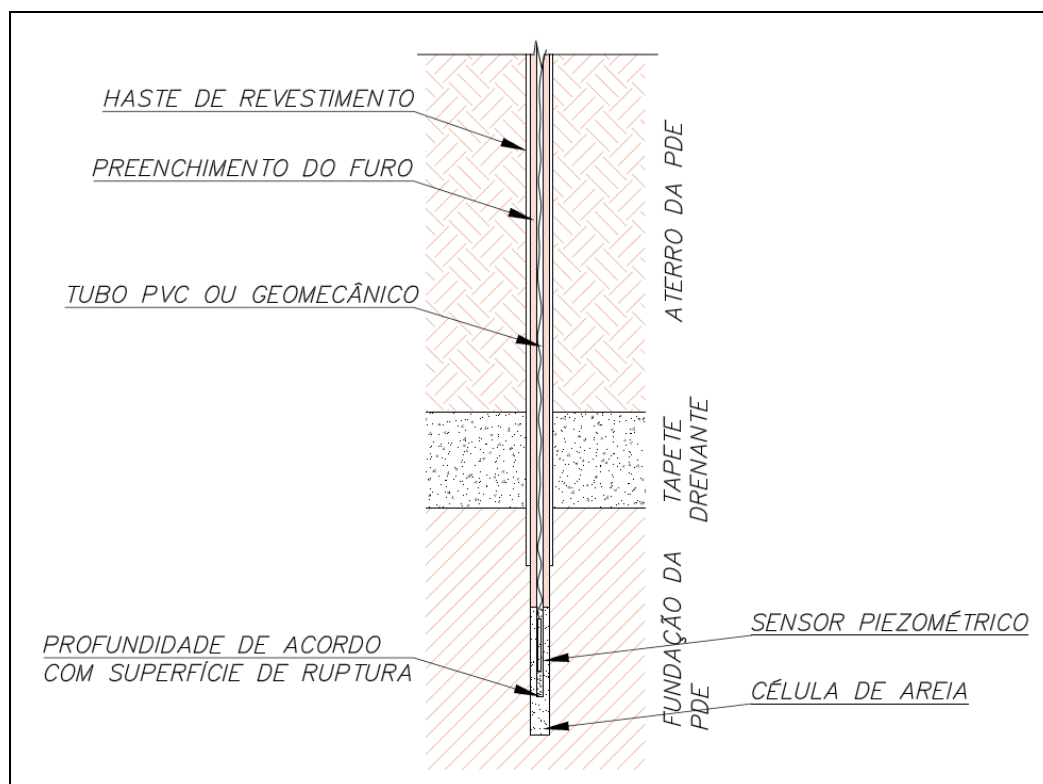
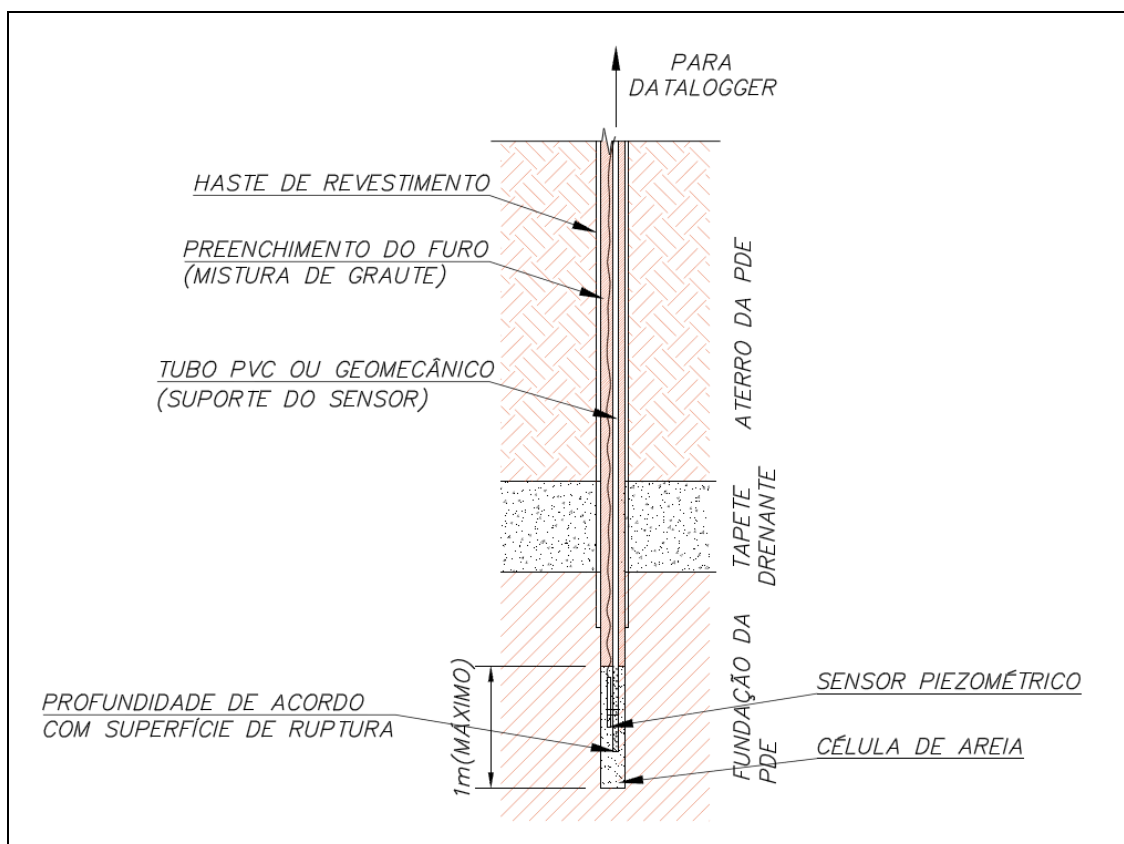


Figura 4-16 - Perfil construtivo típico de um piezômetro Casagrande instalado em fundação de PDE (Fonte: O autor, 2016).

A automação desta instrumentação não é essencial para o atendimento a este propósito de monitoramento, porém traz vários benefícios operacionais à rotina de monitoramento da estrutura, e pode ser viabilizada conforme descrito no item 4.2.1.

- **Monitoramento da fundação das PDEs durante operação/alteamento:**

Considerando o propósito de monitoramento descrito no item 3.1.3 e os critérios analisados no item 3.2.2.1, a instrumentação mais indicada para a avaliação da dissipação do excedente de poro-pressão atuante em fundações de pilhas de estéril durante alteamento/operação é uma instrumentação composta por sensores piezométricos de corda vibrante instalados pelo método convencional em célula de areia limitada à no máximo 1 metro de altura (Figura 75). Este limite de altura, assim como no item anterior, se deve à necessidade de se restringir a extensão do bulbo de pressão do instrumento à região de interesse. A determinação da altura de 1 metro foi adotada pela facilidade do controle de qualidade na ocasião da construção.



**Figura 4-17 - Perfil construtivo típico de um piezômetro de corda vibrante instalado pelo método convencional em fundação de PDE (Fonte: O autor, 2016).**



O isolamento entre o sistema de drenagem interna e o furo de sondagem é alcançado conforme descrito no item 4.2.1. A unidade de armazenamento de dados (“datalogger”) e o modem de transmissão remotas dos dados também devem ser configuráveis conforme descrito no item 4.2.1.

#### 4.3.2. ATERRO

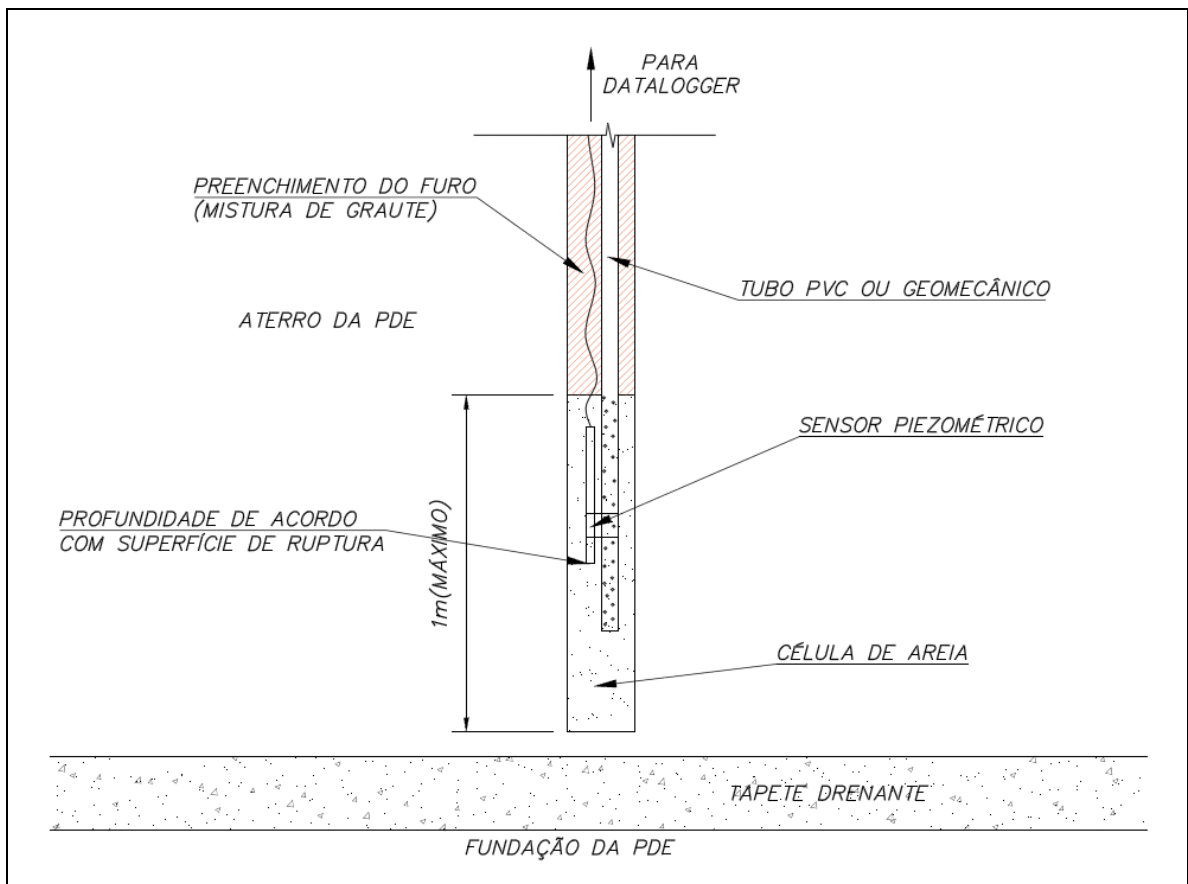
- **Monitoramento do corpo das PDEs durante operação/alteamento:**

Considerando o propósito de monitoramento descrito no item 3.1.3 e os critérios analisados no item 3.2.2.2, a instrumentação mais indicada para a avaliação da dissipação do excedente da poro-pressão atuante no corpo de pilhas de estéril durante sua operação é uma instrumentação composta por sensores piezométricos de corda vibrante fabricados por empresas que também disponibilizam ao mercado conjuntos de emenda de cabeamento, instalados pelo método convencional em célula de areia limitada à no máximo 1 metro de altura (Figura 76). Assim como na fundação, este limite de altura se deve à necessidade de se restringir a extensão do bulbo de pressão do instrumento à região de interesse. A determinação da altura de 1 metro foi adotada pela facilidade do controle de qualidade na ocasião da construção.



**Figura 4-18 - Injeção de graute sob baixa pressão e detalhe da conexão da mangueira (Fonte: O autor, 2015).**

O selamento e preenchimento do restante do furo de sondagem deve ser realizado conforme descrito no item 4.2.3 (mistura de graute à uma permeabilidade na ordem de  $10^{-10}$  bombeada de baixo para cima – Figura 77). A unidade de armazenamento de dados (“datalogger”) e o modem de transmissão remotas dos dados devem ser configuráveis conforme descrito no item 4.2.1.

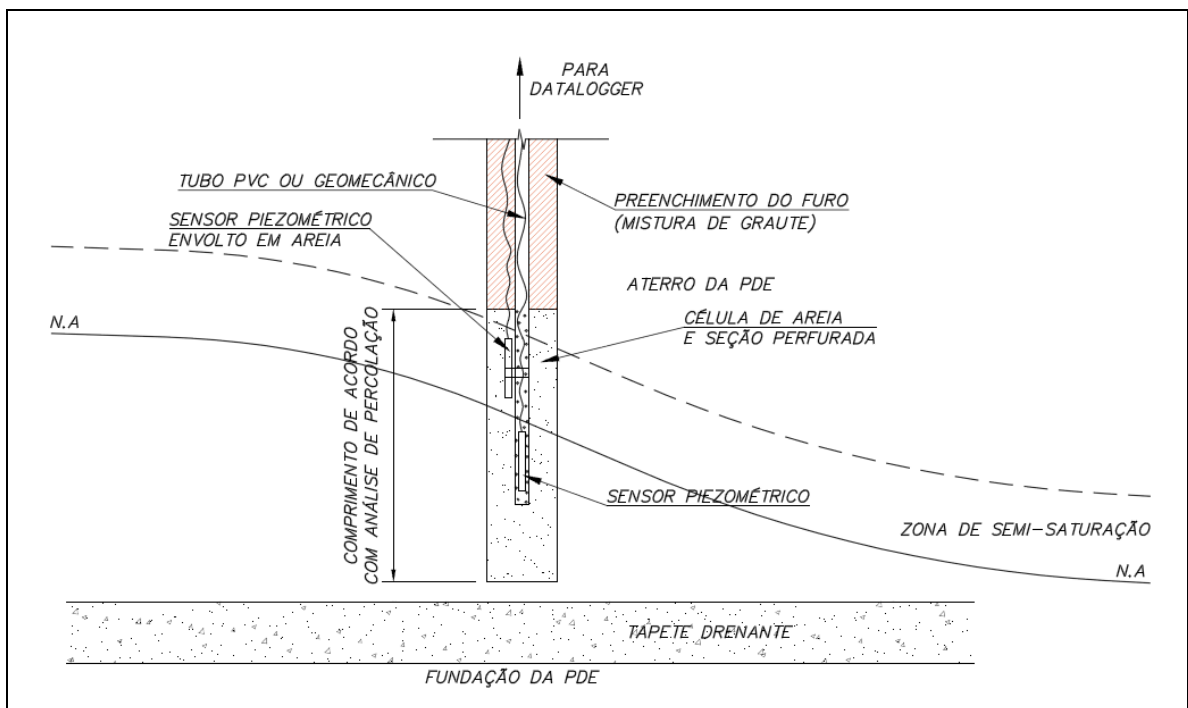


**Figura 4-19- Perfil construtivo típico de um Piezômetro de corda vibrante instalado pelo método convencional no corpo de PDE (O autor, 2016).**

- **Monitoramento do corpo das PDEs paralisadas ou em processo de fechamento:**

Considerando o propósito de monitoramento descrito no item 3.1.5 e os critérios analisados no item 3.2.2.2, a instrumentação mais indicada para a avaliação da estabilidade de taludes em aterros de pilhas de estéril é uma instrumentação composta por indicadores de nível d’água ou piezômetros tipo Casagrande dimensionados conforme a equação 8 do item 2.3.2.1 (Tabela de dimensionamento de célula de areia –

Vazão de admissão e fatores de formato) e considerando a vazão indicada na análise de percolação (Figura 78). A profundidade de instalação deve abranger a altura da PDE no ponto de instalação, porém, sem atingir sua fundação ou dreno de fundo. O selamento e preenchimento do restante do furo de sondagem deve ser realizado conforme descrito no item 4.2.3. A automação deste tipo de instrumentação não é essencial para o atendimento a este propósito de monitoramento, porém traz vários benefícios operacionais à rotina de monitoramento da estrutura, e pode ser viabilizado conforme descrito no item 4.2.1. No caso da célula de areia estiver localizada na zona de semi-saturação, um segundo sensor deverá ser instalado do lado de fora do tubo e envolto em areia, visando assim a leitura da poro-pressão negativa conforme descrito no item 4.2.3. Um pluviógrafo equipado com uma unidade própria de armazenagem de dados (“datalogger”) ou conectado ao “datalogger” da estação de monitoramento deve ser empregado no monitoramento da precipitação. Um medidor de vazão dimensionado conforme item 2.3.5.2 deste estudo deve ser construído na saída do dreno de fundo da PDE. Este medidor de vazão deve também ser conectado a um “datalogger” para registro horário das vazões.



**Figura 4-20 - Detalhe de um perfil Construtivo típico de Piezômetro Casagrande instalado no corpo de PDE (O autor, 2016).**



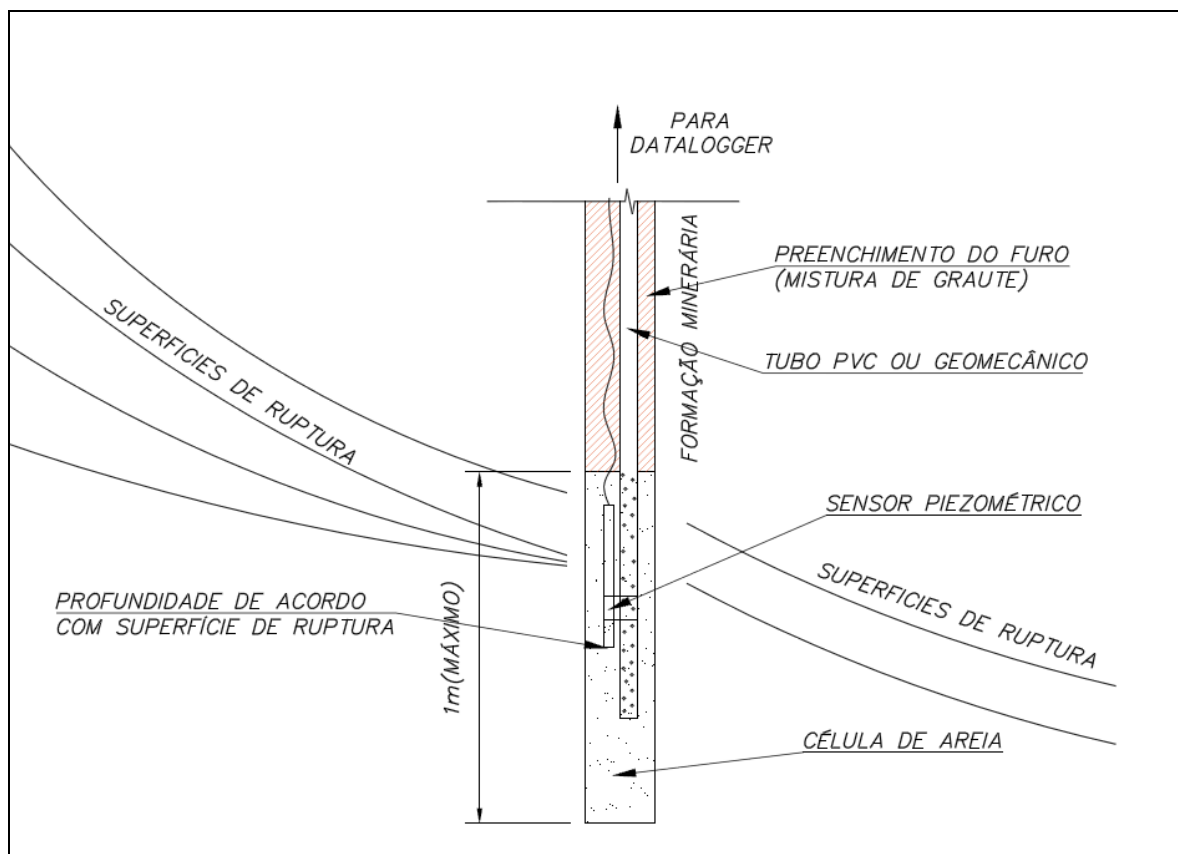
#### 4.4. PROPOSTA DE CONCEITO DE PROJETO PARA INSTRUMENTAÇÃO PIEZOMÉTRICA EM TALUDES

##### 4.4.1. TALUDE DE CAVA A CÉU ABERTO

- **Monitoramento de taludes de cava em formação minerária (fase de término de escavação):**

Considerando o propósito de monitoramento descrito no item 3.1.3 e os critérios analisados no item 3.2.3.1, a instrumentação mais indicada para a avaliação da dissipação do excesso de poro-pressão em taludes de cava a céu aberto logo após a escavação de um grande volume de material é uma instrumentação composta por sensores piezométricos de corda vibrante instalados pelo método convencional em célula de areia limitada à no máximo 1 metro de altura (Figura 80). Este limite de altura se deve à necessidade de se restringir a extensão do bulbo de pressão do instrumento à região de interesse. A determinação da altura de 1 metro foi adotada pela facilidade no controle de qualidade na ocasião da construção. O selamento e preenchimento do restante do furo de sondagem deve ser realizado conforme descrito no item 4.2.3 (mistura de graute à uma permeabilidade na ordem de  $10^{-10}$  bombeada de baixo para cima). No caso de furos muito profundos, onde o controle da qualidade na confecção da célula de areia passa a ser uma tarefa muito difícil, o emprego da instalação dos sensores pelo método completamente grauteado deve ser considerado em detrimento de uma pequeno atraso no tempo de resposta, porém, com uma chance menor de se errar na confecção da célula ou do selo de bentonita.

A unidade de armazenamento de dados (“datalogger”) e o modem de transmissão remotas dos dados devem ser configuráveis de forma que se permita o registro e a transmissão dados a uma frequência de no mínimo 15 minutos de intervalo.

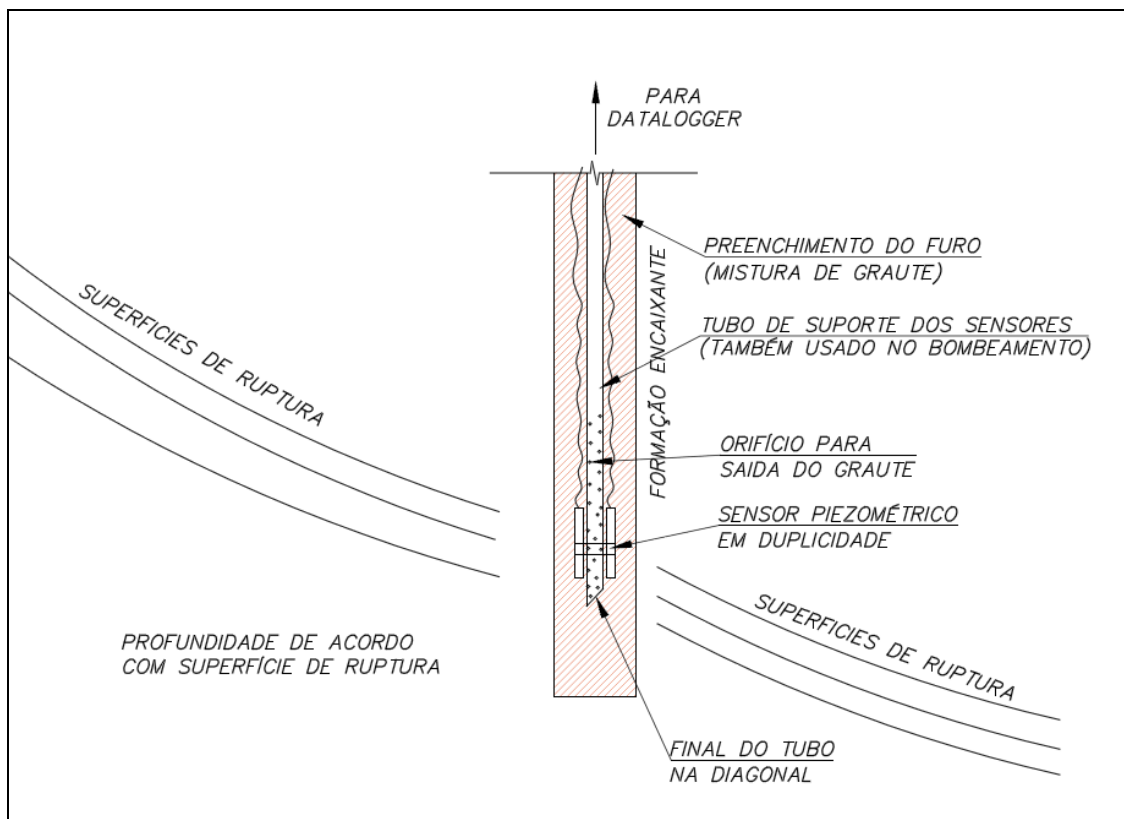


**Figura 4-22 - Detalhe do perfil construtivo típico de um Piezômetro de corda vibrante instalado pelo método convencional em talude de cava a céu aberto (Fonte: O autor, 2016).**

Beale *et al.* (2013) fazem algumas considerações a respeito da importância e da localização de piezômetros instalados em formações minerárias: “é crítico se ter pontos de monitoramento no interior da cava para entregar o grau de acurácia necessário para o desenvolvimento das análises de risco de ruptura.” “Com respeito à piezômetros internos à cava, todo esforço deve ser feito para garantir que eles sejam localizados em áreas que irão se manter acessíveis durante toda vida da mina. Embora isto seja entendido como, frequentemente, uma tarefa impossível (projetos de cava mudam regularmente), piezômetros localizados em largas bermas, em rampas, ao longo de vias ou estradas de acesso, e nas vizinhanças de estruturas permanentes da cava (ex, estações de bombeamento, geradores) terão uma chance melhor de ‘subrevivência’ à longo prazo que uma rede de piezômetros projetadas na prancheta em uma malha teórica de, digamos, 50 x 50m.”

- **Monitoramento de taludes de cava em formação encaixante (fase final de escavação):**

Considerando o propósito de monitoramento descrito no item 3.1.2 e os critérios analisados no item 3.2.3.1, a instrumentação mais indicada para a avaliação da estabilidade de taludes de cava a céu aberto é uma instrumentação composta por sensores piezométricos de corda vibrante fabricados por empresas que também disponibilizam ao mercado conjuntos de emenda e corte de cabeamento, instalados pelo método completamente grauteado em profundidades equivalentes à localização das superfícies de ruptura mais críticas (Figura 81). Um detalhe importante quando se especifica o uso deste tipo de método de preenchimento do furo é a necessidade de se posicionar um sensor piezométrico extra do mesmo modelo do primeiro sensor (duplicado). Trata-se de uma medida preventiva que visa garantir a funcionalidade do instrumento caso ocorra a falha de um dos sensores. Conforme comentado no item 4.2.5, o custo de se acrescentar mais um sensor piezométrico é irrisório comparado com o todo custo de perfuração e de mobilização das equipes de sondagem.



**Figura 4-23 - Detalhe do perfil construtivo típico de uma Piezômetro de corda vibrante instalado pelo método completamente grauteado em talude de cava a céu aberto (Fonte: O autor, 2016).**

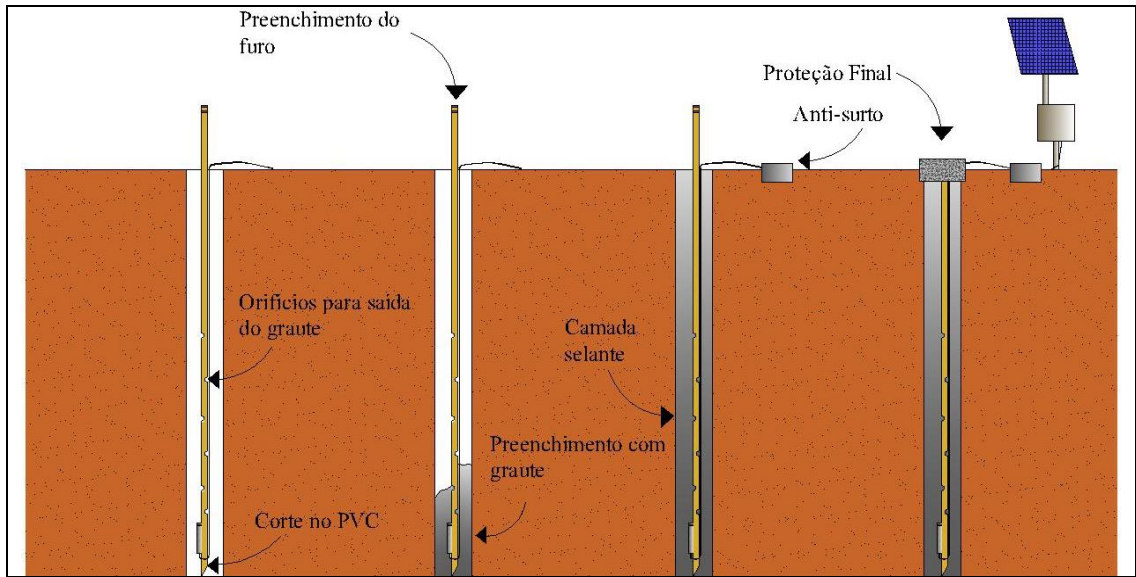
No caso de furos mais rasos, onde o controle da qualidade na confecção da célula de areia passa a ser uma tarefa viável, o emprego da instalação dos sensores pelo método convencional deve ser considerado em benefício de tempo de resposta mais curto, porém, este critério não é muito importante em relação ao propósito de monitoramento.

Beale *et al.* (2013) fazem algumas considerações a respeito da locação e abrangência de piezômetros instalados em formações encaixantes: *“Uma completa e compreensiva rede de monitoramento deve conter uma rede com piezômetros externos à cava e piezômetros internos à cava. Os piezômetros externos à cava devem ser localizados em uma faixa que varia de mais próximo possível à crista da cava (levando em consideração os efeitos de um possível recuo) até ao menos 100 a 200 m distante da crista da cava, e potencialmente muito mais longe no caso de um sistema de rebaixamento com maior capacidade e abrangência.”* Beale *et al.* (2013) ainda complementam afirmando que a distância da crista da cava, assim como o número de piezômetros especificados para esta distância, devem ser baseados na escala de operação e no grau de acurácia necessária na determinação da geometria da superfície piezométrica.

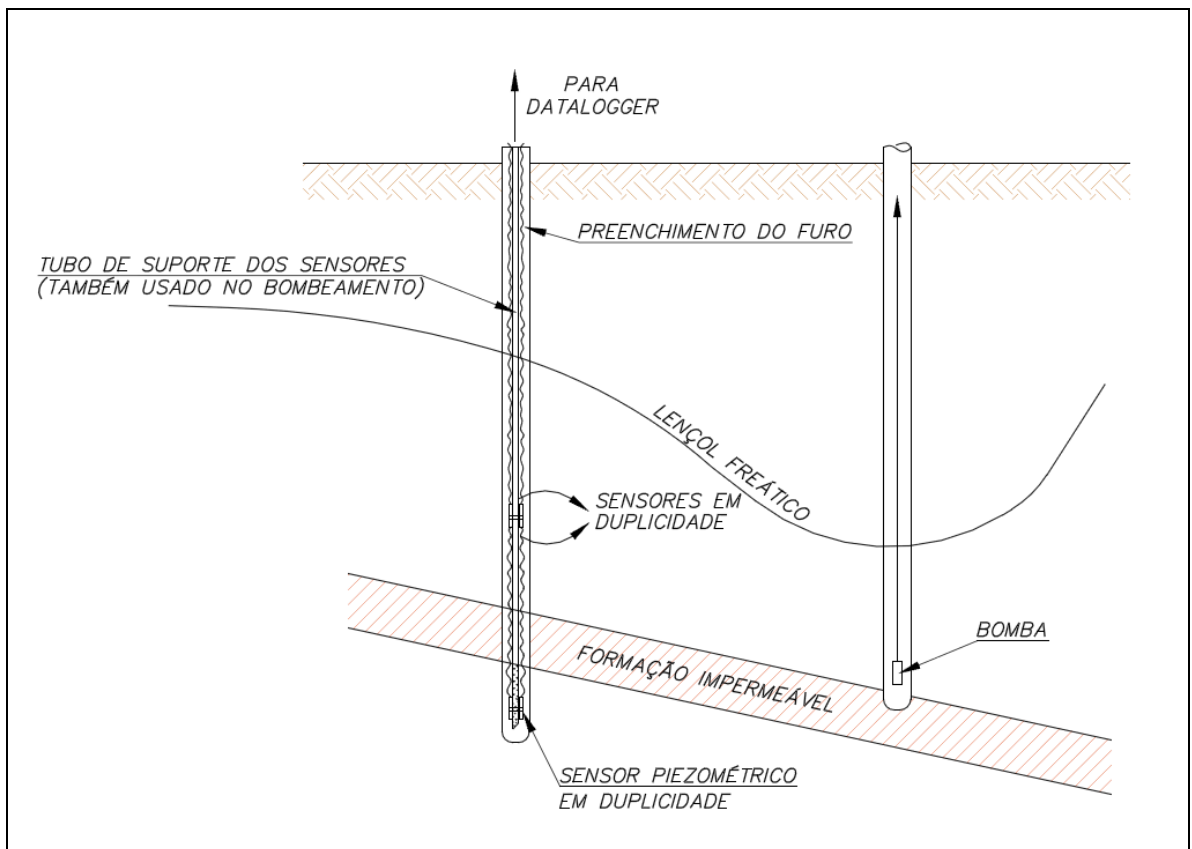
- **Monitoramento da eficiência de poços de rebaixamento:**

Considerando o propósito de monitoramento descrito no item 3.1.4 e os critérios analisados no item 3.2.3.1, a instrumentação mais indicada para a avaliação da efetividade de poços de rebaixamento e despressurização em taludes de cava a céu aberto é composta por sensores piezométricos de corda vibrante instalados pelo método completamente grauteado (Figuras 82 e 83). Um detalhe importante quando se especifica o uso deste tipo de método de preenchimento do furo é a necessidade de se posicionar um sensor piezométrico extra do mesmo modelo do primeiro sensor (duplicado). Conforme mencionado acima, trata-se de uma medida preventiva que visa garantir a funcionalidade do instrumento caso ocorra a falha de um dos sensores. No caso de furos mais rasos, onde o controle da qualidade na confecção da célula de areia passa a ser uma tarefa viável, o emprego da instalação dos sensores pelo método convencional deve ser considerado em benefício de tempo de resposta mais curto, porém, este critério não é muito importante no atendimento a este propósito de monitoramento.





**Figura 4-24 - Sequência de instalação do Piezômetro pelo método totalmente grauteado (Fonte: VALE / Coffey, 2016).**



**Figura 4-25 - Perfil construtivo típico de um Piezômetro de corda vibrante instalado pelo método completamente grauteado para monitoramento da efetividade de poços de rebaixamento do N.A (Fonte: O autor, 2016).**

#### 4.4.2. TALUDES DE INFRAESTRUTURA E ENCOSTAS NATURAIS

Considerando o propósito de monitoramento descrito no item 3.1.2 e os critérios analisados no item 3.2.3.2, a instrumentação mais indicada para a avaliação da estabilidade de taludes de infraestrutura e encostas naturais é uma instrumentação composta por piezômetros tipo Casagrande dimensionados conforme as equações 8 e 9 do item 2.3.2.1 (Tabela de dimensionamento de célula de areia – Vazão de admissão e fatores de formato) e considerando a vazão indicada na análise de percolação (Figura 84). O selamento e preenchimento do restante do furo de sondagem deve ser realizado conforme descrito no item 4.2.3. A automação deste tipo de instrumentação não é essencial para o atendimento a este propósito de monitoramento, porém traz vários benefícios operacionais à rotina de monitoramento da estrutura, e pode ser viabilizada conforme descrito no item 4.2.1.

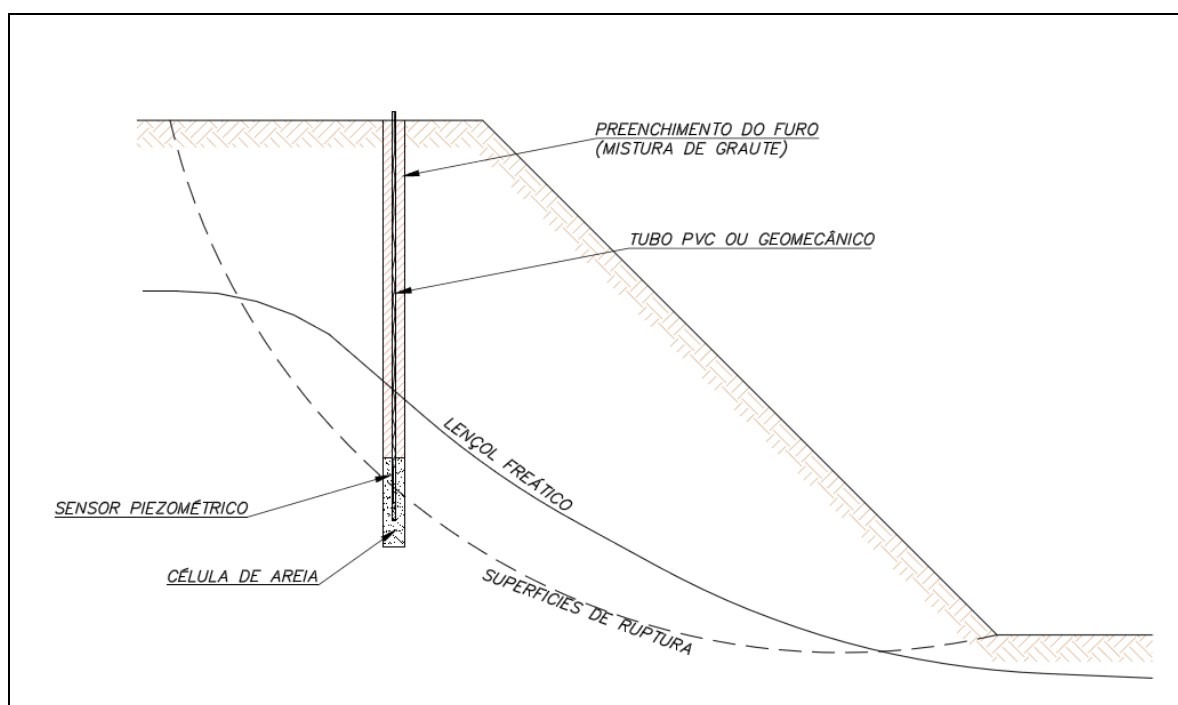


Figura 4-26 - Perfil construtivo típico de um Piezômetro Casagrande instalado em taludes de infraestrutura ou encostas naturais (Fonte: O autor, 2016).

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

### 5.1. CONCLUSÕES

Este estudo permitiu concluir que para elaboração de projetos de instrumentação piezométrica em estruturas geotécnicas comumente encontradas na indústria da mineração, é necessário o estabelecimento dos propósitos de monitoramento o qual os instrumentos a serem instalados irão viabilizar a aquisição dos dados a serem analisados durante o monitoramento especificado. Além do conhecimento dos propósitos de monitoramento das estruturas, uma avaliação dos critérios de projeto de instrumentação para atendimento aos referidos propósitos de monitoramento também se faz necessária, e é parte integrante deste estudo. Este estudo também conclui que para concretização dos critérios de projeto avaliados no formato de projeto conceitual de instrumentação piezométrica, são necessários conhecimento teórico e prático da instrumentação e tecnologia disponíveis no mercado, além do conhecimento e experiência em sondagem e perfuração em solo/rocha.

Os anexos 01 e 02 resumizam os resultados deste estudo na forma de dois quadros resumo correlacionando as estruturas geotécnicas normalmente encontradas na indústria da mineração, seus diversos componentes, os diversos propósitos de monitoramento piezométrico necessários à avaliação efetiva da performance e da segurança das estruturas e os critérios de especificação e instalação de instrumentação necessários ao atendimento de cada propósito de monitoramento e considerando a função e a constituição de cada componente da estrutura geotécnica (Anexos 01 e 02).

O emprego de piezômetros Casagrande é adequado em ocasiões onde o propósito de monitoramento é estabelecer aquisição de leituras de carga piezométrica, porém, quando a aquisição de leituras de poro-pressão se fizer necessária, o projeto de instrumentação deve especificar o emprego de sensores de corda vibrante instalados pelos métodos convencional ou completamente grauteado (confinados).

Em ocasiões onde o propósito de monitoramento estabelecer a necessidade de tempos de resposta curtos, o projeto de instrumentação deve especificar não somente o emprego de sensores de corda vibrante instalados pelo método convencional ou completamente grauteado, mas também o emprego de um método de aquisição de dados automático por meio de unidades de armazenamento de dados (“dataloggers”) e modems

de transmissão de dados. Caso contrário, o esforço de se construir instrumentos de tempo de resposta curto é perdido na espera para se coletar os dados de forma manual ou semi-automática.

Em ocasiões onde instrumentos forem instalados abaixo do sistema de drenagem interna da estrutura geotécnica, são necessários cuidados em relação ao isolamento das contribuições do fluxo de água do dreno de fundo e da percolação de água na fundação da estrutura. Nestes casos recomenda-se o emprego do abandono da haste de revestimento do furo de sondagem logo acima da célula de areia do piezômetro.

Quando o propósito de monitoramento estabelecer a avaliação da estabilidade de taludes de barragens, pilhas de estéril ou cavas, o projeto de instrumentação deve especificamente posicionar a profundidade da célula de areia do piezômetro com base nas superfícies de ruptura críticas da análise de estabilidade da seção geotécnica.

Quando o propósito de monitoramento estabelecer a avaliação da dissipação do excedente de poro-pressão em barragens de rejeito durante e logo após eventos sísmológicos, o projeto de instrumentação deve especificar o emprego de não somente instrumentos de tempo de resposta curto, mas também o emprego de Controladores Lógico Programáveis (CLPs) para viabilização de uma interface automática entre sistemas de avaliação do monitoramento e sistemas de alerta e notificação em massa para evacuação de comunidades à jusante das barragens.

Em ocasiões onde sensores de corda vibrante forem propostos para a instrumentação de taludes de cavas em processo de escavação (formação minerária) ou na instrumentação de maciços de barragens e/ou corpos de pilhas de estéril em processo de alteamento, o projeto de instrumentação deve especificar sensores de fornecedores que disponibilizem kits de corte e emenda de cabos, desta forma o uso do sensor será maximizado, o histórico de dados deste instrumento será preservado.

Em ocasiões onde instrumentos forem instalados a uma grande profundidade (cavas de mineração a céu aberto, por exemplo), existe a necessidade do emprego de procedimentos de controle da qualidade da construção deste instrumento. A instalação de piezômetros de corda vibrante pelo método completamente grauteado oferece a chance de se estabelecer o controle da profundidade grauteada deste furo de uma maneira mais confiável do que a simples confecção do selo de bentonita ou reaterro do furo de sondagem a partir da boca do furo a centenas de metros da superfície.

Este estudo visa orientar os profissionais de engenharia geotécnica na idealização e no projeto de instrumentação geotécnica de piezometria necessários a uma temporária ou permanente avaliação efetiva da segurança ou da performance de uma estrutura existente ou proposta.

Este estudo oferece uma discussão sobre o princípio de funcionamento de um instrumento piezométrico, e propõe uma avaliação sobre a escolha correta de cada um deles, bem como seu método de instalação/construção.

Este estudo consolida os resultados de diversos experimentos de campo e laboratório realizados por estudiosos e pesquisadores nas últimas 6 décadas na área da instrumentação e monitoramento piezométrico.

## 5.2. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Seguem listados abaixo algumas sugestões para pesquisas futuras que poderiam complementar o tema:

### SUGESTÃO 1: ORIENTAÇÃO PARA PROJETO EM INSTRUMENTAÇÃO E MONITORAMENTO PIEZOMÉTRICO EM MINAS SUBTERRÂNEAS:

Uma análise do funcionamento e dos métodos de instalação dos instrumentos de piezometria empregados em mina subterrânea, a correlação com o propósito de monitoramentos piezométricos nestes ambientes e a consolidação dos critérios e especificações de projeto necessários ao atendimento à cada propósito de monitoramento.

### SUGESTÃO 2: ORIENTAÇÃO PARA PROJETO EM INSTRUMENTAÇÃO E MONITORAMENTO DE DESLOCAMENTO DE SUPERFÍCIE E EM PROFUNDIDADE EM ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS DE MINAS A CÉU ABERTO.

Uma análise do funcionamento e dos métodos de instalação dos diversos instrumentos de medição de deslocamento de superfície e em profundidade empregados em mina a céu aberto, a correlação com o propósito de monitoramentos de

deslocamento nestes ambientes e a consolidação dos critérios e especificações de projeto necessários ao atendimento à cada propósito de monitoramento.

### SUGESTÃO 3: ORIENTAÇÃO PARA PROJETO EM INSTRUMENTAÇÃO E MONITORAMENTO DE DESLOCAMENTO DE SUPERFÍCIE E EM PROFUNDIDADE EM MINAS SUBTERRÂNEAS.

Uma análise do funcionamento e dos métodos de instalação dos diversos instrumentos de medição de deslocamento de superfície e em profundidade empregados em mina a céu aberto, a correlação com o propósito de monitoramentos de deslocamento nestes ambientes e a consolidação dos critérios e especificações de projeto necessários ao atendimento à cada propósito de monitoramento.

### SUGESTÃO 4: ORIENTAÇÃO PARA PROJETO EM INSTRUMENTAÇÃO E MONITORAMENTO DE GEOFÍSICA EM ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS DE MINAS A CÉU ABERTO E MINAS SUBTERRÂNEAS.

Uma análise do funcionamento e da instalação dos diversos métodos de instrumentação geofísica aplicados em geotecnia e empregados em mina a céu aberto e minas subterrânea, a correlação com os propósitos de monitoramento diversos nestes ambientes e a consolidação dos critérios e especificações de projeto necessários ao atendimento à cada propósito de monitoramento.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ABNT NBR 13028 (2006): Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de barragens de disposição de rejeito, contenção de sedimentos e reservação de água.

ABNT NBR 13029 (2006): Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de disposição de estéril em pilha.

Arulrajah, A., et.al. (2013) Piezometer measurements of prefabricated vertical drains improvement of soft soils under land reclamation fill. *J. Engineering Geology*, Vol. 162. Elsevier B.V., pp. 33-42.

BC Mine Waste Rock Pile Research Committee (1991). Mined rock and overburden piles. Investigation & Design Manual. Interim Guidelines, 128p.

Beale, G., Read, J. (eds) (2013) Guidelines for evaluating water in pit slope stability. CSIRO Publishing, Collingwood, Victoria, 578pp.

Carvalho & Silva (2006): Apostila do curso de Pequenas Barragens de Terra, disciplina IT 503 (Fundamentos de Hidráulica). Profs. Daniel Fonseca de Carvalho e Leonardo Duarte Batista da Silva, 8p.

Casagrande, A. (1949) Soil mechanics in the design and construction of the Logan airport. *J. Boston Soc. Civil Engineers.*, 36. No. 2, pp. 192-221.

Costa, F. M (2005): Análise por métodos hidrológicos e hidroquímicos de fatores condicionantes do potencial hídrico de bacias hidrográficas – Estudo de casos no Quadrilátero Ferrífero – MG. Ouro Preto: DEGEO, Universidade Federal de Ouro Preto, 2005. 147p.

Contreras, I.A., et.al. (2008) The Use of the Fully-grouted Method for Piezometer Installation. *Geotechnical News* June 2008, pp. 30-37.

Dunnicliff, J. (1993) Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance. John Wiley & Sons, Inc., New York, 577pp.

Fell, R. *et al.* (2015): Geotechnical Engineering of Dams, 2<sup>nd</sup> Edition, Taylor & Francis Group, London UK, 1374p.

Geokon Inc. (2014) Instruction Manual. Model 4500 series Vibrating Wire Piezometer, 26pp

Hvorslev, M.J. (1951) Time lag and soil permeability in ground-water observations. Bull. No. 36, Waterways Experiment Station. Corps of Engineers, U.S. Army, Vicksburg, Mississippi, 50pp.

ICOLD – International Commission of Large Dams (2004) Tailing Dams Risk of Dangerous Occurrences, Bulletin 121.

McKenna, G.T. (1995) Grouted-in Installation of Piezometers in Boreholes. Geotechnical Journal, Number 32, pp. 355-363.

Mikkelsen, P.E. (2002) Cement-Bentonite Grout Backfill for Borehole Instruments. Geotechnical News December 2002, pp. 38-42.

Mikkelsen, P.E., and Green, G.E. (2003) Piezometers in Fully Grouted Boreholes. In Proceedings of the 6th International Symposium on Field Measurements in Geomechanics, Oslo, Norway, 15-18 September 2003.

Morris, G. L. and Fan, J., (1998): Reservoir Sedimentation Handbook: Design and Management of Dam, Reservoirs and Watersheds for Sustainable Use. McGraw-Hill Book Co., New York.

Read, J., Stacey, P. (eds) (2009) Guidelines for open pit slope design. CSIRO Publishing, Collingwood, Victoria, 496 pp.



Ribeiro, L.F.M (2000): Simulação Física do Processo de Formação dos Aterros Hidráulicos Aplicados a Barragem de Rejeito – Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Brasília, Brasília, DF.

Santos, A.G. (2004): Influência do teor de ferro na condutividade hidráulica de um rejeito de minério de ferro. Ouro Preto: UFOP, 2004. 191 p. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Escola de Minas.

Simeoni, L. (2012) Laboratory tests for measuring the time-lag of fully grouted piezometers performance of fully grouted piezometers. Geotechnical News June 2008, pp.

Sophiebraem (2015): Ilustração exemplificando o mecanismo de liquefação, perda momentânea do contato/interação em grãos do solo - <https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3ASkuld-bulk-cargo-liquefaction.jpg>

Souza (2001): Apostila da disciplina Métodos de Lavra a Céu Aberto, Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia de Minas, Prof. Júlio César de Souza, 73p.

UFOP (2014): Notas das aulas 01 (Produção de Resíduos de Mineração), 02 (Planejamento de Sistemas de Disposição de Resíduos), 03 (Disposição de Estéril) e 07 (Engenharia da Disposição de Rejeitos) da disciplina Disposição de resíduos de mineração, ministradas pelo Prof. Romero César Gomes.

UFOP (2014): Notas das aulas 02 (Superfície Plana de Ruptura) e 13 (Taludes Reforçados) da disciplina Estabilidade de Taludes, ministradas pelo Prof. Romero César Gomes.

UFOP (2014): Notas da aula 11 (Compressibilidade e Adensamento dos Solos) da disciplina Mecânica dos Solos, ministradas pelo Prof. Romero César Gomes.

VALE (2016): Figura representando os métodos de alteamento de barragens de rejeito, DIFP, Brasil.

VALE / Coffey (2016): Estudos Comparativos e Avaliação de Piezômetros de Corda Vibrante e Casagrande, 234p.

Vaughan, P.R. (1969) A Note on Sealing Piezometers in Boreholes. *Geotechnique*, Vol. 19, No. 3, pp. 405-413.

Vick, S.G. (1983): *Planning, design and analysis of tailings dams*. New York, USA: John Wiley and Sons, Inc, 1983. 369 p.

Wahlstrom, E. E. (1974): *Dams, Dam Foundations and Reservoir Sites*, Elsevier scientific Publishing Company, Amsterdam, The Netherlands, 278p.

Yassuda (2008): *Curso de Instrumentação de Barragens – Instrumentação da Barragem Irapé*, André Jum Yassuda - Bureau Projetos e Consultoria.

ANEXO I - QUADRO RESUMO DE ORIENTAÇÃO ÀS ESPECIFICAÇÕES  
TÉCNICAS DE PROJETO DE INSTRUMENTAÇÃO PIEZOMÉTRICA –  
BARRAGENS DE MINERAÇÃO

ANEXO I - QUADRO RESUMO DE ORIENTAÇÃO ÀS ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DE PROJETO DE INSTRUMENTAÇÃO PIEZOMÉTRICA – BARRAGENS DE MINERAÇÃO

ESTRUTURA GEOTÉCNICA	ELEMENTO / COMPONENTE DA ESTRUTURA	PROPÓSITO DO MONITORAMENTO	CRITÉRIOS PARA INSTRUMENTAÇÃO PIEZOMÉTRICA	ORIENTAÇÕES PARA ESPECIFICAÇÃO E INSTALAÇÃO DO PIEZÔMETRO			MÉTODO DE AQUISIÇÃO DE DADOS
				Escolha do instrumento	Escolha do Sensor/Tecnologia	Preenchimento do Furo de Sondagem	
Barragens de Mineração	Fundação da Barragem	Monitoramento da poropressão na avaliação da estabilidade da estrutura.	Necessidade de leituras de poropressão ou carga piezométrica.	Piezômetro Casagrande.	Piezômetro Casagrande automatizado por meio de um sensor piezométrico ou transdutor de pressão compatível ao "datalogger".	Após abandono da haste de revestimento em profundidade logo acima da célula de areia, instalação do tubo geomecânico (caso houver) e confecção da célula de areia, o interior desta haste deve ser preenchida com mistura de cimento, água e bentonita em proporções equivalentes à uma permeabilidade na ordem de $10^{-10}$ .	Manual, semi-automática ou automática
			Leitura de poropressão adquirida deve representar aquela atuante próxima à superfície de ruptura, portanto, a célula de areia deve ser posicionada observando as análises de estabilidade (atenção especial no isolamento do furo quando atravessar o dreno de fundo).				Automática ("datalogger")
		Monitoramento da dissipação do excedente de poropressão durante as fases de construção e/ou alteamento da estrutura (avaliação das taxas de segurança no avanço de aterros).	Necessidade de leituras de poropressão. Necessidade de tempo de resposta curto. Necessidade de aquisição de dados de forma automática (armazenagem + telemetria).	Piezômetro de corda vibrante.	Sensor piezométrico de corda-vibrante.		Automática ("datalogger")
	Maciço de Rejeito (arenoso)	Monitoramento da poropressão na avaliação da estabilidade da estrutura.	Necessidade de leituras de poropressão ou carga piezométrica.	Piezômetro Casagrande.	Piezômetro Casagrande automatizado por meio de um sensor piezométrico ou transdutor de pressão compatível ao "datalogger".	Após abandono da haste de revestimento em profundidade logo acima da célula de areia, instalação do tubo geomecânico (caso houver) e confecção da célula de areia, o interior desta haste deve ser preenchida com mistura de cimento, água e bentonita em proporções equivalentes à uma permeabilidade na ordem de $10^{-10}$ .	Manual, semi-automática ou automática
			Leitura de poropressão adquirida deve representar aquela atuante próxima à superfície de ruptura, portanto, a célula de areia deve ser posicionada observando as análises de estabilidade (atenção especial no isolamento do furo quando atravessar eventuais camadas drenantes existentes).				Automática ("datalogger")
		Monitoramento da dissipação do excedente de poropressão durante as fases de construção e/ou alteamento da estrutura (avaliação das taxas de segurança no avanço de aterros)	Necessidade de leituras de poropressão. Necessidade de tempo de resposta curto. Necessidade de aquisição de dados de forma automática (armazenagem + telemetria).	Piezômetro de corda vibrante.	Sensor piezométrico de corda-vibrante.		Automática ("datalogger")
		Monitoramento da dissipação do excedente de poropressão durante e logo após eventos sísmológicos causados por rupturas naturais ou por desmonte de rocha.	Necessidade de aquisição de dados de forma automática e em tempo real (automação em CLP com frequência de leitura muito alta, ex. 1 leitura / minuto). Necessidade de sistema de alerta sonoro automático com transmissão redundante de sinal.	Piezômetro de corda vibrante. Controlador lógico programável (CLP)	Sensor piezométrico de corda-vibrante conectado a um CLP e configurado para registro de leituras com uma frequência mínima de 1 leitura/minuto.		Automática e em tempo real via CLP (emprego de "datalogger" não oferece confiabilidade para os critérios de atendimento deste)
	Maciço de Terra	Monitoramento da dissipação do excedente de poropressão durante as Fases de construção e/ou alteamento da estrutura (avaliação das taxas de segurança no avanço de aterros)	Necessidade de leituras de poropressão.	Piezômetro de corda vibrante.	Sensor piezométrico de corda-vibrante fabricado por empresas que também disponibilizam kits de corte e emenda de cabeamento.	Método convencional com célula de areia de altura não superior à 1 metro, selamento e preenchimento realizado com emprego de mistura de cimento, água e bentonita em proporções equivalentes à uma permeabilidade na ordem de $10^{-10}$ .	Automática ("datalogger")
			Necessidade de tempo de retorno curto.				
			Necessidade de aquisição de dados de forma automática (armazenagem + telemetria). Instrumentação deve empregar sensores com cabeamento capaz de ser encurtado de acordo com o avanço da lavra e rebaixamento das bermas (Isto irá proporcionar um bom histórico contínuo de leituras).				
		Monitoramento da performance da drenagem interna	Necessidade somente de leituras do nível freático no maciço.	Indicadores de nível d'água (INAs) ou piezômetro Casagrande.	INA ou piezômetro Casagrande automatizado por meio de um sensor piezométrico ou transdutor de pressão compatível ao "datalogger".	Método convencional com célula de areia conforme variação do N.A experimentada na fase de operação, selamento e preenchimento realizado com emprego de mistura de cimento, água e bentonita em proporções equivalentes à uma permeabilidade na ordem de $10^{-10}$ .	Manual, semi-automática ou automática
	Maciço de Enrocamento	Monitoramento da performance da drenagem interna	Necessidade de registro da pluviometria.	Pluviógrafo	Medidor de intensidade de chuva (mínimo horário).	Não aplicável	Semi-automática ou automática
			Necessidade de registro da vazão sistema de drenagem interna.	Medidor de vazão	Medidor dimensionado conforme Thompson, Francis, Basin ou Parshall.		
	Núcleo Impermeável	Monitoramento da dissipação da poro-pressão em processos de adensamento ou expansividade do solo.	Necessidade de leituras de poropressão.	Piezômetro de corda vibrante.	Sensor piezométrico de corda-vibrante (duplicidade deve ser considerada neste caso devido ao método de reaterro das valas).	Os cabos devem ser dispostos em valas não retílineas, reaterro deve ser executado com uso de mistura seca de bentonita e areia (traço 1:3 - em peso) compactada no mesmo grau de compactação do núcleo. (Fell et al. 2015).	Semi-automática ou automática
			Instalação dos sensores deve ser realizada durante a construção do núcleo, e reaterro deve garantir a estanqueidade. Necessidade do registro de pequenas variações de poro-pressão.				
	Interface ombreira e maciço	Monitoramento da poropressão na avaliação da estabilidade da estrutura	Necessidade de leituras de poropressão ou carga piezométrica.	Piezômetro Casagrande.	Piezômetro Casagrande automatizado por meio de um sensor piezométrico ou transdutor de pressão compatível ao "datalogger".	Método convencional com célula de areia de altura não superior à 1 metro, selamento e preenchimento realizado com emprego de mistura de cimento, água e bentonita em proporções equivalentes à uma permeabilidade na ordem de $10^{-10}$ .	Manual, semi-automática ou automática
	Reservatórios de Barragens	Medição eventual da poro-pressão na lama de rejeito.	Conveniência do registro das poro-pressões atuantes na lama depositada no fundo do reservatório.	Sonda piezométrica.	Conjunto balsa, haste e transdutor de pressão.	Não aplicável	Semi-automática
		Monitoramento da flutuação do nível de água do reservatório.	Necessário o registro do nível de água do reservatório.	Régua linimétrica	Transdutor de pressão ou sensor piezométrico instalado em tubo fixo e perfurado na margem do reservatório e correlacionado ao N.A.		Semi-automática ou automática
		Monitoramento da precipitação na bacia de contribuição	Necessidade de registro da pluviometria.	Pluviógrafo	Medidor de intensidade de chuva (mínimo horário).		

ANEXO II - QUADRO RESUMO DE ORIENTAÇÕES ÀS ESPECIFICAÇÕES  
TÉCNICAS DE PROJETO DE INSTRUMENTAÇÃO PIEZOMÉTRICA – PILHAS  
DE ESTÉRIL E TALUDES

ANEXO II - QUADRO RESUMO DE ORIENTAÇÕES ÀS ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DE PROJETO DE INSTRUMENTAÇÃO PIEZOMÉTRICA – PILHAS DE ESTÉRIL E TALUDES

ESTRUTURA GEOTÉCNICA	ELEMENTO / COMPONENTE DA ESTRUTURA	PROPÓSITO DO MONITORAMENTO	CRITÉRIOS PARA INSTRUMENTAÇÃO PIEZOMÉTRICA	ORIENTAÇÕES PARA ESPECIFICAÇÃO E INSTALAÇÃO DO PIEZÔMETRO			MÉTODO DE AQUISIÇÃO DE DADOS	
				Escolha do instrumento	Escolha do Sensor/Tecnologia	Preenchimento do Furo de Sondagem		
Pilhas de Estéril	Fundação da PDE	Monitoramento da poropressão na avaliação da estabilidade da estrutura	Necessidade de leituras de poropressão ou carga piezométrica. Leitura de poropressão adquirida deve representar aquela atuante próxima à superfície de ruptura, portanto, a célula de areia deve ser posicionada observando as análises de estabilidade (atenção especial no isolamento do furo quando atravessar o dreno de fundo).	Piezômetro Casagrande.	Piezômetro Casagrande automatizado por meio de um sensor piezométrico ou transdutor de pressão compatível ao "datalogger".	Após abandono da haste de revestimento em profundidade logo acima da célula de areia, instalação do tubo geomecânico (caso houver) e confecção da célula de areia, o interior desta haste deve ser preenchida com mistura de cimento, água e bentonita em proporções equivalentes à uma permeabilidade na ordem de 10 <sup>-10</sup> .	Manual, semi-automática ou automática	
		Monitoramento da dissipação do excedente de poropressão durante as fases de construção e/ou alteamento da estrutura (avaliação das taxas de segurança no avanço de aterros)	Necessidade de leituras de poropressão. Necessidade de tempo de resposta curto. Necessidade de aquisição de dados de forma automática (armazenagem + telemetria).	Piezômetro de corda vibrante.	Sensor piezométrico de corda-vibrante.		Automática ("datalogger")	
	Aterro	Monitoramento da dissipação do excedente de poropressão durante as Fases de construção e/ou alteamento da estrutura (avaliação das taxas de segurança no avanço de aterros)	Necessidade de leituras de poropressão. Necessidade de tempo de retorno curto. Necessidade de aquisição de dados de forma automática (armazenagem + telemetria). Instrumentação deve empregar sensores com cabeamento capaz de ser encurtado de acordo com o avanço da lavra e rebaixamento das bermas (Isto irá proporcionar um bom histórico contínuo de leituras).	Piezômetro de corda vibrante.	Sensor piezométrico de corda-vibrante fabricado por empresas que também disponibilizam kits de corte e emenda de cabeamento.	Método convencional com célula de areia de altura não superior à 1 metro, selamento e preenchimento realizado com emprego de mistura de cimento, água e bentonita em proporções equivalentes à uma permeabilidade na ordem de 10 <sup>-10</sup> .	Automática ("datalogger")	
		Monitoramento da performance da drenagem interna	Necessidade somente de leituras do nível freático no maciço.	Indicadores de nível d'água (INAs) ou piezômetro Casagrande.	INA ou piezômetro Casagrande automatizado por meio de um sensor piezométrico ou transdutor de pressão compatível ao "datalogger".	Método convencional com célula de areia conforme variação do N.A experimentada na fase de operação, selamento e preenchimento realizado com emprego de mistura de cimento, água e bentonita em proporções equivalentes à uma permeabilidade na ordem de 10 <sup>-10</sup> .	Manual, semi-automática ou automática	
	Interface ombreira e aterro	Monitoramento da poropressão na avaliação da estabilidade da estrutura	Necessidade de registro da pluviometria.	Pluviógrafo	Medidor de intensidade de chuva (mínimo horário).	Não aplicável	Semi-automática ou automática	
			Necessidade de registro da vazão sistema de drenagem interna.	Medidor de vazão	Medidor dimensionado conforme Thompson, Francis, Basin ou Parshall.			
	Interface ombreira e aterro	Monitoramento da poropressão na avaliação da estabilidade da estrutura	Necessidade de leituras de poropressão ou carga piezométrica. Leitura de poropressão adquirida deve representar aquela atuante próxima à superfície de ruptura, portanto, a célula de areia deve ser posicionada observando as análises de estabilidade.	Piezômetro Casagrande.	Piezômetro Casagrande automatizado por meio de um sensor piezométrico ou transdutor de pressão compatível ao "datalogger".	Método convencional com célula de areia de altura não superior à 1 metro, selamento e preenchimento realizado com emprego de mistura de cimento, água e bentonita em proporções equivalentes à uma permeabilidade na ordem de	Manual, semi-automática ou automática	
	TaluDES de Cava à Céu Aberto	Formação Minerária	Monitoramento da dissipação do excedente de poropressão durante as fases de descarregamento da estrutura (avaliação das taxas de segurança no avanço de escavações)	Necessidade de leituras de poropressão. Necessidade de tempo de resposta curto. Necessidade de aquisição de dados de forma automática (armazenagem + telemetria).	Piezômetro de corda vibrante.	Sensor piezométrico de corda-vibrante.	Método convencional com célula de areia de altura não superior à 1 metro, selamento e preenchimento realizado com emprego de mistura de cimento, água e bentonita em proporções equivalentes à uma permeabilidade na ordem de	Automática ("datalogger")
		Formação Encaixante	Monitoramento da poropressão na avaliação da estabilidade da estrutura	Leitura de poropressão adquirida deve representar aquela atuante próxima à superfície de ruptura do talude, portanto, para posicionamento da célula de areia, deve-se observar a análise de estabilidade e sua interferência com cada litologia. Necessidade de leituras de poropressão ou carga piezométrica (não se deve empregar INAs neste caso). Instrumentação deve empregar sensores com cabeamento capaz de ser encurtado de acordo com o avanço da lavra e rebaixamento das bermas (Isto irá proporcionar um bom histórico contínuo de leituras). Necessidade de se mitigar falhas de preenchimento e selamento (furos profundos).	Piezômetro de corda vibrante.	Sensor piezométrico de corda-vibrante fabricado por empresas que também disponibilizam kits de corte e emenda de cabeamento (duplicidade deve ser considerada neste caso devido ao método de preenchimento do furo).	Método completamente grauteado com traço da mistura do graute simulando a permeabilidade e a resistência à compressão da formação rochosa adjacente de menor coeficiente de permeabilidade.	Semi-automática ou automática
		Poço de Rebaixamento e Monitoramento	Monitoramento da efetividade de instalações e trabalhos de rebaixamento do lençol freático e de depressurização	Necessidade de leituras de poropressão ou carga piezométrica (não se deve empregar INAs neste caso). Necessidade de se mitigar falhas de preenchimento e selamento (furos profundos).	Piezômetro de corda vibrante.	Sensor piezométrico de corda vibrante (duplicidade deve ser considerada neste caso devido ao método de preenchimento do furo).	Método completamente grauteado com traço da mistura do graute simulando a permeabilidade e a resistência à compressão da formação rochosa adjacente de menor coeficiente de permeabilidade.	Semi-automática ou automática
Talude / Encosta		Monitoramento da poropressão na avaliação da estabilidade da estrutura	Leitura de poropressão adquirida deve representar aquela atuante próxima à superfície de ruptura do talude, portanto, para posicionamento da célula de areia, deve-se observar a análise de estabilidade e sua interferência com cada litologia. Necessidade de leituras de poropressão ou carga piezométrica (não se deve empregar INAs neste caso).	Piezômetro Casagrande.	Piezômetro Casagrande automatizado por meio de um sensor piezométrico ou transdutor de pressão compatível ao "datalogger".	Método convencional com célula de areia conforme variação do N.A experimentada na fase de operação, selamento e preenchimento realizado com emprego de mistura de cimento, água e bentonita em proporções equivalentes à uma permeabilidade na ordem de 10 <sup>-10</sup> .	Manual, semi-automática ou automática	