WILLIAM GLADSTONE DE FREITAS MACHADO

MONITORAMENTO DE BARRAGENS DE CONTENÇÃO DE REJEITOS DA MINERAÇÃO

SÃO PAULO
2007

FICHA CATALOGRÁFICA

Machado, William Gladstone de Freitas
Monitoramento de barragens de contenção de rejeitos da mineração / W.G.F. Machado. -- São Paulo, 2007.
155 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo.

1. Barragem de rejeitos (Monitoramento; Instrumentação) I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo II.t.

WILLIAM GLADSTONE DE FREITAS MACHADO

MONITORAMENTO DE BARRAGENS DE CONTENÇÃO DE REJEITOS DA MINERAÇÃO

Dissertação apresentada a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Engenharia Mineral

Orientador: Prof. Dr. Lindolfo Soares

SÃO PAULO
2007

AGRADECIMENTOS

Inicialmente agradeço aos meus pais, Olinto e Odila por me ensinarem que o mais importante é investir em educação e o retorno vem em prosperidade e felicidade.

Agradeço minha avó Teresa que lá do céu orou muito para que eu conseguisse finalizar mais esta etapa de minha vida acadêmica.

Ao meu orientador, Prof. Lindolfo Soares, pela objetividade, orientação técnica e compreensão de minhas dificuldades ao longo deste período de convivência.

Aos professores Wildor Theodoro Hennies e Ana Carolina Chieregati por terem contribuído no aperfeiçoamento técnico desta dissertação.

A bibliotecária da Minas, Maria Cristina Bonesio, pela ajuda na adequação técnica desta dissertação com orientações precisas, Silvia Saran e Madalena Martins da biblioteca Central pelas contribuições e também aos técnicos Elaine, Leo, Roseli e Rosivaldo da biblioteca da Engenharia Civil.

Aos funcionários da secretaria da Minas pela atenção e dedicação aos alunos da pós-graduação.

A Escola Politécnica da USP que ampliou meus conhecimentos técnicos e acadêmicos.

Aos meus dois amores Karina Elena e Andrezinho pelo incentivo em todos os momentos.

A minha esposa Regina Elena que foi fundamental para esta conquista, pelo apoio material, emocional e pelo seu amor.

Finalizando, agradeço a Deus pela proteção em todos os momentos de minha vida.

RESUMO

Esta dissertação é uma contribuição, através de uma pesquisa bibliográfica, sobre o tema instrumentação e monitoramento em empreendimentos de barragens de rejeitos da mineração.

Nesta pesquisa apresentam-se os objetivos básicos da instrumentação de barragens e suas características técnicas, metodologia construtiva das barragens de rejeitos e seu monitoramento através de auscultação da instrumentação.

Como limitação do trabalho, devido à variedade de instrumentos que podem ser instalados em uma barragem, buscou-se pesquisar os instrumentos de medição de deslocamentos e controle de fluxo percolante, sendo os mais utilizados em barragens de terra e rejeitos.

Justifica-se este tema motivado pelos últimos acidentes ocorridos em barragens de contenção de rejeitos, enfatizando a importância e a necessidade permanente da melhoria das condições de segurança e monitoramento das barragens brasileiras. Estes acidentes causam danos à população do entorno da barragem, econômicos ao empreendedor e ambientais.

Como resultado obtido nesta pesquisa pode-se concluir que propiciou conhecimento atualizado ao meio técnico nacional de barragens.

Palavras-chave: barragens de rejeitos; instrumentação e monitoramento.

ABSTRACT

This dissertation is a contribution, through a bibliographical research, on the subject of instrumentation and monitoring in enterprises of tailings dams.

This research presents the basic objectives of the instrumentation of dams, their technical characteristics, the construction methodology of tailings dams and their monitoring through auscultation of the instrumentation.

Due to the variety of instruments that can be installed in a dam, this work was limited to the analysis of two segments, instruments of measurement displacements and those for controlling percolation flow, which are the most commonly used in earth and tailings dams.

This study is justified due to recent accidents occurring in tailings dams, which stress the importance and the permanent necessity of the improvement in security and monitoring conditions of Brazilian dams. These accidents cause social, economic and environmental damages to the enterprise.

As a result of this research it can be concluded that it contributed with up-to-date knowledge to the national technical dam sector.

keywords: tailings dams; dam instrumentation; auscultation; monitoring.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....14

1.1 ATIVIDADE MINERADORA.....17

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO.....27

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....27

2 OBJETIVOS BÁSICOS DA INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS.....28

2.1. INTRODUÇÃO.....28

2.2. A IMPORTÂNCIA DA INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS.....30

2.3 INSPEÇÕES VISUAIS NAS BARRAGENS.....33

3 REVISÃO SOBRE BARRAGENS DE REJEITOS.....36

3.1 RECURSOS MINERAIS.....36

3.2 REJEITO DA MINERAÇÃO.....41

3.3 BARRAGEM DE REJEITO.....53

3.4 MÉTODOS DE CONSTRUÇÃO DE BARRAGENS DE REJEITOS.....55

3.5 INFORMAÇÕES PRÉVIAS PARA O DESENVOLVIMENTO DO PROJETO..69

3.6 CAUSAS DE RUPTURA DE BARRAGENS DE REJEITOS.....71

3.7 INSTRUMENTAÇÃO PARA BARRAGENS DE REJEITOS.....75

3.8 DANOS NA INSTRUMENTAÇÃO.....79

3.9 VIDA ÚTIL DOS INSTRUMENTOS.....80

3.10 AUTOMAÇÃO DA INSTRUMENTAÇÃO.....80

4 AUSCULTAÇÃO E CONTROLE EM BARRAGENS DE DISPOSIÇÃO DE REJEITOS.....82

4.1 CONCEITUAÇÃO DE AUSCULTAÇÃO.....82

4.2 OBJETIVOS DA AUSCULTAÇÃO E CONTROLE.....83

4.3 PERÍODO DE REALIZAÇÃO DESTAS ATIVIDADES.....85

4.4 NECESSIDADE DA AUSCULTAÇÃO E CONTROLE.....86

4.5 ESCOLHA DOS TIPOS, NÚMERO E LOCAÇÃO DOS INSTRUMENTOS.....87

5 INSTRUMENTAÇÃO PARA MEDIÇÕES DO COMPORTAMENTO DO NÍVEL D'ÁGUA.....91

5.1 MEDIDOR DE NÍVEL D'ÁGUA.....93

5.2 PIEZÔMETRO DE TUBO ABERTO OU “STANDPIPE” (CASAGRANDE).....96
5.3 PIEZÔMETRO PNEUMÁTICO.....106
5.4 PIEZÔMETRO HIDRÁULICO DE TUBO DUPLO OU ABERTO.....110
5.5 PIEZÔMETRO ELÉTRICO.....112
5.6 PIEZÔMETRO DE CORDA VIBRANTE.....114
6 INSTRUMENTAÇÃO PARA MEDIÇÕES DE DESLOCAMENTOS.....118
6.1 MEDIDORES DE DESLOCAMENTOS DE SUPERFÍCIE.....120
6.2 MEDIÇÃO DE DESLOCAMENTOS COM INCLINÔMETROS.....128
7 CUSTOS ENVOLVIDOS EM UM PROJETO DE INSTRUMENTAÇÃO.....140
8 CONCLUSÕES.....143

REFERÊNCIAS.....145
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.....153

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Rompimento da barragem de rejeitos de minério de ferro, em Sebastião das Águas Claras (Macacos), Distrito de Nova Lima, em 2001.....18
Figura 2 – Barragem de rejeitos da empresa Mineração Rio Pomba Cataguases, antes do acidente e local do rompimento do barramento.....21
Figura 3 – Lama resultante da lavagem da bauxita sobre localidades próximas.....22
Figura 4 – Rotina de um programa de instrumentação de barragem.....33
Figura 5 – Fluxograma típico de tratamento de minério.....38
Figura 6 - Métodos praticados na etapa de concentração: gravidade, flutuação e magnética e eletrostática.....39
Figura 7 – Curvas granulométricas dos materiais em fases distintas do beneficiamento da areia.....45
Figura 8 – Curva de graduação de rejeitos para vários tipos de minérios 46
Figura 9 – Curva granulométrica do rejeito da mina do Germano.....47
Figura 10 – Curva granulométrica do rejeito da mina de Gongo Soco.....48
Figura 11 – Curva granulométrica do rejeito da barragem do pontal.....48
Figura 12 – Procedimento na produção de rejeitos.....49
Figura 13 – Moinhos: bolas e vibratório.....50
Figura 14 – Fluxograma de beneficiamento da mina Trevo - Siderópolis (SC).....52
Figura 15 – Fases de uma mineração: extração e beneficiamento.....53
Figura 16 – Perfil de uma barragem de rejeitos e seus elementos.....54
Figura 17 – Seção transversal do dique de partida e dique de partida dos três tipos de alteamento de barragem.....57
Figura 18 – Posição do extravasor em relação à barragem.....58
Figura 19 – Vista de jusante do extravasor.....59
Figura 20 – Método construtivo de montante.....60
Figura 21 – Fatores que influenciam a posição do gradiente hidráulico em barragem do método de montante 62
Figura 22 – Riscos de ruptura da barragem através de forças percolantes.....63
Figura 23 – Linha do nível d'água controlada por piezometria.....63
Figura 24 – Dissipação das forças percolantes em barragens de rejeitos pelo método de montante e jusante.....64
Figura 25 – Método construtivo de jusante.....65

Figura 26 – Seção transversal máxima e fases de alteamento da barragem.....65
Figura 27 – Método construtivo de linha de centro.....66
Figura 28 – Sistema de ciclonagem.....67
Figura 29 – Ciclone típico.....68
Figura 30 – Variação temporal dos totais anuais médios de precipitação entre 1979 a 2006.....71
Figura 31 – Fases de um programa de monitoração.....77
Figura 32 – Instrumentação em barragem de terra.....88
Figura 33 – Esquema do medidor de nível d'água.....93
Figura 34 – Furo de sondagem e instalação do tubo de PVC.....94
Figura 35 – Tubo envolvido por manta geotéxtil.....95
Figura 36 – Indicador de nível d'água.....96
Figura 37 - Medidor do nível de água para piezômetros de tubo aberto.....99
Figura 38 - Leitura do nível piezométrico para piezômetro de tubo aberto.....99
Figura 39 – Medição da cota piezométrica.....100
Figura 40 – Esquema do piezômetro de tubo aberto.....101
Figura 41 – Piezômetros na seção da estaca 35.....102
Figura 42 – Piezômetros na seção da estaca 38.....103
Figura 43 – Piezômetro na estaca 35 ano de 2001 (B – barragem; F – fundação).103
Figura 44 – Piezômetros na seção da estaca 38 (B – barragem; F – fundação).....104
Figura 45 – Medições com piezômetro e medidor de nível d'água em um mesmo ponto.....105
Figura 46 – Detalhe de prolongamento horizontal de tubulação para jusante.....106
Figura 47 – Detalhe do equipamento, princípio de leitura e instalação.....107
Figura 48 - Pedra porosa, diafragma e conexões para fixação da tubulação flexível.....107
Figura 49 – Unidade de leitura portátil para instrumentos pneumáticos.....108
Figura 50 – Esquema de piezômetro pneumático.....110
Figura 51 – Esquema de instalação de piezômetro hidráulico de tubo duplo ou aberto.....111
Figura 52 – Circuito eletrônico contendo o sistema varistor aplicado à proteção de um equipamento eletrônico.....113
Figura 53 – Piezômetro elétrico.....113
Figura 54 – Transdutor de pressão.....114

Figura 55 – Piezômetro elétrico de corda vibrante.....115
Figura 56 – Piezômetro de corda vibrante.....116
Figura 57 – Instalação de um piezômetro de corda vibrante em furo de sondagem.....116
Figura 58 - Elementos funcionais de um sistema de medição.....119
Figura 59 – Referência de nível materializado por marco topográfico.....122
Figura 60 – Esquema de levantamento de campo.....124
Figura 61 – Preservação de marcos topográficos instalados em áreas externas....125
Figura 62 - Medição de deslocamentos dos marcos superficiais através de levantamentos topográficos.....126
Figura 63 - Medição indireta ótica de distância horizontal.....127
Figura 64 – Tubos de plástico com ranhuras e encaixe por pressão e colagem.....129
Figura 65 – Princípio de funcionamento do sensor – pêndulo suspenso.....130
Figura 66 – Esquema de um acelerômetro.....131
Figura 67 – Detalhes das polias, sensor (torpedo), guia das polias.....132
Figura 68 – Sonda e cabo de medição instalado dentro do tubo do inclinômetro...134
Figura 69 – Princípio para determinação do deslocamento horizontal com o inclinômetro removível.....135
Figura 70 – Gráfico indicando quatro seqüências de leituras durante seis anos de operação de um inclinômetro.....137
Figura 71 – Princípio de operação do inclinômetro.....138
Figura 72 – Inclinômetro com comunicação sem fio e tecnologia digital.....139

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Critérios para classificação das barragens.....19
Tabela 2 – Critérios para definição do porte da barragem.....20
Tabela 3 – Distribuição territorial de minas pelo Brasil e seu porte.....24
Tabela 4 – Produção mineral brasileira.....25
Tabela 5 – Principais impactos ambientais da mineração no Brasil.....26
Tabela 6 – Classificação granulométrica.....43
Tabela 7 – Aberturas das malhas das peneiras normais.....43
Tabela 8 – Parâmetros geotécnicos.....44
Tabela 9 – Identificação das amostras de rejeito.....47
Tabela 10 – Conseqüências devido a vários tipos de ruptura.....73
Tabela 11 – Tipos de deteriorações mais freqüentes em barragens de terra.....75
Tabela 12 – Medições a serem utilizadas para segurança estrutural e ambiental....78
Tabela 13 – Vantagens e limitações do piezômetro aberto.....98
Tabela 14 – Dados de instalação de piezômetros modelo Casagrande.....102
Tabela 15 – Vantagens e limitações do piezômetro pneumático.....109
Tabela 16 – Vantagens e limitações do piezômetro hidráulico.....111
Tabela 17 – Vantagens e limitações do piezômetro de corda vibrante.....117
Tabela 18 – Custo relativo de cada fase da auscultação.....142

LISTA DE SIGLAS

ABNT –	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADAS -	Automated Data Aquisition System
ASTM -	American Society for Testing and Materials
CBDB –	Comitê Brasileiro de Barragens
CNEN –	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CONAMA –	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COPAM –	Conselho Estadual de Política Ambiental
CVRD –	Companhia Vale do Rio Doce
DIDEM –	Diretoria de Desenvolvimento Econômico e Mineral
DN –	Deliberação Normativa
DNER –	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNPM –	Departamento Nacional de Produção Mineral
FEAM –	Fundação Estadual do Meio Ambiente
IBGE -	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICOLD -	International Commission on Large Dams
MI –	Ministério da Integração Nacional
USACE -	United States Army Corps of Engineers
USCOLD -	United States Committee on Large Dams

LISTA DE SÍMBOLOS

c' – coesão efetiva

c_u – coesão não drenada

γ_{sat} – peso específico saturado

φ' - ângulo de atrito interno efetivo

ΔH - incremento de altura de aterro

r_u – parâmetro de pressão neutra

ϕ - diâmetro

i_{crit} - gradiente crítico

γ_{sub} - peso específico submerso

γ_w - peso específico da água

1 INTRODUÇÃO

O surgimento da instrumentação geotécnica se deu entre os anos de 1930 e 1940 e inicialmente observa-se a utilização de instrumentos mecânicos e hidráulicos para essa finalidade (WHA, 1999).

A instrumentação de auscultação é o processo de observação, detecção e caracterização do desempenho e tendência de comportamento de uma barragem e suas estruturas auxiliares. Pode ser feita por meio de Instrumentação e inspeções visuais, que é o processo da auscultação qualitativa, através de vistorias periódicas ao campo.

As primeiras iniciativas relativas à observação do comportamento das barragens e a instrumentação de auscultação buscando controle e segurança das estruturas são da década de 50.

Segundo Penman, 1989, a maioria das barragens antigas de pequeno porte, até 15 metros de altura, possuía como instrumentação apenas medidores de vazão.

Na década de 60 inicia-se a medição de deslocamentos horizontais com inclinômetros e a instalação de células de pressão total nos aterros e interface solo-cimento. As medições de tensões e deformações começaram na década de 70 a serem utilizadas. Os instrumentos de medição ganham confiabilidade e a análise dos dados ganha uma ferramenta valiosa com o método dos elementos finitos, quando este é aplicado em análises paramétricas de projeto.

A dificuldade ou mesmo impossibilidade de importação da década anterior favoreceu nos anos 80 o desenvolvimento de instrumentos de procedência nacional, exceção feita aos inclinômetros e piezômetros de corda vibrante que têm como princípio de operação do sensor a medição de mudança na freqüência de uma corda vibrante.

Na década de 90, houve aperfeiçoamento dos instrumentos de medição e informatização das fases de coleta, transmissão, processamento e análise dos dados e início da aplicação dos modernos recursos da informática e automação das grandes barragens.

No final do século XX, registrou-se o aparecimento de sistemas automatizados de aquisição de dados (ADAS – *Automated Data Aquisition System*), alguns dos quais utilizam satélites espaciais para transmissão dos dados (U. S. ARMY CORPS OF ENGINEER, 2004).

No início do século XXI, a evolução tecnológica direcionou-se para o desenvolvimento da instrumentação por fibra ótica oferecendo excelente vantagem se comparado com sistemas tradicionais de medição. A instrumentação por fibra ótica, em relação à convencional, possui tamanho reduzido, não tem condutividade nem risco de choque elétrico. Não atrai descargas elétricas atmosféricas, não interfere com campos eletromagnéticos ou ondas de rádio e mais resistente à corrosão.

Os diversos acidentes ocorridos em barragens de rejeitos com graves conseqüências ambientais e perdas financeiras significativas para o empreendedor, sinalizaram a importância de um monitoramento planejado através do desenvolvimento de um bom projeto de instrumentação.

Nas últimas décadas, tem crescido o interesse pelos sistemas de controle de obras de barragens buscando oferecer segurança em seu período de operação.

A instrumentação é um dos métodos utilizados para acompanhar o comportamento de uma barragem e de sua fundação (CRUZ, 1996), podendo alertar para o desenvolvimento de condições inseguras. O projeto de instrumentação deve especificar e detalhar as diretrizes básicas para um bom monitoramento.

Estão incluídas neste detalhamento as justificativas técnicas para a instrumentação a ser adotada, a seleção do tipo de instrumentos necessários e adequados à necessidade do empreendimento, as especificações técnicas dos equipamentos e o projeto detalhado da instrumentação.

Com o crescimento da produção da indústria mineira e, conseqüentemente, dos volumes de rejeitos gerados a serem armazenados, houve necessidade de estruturas de barramento de maior porte que viabilizassem a implantação do projeto de mineração, visto que este é um fator determinante na vida útil do empreendimento e no seu estudo de viabilidade econômica.

Também existe a necessidade de manutenção das barragens em processo de envelhecimento até o encerramento das atividades da mina.

Diante destes desafios, decidiu-se focar mais atenção à segurança de barragens iniciando-se um desenvolvimento científico e tecnológico buscando melhoria nos instrumentos e adequá-los as necessidades de cada projeto de barragem.

Barragens de contenção de rejeitos da mineração são estruturas de grande responsabilidade e necessitam de monitoramento constante do seu desempenho operacional ao longo da vida útil do empreendimento.

Utilizam-se diversos instrumentos nas barragens para medir, entre outros fenômenos físicos, as tensões, deformações, subpressão, percolação, vazão, sismos e deslocamentos.

Com a obtenção destas informações através dos instrumentos, é possível operar barragens otimizando o seu aproveitamento e adequando o projeto da barragem às condições de extração e produção da mineradora.

A instrumentação disponível no mercado deve ser adequada à necessidade do empreendimento. Podem ser sistemas mais econômicos com leituras manuais e, conseqüentemente, necessitando de operador de leitura. Sistemas automatizados necessitam de investimentos financeiros mais elevados para transmissão de dados à média e longas distâncias.

Os sistemas de coleta de dados podem ser obtidos por instrumentos mecânicos, hidráulicos, pneumáticos ou elétricos.

A instrumentação de auscultação instalada em barragens de contenção de rejeitos da mineração, desde as primeiras fases de construção, através dos dados coletados em campo, permite a verificação das especificações técnicas e critérios de projeto idealizados na concepção do projeto executivo da barragem. A instrumentação também atua no acompanhamento das condições de segurança da estrutura e dos materiais, em todas as etapas da construção, operação e encerramento ou desmobilização.

O fim do período de utilização de uma barragem deve ser planejado para garantir que não se constituirá em risco para as populações futuras nem em dano profundo ao meio ambiente.

Embora esta destinação última não seja propriamente uma atividade de observação do comportamento da barragem, deve-se considerar que é uma das finalidades, uma vez que sempre haverá o momento em que a desmobilização de uma obra se fará necessária, seja por ter atingido sua obsolência, seja por necessidades de progresso tecnológico.

A obtenção dos dados de auscultação através de instrumentação geotécnica e inspeções visuais, atenuam os riscos impostos em barragem de rejeito em construção e justifica o interesse pela implantação da instrumentação nas obras geotécnicas de engenharia.

1.1 Atividade Mineradora

O rápido crescimento da população mundial levou à necessidade de grandes incrementos da produção minerária, os quais vêm sendo obtidos através da aplicação intensiva de novas tecnologias e pela conquista de novas fronteiras. A produção mineral brasileira, que contempla inúmeras substâncias, é reflexo natural dessa característica. Contudo, apesar dessa multiplicidade, o valor da produção ainda é muito concentrado, principalmente, sobre ferro, alumínio, nióbio, níquel e ouro. Percebe-se que ainda há muito espaço para se crescer no setor mineral brasileiro. Contudo, têm-se observado efeitos negativos, principalmente com a degradação dos ecossistemas, até então estáveis e harmônicos. Minerar é uma das atividades mais primitivas exercidas pelo homem como fonte de sobrevivência e produção de bens sociais e industriais. A forma de extrair os bens minerais que a natureza nos oferece tem sido aprimorada nos últimos cinquenta anos. Como atividade extrativa, a mineração exercida sem técnicas adequadas e sem controle, pode deixar um quadro de degradação oneroso na área que a abriga. A atividade mineral requer, para seu êxito, cuidadoso planejamento a partir do conhecimento efetivo da situação, a adoção de tecnologia evoluída e aplicável ao caso específico por uma equipe qualificada e o restabelecimento das condições anteriores encontradas ou recomendadas. Em algumas regiões do país a mineração ainda utiliza técnicas inadequadas na exploração mineral, gerando impactos ambientais de grandes proporções e um alto custo social. A expressão “impacto ambiental” teve uma definição mais precisa nos anos 70 e 80, quando diversos países perceberam a necessidade de estabelecer diretrizes e critérios para avaliar efeitos adversos das intervenções humanas na natureza. A definição jurídica de impacto ambiental no Brasil vem expressa no art. 1º da Resolução 1 de 23.1.86 do CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente, (BRASIL, 1986), nos seguintes termos: “*considera-se impacto ambiental qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas, que direta ou indiretamente, afetam-se: a saúde, a segurança e o bem-estar da população; as atividades sociais e econômicas; a biota; as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente e a qualidade dos recursos naturais*”.

A mineração está no centro de constantes conflitos entre as necessidades de preservação do meio ambiente e o desenvolvimento econômico que esta atividade gera. Todo ato de minerar, tanto a céu aberto como subterrâneo, modifica o terreno no processo da extração mineral e de deposição de rejeitos.

O bem mineral após sua extração não retorna mais ao local de origem, fica em circulação, servindo ao homem e às suas necessidades.

Mineração está associada com benefícios e impactos ambientais. Os benefícios são repartidos mundialmente, mas os impactos ambientais permanecem localizados nas regiões de abrangência da mina. Em geral, as empresas de mineração já vêem a necessidade de serem internalizados os custos de recuperação ambiental e, já reconhecem como legítimas as reivindicações das comunidades, incorporando em suas práticas a responsabilidade social. Devido à redução das condições de segurança ao longo da vida útil da obra e a falta de instrumentação adequada, os acidentes ocorridos nos últimos tempos em barragens de rejeitos, têm causado grandes desastres ao meio ambiente da região onde se localiza as instalações da barragem, penalizando as comunidades do entorno das minas e, em muitos casos, em grandes extensões ao longo de cursos d'água, destruindo completamente ecossistemas locais e regionais, ver Figura 1.

Figura 1 - Rompimento da barragem de rejeitos de minério de ferro, em Sebastião das Águas Claras (Macacos), distrito de Nova Lima, em 2001.

Os critérios de classificação das barragens, segundo a Deliberação Normativa do Conselho Estadual de Política Ambiental, Minas Gerais - DN COPAM nº. 62/2002 define dois critérios técnicos (altura da barragem e volume do reservatório) e três ambientais para classificação, Tabela 1, quanto ao potencial de dano ambiental de barragens de contenção de rejeitos, de resíduos e de reservatórios de água em empreendimentos industriais e mineiros.

Os critérios técnicos são: altura da barragem (H), volume do reservatório (Vn), e os ambientais são: ocupação humana a jusante da barragem, interesse ambiental a jusante da barragem e instalações na área a jusante.

Segundo a DN, cada um destes critérios recebe uma pontuação (V) que varia de zero a três, dependendo das características da barragem, conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Critérios para classificação das barragens, DN COPAM Nº. 062/2002.

Altura da Barragem H (m)	**Volume do Reservatório (10^6 m^3)**	**Ocupação Humana a Jusante**	**Interesse Ambiental a Jusante**	**Instalações na Área de Jusante**
$H < 15$ $V = 0$	$V_r < 0,5$ $V = 0$	Inexistente $V = 0$	Pouco significativo $V = 0$	Inexistente $V = 0$
$15 \leq H \leq 30$ $V = 1$	$0,5 \leq V_r \leq 5,0$ $V = 1$	Eventual $V = 2$	Significativo $V = 1$	Baixa concentração $V = 1$
$H > 30$ $V = 2$	$V_r > 5,0$ $V = 2$	Grande $V = 3$	Elevado $V = 3$	Alta concentração $V = 2$

Considerando-se o somatório dos valores (V) dos parâmetros de classificação da Tabela 1, as barragens são classificadas quanto ao potencial de dano ambiental em três categorias.

- Baixo potencial de dano ambiental – Classe I, quando a somatória dos valores for menor ou igual a dois ($V \leq 2$);
- Médio potencial de dano ambiental – Classe II, quando a somatória dos valores for maior que dois e menor ou igual a quatro ($2 < V \leq 4$);
- Alto potencial de dano ambiental – Classe III, quando a somatória dos valores for maior que quatro ($V > 4$);

O porte de uma barragem é determinado pela sua altura e o porte de um reservatório é determinado pelo seu volume, conforme Tabela 2.

Tabela 2 – Critérios para definição do porte da barragem, DN COPAM Nº. 062/2002.

Barragem	**Altura da Barragem** H (m)	**Reservatório**	**Volume do Reservatório** V_r (m^3)
Pequeno porte	$H < 15$	Pequeno porte	$V_r < 500.000$
Médio porte	$15 \leq H \leq 30$	Médio porte	$500.000 \leq V_r \leq 5.000.000$
Grande porte	$H > 30$	Grande porte	$V_r > 5.000.000$

Os recentes acidentes em barragens de contenção de rejeitos ocorridos nos últimos anos evidenciaram a necessidade de discussão e formulação de modelos de gestão de segurança de barragens de rejeito, envolvendo as entidades reguladoras, licenciadoras, fiscalizadoras bem como as empresas de mineração e comunidades potencialmente afetadas.

A falta de compromisso das empresas com procedimentos de gestão, de planejamento de longo prazo, de projeto de engenharia adequado, ausência de supervisão especializada, inexistência de manual de operação, improviso da equipe de operação, falta de inspeções e avaliações periódicas de segurança geram fatos catastófricos.

Diante dos acidentes de grandes proporções ocorridos, o último na empresa Mineração Rio Pomba Cataguases Ltda, que lavra o minério de bauxita, localizada na zona da mata mineira, no município de Miraí (335 km de Belo Horizonte), no Estado de Minas Gerais, em 10 de janeiro de 2007, conforme mostra a Figura 2, parte do maciço da barragem de rejeitos rompeu.

Este rompimento foi ocasionado pela subida rápida do nível d'água atingindo a crista da barragem devido à grande quantidade de chuvas, provocando o vazamento de lama acumulada na barragem, estimada em dois bilhões de litros.

Esta lama atingiu o córrego Bom Jardim, que deságua no ribeirão Fubá, chegando aos municípios de Miraí, Muriaé e Patrocínio do Muriaé no estado de Minas Gerais e Laje do Muriaé e Itaperuna, no estado do Rio de Janeiro.

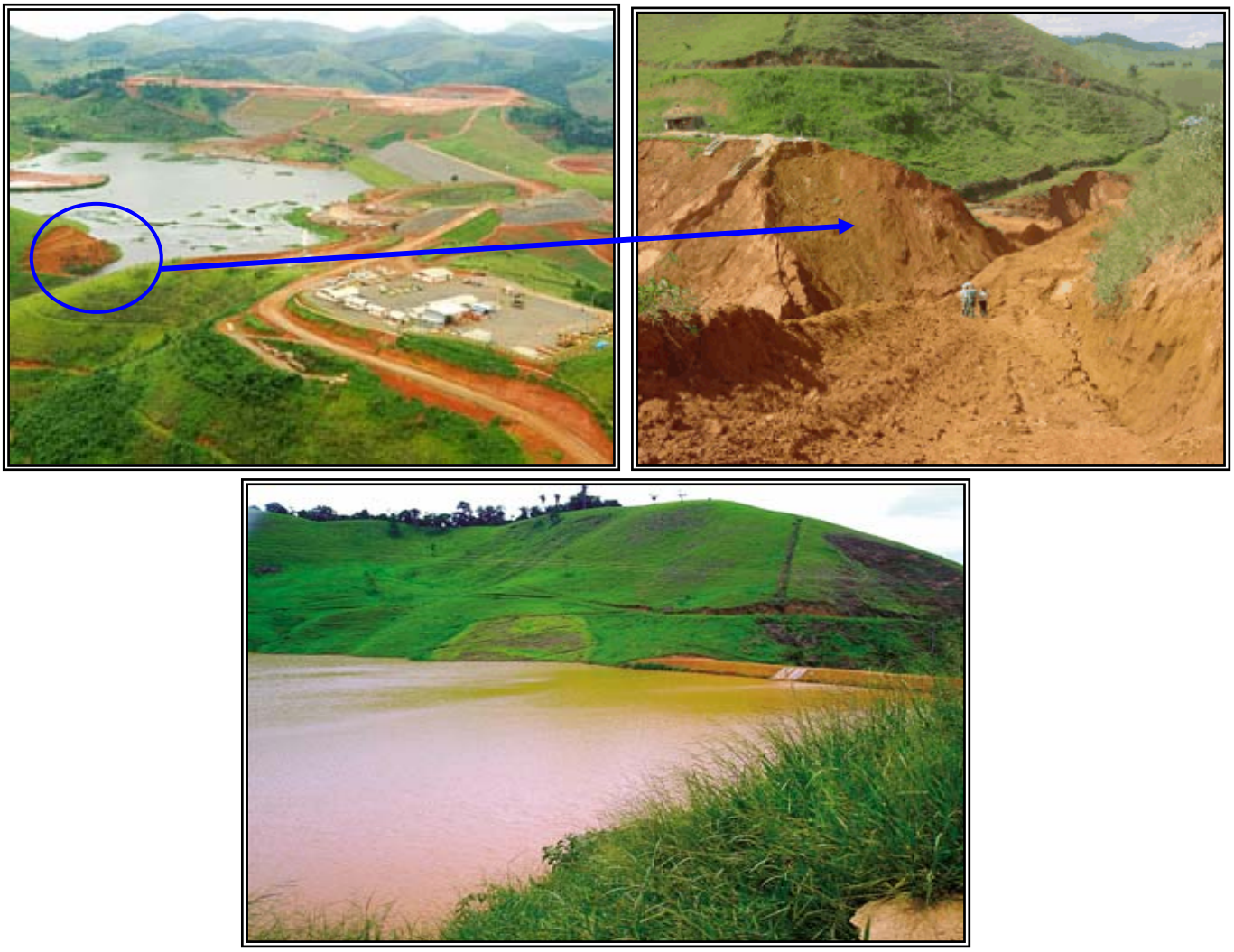


Figura 2 – Barragem de rejeitos da empresa Mineração Rio Pomba Cataguases, antes do acidente e local do rompimento do barramento (NEWSLETTER, 2007).

Esta barragem com altura de 35 metros, volume de reservação de 3,6 milhões de metros cúbicos, recebendo a pontuação de Classe III, isto é, a classe a que corresponde às maiores exigências de controle.

Os técnicos do DNPM verificaram que cerca de 70% do material que estava retido havia vazado. O material que ainda se encontrava no interior da barragem, poderia, se houvesse continuidade das fortes chuvas, seguir o mesmo destino da lama vermelha que havia vazado, como mostra a Figura 3. Viu-se também que a empresa, juntamente com as autoridades da Defesa Civil, estava providenciando uma barreira de contenção da lama vermelha que ainda restava no barramento. Em uma avaliação preliminar, por técnicos do órgão ambiental, a quantidade de lama que vazou foi de dois milhões de metros cúbicos. A lama é formada por água e

composta de finos menores que 0,5 mm e colóides de argilas (frações menores que 0,001 mm ou 1 micra) e bauxita, considerada como rejeito do lavador de bauxita. A lama não continha material tóxico.

Figura 3 – Lama resultante da lavagem da bauxita sobre localidades próximas (NEWSLETTER, 2007).

Diante dos fatos, a opinião pública questiona o real benefício da indústria mineira, que, sem sombra de dúvida, é imprescindível para o desenvolvimento da economia brasileira.

O ciclo produtivo da mineração e os benefícios dos minérios no cotidiano do homem devem ser informados à população com ações institucionais.

Dessa forma, o grande desafio atual das empresas de mineração consiste em conceber uma mineração moderna, sendo necessário o desenvolvimento de novas tecnologias, a minimização dos impactos ao meio ambiente e a redução dos riscos de acidentes ambientais seguindo a legislação ambiental brasileira.

Em seminário realizado pela FEAM em abril de 2007, em Minas Gerais, três novas propostas foram elaboradas na área de segurança:

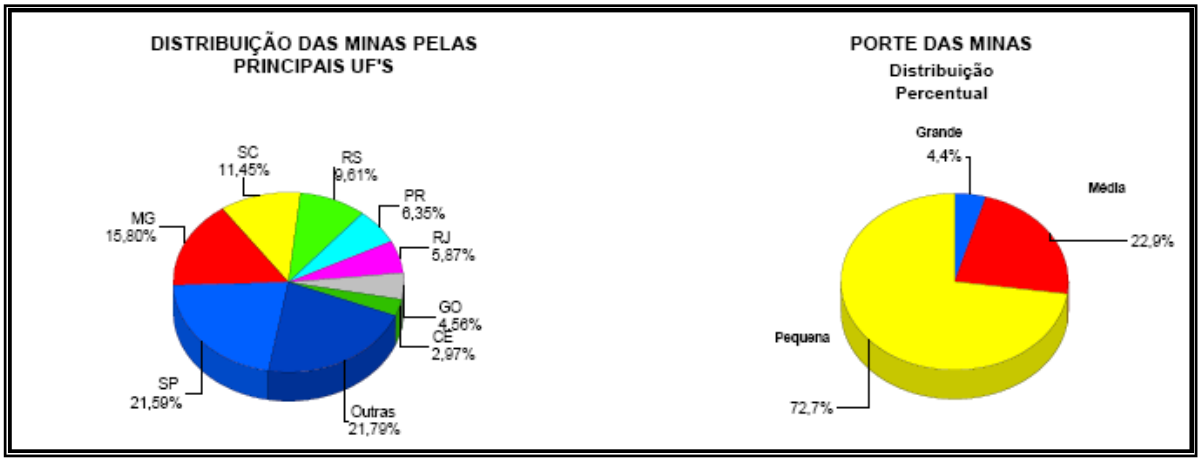
- As empresas de mineração que possuam ou venham a construir barragens (de rejeitos, água e/ou sedimentos) deverão elaborar Plano de Contingência/Plano de Ação Emergencial;
- Todo município que possua atividade de mineração devem criar Conselho e a Coordenação de Defesa Civil;
- Estabelecer diretrizes para elaboração de Plano de Contingência.

A mineração oferece importantes contribuições nas áreas sociais e ambientais, além de incentivos para o crescimento econômico. Isso mostra uma nova percepção das empresas mineradoras brasileiras de norte a sul do país.

A indústria da mineração é responsável pela geração de milhões de postos de trabalho. Atualmente, de acordo com dados do anuário mineral brasileiro (2006), estão em atividade cinco mil minas no País, ver distribuição na Tabela 3, gerando 2,5 milhões de empregos diretos. Nesta estatística foram consideradas as minas com produção ROM (*Run of Mine*) acima de 10.000 toneladas/ano. ROM é o minério bruto, obtido diretamente da mina, sem sofrer qualquer tipo de beneficiamento, ou seja, produção bruta. O destino da produção bruta é subdividido em tratamento, transformação, consumo e venda. A cada vaga na mineração, mais treze empregos indiretos são gerados na cadeia produtiva. Um exemplo é a utilização do metal níquel nos seguintes segmentos industriais de:

- Informática, fabricação de placas para microcomputadores;
- Entretenimento, no revestimento de cd's e dvd's;
- Aviação, na construção da estrutura de aeronaves;
- Moda, para impressão de estamparias;
- Laticínios, nos equipamentos de conservação de alimentos;
- Automóvel, para geração de energia em baterias para a indústria automobilística;
- Usinas nucleares, como matéria-prima de superligas;
- Em equipamentos cirúrgicos;
- Em utensílios domésticos, como talheres.

Tabela 3 – Distribuição territorial de minas pelo Brasil e seu porte. (ANUÁRIO MINERAL BRASILEIRO, 2006).



O setor mineral atua na cadeia de valor da produção dos três setores da economia, sendo:

- Primário - Pesquisa Mineral e Mineração;
- Secundário – Transformação Mineral: Metalurgia, Siderurgia, Química, etc;
- Terciário – Mercado e Comércio.

O setor Mineral apresenta grande heterogeneidade e diferentes estágios de desenvolvimento, do precário (garimpagem, mineração artesanal) ao moderno (pesquisa mineral e minas planejadas na perspectiva das excelências técnicas da Geologia, Engenharia de Minas e Economia Mineral). A produção mineral brasileira (bens selecionados) entre 2005 e 2006, está apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 – Produção mineral brasileira (INFORME MINERAL, 2007).

PRODUÇÃO MINERAL DO BRASIL
2006

Grupos	BRASIL			MUNDIAL	BRASIL
	2005	2006(p)	2006/2005	2006	2006
	(t)	(t)	Var. (%)	(t)	Δ (%)
METALICOS					
Não-Ferrosos					
Alumínio (bauxita)	20.307.425	22.100.000	8,83	153.000.000	14,44
Cobre (1)	133.084	147.836	11,08	15.300.000	0,97
Chumbo (1)	24.000	26.000	8,33	3.360.000	0,77
Estanho (1)	12.221	12.907	5,61	273.000	4,73
Níquel (3)	36.729	36.959	0,63	1.550.000	2,38
Zinco (1)	170.659	185.211	8,53	10.000.000	1,85
Ferrosos					
Cromo (Cr_2O_3)	248.088	221.777	-10,61	20.000.000	1,11
Ferro	280.585.843	317.800.229	13,26	1.690.000.000	18,80
Magnesita	386.000	324.000	-16,06	4.050.000	8,00
Manganês	3.862.012	4.291.425	11,12	11.000.000	39,01
Nióbio (pirocloro) (2)	58.009	70.600	21,71	59.900.000	0,12
Preciosos					
Ouro	38	45	18,42	2.500	1,80
Minerais Industriais					
Amianto (fibras)	236.047	227.304	-3,70	2.300.000	9,88
Caulim	2.318.515	2.454.684	5,87	44.800.000	5,48
Fluorita	66.512	63.604	-4,37	5.350.000	1,19
Gipsita (bruta)	527.912	575.583	9,03	119.000.000	0,48
Grafita	77.494	76.194	-1,68	1.070.000	7,12
Potássio (K_2O)	404.871	403.080	-0,44	30.000.000	1,34
Rocha Fosfática (concentrado)	5.450.058	5.929.976	8,81	147.000.000	4,03
Vermiculita	28.313	25.200	-10,99	520.000	4,85
Energéticos Fósseis					
Carvão (10^3 t)	5.860.069	5.981.049	2,06	5.852.000.000	0,10

Fonte: DIDEM/DNPM, 2007; MCS/USGS, 2007; WCI, 2007.
Notas: (p) Preliminar; (1) Metal contido no concentrado; (2) Em Nb_2O_5; (3) Níquel contido no carbonato e no matte.

No Brasil, os principais problemas oriundos da mineração podem ser englobados em quatro categorias: poluição da água, ar, sonora e subsidência do terreno.

A Tabela 5 apresenta, por estado, síntese dos principais impactos ambientais na produção brasileira das seguintes substâncias minerais: ferro, ouro, chumbo, zinco e prata, carvão, agregados para construção civil, gipsita e cassiterita.

Tabela 5 – Principais impactos ambientais da mineração no Brasil (CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS, 2002).

Substância Mineral	Estado	Principais problemas	Ações Preventivas e ou Corretivas
Ferro	MG	Antigas barragens de contenção, poluição de águas superficiais	Cadastramento das principais barragens de decantação em atividade e as abandonadas; Caracterização das barragens quanto a estabilidade; Preparação de estudos para estabilização
Ouro	PA	Utilização de mercúrio na concentração do ouro de forma inadequada; aumento da turbidez, principalmente na região de Tapajós	Divulgação de técnicas menos impactantes; monitoramento de rios onde houve maior uso de mercúrio
	MG	Rejeitos ricos em arsênio; aumento da turbidez	Mapeamento e contenção dos rejeitos abandonados
	MT	Emissão de mercúrio na queima de amálgama	Divulgação de técnicas menos impactantes
Chumbo, Zinco e Prata	SP	Rejeitos ricos em arsênio	Mapeamento e contenção dos rejeitos abandonados
Chumbo	BA	Rejeitos ricos em arsênio	Mapeamento e contenção dos rejeitos abandonados
Zinco	RJ	Barragem de contenção de rejeito, de antiga metalurgia, em péssimo estado de conservação	Realização das obras sugeridas no estudo contratado pelo Governo do Estado do Rio de Janeiro
Carvão	SC	Contaminação das águas superficiais e subterrâneas pela drenagem ácida provenientes de antigos depósitos de rejeitos	Atendimento às sugestões contidas no Projeto Conceitual para Recuperação da Bacia Carbonífera Sul Catarinense
Agregados para construção civil	RJ	Produção de areia em Itaguaí/Seropédica: contaminação do lençol freático, uso futuro da terra comprometido devido a craação desordenada de áreas alagadas	Disciplinamento da atividade; Estudos de alternativas de abastecimento
	SP	Produção de areia no Vale do Paraíba acarretando a destruição da mata ciliar, turbidez, conflitos com uso e ocupação do solo, acidentes nas rodovias pelo causados transporte	Disciplinamento da atividade; Estudos de alternativas de abastecimento e de transporte
	RJ e SP	Produção de brita nas Regiões Metropolitanas do Rio de Janeiro e São Paulo, acarretando: vibração, ruído, emissão de particulado, transporte, conflitos com uso e ocupação do solo	Aplicação de técnicas menos impactantes; Estudos de alternativas de abastecimento
Calcário	MG e SP	Mineração em áreas de cavernas com impactos no patrimônio espeleológico	Melhor disciplinamento da atividade através da revisão da Resolução Conama n ° 5 de 06/08/1987
Gipsita	PE	Desmatamento da região do Araripe devido a utilização de lenha nos fornos de queima da gipsita	Utilização de outros tipos de combustível e incentivo ao reflorestamento com espécies nativas
Cassiterita	RO e AM	Destruição de Florestas e leitos de rios	Racionalização da atividade para minimizar os impactos

1.2 Objetivos do Trabalho

Devido à abrangência deste tema, instrumentação de auscultação, esta pesquisa apresenta revisão bibliográfica das principais técnicas de instrumentação de barragens de rejeito e foca nas vantagens, metodologia de instalação, leitura, erros de interpretação de dados, objetivo geral de cada instrumento, valores limites e qual critério utilizado para definição desses valores, buscando com isto auxiliar na especificação técnica destes equipamentos a serem implantados. O controle da instrumentação de auscultação deve recair essencialmente sobre os instrumentos que permitam a observação de deslocamentos, subpressão e vazões de percolação, uma vez que constituem, dentre os instrumentos de auscultação de barragens, aqueles de mais fácil interpretação e os mais indicados para o controle da segurança das estruturas. Nesta pesquisa será dado ênfase aos instrumentos que monitoram as deformações do maciço, que variam com o nível de tensões aplicadas e a granulometria do rejeito, e são medidos através de inclinômetros. Também serão abordados os instrumentos de piezometria utilizados para monitorar o comportamento da água subterrânea que percola pela fundação e em diferentes pontos ao longo do maciço, concluindo-se que estes instrumentos são imprescindíveis para o controle da segurança da barragem.

1.3 Organização do Trabalho

Esta dissertação está estruturada em oito capítulos, assim distribuídos:

- O capítulo 2 apresenta os objetivos básicos da instrumentação em barragens;
- No capítulo 3 é apresentada revisão da literatura;
- O capítulo 4 discute auscultação e controle;
- O conteúdo do capítulo 5 aborda medidores de nível freático;
- No capítulo 6 os instrumentos para medir deslocamentos de superfície e ângulo são descritos;
- O capítulo 7 discute os custos de um projeto de instrumentação;
- O capítulo 8 apresenta as principais conclusões do estudo;
- Finalizando, apresenta-se as referências citadas no texto além de outras consultadas.

2 OBJETIVOS BÁSICOS DA INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS

Em alguns casos de obras de engenharia, principalmente aquelas de grande porte, ou que envolva algum nível de risco, não só perdas materiais significativas, mas também risco de perda de vidas humanas, há necessidade de se acompanhar a evolução do seu comportamento após a sua conclusão. Assim, nestes casos são montados instrumentos apropriados para o acompanhamento das informações mais relevantes no que se refere ao seu comportamento.

2.1 Introdução

De acordo com o manual *Instrumentation of Embankment Dams and Levees* (US ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2004), a determinação do número, tipo e localização dos instrumentos requeridos por uma barragem pode ser efetivamente escolhido pela combinação de experiência, bom senso e intuição. As barragens representam situações únicas e requerem soluções individuais para suas necessidades quanto à instrumentação. O engenheiro deve entender os fenômenos físicos e mecânicos envolvidos na instalação de instrumentação de campo, e como será o desempenho dos instrumentos disponíveis sob as condições de trabalho. Os objetivos principais de um plano de instrumentação geotécnica devem ser agrupados, segundo o mesmo manual, em quatro categorias:

- Avaliações analíticas;
- Previsão do desempenho futuro;
- Avaliações legais e
- Desenvolvimento e verificação de projetos futuros.

A avaliação analítica consiste na análise dos dados obtidos da instrumentação geotécnica e deve ser utilizada na verificação dos parâmetros adotados no projeto, verificação de hipóteses de projeto, técnicas construtivas e análise de eventos adversos que podem ocorrer simulados no projeto. A previsão do desempenho

futuro refere-se aos dados de instrumentação obtidos que sinalizam o comportamento futuro da barragem. Tais previsões devem ser um indicativo das condições satisfatórias da operação normal ou uma indicação de um potencial risco futuro que necessite de intervenções corretivas. Para as avaliações legais são utilizados dados de instrumentação importantes na solução de litígios relativos à construção do empreendimento. Também podem ser utilizados em casos de mudanças das condições de fluxo à jusante do barramento. Em outros eventos adversos também se pode utilizar a instrumentação. Através de análises do desempenho de barragens e dados de instrumentação gerados durante a operação, utiliza-se este material como tecnologia de avanço para desenvolvimento e verificação de projetos e construções futuros refletindo em mais economia dos novos empreendimentos. O simpósio sobre instrumentação de barragens (1996), estabeleceu como objetivos básicos da instrumentação os seguintes tópicos agrupados de acordo com o desenvolvimento da barragem: construção, enchimento e operação.

Período Construtivo:

- Alertar sobre a ocorrência de possíveis anomalias no comportamento da barragem;
- Possibilitar soluções menos conservadoras, permitindo economia significativa para a obra;
- Fornecer informações, por retro-análise dos dados de instrumentação a respeito de valores dos parâmetros dos materiais que constituem a barragem e sua fundação;
- Possibilitar revisões do projeto durante o período construtivo, permitindo, caso necessário, reestudá-los em tempo de se evitar prejuízos de grandes conseqüências.

Período de Enchimento do Reservatório:

- Alertar sobre a ocorrência de possíveis anomalias que possam colocar em risco a segurança da estrutura;
- Possibilitar avaliação do desempenho estrutural, geotécnico e hidráulico da obra, em função das comparações entre grandezas medidas *in-situ* e aquelas previstas por modelos teóricos ou experimentais de análise;

- Verificar a adequação das simplificações introduzidas nas hipóteses de projeto.

Período Operacional:

- Verificar se a barragem está apresentando um desempenho geral satisfatório, conforme previsto em projeto. É, entretanto, neste período que se podem tirar importantes conclusões com relação à qualidade e desempenho da estrutura;
- Caracterizar o comportamento no tempo dos solos e/ou do maciço rochoso de fundação determinando o prazo necessário para estabilização dos deslocamentos, tensões internas, subpressão, vazões de drenagem, etc;
- Caracterizar o comportamento no tempo das estruturas da barragem em função da carga hidráulica, levando-se também em consideração os efeitos das condições termo-ambiental.

2.2 A Importância da Instrumentação de Barragens

Com o objetivo de reduzir riscos de acidentes nos empreendimentos de barragens, em virtude dos impactos causados por eles, justifica-se a atual preocupação em instrumentar barragens com tecnologia moderna e dentro do possível, nacional.

Através da instrumentação localizam-se pontos nas barragens onde há níveis críticos de segurança estrutural e operacional. A estrutural é mais importante, pois compromete a estabilidade da barragem. A operacional relaciona-se ao funcionamento dos equipamentos da barragem, por exemplo, medidor de vazão.

Os instrumentos devem ser instalados de acordo com as especificações e indicações de projeto. Todas as modificações de projeto ocorridas durante a implantação ou mesmo durante a operação devem ser sistematicamente registradas em relatórios operacionais.

Estes registros da instrumentação podem ser usados tanto para a localização e monitoramento de fenômenos anômalos em progressão quanto para aferir quais instrumentos não estão em operação ou operando inadequadamente.

Por meio de instrumentação de auscultação e inspeções visuais freqüentes, acompanham-se, ao longo da vida útil da barragem, o desempenho das estruturas, da fundação e seus efeitos durante a fase de construção, enchimento do reservatório. As inspeções visuais de segurança da obra são essenciais para se

manter inteiramente sob controle a situação da barragem no seu todo, e têm como objetivos básicos examinar o estado geral dos acessos exteriores à barragem, operacionalidade das vias de acessos a zonas sensíveis em condições desfavoráveis, iluminação noturna de zonas críticas, eventual existência de fissuração superficial ou de assentamentos (nivelamento), alinhamento, perturbações localizadas (erosão, assentamentos, vegetação e detritos), percolação de água pelo maciço e verificar o estado de operação dos instrumentos instalados na barragem.

As vias de acesso à barragem e as estruturas anexas devem ser mantidas em condições que permitam o acesso de pessoal, veículos e equipamentos de manutenção em qualquer situação.

A instrumentação a partir de informações obtidas através da realização de suas leituras complementa as inspeções visuais de uma barragem e assegura o monitoramento das medições de deslocamento, pressão, percolação e drenagem, além de outros fatores que afetam o comportamento da obra como nível do reservatório e precipitação.

Por verificar e confirmar hipóteses de segurança associadas aos critérios da fase de projeto, a instrumentação é um item de fundamental importância e sua eficiência depende de um plano racional de implantação da sistematização das informações coletadas, quando processadas, gerando hipóteses de modelagem, através de software, em tabelas e gráficos, proporcionando uma visualização imediata do comportamento da barragem, informando de forma real as situações vivenciadas em campo.

O avanço tecnológico e a maior capacidade de processamento dos computadores permitem, sem maiores dificuldades, o processamento de dados de instrumentação simulando efeitos de condições operacionais adversas, indicando riscos potenciais para a barragem e buscando valores aceitáveis para condições operacionais seguras.

Há portanto a necessidade de intensificação de esforços na utilização de técnicas mais precisas e abrangentes de monitoramento do comportamento real de obras geotécnicas (WHA, 1999). A obtenção dos dados da instrumentação pode ser automatizada ou pode ser obtida com base em leituras periódicas efetuadas por equipe treinada de técnicos ou leituristas.

Esses controles, executados de maneira sistemática, garantem a segurança, qualidade e economia na execução da obra e na operação da barragem.

Vale lembrar que um plano de instrumentação para um empreendimento possui vida útil variando entre 20 a 30 anos, devendo ser readequado às novas condições de operação do empreendimento.

Com isto, prevendo o desempenho futuro de uma barragem, deve-se reavaliar a instalação de novos instrumentos em locais de interesse e, principalmente, considerar nesta reavaliação a evolução tecnológica dos instrumentos.

Os instrumentos a serem instalados em uma barragem devem ser avaliados em função de sua eficiência no monitoramento da segurança estrutural da barragem e devem possuir confiabilidade nos dados de leitura emitidos. Estas informações devem ter as seguintes características:

a) exatidão: grau de aproximação de uma medida com o verdadeiro valor da quantidade medida;
b) sensibilidade: como correspondendo à menor unidade de pressão, deformação, temperatura ou vazão que possa ser detectada em um dado sistema de medida;
c) reprodutividade (precisão): grau de aproximação da média aritmética de cada uma das séries de medições semelhantes;
d) amplitude (intervalo ou faixa): como a capacidade que tem um sistema de medida, para registrar um valor qualquer compreendido entre um valor máximo e um valor mínimo;
e) resolução: quantidade de resposta de saída que um instrumento ou transdutor produz quando se aplica ao instrumento certa quantidade de dados de entrada;
f) linearidade: grau de aproximação de uma curva de calibração de um instrumento com uma linha reta;
g) histeresis: como sendo a diferença entre duas medidas semelhantes efetuadas durante um processo cíclico de leitura;
h) robustez: o equipamento de instrumentação geotécnico deve ser robusto o bastante para resistir ao transporte, montagem, manuseio e instalação na obra;
i) durabilidade: a vida do instrumento deve ser no mínimo igual a do período de vida útil da obra, devendo ser resistente à corrosão e a outros fatores que

podem deteriorar o instrumento, tais como umidade e variações de temperatura.

Embora seja dada grande ênfase à segurança, a instrumentação de uma barragem também tem por objetivo fundamental o de obter redução global nos custos do empreendimento. A instrumentação permite trabalhar com a segurança mínima necessária, sem a necessidade de segurança adicional, o que elevaria os custos financeiros da obra. A Figura 4 apresenta, de forma esquemática, os principais itens da rotina de um projeto de instrumentação.

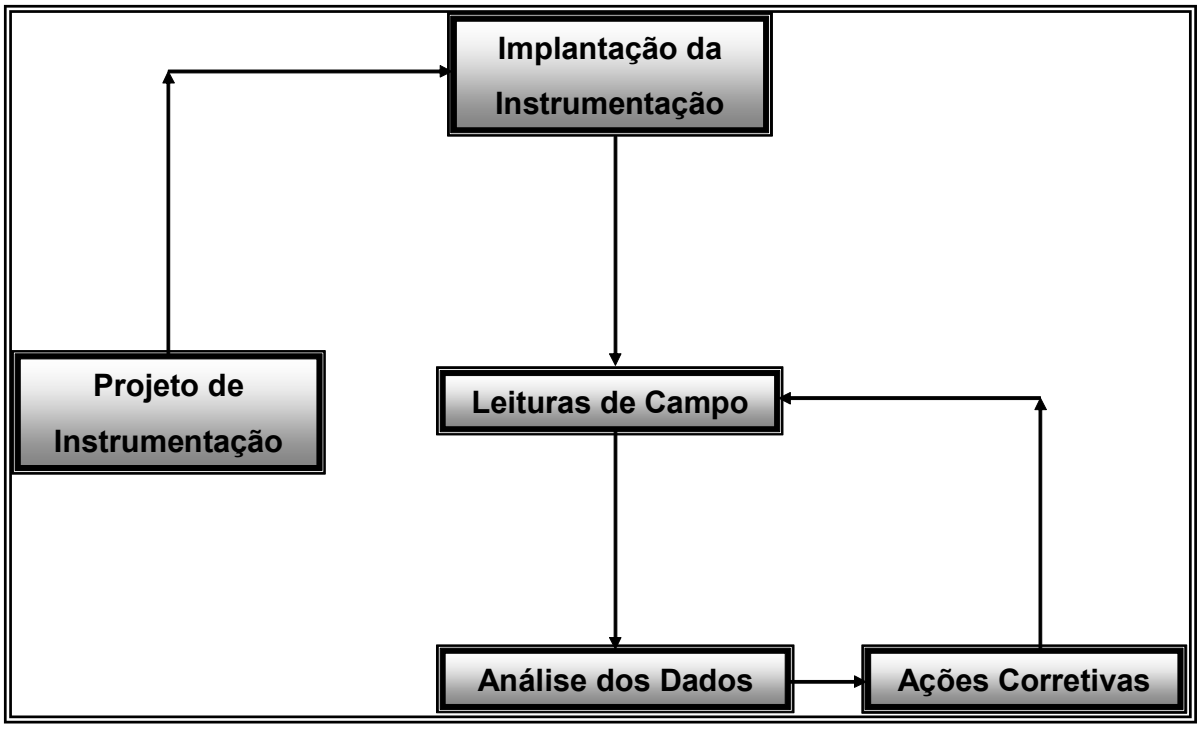


Figura 4 – Rotina de um programa de instrumentação de barragem.

2.3 Inspeções Visuais nas Barragens

As boas condições de segurança de uma barragem não dependem apenas de um bom projeto de instrumentação de auscultação devendo ser complementado com inspeções visuais periódicas de campo que têm por objetivo detectar deteriorações em potencial e alertar sobre condições que podem comprometer a segurança das estruturas associadas das barragens. Devem ser incluídas na inspeção do local, a barragem, sua fundação, dispositivos de descarga, dispositivos de saída,

reservatório, áreas imediatamente a jusante, dispositivos de auscultação e as vias de acesso. (BRASIL, 2002).

Em muitos casos, mudanças na integridade da barragem podem ser detectadas somente por inspeções visuais, através de um técnico treinado ou acostumado a este tipo de inspeção que fará observações sobre eventuais problemas. Estas observações serão anotadas e transmitidas para que se tomem todas as medidas corretivas ou se implante um sistema de observação baseado em instrumentação.

As inspeções de campo e a instrumentação de auscultação das estruturas das barragens devem ser encaradas sempre como mutuamente complementares. Os dados das mesmas devem ser analisados conjuntamente, pois muitas vezes os problemas surgem em regiões não instrumentadas, onde apenas as inspeções visuais podem detectá-los.

Estas inspeções, associadas a uma análise criteriosa dos dados fornecidos pela instrumentação de auscultação da barragem, formam a mais importante e eficiente ferramenta para avaliação do comportamento das estruturas do barramento. As inspeções podem ser divididas em cinco tipos: rotineiras, periódicas, formais, especiais e de emergência, como preconizado pelo Simpósio sobre Instrumentação de Barragens (1996), e utilizado pelas principais empresas do mundo. A equipe de inspeção deve ser formada por especialistas em barragens.

a) Inspeções de Rotina

As inspeções de rotina devem ser realizadas em período de tempo curto, não mais de uma semana, pois alguns fenômenos que podem ocorrer nas barragens, dependendo do estágio de deterioração, levam a danos extremamente rápido. Por exemplo, fissuras e erosão interna que apresenta evolução rápida dependendo do tipo de rejeito, velocidade de percolação e tensões confinantes. Esta inspeção deve ser realizada por pessoas que possuam conhecimento da operação da barragem.

b) Inspeções Periódicas

Devem ser realizadas em datas específicas e por equipe do proprietário do empreendimento ou por terceiros devidamente treinados para realização da tarefa.

c) Inspeções Formais

As inspeções formais devem ser realizadas com freqüência anual e com participação de engenheiro e geólogo. Esta inspeção deve ser minuciosa e consubstanciada em relatórios técnicos através de uma lista de pontos essenciais preparada para esta finalidade. As ocorrências encontradas devem ser relatadas e evidencializadas em relatórios fotográficos.

d) Inspeções Especiais

As inspeções especiais devem ser realizadas a cada 5 a 10 anos dependendo do potencial de ruptura e da velocidade de alteamento do barramento. Esta inspeção deve ser realizada por consultores e especialista em barragens com largo conhecimento técnico e científico e o conhecimento do comportamento, se possível, do passado da barragem, e para segurança do empreendimento, profissionais independentes.

O objetivo desta inspeção é aferir se os tipos de procedimentos operacionais estão corretos e se a estrutura do barramento oferece segurança em sua estabilidade alertando os possíveis danos no caso de ruptura brusca da estrutura.

e) Inspeções de Emergência

Consiste na inspeção da barragem, parte dela, ou de estruturas anexas, devido à ocorrência de algum evento ou anomalia muitas vezes repentino, que possam colocar em perigo a situação das estruturas ou da área a jusante do barramento. Podemos classificar estes eventos como épocas de grandes precipitações ou sismos.

3 REVISÃO SOBRE BARRAGENS DE REJEITOS

As barragens de contenção de rejeitos são estruturas construídas pelas mineradoras com o objetivo de reunir e armazenar os rejeitos produzidos em grande escala no ato do beneficiamento do minério. A legislação ambiental brasileira impõe normas rígidas de controle e estocagem deste rejeito em barragens.

Barragens de rejeitos contendo radionuclídeos, que são rejeitos radioativos de baixo e médio nível de radiação, devem seguir normas da Comissão Nacional de Energia Nuclear (1980), aplicáveis a projetos, construção, operação e descomissionamento de sistemas de barragem de rejeitos, cujos reservatórios sejam destinados à deposição de rejeitos contendo concentrações apreciáveis, a juízo do CNEN, de radionuclídeos de meia-vida longa resultantes da operação de usinas de tratamento de minérios e de outras indústrias. Neste capítulo será feita revisão dos conceitos, processos construtivos e utilização de instrumentação.

3.1 Recursos Minerais

Mineral é todo corpo inorgânico de composição química e de propriedades físicas definidas, encontrado na crosta terrestre. Minério é toda rocha constituída de um mineral ou agregado de minerais contendo um ou mais minerais valiosos, possíveis de serem aproveitados economicamente. Esses minerais valiosos, aproveitados como bens úteis, são chamados de minerais-minério. O mineral ou conjunto de minerais não aproveitados de um minério é denominado ganga.

Os recursos minerais englobam materiais rochosos que podem ser utilizados pelo homem. Como parte do recurso mineral, a reserva mineral representa um determinado volume de rochas com características próprias, passível de aproveitamento econômico. Em outras palavras, recurso é "o que temos" e reserva é "o quanto temos".

O conjunto de operações coordenadas para aproveitamento do material da jazida é denominado lavra. A mina vem a ser a jazida mineral em lavra. As minas podem ser classificadas como: céu aberto, subterrânea ou mista. A lavra pode ser executada de modo artesanal e rudimentar, como nos garimpos, ou realizada mecanicamente e em grande escala como nas minerações.

Segundo o Anuário Mineral Brasileiro (2005), as minas são classificadas de acordo com a produção bruta anual, em toneladas: Grande: maior que 1.000.000, Média: entre 100.000 a 1.000.000 e Pequena: entre 10.000 a 100.000. O objetivo da atividade mineira é a descoberta, a lavra e a concentração de minérios segundo Chaves e Peres (2006).

As mineradoras extraem sua riqueza do meio ambiente e nessa atividade consomem recursos naturais. Nada mais correto, portanto, que a empresa preste conta sobre o impacto de suas ações e invista em preservação ambiental e na melhoria da qualidade de vida da população, principalmente nas comunidades onde atua diretamente.

A demanda crescente por minérios e a tecnologia do beneficiamento têm exigido áreas cada vez mais extensas para disposição dos rejeitos.

Os bens minerais podem ser considerados como "frutos da terra". A exploração de minérios de forma indiscriminada pode ocasionar, entretanto, a destruição da flora, a extinção da fauna, a erosão dos solos e a poluição do ar e das águas.

As rochas e os minerais levaram até bilhões de anos para se formarem e devem, ser extraídos de maneira racional, pois ocorrem em quantidade finita e não renovável.

Os processos de formação dos recursos minerais são incompatíveis com a escala de tempo do homem. Os minerais e rochas são "frutos da terra" que não se reproduzem. Diz-se, a respeito, em contraposição à agricultura, que “minério só dá uma safra”.

Podemos então afirmar que as mineradoras devem ter responsabilidade social que se traduz na forma como a empresa dirige suas atividades, comprometendo-se com o desenvolvimento sustentável da sociedade.

A gestão social e ambientalmente responsável se define pela relação transparente e ética com as partes interessadas e deve estar integrada às atividades da organização.

A responsabilidade social se norteia através da preservação dos recursos ambientais e culturais, o respeito à diversidade e o desenvolvimento com cidadania e inclusão social.

O tratamento ou beneficiamento de minérios consiste de operações aplicadas aos bens minerais com o objetivo de modificar a granulometria, a concentração relativa das espécies minerais presentes ou a forma, sem contudo modificar a identidade

química ou física dos minerais. Em um fluxograma típico de tratamento de minérios, ver Figura 5, as operações são assim classificadas.

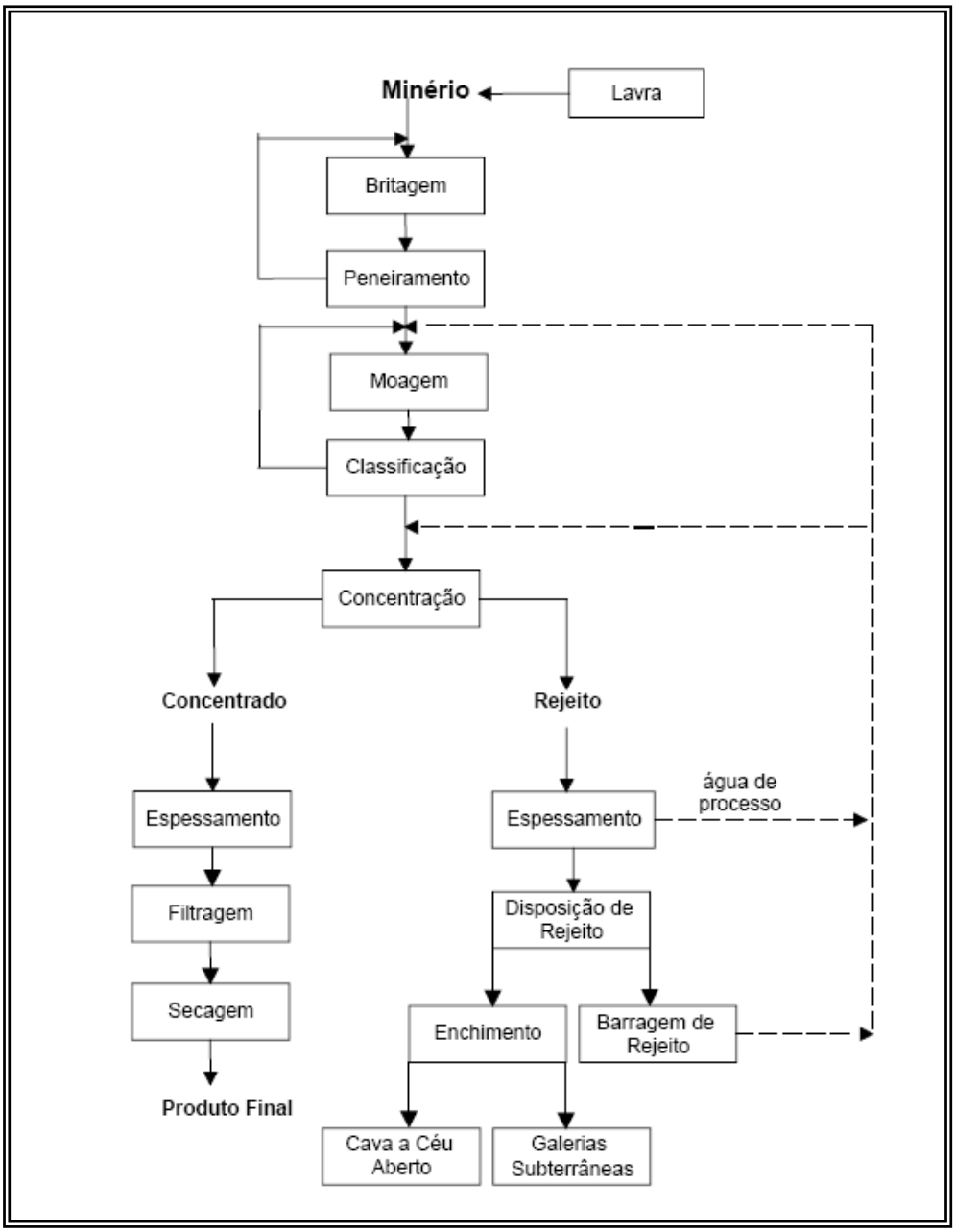


Figura 5 – Fluxograma típico de tratamento de minério.

Beneficiamento pode ser considerado o processo segundo o qual o minério passa por uma preparação para subseqüente estágio no processamento, tal como fundição, lixiviamento e refinamento. Este processo serve para remover minerais constituintes não desejáveis, aumentando assim a concentração do mineral

desejado e/ou para alterar as propriedades físicas do mineral, tal como a classificação de partículas e misturas contidas.

A obtenção do concentrado e do rejeito é conseguida através de operações que envolvem cominuição inicial e final (britagem e moagem), classificação (peneiramento e separação por tamanhos), concentração (gravítica, flotação, etc.) e desaguamento (sedimentação, filtragem, centrifugação e secagem).

A etapa de concentração possui uma importante característica e, pode-se dizer, de especial conotação no processo de beneficiamento. Isto porque muitos minerais podem conter outros ingredientes que acabam se traduzindo, também, em atrativo econômico. Esta possibilidade sugere que, geralmente, se torna necessária uma separação individual do minério e de seus componentes, ver Figura 6. O rejeito é o material que não tem aplicação por não possuir valor comercial, e será descartado de forma econômica minimizando os impactos ambientais.

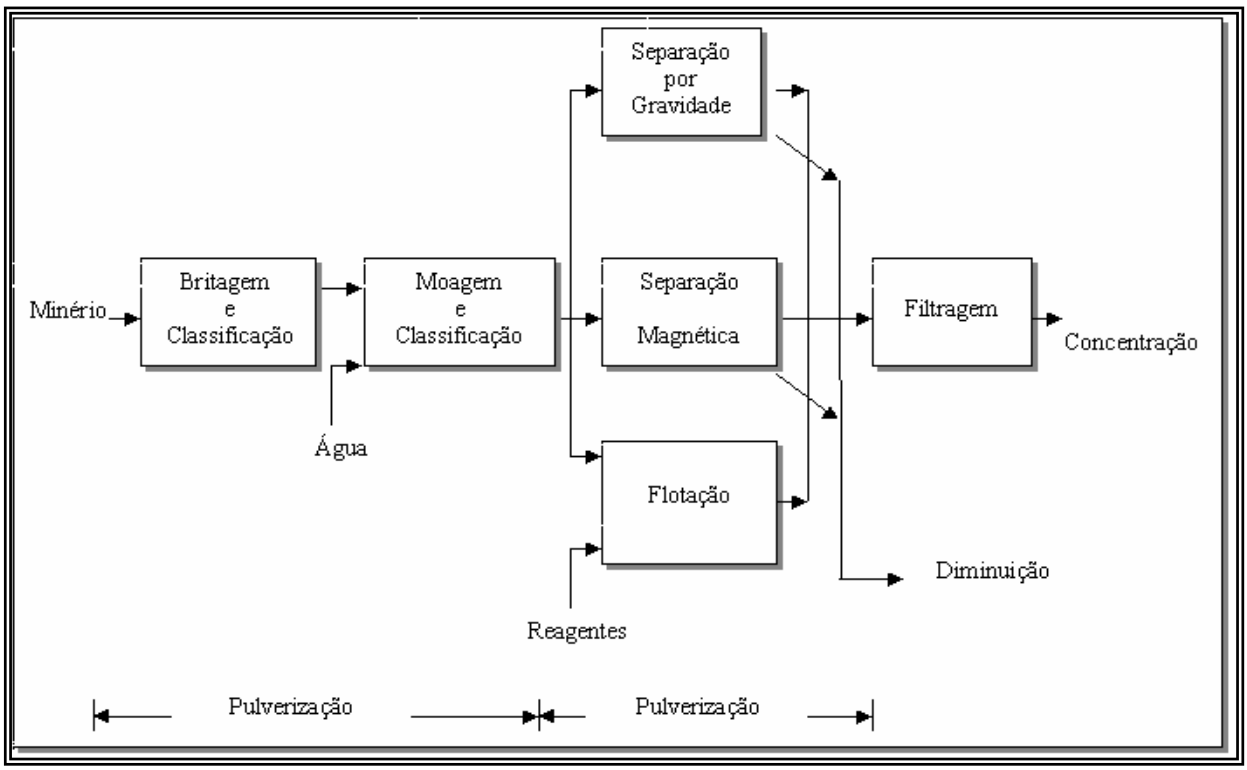


Figura 6 - Métodos praticados na etapa de concentração: gravidade, flutuação e magnética e eletrostática. (MILIOLI, 1999)

Uma característica comum encontrada em algumas jazidas brasileiras é a de apresentar uma grande quantidade de lama, constituída principalmente de argilo-

minerais ou de outros minerais advindos de processos genéticos de alteração, apresentando tamanhos finos, ultrafinos e colóides.

Minerais com esses tamanhos também estão presentes em rejeitos de beneficiamento de minérios. Muitas vezes tais rejeitos contêm ainda grandes quantidades de minerais úteis, devido à dificuldade de separá-los dos minerais de ganga, estão à espera de uma tecnologia que proporcione o seu beneficiamento não desprezando o conceito econômico.

Sabe-se, como regra geral, que quanto maior o teor dos concentrados, maiores são as perdas, ou seja, mais baixas são as recuperações. Como a obtenção de teores mais altos e melhores recuperações normalmente implica em um aumento de custos do tratamento, para a obtenção de maiores lucros esses vários itens devem ser devidamente balanceados.

Diante deste fato o planejamento industrial para implantação de uma planta de mineração deve ser criterioso nas etapas de produção e disposição do rejeito evitando, assim, danos em relação ao meio ambiente.

O desenvolvimento da indústria de base que irá refletir nos índices de crescimento do país depende da utilização de matéria prima oriunda da atividade de extração mineral, e esta atividade gera o minério e descarta volumes razoáveis de rejeitos e estéreis. O impacto ambiental é caracterizado por qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas, que direta ou indiretamente, afetem:

- a saúde, a segurança e o bem estar da população;
- as atividades sociais e econômicas;
- a biota;
- as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente;
- qualidade dos recursos ambientais.

Atualmente o desafio das mineradoras consiste em reduzir os impactos danosos ao meio ambiente no entorno das mineradoras e monitorar os potenciais riscos de acidentes nas barragens, procurando elaborar projetos adequados e específicos ao seu tipo de rejeito.

Os rejeitos devem ser classificados (granulometria, composição química e porosidade) e depositados de acordo com o seu estado físico e a forma de descarte deve ser segura, de maneira a não comprometer o meio ambiente.

A forma mais comum de deposição em superfície é em barragens de contenção de rejeitos, alteadas com o próprio rejeito como elemento de construção destas estruturas e que podem ser executadas por vários métodos construtivos.

3.2 Rejeito da Mineração

Os minérios são processados e resultam rejeitos que poderão ser ativos (contaminados) ou inertes (não contaminados), dependendo do tipo de minério e do processo da planta (CHAMMAS, 1986).

Hoje, basicamente poucos minérios brutos são passíveis de utilização direta como produto final. Na maioria dos casos necessitam de um determinado tratamento, utilizando-se essencialmente de processos físicos, sem alterar a estrutura química dos minerais presentes. Os materiais assim obtidos são usualmente denominados concentrados.

A parte sem interesse econômico é denominada rejeito. O concentrado é um produto com elevado teor da substância de interesse comercial e com especificação apropriada. O rejeito é o material que não tem aplicação comercial e é descartado.

Resíduos sólidos gerados nas operações de lavra e processamento mineral pode ser classificado preliminarmente em estéreis e rejeitos.

Estéreis da mina são materiais (solo, subsolo, rocha) que ocorrem naturalmente na área, não aproveitáveis economicamente, dispostos em camadas (horizontais ou inclinadas), como corpos irregulares, ambos encaixados ou intimamente ligados ao minério.

Rejeito da mineração, que é o material proveniente de beneficiamento do minério, do qual já foi retirada a parte economicamente importante. Este rejeito pode estar na forma de fragmentos ou partículas secas, ou em via aquosa, sendo isto dependendo do tipo de beneficiamento do minério.

Uma vez que estas operações de beneficiamento implicam em cominuição e classificação do minério, os rejeitos apresentam distribuição granulométrica pouco

dispersa e usualmente mais fina que os estéreis, variando o diâmetro dos grãos em função do tipo de minério.

Os rejeitos são freqüentemente depositados a céu aberto, de forma subterrânea ou subaquática e em áreas confinadas (barragens ou bacias) dotadas de estrutura de contenção.

O termo rejeito "*tailings*", é derivado do seguinte fato: O processo de beneficiamento do minério gera um produto chamado condensado no topo ou "*head*" e refugo chamado de rejeito no final ou "*tail*".

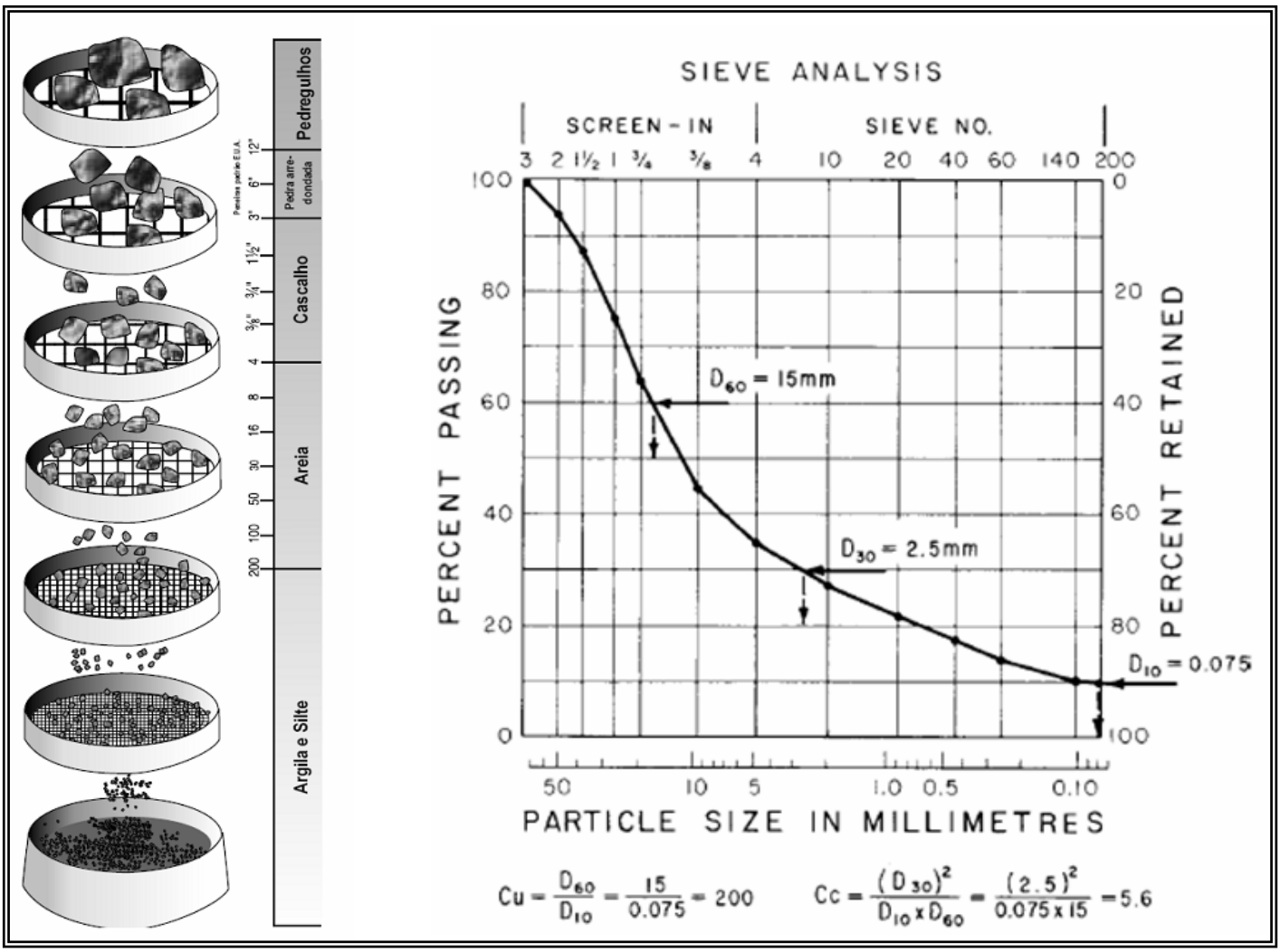
As características dos rejeitos da mineração em termos de granulometria estão diretamente ligadas ao tipo de minério bruto lavrado e do processo industrial de beneficiamento utilizado. Desta feita, sua composição pode abranger uma ampla faixa de materiais, variando desde solos com características arenosas, não plásticos (rejeitos granulares) até solos de granulometria muito fina e alta plasticidade (lamas). O rejeito da mineração, apesar de ser muito arenoso, apresenta condutividade hidráulica relativamente baixa, provavelmente em razão presença de muita areia fina. O tamanho das partículas de rejeito se encontra tipicamente na faixa granulométrica de partículas de areias finas e siltes, ver Tabela 6.

Minerais de minério são minerais valiosos, aproveitáveis como bens úteis com finalidades lucrativas (econômicas). Neste contexto, aparece a denominação de *mineral de ganga* e *mineral de canga*. *Minerais de ganga* são minerais ou conjunto de minerais presentes nas jazidas juntos com os minerais de minério que devido a aspectos econômicos e tecnológicos, não são utilizados, e incorporam-se ao rejeito. *Minerais de canga* são minerais que recobrem os depósitos minerais formados pela oxidação ou laterização superficial; dominam os hidróxidos e óxidos de Fe, Al e Mn. No Brasil é empregada a escala granulométrica normalizada pela associação brasileira de normas técnicas (1995). A Tabela 7 apresenta as aberturas das malhas das peneiras normais da American Society for Testing and Materials (1996).

Tabela 6 – Classificação granulométrica
(ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR-6502/1995).

FRAÇÃO GRANULOMÉTRICA		DIÂMETRO DOS GRÃOS (ϕ)
PEDREGULHO		$\phi > 4{,}76$mm
AREIA	GROSSA	$4{,}76 > \phi > 2$mm
	MÉDIA	$2 > \phi > 0{,}42$mm
	FINA	$0{,}42 > \phi > 0{,}074$mm
SILTE		$0{,}074 > \phi > 0{,}002$mm
ARGILA		$\phi < 0{,}002$mm

Tabela 7 – Aberturas das malhas das peneiras normais
(AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, C-136-1996).



Muitos rejeitos se apresentam na forma de finos grãos de lama com uma fração sólida que se comporta como um solo.

A natureza dos rejeitos varia de acordo com o mineral que está sendo processado pela mineradora.

Os principais problemas estão associados à alta variabilidade dos rejeitos depositados, tendo em vista que os mesmos são produtos decorrentes das necessidades da mineradora em obter o minério com as características comerciais desejadas. Associado a este fato, ainda pode-se citar a falta de metodologias de controle.

Todo este mecanismo necessita ser estudado e associado de forma a estabelecer um controle geotécnico das barragens de rejeitos, com a finalidade de diminuir o empirismo durante a construção destas estruturas.

As propriedades com as quais os rejeitos são caracterizados, em geral, incluem granulometria, resistência, densidade específica e plasticidade. A Tabela 8 apresenta parâmetros geotécnicos comparativos com um tipo de rejeito.

Tabela 8 – Parâmetros geotécnicos (NAMBA et al, 2002).

Materiais	c' (kPa)	φ' (°)	c_u (kPa)	γ_{sat} (kN/m^3)	r_u
Aterro compactado	10,0	27	-	18,0	-
Aterro de fundação	10,0	27	-	18,0	0,1 a 0,3
Areia fina argilosa	1,0	26	-	17,0	-
Argila orgânica	10,0	25	24,2	15,0	0,6
Solo residual	80,0	30	-	20,0	-
Rejeito	0,0	10	-	13,0	-

onde: c': coesão efetiva, em kPa; φ': ângulo de atrito interno efetivo, em graus;
c_u: coesão não-drenada, em kPa; γ_{sat}: peso específico saturado, em kN/m^3;
r_u: parâmetro de pressão neutra = $\Delta u/\gamma.\Delta H$, onde ΔH = incremento de altura de aterro.

Os diversos tipos de rejeitos possuem uma larga variedade de características físicas cuja generalização é muito difícil.

De uma maneira geral, os vários tipos de rejeitos são classificados basicamente em quatro categorias de acordo com granulometria e plasticidade, sendo: rejeitos de rochas brandas, de rochas duras, finos e grossos.

Entretanto, rejeitos são diferentes de muitas ocorrências de solo, pois a densidade e a resistência dos rejeitos são inicialmente baixas e aumentam muito lentamente com

o tempo. Os rejeitos possuem características mais comuns de material granular, independente do tamanho das partículas.

A maioria dos rejeitos encontrados nas minas brasileiras, especialmente aquelas jazidas com intemperismo, consistem de:

- Areia, areia natural, silte;
- Lama ou resíduos micáceos, mica;
- Argila;
- Pedras e seixos;
- Solos de decapeamento, incluindo turfa. (BATES, 2002)

A Figura 7 apresenta curvas granulométricas de um solo residual de capeamento em três distintas fases do processo de beneficiamento:

1- após o desmonte hidráulico;

2- areia para comercialização após segregação hidráulica e

3- rejeito depositado na barragem da Mineração Juruaçu localizada no distrito de Perus, cidade de São Paulo.

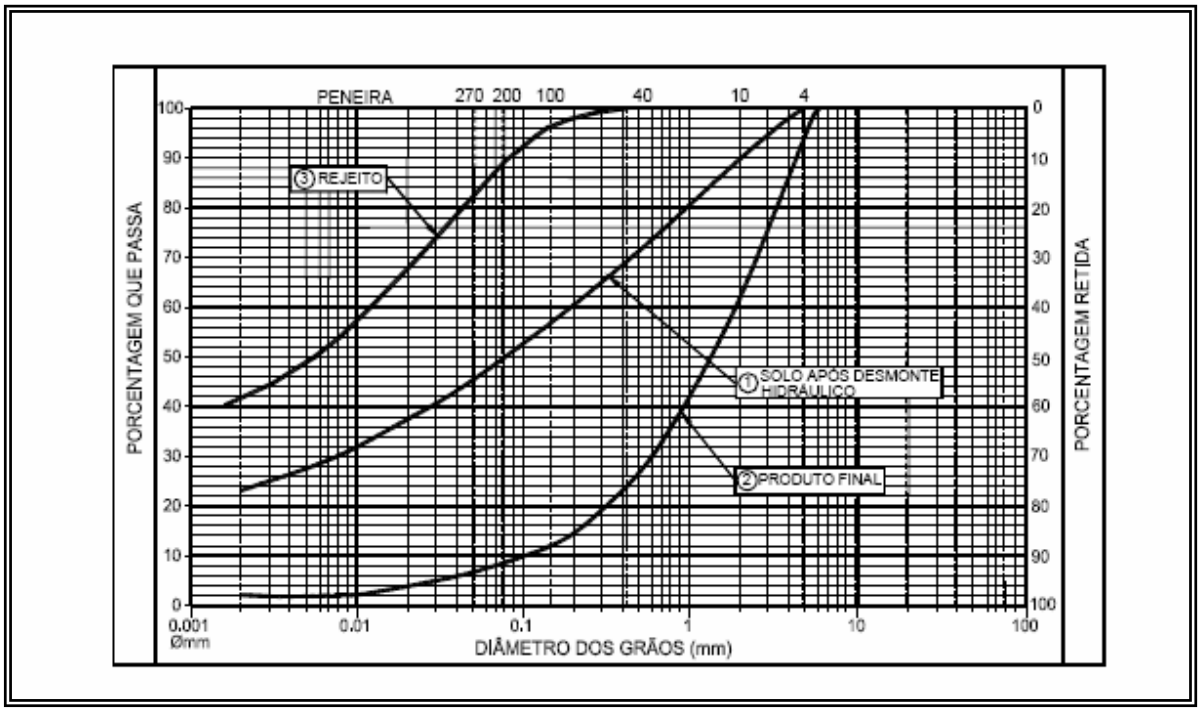


Figura 7 – Curvas granulométricas dos materiais em fases distintas do beneficiamento da areia (NAMBA et al, 2002).

O tamanho das partículas de rejeito se encontra tipicamente na faixa de partículas de areias e siltes.

As características químicas dos rejeitos de mineração variam de acordo com o mineral de interesse e as substâncias químicas envolvidas no processo de extração dos metais.

Em função do tipo de minério e do tratamento utilizado, os rejeitos podem variar de materiais arenosos não plásticos (rejeitos granulares) até solos de granulometria fina e alta plasticidade (lamas). Os rejeitos granulares, constituídos de partículas de granulometria de areias finas a médias, não plásticas, possuem alta permeabilidade e resistência ao cisalhamento e baixa compressibilidade. Já as lamas, constituídas por partículas de granulometria de siltes e argilas, possuem alta plasticidade, difícil sedimentação e alta compressibilidade. A Figura 8 apresenta curva granulométrica de rejeitos de vários tipos de minérios.

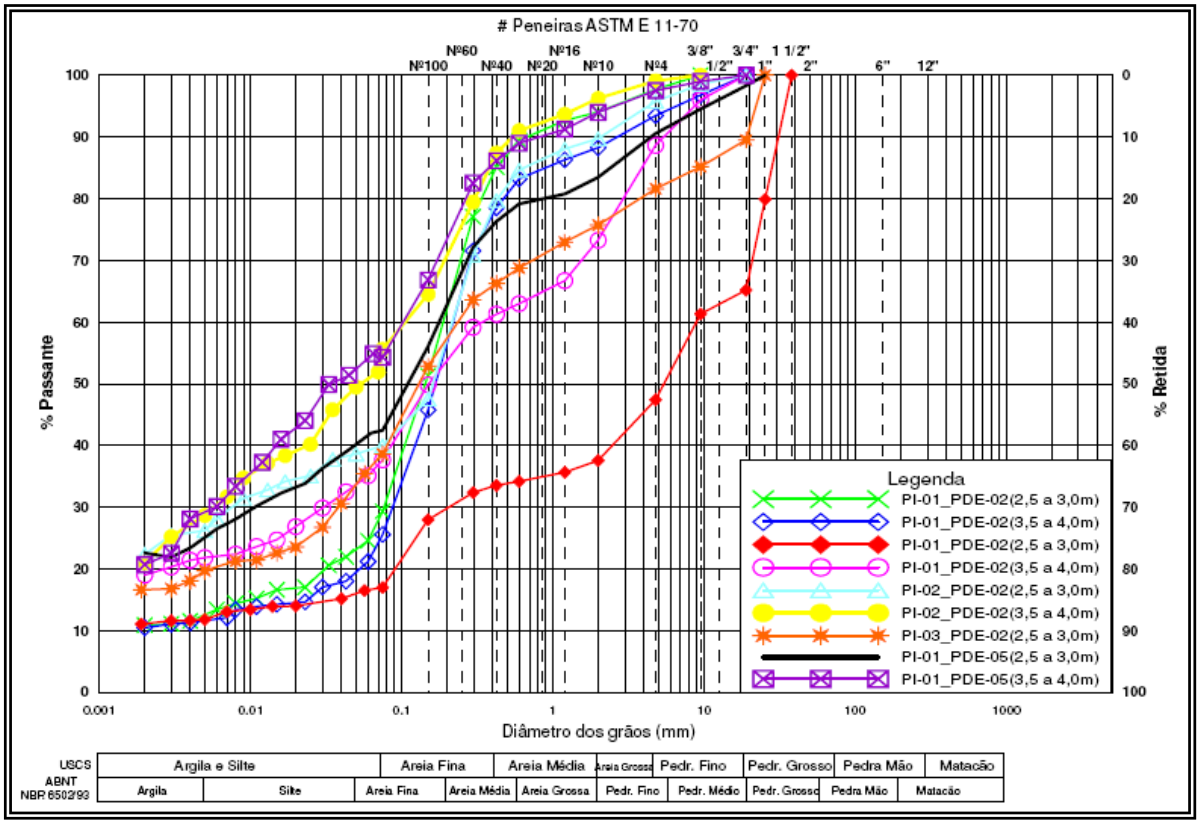


Figura 8 – Curva de graduação de rejeitos para vários tipos de minérios (WILSON, 1980).

Como dado prático, apresentamos amostras coletadas nos reservatórios das barragens de contenção de rejeitos das mineradoras indicadas na Tabela 9.

Tabela 9 – Identificação das amostras de rejeito (PEREIRA, 2006).

Identificação da Amostra	Local	Rejeito (tipo)	Mineradora
01	Mina do Germano	Minério de Ferro	Samarco Mineração S.A.
02	Mina de Gongo Soco	Minério de Ferro	CVRD
03	Barragem do Pontal	Minério de Ferro	CVRD

As curvas granulométricas destes materiais são apresentadas a seguir:

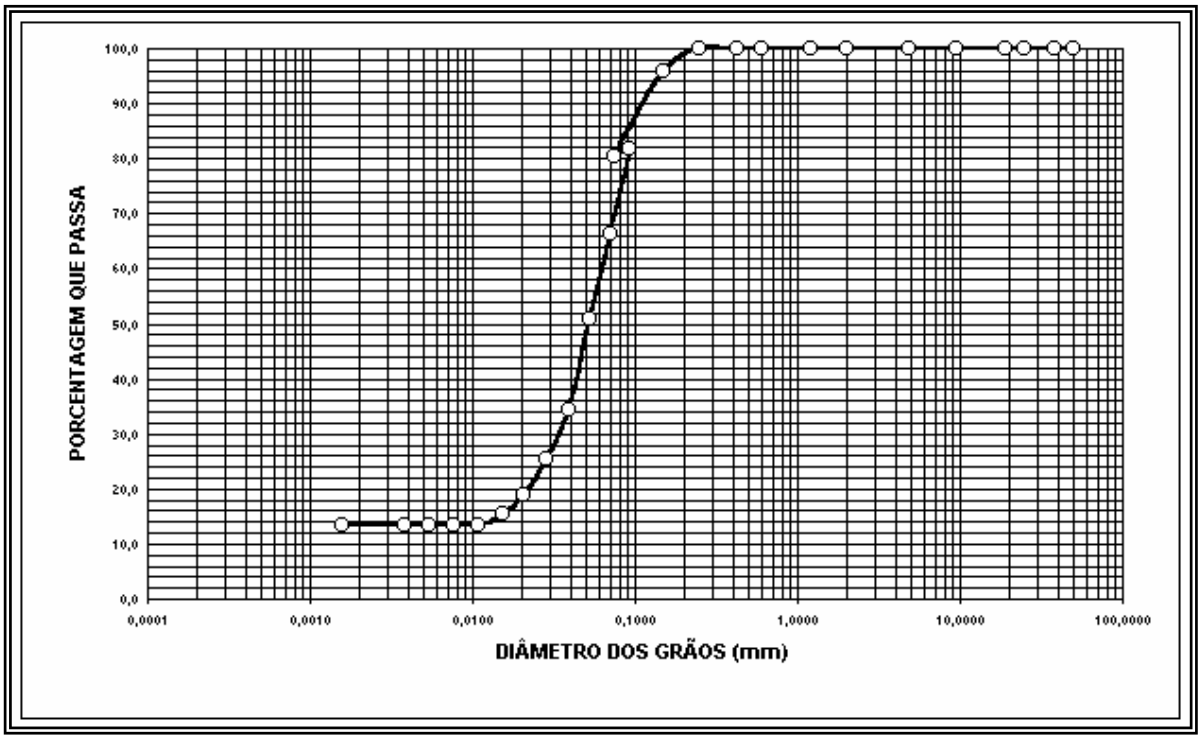


Figura 9 – Curva granulométrica do rejeito da mina do Germano (PEREIRA, 2006).

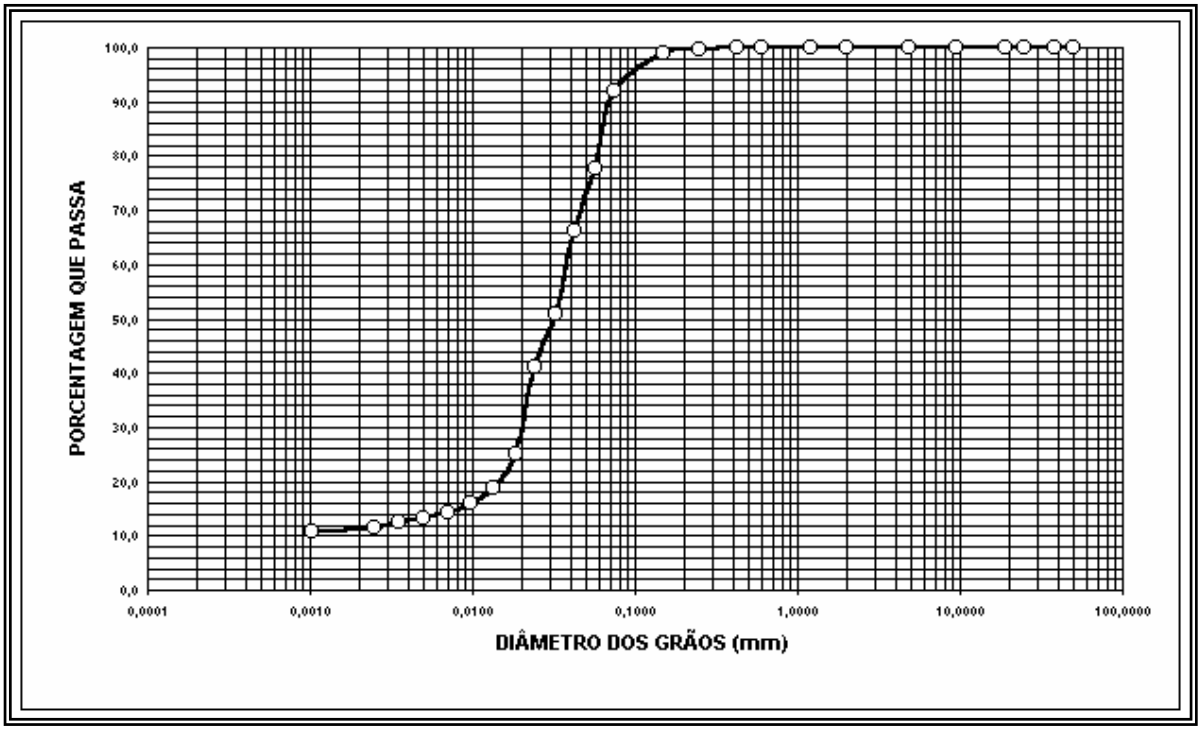


Figura 10 – Curva granulométrica do rejeito da mina de Gongo Soco (PEREIRA, 2006).

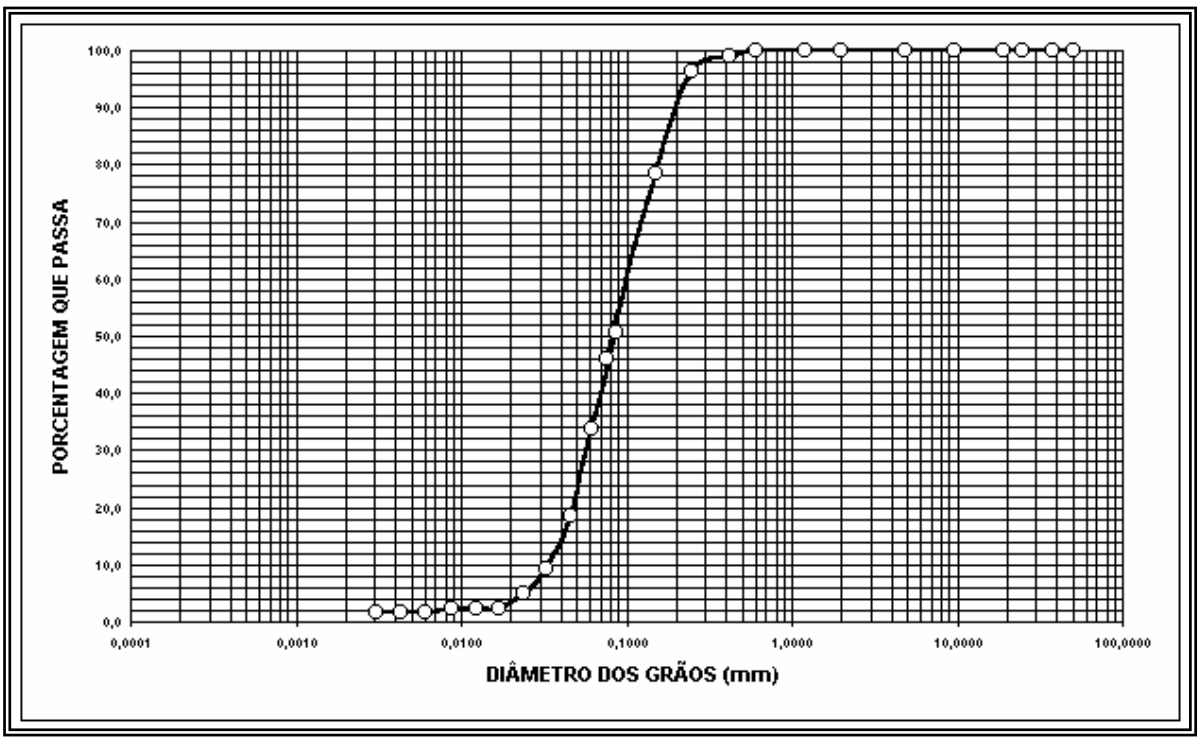


Figura 11 – Curva granulométrica do rejeito da barragem do Pontal (PEREIRA, 2006).

A mineração é uma atividade que gera grande volume de rejeitos, devido à pequena concentração de metal encontrada no mineral bruto.

O mecanismo de estabilização da massa de rejeito é dificultado pelas suas diferenças nas características granulométricas, no seu alto conteúdo aquoso e nos processos de disposição dos resíduos.

Estes fatores tendem, de maneira significativa, a comprometer o comportamento geotécnico das estruturas responsáveis pela contenção dos rejeitos.

Para o entendimento da natureza da formação dos rejeitos é fundamental o conhecimento básico de como o beneficiamento de minérios divide o mineral bruto em concentrado e rejeito.

Os passos apresentados na Figura 12 são comuns no processamento de diversos tipos de minérios.

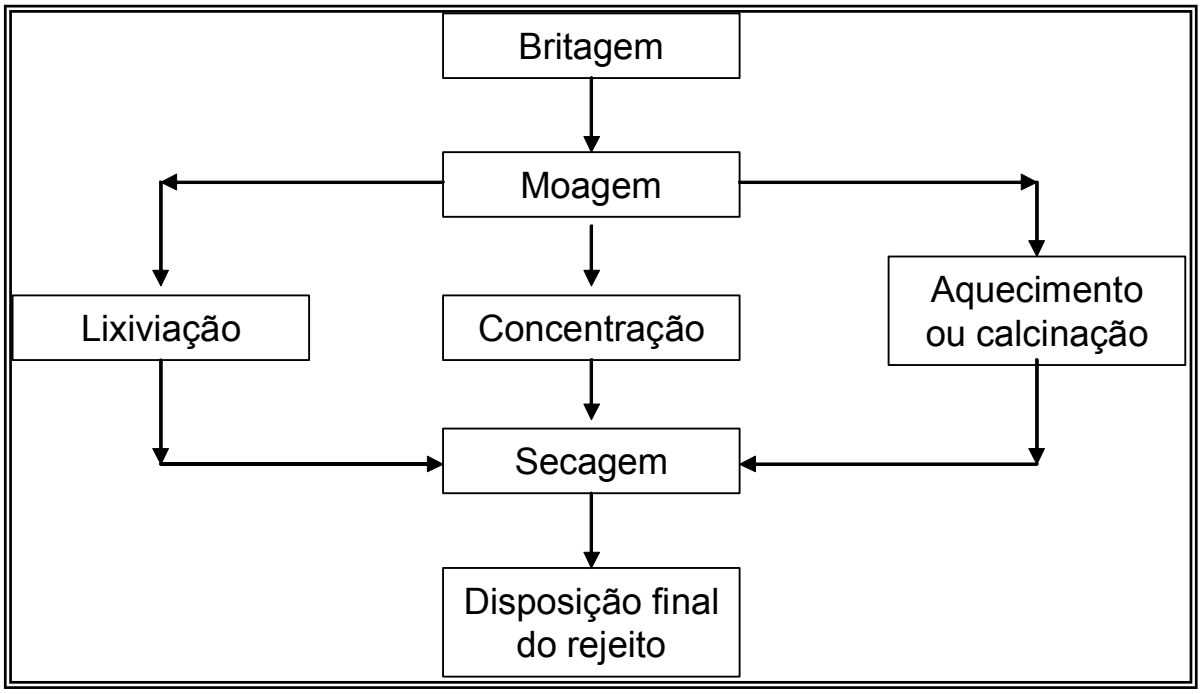


Figura 12 – Procedimento na produção de rejeitos (VICK, 1990, modificado).

A *Britagem* tem por objetivo básico redução (ruptura) de partículas minerais em material de tamanhos reduzidos (superior a 10 milímetros) de maneira controlada. Os mecanismos envolvidos compreendem basicamente impacto, compressão e cisalhamento. Os equipamentos tradicionalmente utilizados são os britadores giratórios, de mandíbulas, cônicos, de rolos e de impacto (horizontal e vertical).

A *moagem* tem o objetivo de diminuir, o máximo possível, o tamanho das partículas no tamanho adequado às diferentes operações subseqüentes a que devem ser submetidas, para obtenção de produtos com granulometria inferior a 10 milímetros.

Os moinhos empregados em cominuição de minérios normalmente são moinhos tubulares rotativos (bolas e barras), vibratórios, ver Figura 13, de rolos e de impacto, dentre outros.

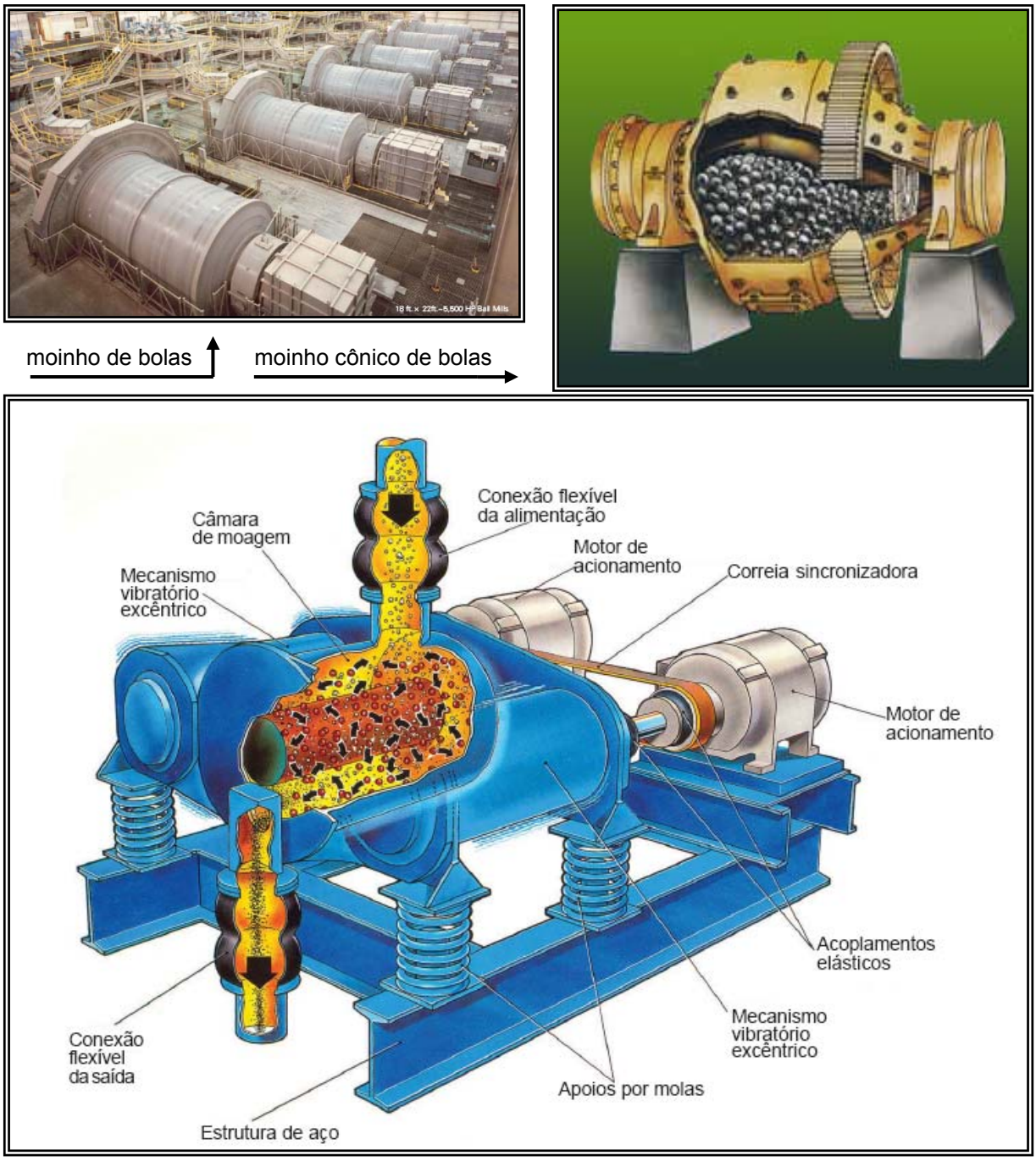


Figura 13 – Moinhos: bolas e vibratório (METSO MINERALS, 2007).

A *Concentração* tem como principal objetivo o processo de recuperação dos minerais úteis contidos num minério na forma mais concentrada possível.

A *Lixiviação* consiste na dissolução seletiva de minerais contendo o metal ou metais de interesse através do contato do sólido (minério ou concentrado) com uma fase aquosa contendo ácidos (ácido sulfúrico), bases (hidróxidos de amônio e sódio) ou agentes complexantes (cianeto de sódio e o hidróxido de amônio), em condições variadas de pressão e temperatura (24 a 250 ºC).

A *Calcinação* é o processo de aquecer uma substância a altas temperaturas, sem, contudo atingir seu ponto de fusão, de forma a conseguir sua decomposição química e conseqüente eliminação dos produtos voláteis.

A calcinação também é usada para a eliminação da água de cristalização, operação conhecida como queima e na oxidação de substâncias poluidoras presentes em resíduos, buscando a eliminação de sua toxidez.

Na *Desidratação* se faz necessária a retirada de água para obter produtos com baixa umidade.

A *Disposição de Rejeitos* provenientes de uma unidade de beneficiamento constitui uma tarefa delicada, quer por questões econômicas, quer por questões ambientais.

A Figura 14 apresenta o fluxograma do processo de beneficiamento de uma indústria carbonífera.

O peneiramento fino, a moagem e classificação e as operações de concentração são, via de regra, executadas por processos via úmida. Isto significa que são adicionadas quantidades substanciais de água, formando uma mistura, denominada polpa, em que as partículas sólidas estão em suspensão em água. (CHAVES, 1996).

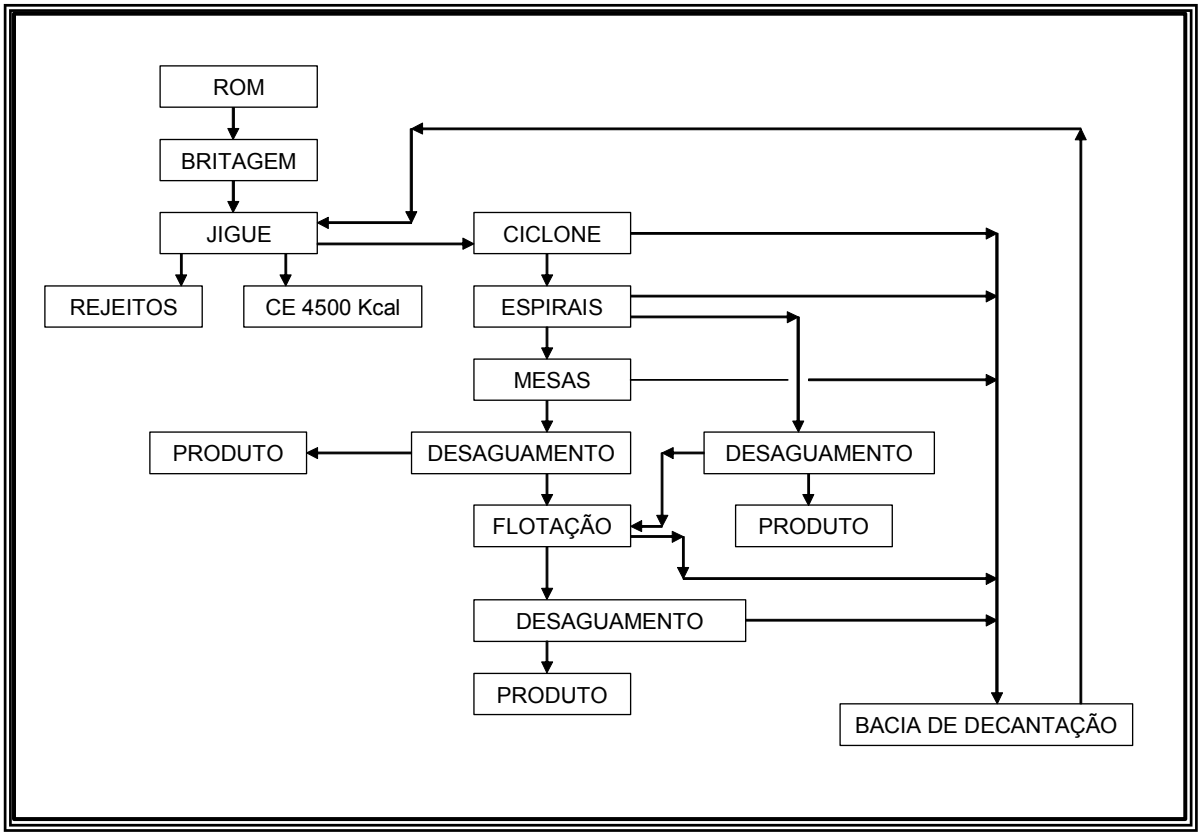


Figura 14 – Fluxograma de beneficiamento da mina Trevo - Siderópolis (SC). (RIBEIRO, 2003).

O processo normalmente utilizado em minas a céu aberto consiste em: decapeamento da jazida realizado por tratores de esteira e escavadeira hidráulica, perfuração, desmonte com explosivos, desmonte mecânico e operações de carga e transporte por caminhões especiais denominados “fora de estrada” até as instalações de beneficiamento.

Na lavra são produzidos os estéreis do decapeamento da mina e no processo de beneficiamento temos redução granulométrica, classificação granulométrica, transporte e manuseio, concentração mineral, desaguamento, secagem, disposição de rejeitos e estocagem. Deste processo são gerados os rejeitos e seus descartes líquidos, ilustrado na Figura 15.

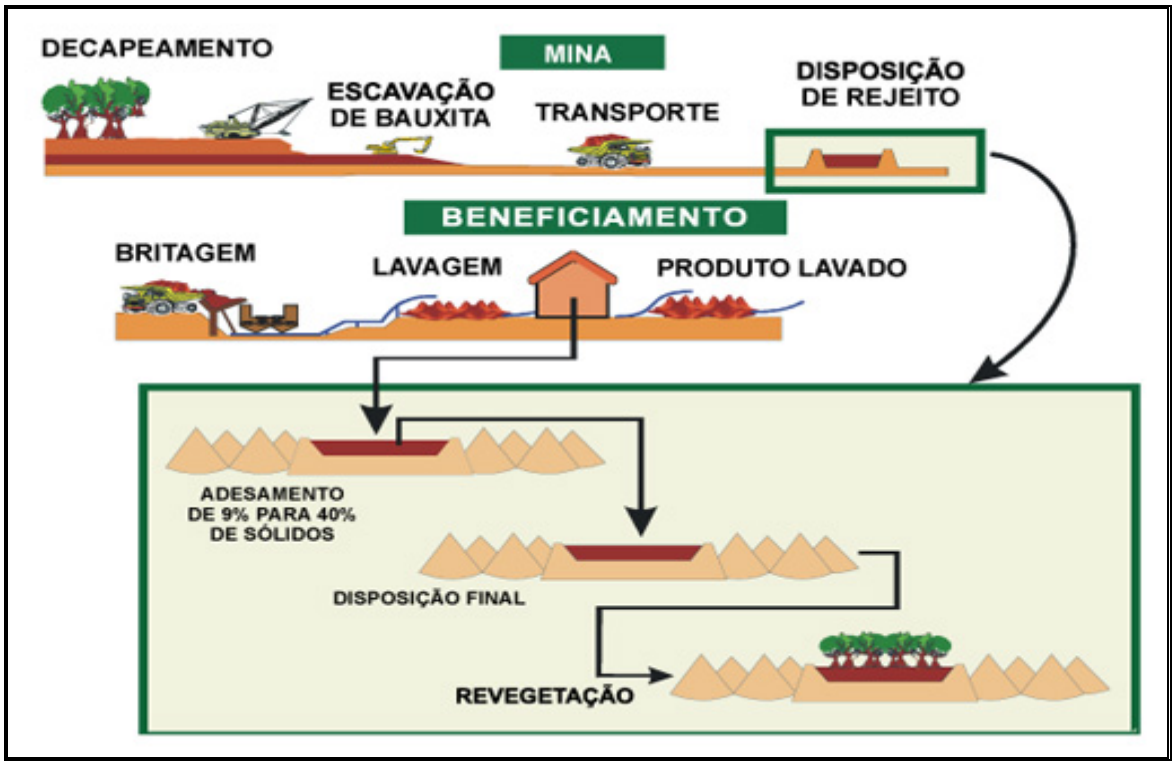


Figura 15 – Fases de uma mineração: extração e beneficiamento (MINERAÇÃO RIO DO NORTE, 2007).

3.3 Barragem de Rejeito

Barragem de rejeitos é uma estrutura projetada para decantação e manutenção de rejeitos e água de processo. (EUROPEAN COMMISSION, 2004).

Por não possuir valor comercial, o rejeito necessita ser descartado da forma mais econômica, minimizando porém os impactos ambientais resultantes. No caso de rejeitos na forma de sólidos a deposição será em barragens de rejeitos.

O manual de segurança e inspeção de barragens (BRASIL, 2002) define barragem de rejeitos como sendo um barramento construído para reter rejeitos ou materiais estéreis de mineração e de outros processos industriais.

Atualmente o desenvolvimento dos projetos de barragens somente são iniciados após definição do local de implantação da barragem. Atualmente não se admite o caráter empírico nas construções de barragens, porém ainda está presente na elaboração de alguns projetos de barragens de rejeitos.

Os projetos modernos de barragens de terra envolvem análises das condições estáticas e dinâmicas que modelam o desempenho das barragens (GOLDIN e

RASSKAZOV, 1992). A estrutura de uma barragem é construída seguindo critérios técnicos e geotécnicos com o objetivo de confinar o rejeito gerado durante o processo de beneficiamento do minério. A variação do processamento do minério pode eventualmente mudar as características do rejeito. Cada barragem de rejeito é uma obra particular, pois depende da finalidade, do tipo de rejeito a ser depositado, diferenças nas características granulométricas e nos processos de disposição. A geometria de uma barragem de rejeitos depende da topografia do local, podendo ser implantada aproveitando o perfil de vales e possuir solo estável, facilitando a formação da lagoa ou em terrenos planos. O solo escolhido deve possuir capacidade de suporte suficiente para não ocorrer deslizamentos ou grandes acomodações devido ao peso de rejeito a cada alteamento. Deve-se evitar a construção da barragem sobre nascentes, pois a pressão da água pode comprometer a estabilidade do aterro. A construção de uma barragem de rejeitos é um processo contínuo, e o projeto deve ser objeto de contínuas discussões durante curto período de operação. Porém, a disposição de rejeitos, mesmo em estruturas adequadamente projetadas e dotadas de todos os dispositivos de monitoramento, deve ser encarada como uma situação transitória até ser encontrada solução de processo que elimine o rejeito, em sua forma nociva. A Figura 16 apresenta em corte o detalhamento de uma barragem de rejeitos.

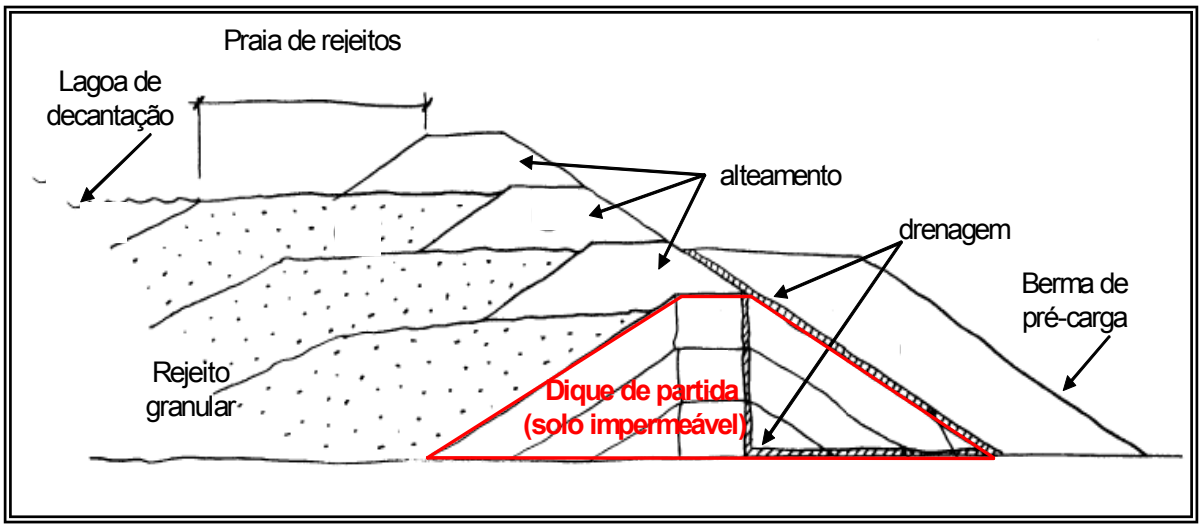


Figura 16 – Perfil de uma barragem de rejeitos e seus elementos (VICK modificado, 1990).

3.4 Métodos de Construção de Barragens de Rejeitos

A retenção dos rejeitos de mineração normalmente é feita por tanques ou barramentos. Em geral, estes barramentos são projetados com um dique de partida com material impermeável. Quando o solo local não for de boa qualidade, deve ser construído um dique de partida com material granular adequado e compactado para evitar a infiltração de água pelo corpo da barragem.

Sob o dique de partida, constrói-se uma trincheira de vedação *cut-off*, ver Figura 17, que pode ser executado de duas formas distintas: vedação total ou vedação parcial. Quando se utiliza vedação total, a camada permeável da fundação é totalmente atravessada pelo elemento, encaixando-se no horizonte impermeável.

A execução do dique de partida pode ser feita com material argiloso compactado e esta região passa a ser uma zona impermeável e deve ser livre de concentrações localizadas de percolação. Havendo um movimento de água através de um solo, ocorre uma transferência de energia da água para as partículas do solo, devido o atrito viscoso que se desenvolve. A energia transferida é medida pela perda de carga e a força correspondente a energia chamada de força de percolação. Tal força transfere-se de grão a grão (é, portanto, uma força efetiva) e tendo mesmo sentido de fluxo. O conhecimento do mecanismo e a determinação do valor desta força são de fundamental importância, uma vez que ela é responsável por instabilidades em taludes de barragens.

Quando a água flui com gradiente elevado através do corpo ou fundação da barragem, a força de percolação pode provocar o rompimento da estrutura e conseqüentemente carreamento dos grãos. Dos estudos das redes de percolação é avaliado o risco de haver o fenômeno chamado *piping,* que é a erosão interna regressiva da barragem provocada pelas forças de percolação, o que pode causar o colapso total da barragem. Este processo, *piping,* pode ocorrer de forma contínua e progressiva.

O desenvolvimento do processo de erosão interna ocorre de jusante para montante, seguindo caminhos preferenciais como: contatos de solos diferentes ao longo de tubulações enterradas e juntas de estratificação.

O movimento de água através do solo é realizado pelas forças de gravidade e de capilaridade, esse movimento através dos grandes poros, em solo saturado, é

realizado fundamentalmente pela ação da gravidade, enquanto em um solo não saturado ocorre principalmente pela capilaridade.

A densidade do fluxo é função da condutividade hidráulica do solo, que expressa a facilidade com que um fluido é transportado através de um meio poroso.

Este fenômeno pode ser evitado fazendo-se uma redução dos gradientes de saída, pois nessa região, jusante é o local mais crítico, os gradientes hidráulicos são elevados e os níveis de tensão confinantes são baixos.

Em barragens de solo, deve-se observar: a erosão interna é um dos defeitos mais comuns, arraste das partículas com pouca coesão, o arraste é máximo em areias finas com pouca compactação e gradiente máximo de saída é igual a um valor critico.

A espessura do dique de partida dependerá da qualidade e quantidade de materiais argilosos disponíveis na área que atenda aos requisitos do projeto, das suas características geotécnicas, de seus índices físicos naturais (teor de umidade) e do condicionamento climático (índice pluviométrico anual e distribuição das chuvas ao longo do ano).

O peso da argila e sua coesão podem não ser suficientes para contrabalançar uma eventual pressão de água, ocorrendo o chamado levantamento de fundo.

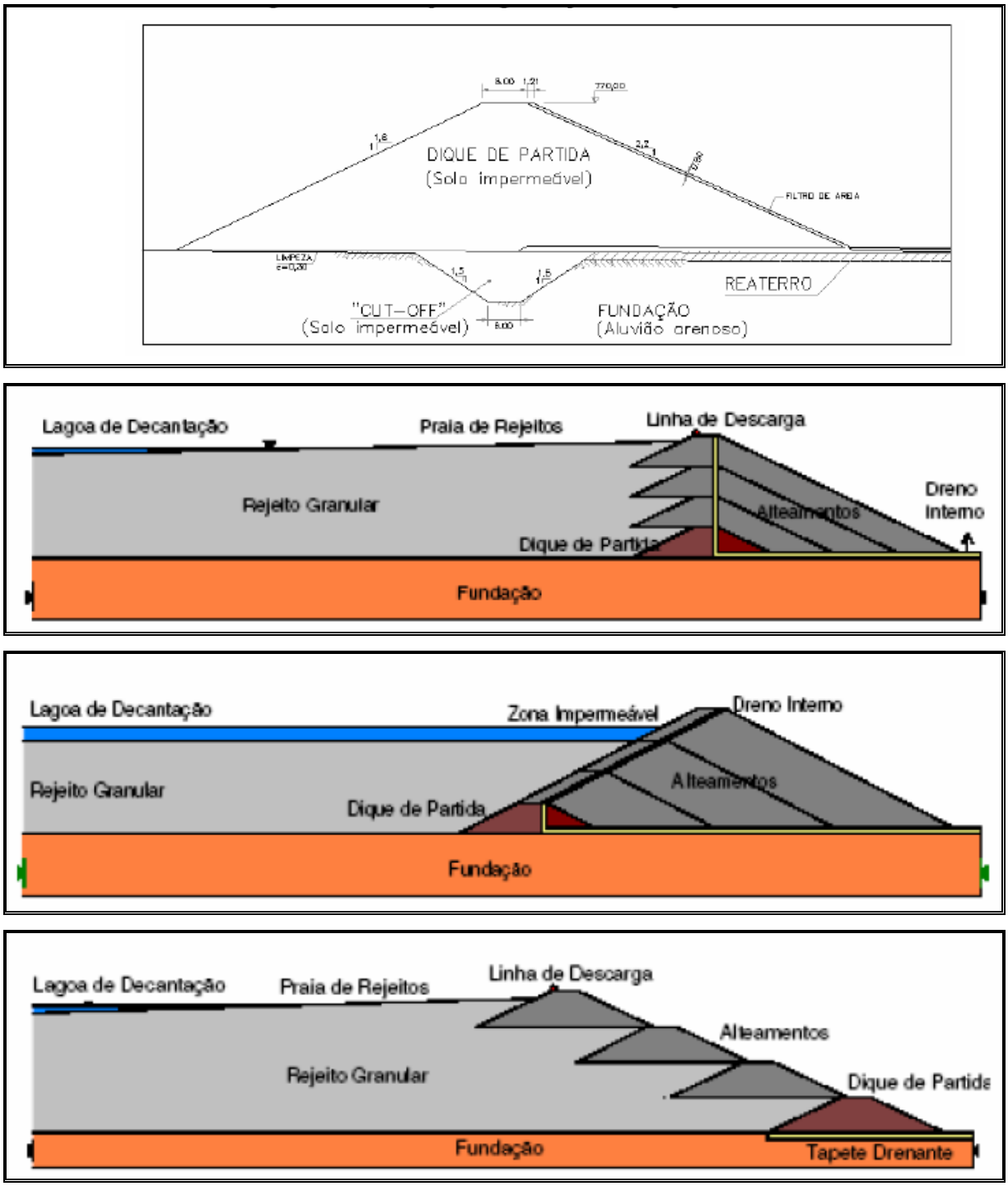


Figura 17 – Seção transversal do dique de partida (ARAÚJO, 2006) e dique de partida dos três tipos de alteamento de barragem (ALBUQUERQUE FILHO, 2004).

As estruturas hidráulicas singulares, estruturas complexas para desvio, conduto de drenagem e extravasamento são importantes nas barragens de rejeitos. O sistema de extravasão é um dispositivo de segurança e tem a finalidade de eliminar o

excesso de água quando a vazão assumir valores que tornem perigosa a estabilidade da barragem ou impedir que o nível de água suba acima de certa cota.

O extravasor deve ter capacidade suficiente para permitir o escoamento máximo que pode ocorrer na seção considerada. A vazão de dimensionamento deve ser igual à máxima vazão do curso de água, o que ocorre por ocasião de grandes vazões provenientes de precipitações de grande intensidade que aconteçam durante algumas épocas do ano, ou capacidade de escoar a cheia máxima provável, sem causar erosão ou transbordamento do barramento, conforme indica a Figura 18.

Figura 18 – Posição do extravasor em relação à barragem (Foto cedida – Barragem Casa de Pedra, Congonhas, MG, da Companhia Siderúrgica Nacional – CSN).

O extravasor vai tendo seu nível elevado com peças de concreto à medida que é alteada a barragem ou elevação do nível do reservatório. O sistema é operado de tal forma a se reter o mínimo de água no reservatório, tanto para permitir maior capacidade de amortecimento de cheias como a própria segurança da barragem, conforme detalha a Figura 19.

Figura 19 – Vista de jusante do extravasor (Foto cedida – Barragem Casa de Pedra, Congonhas, MG, da Companhia Siderúrgica Nacional – CSN).

Os estudos de viabilidade de barragens para contenção de rejeitos de mineração devem levar em consideração o alteamento em etapas. Como é comum em obras de mineração, a barragem é normalmente construída com uma altura inicial para atender ao primeiro ano de operação, sendo alteada posteriormente, de acordo com o avanço de lavra e conseqüentemente aumento na produção de rejeitos. A forma mais comum de executar o alteamento de barragens de rejeitos é executar um aterro onde todo o material novo compactado é colocado acima da crista e sobre o talude antigo. A grande vantagem desta metodologia é operacional, pois não existe a necessidade de rebaixamento do nível do reservatório e a operação pode continuar sem interrupções. Esta concepção de projeto permite parcelar os investimentos possibilitando inclusive que fases finais da construção da obra sejam realizadas pelas próprias equipes e equipamentos do empreendedor.

A elevação da cota da barragem aumenta sua capacidade volumétrica, evitando a construção de nova barragem, que inundaria novas áreas. O alteamento é feito com rejeitos de melhores características geotécnicas. Na prática são utilizadas três metodologias construtivas de barramentos, sendo:

- **Método de Montante**: Por questões econômicas, as barragens de rejeitos são construídas pelo método de montante, no qual a estrutura do barramento é iniciada a partir de uma barragem piloto ou por meio de um dique de partida, normalmente de material argiloso ou enrocamento compactado. Após a conclusão desta estrutura inicial, é utilizada a técnica de aterro hidráulico e o próprio rejeito é lançado à montante ao longo da periferia da crista, formando uma "praia". Esta praia será a fundação e, eventualmente, a fonte de material de construção do próximo alteamento. Esta fundação deverá possuir resistência suficiente para resistir a deslizamentos e uma capacidade de suporte adequada para prevenir recalques excessivos.

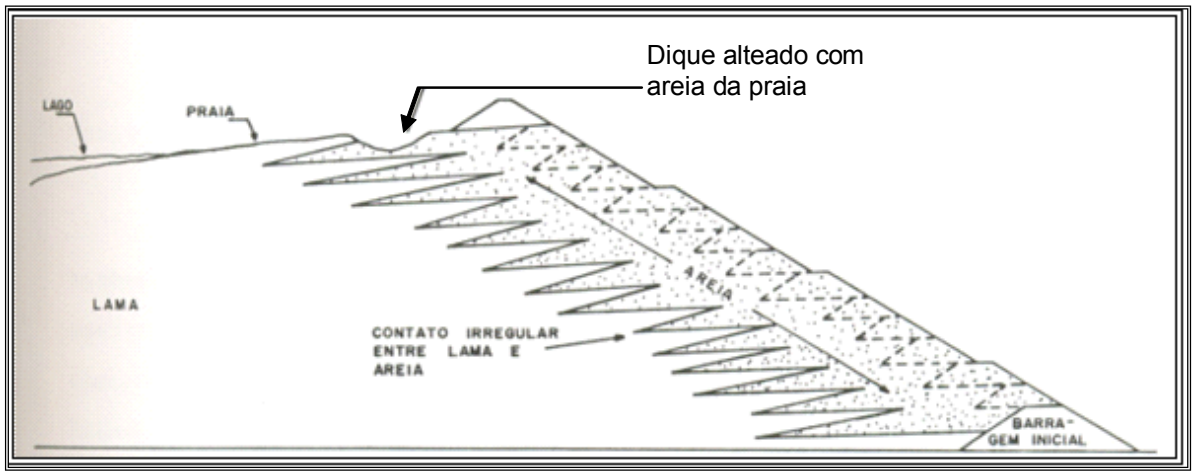


Figura 20 – Método construtivo de montante (WILSON modificado, 1980).

Baseado na variação da porosidade, parâmetros de resistência e permeabilidade, bem como uma avaliação do real potencial de liquefação (por carregamentos estáticos e dinâmicos), considerando as variadas características do rejeito durante sua própria deposição, e também aquelas que ocorrem ao longo do tempo, em diferentes alteamentos, os riscos de ruptura hidráulica deste tipo de barragem são elevados. Segundo Vargas (1978), ruptura hidráulica é a perda de resistência e estabilidade do solo, e conseqüentemente, a danificação da estrutura constituída por ele ou sobre ele fundada, por efeito das pressões de percolação d'água, que é o fluxo ou

movimento intersticial de líquido através da barragem, fundação, ombreiras ou reservatório de rejeitos.

Barragens de rejeitos construídas com a técnica de aterro hidráulico, normalmente apresentam deficiências geotécnicas relacionadas aos aspectos de construção e segurança, pois sua construção é de forma desordenada e resulta em aterros de baixa qualidade e sujeito à ocorrência de instabilidade, pois o material armazenado encontra-se sob condição saturada e apresenta altos índices de vazios levando o rejeito (solo) à perda significativa de rigidez por diminuição de coesão e de atrito com elevado potencial de susceptibilidade a liquefação.

Os fatores que conduzem à liquefação incluem carregamentos dinâmicos, deformação excessiva por carregamento estático, carregamento por impacto e carregamento cíclico, tal como um carregamento por sismo.

O método de montante é o mais econômico, a curto prazo, pois permite obter a menor relação entre volumes de areia e lama. Embora seja o mais utilizado possui baixo controle durante a construção e envolve maiores riscos de ruptura, devido às dificuldades já descritas deve-se prever e controlar a qualidade do maciço e a posição da linha freática interna do maciço.

Os riscos por rompimento por processo de liquefação são grandes e podem ser catastróficos. A posição do gradiente hidráulico é importante para o controle da estabilidade da barragem. Sua posição é influenciada, ver Figura 21, basicamente por três parâmetros:

1 - A posição do nível de água relativo à crista da barragem

2 - O grau de segregação em função da granulometria e a condutividade hidráulica devido à variação do rejeito;

3 - Efeito do gradiente hidráulico na fundação (condutividade hidráulica relativo ao rejeito)

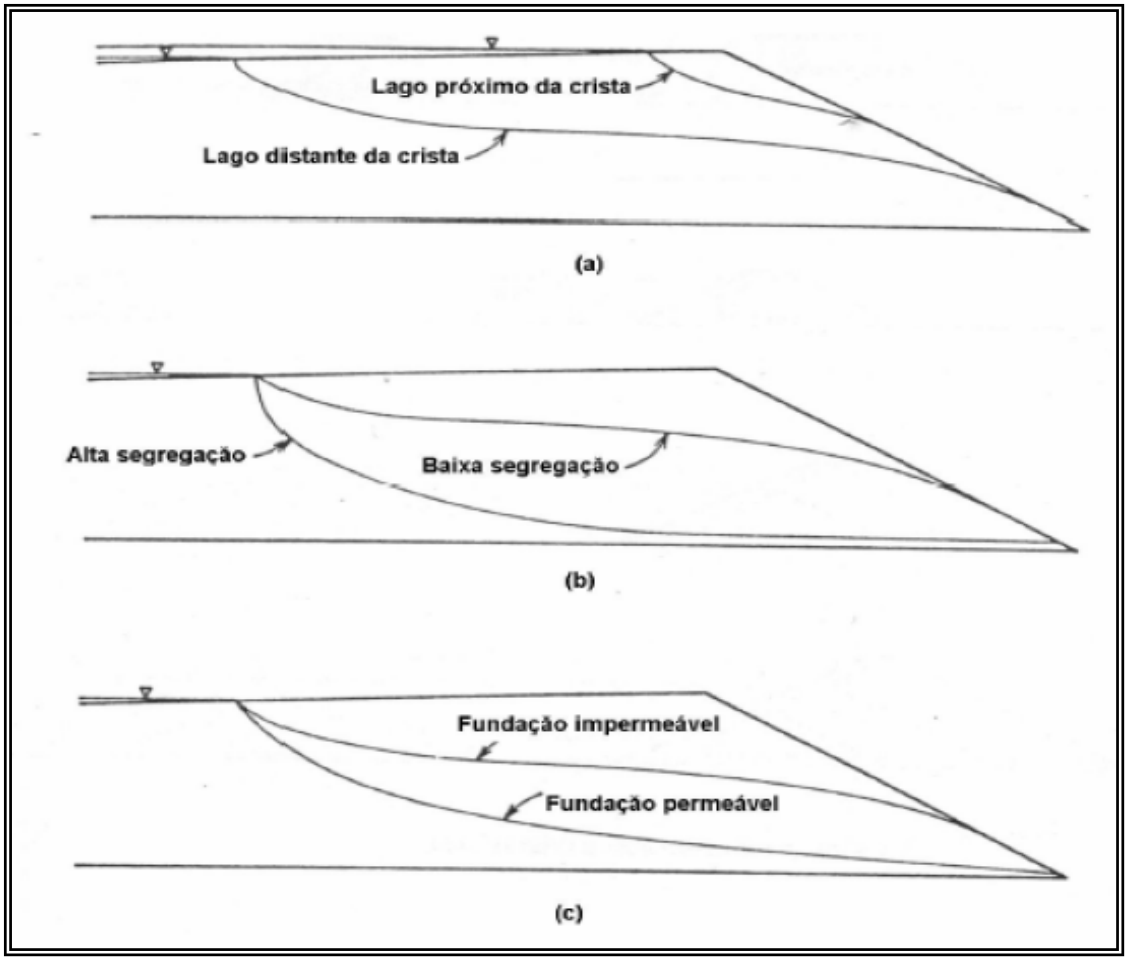


Figura 21 – Fatores que influenciam a posição do gradiente hidráulico em barragem do método de montante (VICK, 1990, modificado).

Se os gradientes hidráulicos, ver Figura 22, são altos, as forças de percolação se desenvolvem de modo a carrear o material do maciço (*piping*). Os gradientes hidráulicos devem ser mantidos dentro dos limites recomendados para os materiais de fundação.

O gradiente hidráulico que provoca a liquefação (gradiente crítico) pode ser calculado a partir da lei de Darcy, igualando-se a tensão efetiva a zero, desta forma:

$$i_{crit} = \frac{\gamma_{sub}}{\gamma_w} \qquad (1)$$

O valor do gradiente crítico é, portanto, próximo da unidade, pois o peso específico submerso dos solos é da ordem de grandeza do peso específico da água.

Se a liquefação é possível, então a estabilidade da barragem pós liquefação deverá ser avaliada. O objetivo é o de verificar se a extensão prevista da liquefação não irá resultar em uma ruptura.

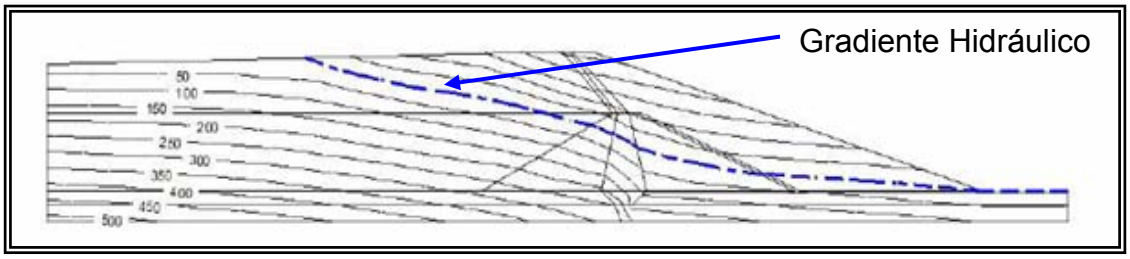


Figura 22 – Riscos de ruptura da barragem através de forças percolantes (ARAÚJO, 2006).

Esta suscetibilidade à liquefação da barragem pode ser agravada quando ocorrem eventos como abalo sísmico severo no subsolo, trânsito de equipamentos pesados nas proximidades da barragem ou detonações de explosivos industriais no desmonte de rochas nas proximidades da barragem que se propagam em todas as direções. Quando não existe controle adequado, tais impactos podem causar graves problemas materiais e sociais.

O peso do material pouco influenciará no combate a ação das forças percolantes, só a coesão e o atrito interno do rejeito virão favorecer a estabilidade do maciço contra a ruptura (CARVALHO, 1984).

Segundo Vargas 1978, a coesão pode ser definida como a resistência ao cisalhamento de um solo, quando sobre ele não atua pressão externa alguma, esta resistência é dada pela fração argilosa do solo que o torna capaz de se manter coeso. Rupturas por percolação e *piping* também são possíveis devido à pequena distância entre a lagoa de decantação e o talude de jusante. A Figura 23 indica as cotas piezométricas, piezômetro 01 a 05, previstas para os diferentes níveis do reservatório.

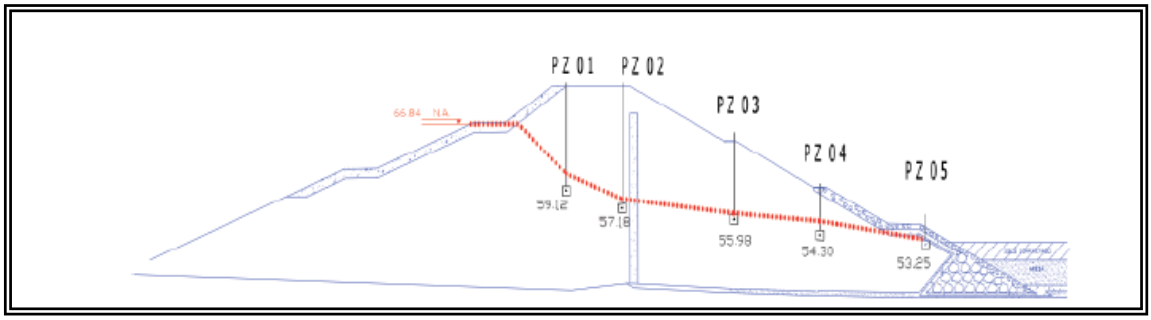


Figura 23 – Linha do nível d'água controlada por piezometria (SARÉ et al, 2003).

- **Método de Jusante**: este método construtivo é mais eficiente para o controle das superfícies freáticas e inicia-se com um dique de partida em solo compactado. A partir desta etapa iniciam-se os alteamentos sucessivos dos rejeitos sentido jusante do dique de partida de acordo com a produção da mineradora até atingir a cota de projeto, sendo cada avanço da barragem direcionado a jusante do rejeito depositado anteriormente. De acordo com Wilson, 1980, as vantagens deste método é o controle do lançamento do rejeito e também da compactação do alteamento. Este método permite o controle das forças de percolação, ver Figura 24, com o alteamento de material menos permeável a montante. As forças de percolação se dissipam, dentro deste material menos permeável, a uma distância segura na face de jusante. Com isto pretende-se impedir a liquefação dos materiais.

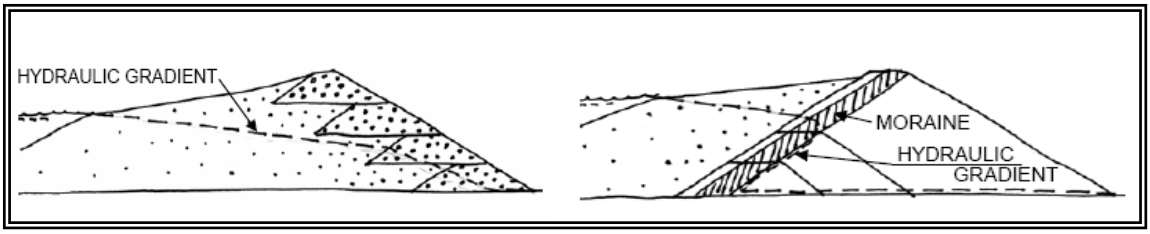


Figura 24 – Dissipação das forças percolantes em barragens de rejeitos pelo método de montante e jusante (BJELKEVIK, 2005).

Este método é mais seguro devido ao maior rigor construtivo e evita a possibilidade de ruptura por liquefação. Porém esta solução requer investimento financeiro superior ao método de montante, pois necessita-se de maiores volumes de material (maior relação areia/lama), necessita de grandes quantidades de rejeitos nas primeiras etapas da construção e sistema de drenagem. Outro fator de acréscimo no investimento é a maior área ocupada, ver Figura 25, devido ao sentido de alteamento para jusante com aos taludes bastante abatidos. O sistema de monitoramento também é prejudicado, pois a cada alteamento deve-se deslocar para jusante os instrumentos de auscultação.

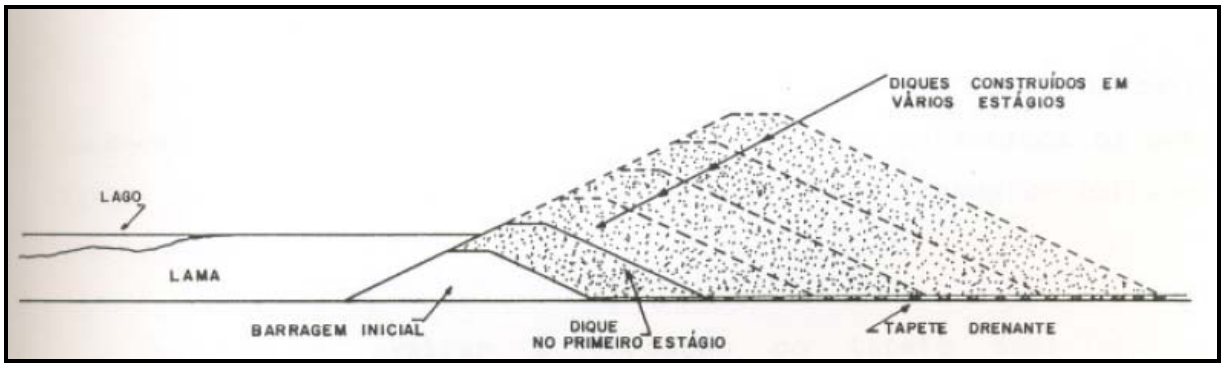


Figura 25 – Método construtivo de jusante (WILSON, 1980).

A Figura 26 apresenta os alteamentos sucessivos até a cota final de projeto da barragem de rejeito da Mineração Juruaçu localizada no distrito de Perus, cidade de São Paulo.

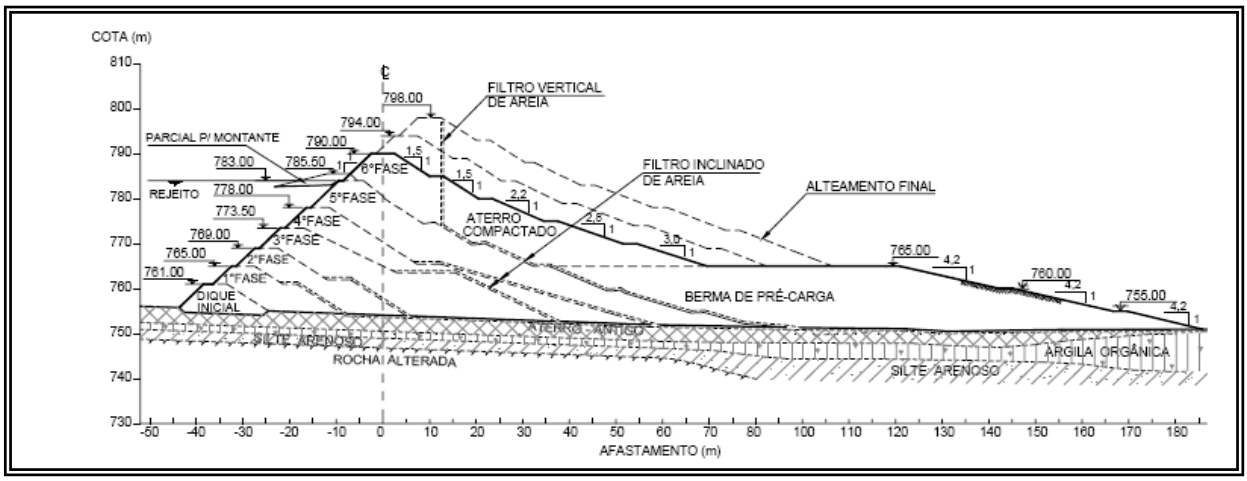


Figura 26 – Seção transversal máxima e fases de alteamento da barragem (NAMBA et al, 2002).

- **Método da Linha de Centro**: este método construtivo apresenta solução adequando os dois métodos anteriores, ou seja, uma solução intermediária, embora seu comportamento estrutural se aproxime do método de Jusante. A barragem inicia-se por um dique de partida sendo os alteamentos executados mantendo-se inalterado o eixo da barragem. Neste método construtivo, ver Figura 27, os rejeitos são lançados para montante e jusante a partir da linha de centro, posicionada sobre o dique de argila compactada.

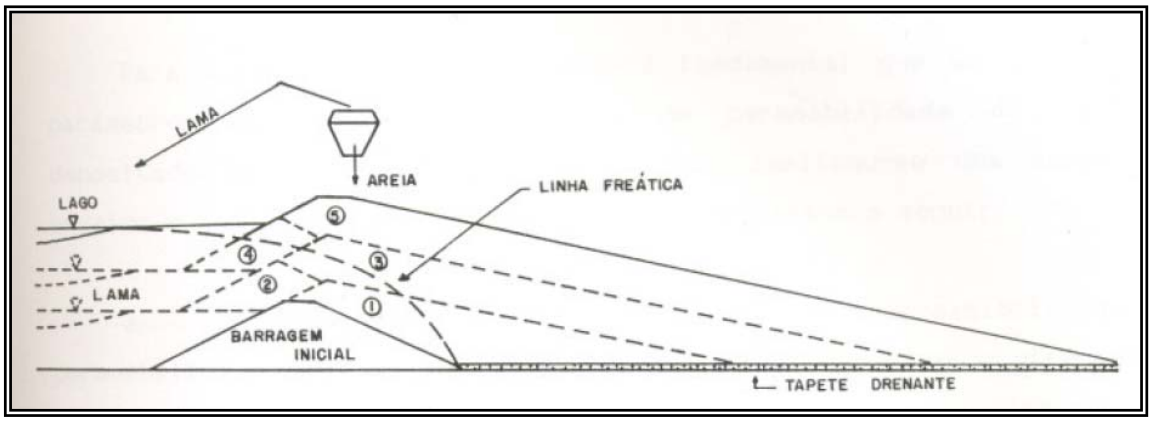


Figura 27 – Método construtivo de linha de centro (WILSON, 1980).

Para superar as dificuldades encontradas na concentração de minerais com granulometria fina e com pequenas diferenças de densidade entre os minerais útil e os de ganga, utiliza-se equipamento de concentração gravítica que opera com a utilização da força centrífuga para separação de partículas minerais, em forma de polpa e da fluidização do leito de partículas. Esses concentrados gravitacionais, que permitem uma melhor seletividade na separação de partículas "*leves*" das "*pesadas*" e entre partículas minerais com pequenas diferenças de densidade. O maciço de jusante é constituído com a fração grosseira de rejeito ou "*underflow*" e, a fração fina ou "*overflow*" é lançada à montante do eixo da barragem formando a praia. Quando instalados próximos à barragem, os hidrociclones têm como objetivo separar o material de diâmetros hidráulicos diferentes, conhecidas como *underflow* (rejeito granular) e *overflow* (lamas). O material que deixa o hidrociclone pela parte superior, *overflow ou vortex finder,* fica com água incorporada e apresenta granulometria fina compondo a lama e lançada na praia. O material que deixa o ciclone pela parte inferior, *underflow,* compõe o rejeito granular, sendo um material mais grosso e com características melhores de resistência e permeabilidade comparando-se com o material do *overflow*. O lançamento do rejeito é feito com o uso de hidrociclones posicionados, portanto, ao longo da linha central da barragem. A Figura 28 apresenta o método de utilização da ciclonagem.

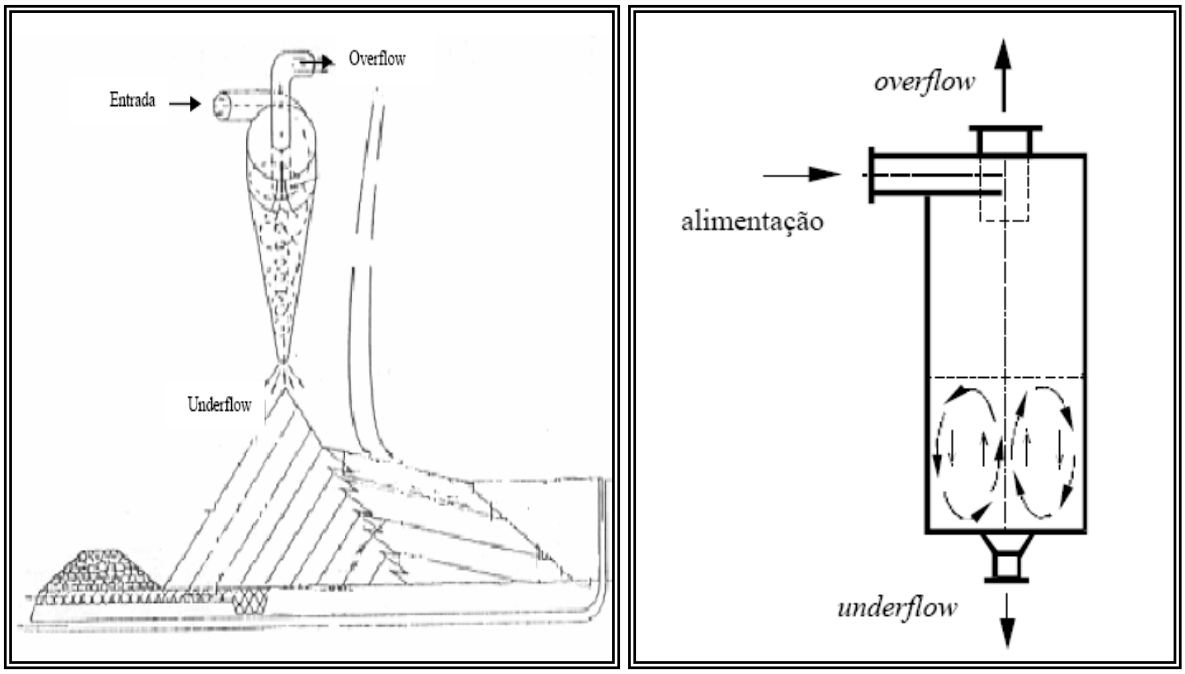


Figura 28 – Sistema de ciclonagem (MELLO, 1987).

No ano de 1939, trabalhos no *Dutch State Mines Department* (Holanda) com lavagem de carvão exigiam uma suspensão de argila para atuar como meio denso. Um dos estágios do processo era o desaguamento desta argila, onde o ciclone foi testado. O sucesso imediato levou a um programa de pesquisa e desenvolvimento. Atualmente, o ciclone é o equipamento padrão para classificação fina, especialmente na faixa granulométrica entre 0,850 e 0,002 milímetros (CHAVES e PERES, 2006).

Hidrociclones ou simplesmente ciclones, ver Figura 29, são equipamentos que executam a separação das partículas por tamanho sendo a polpa injetada sob pressão, com porcentagem de sólidos pré-estabelecida.

O princípio básico de separação nesses equipamentos é a sedimentação centrífuga, onde partículas suspensas são submetidas a uma aceleração centrífuga, que faz com que elas se separam do líquido, a partir do próprio movimento da suspensão no interior do equipamento.

O material segue uma trajetória helicoidal, onde as partículas mais grosseiras se direcionam para as paredes do ciclone devido à força centrípeta e os finos se acumulam no centro do equipamento.

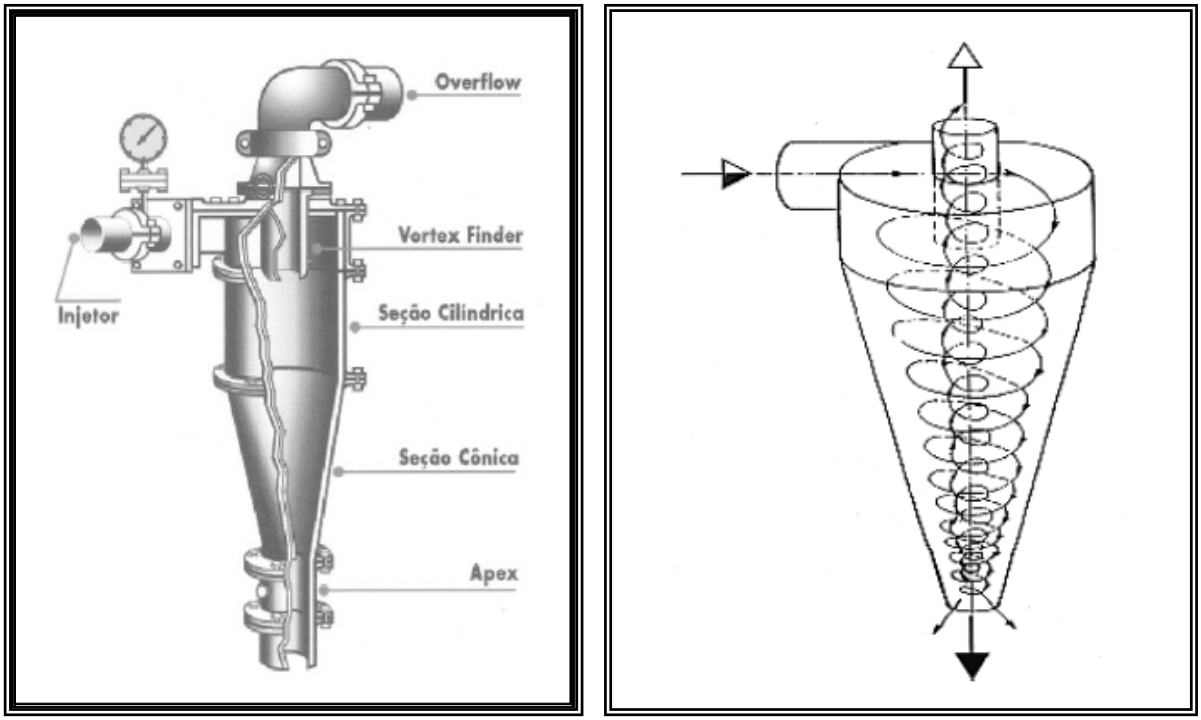


Figura 29 – Ciclone típico (MELLO, 1987).

As vantagens do ciclone são: capacidade elevada em termos de volume com o mínimo de área ocupada pelo equipamento permitindo melhor custo/benefício, facilidade de controle operacional, operação relativamente estável e curto período de tempo para entrar em regime, manutenção fácil e facilitada por um projeto bem feito, investimento baixo viabilizando a colocação de unidade reserva.

As desvantagens são: custo operacional maior (devido à energia gasta no bombeamento), incapacidade de armazenar grande volume de polpa, e com isto, ter efeito regulador. Não possibilitam realizar ajustes para minimizar os efeitos causados pelas oscilações na alimentação.

Neste método é possível o controle da linha de saturação utilizando-se zonas de drenagem interna em todas as fases do alteamento, promovendo a dissipação de poropressão. Este método, segundo Wilson (1980), é o mais utilizado por situar-se em um estágio intermediário de custo e segurança.

3.5 Informações Prévias para o Desenvolvimento do Projeto

O estudo para elaboração de um projeto de barragem de rejeitos da mineração inicia-se pela localização ideal para implantação da barragem. Durante a vida útil do projeto, os rejeitos serão dispostos em conjunto com uma relativa quantidade de estéril rochoso advindo das operações minerárias. A precipitação no local do empreendimento excede a evaporação, mesmo nos anos considerados mais secos. A equipe de projeto, composta de profissionais especialistas nas áreas de mineração, geologia de engenharia, geotecnia, hidrologia, hidrogeologia e gerenciamento de rejeitos, analisa os dados iniciais coletados para iniciar o planejamento e construção da barragem. Alguns dos dados utilizados no estudo de um projeto são:

- Dados climáticos da região;
- Dados topográficos (altimetria e planimetria) da área em estudo;
- Dados hidrológicos: precipitação, pluviometria e precipitação média da bacia que possibilitem avaliação da bacia em estudo quanto para bacias à jusante. É de grande interesse para a hidrologia o conhecimento das características das precipitações para dimensionamento de vertedores de barragens;
- As medidas pluviométricas permitem determinar as vazões de escoamento superficial, as taxas de infiltração, a necessidade de implantação e o dimensionamento dos dispositivos de drenagem superficial. Esta avaliação é obtida por meio de medidas em pontos previamente escolhidos, utilizando-se aparelhos denominados pluviômetros ou pluviógrafos;
- Mapeamentos geológicos de superfície e uma interpretação geotécnica dos tipos de solos;
- Curvas e envoltórias granulométricas, características dos rejeitos a serem dispostos, bem como avaliações sobre o seu peso específico;
- As propriedades dos materiais de construção da barragem devem ser minuciosamente investigadas, especialmente no que concerne a índices físicos, resistência ao cisalhamento, adensamento, expansibilidade,

permeabilidade, compactação, susceptibilidade de ruptura e de erosão interna, e erosão pelo vento e pela água;

- Os taludes da barragem devem ter proteção adequada contra erosão causada pela ação do vento e contra intemperismo;
- Estimativas realistas das quantidades prováveis de rejeitos e de material estéril previstas para lançamento no reservatório, durante a vida útil do empreendimento;
- Estudos de viabilidade e planos de lançamento dos rejeitos, possibilitando uma avaliação da geometria e de outros fatores relevantes associados às estruturas componentes do arranjo do empreendimento, aí se incluindo aspectos como borda livre da barragem necessária durante as épocas de ocorrência de cheias, características do extravasor, modos de ruptura e volume de material que poderia ser liberado para jusante ao longo dos vários estágios componentes da vida útil do projeto.

As medidas realizadas nos pluviômetros são periódicas em geral em intervalos de vinte e quatro horas, no Brasil, às sete horas da manhã. As grandezas características das medidas pluviométricas são: altura pluviométrica, intensidade da precipitação e duração.

A variável precipitação pode ser quantificada pontualmente, através de dois instrumentos meteorológicos, o pluviômetro e o pluviógrafo. A diferença básica entre pluviômetro e pluviógrafo é que este último registra automaticamente os dados, ao contrário do pluviômetro que requer leituras manuais a intervalos de tempo fixo.

No estado de São Paulo, o Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) e o Centro Tecnológico de Hidráulica (CTH) operam uma rede básica com cerca de 1.000 pluviômetros e 130 pluviógrafos, com uma densidade de aproximadamente um posto a cada 250 km^2. A Figura 30 apresenta a variação temporal de uma estação pluviométrica.

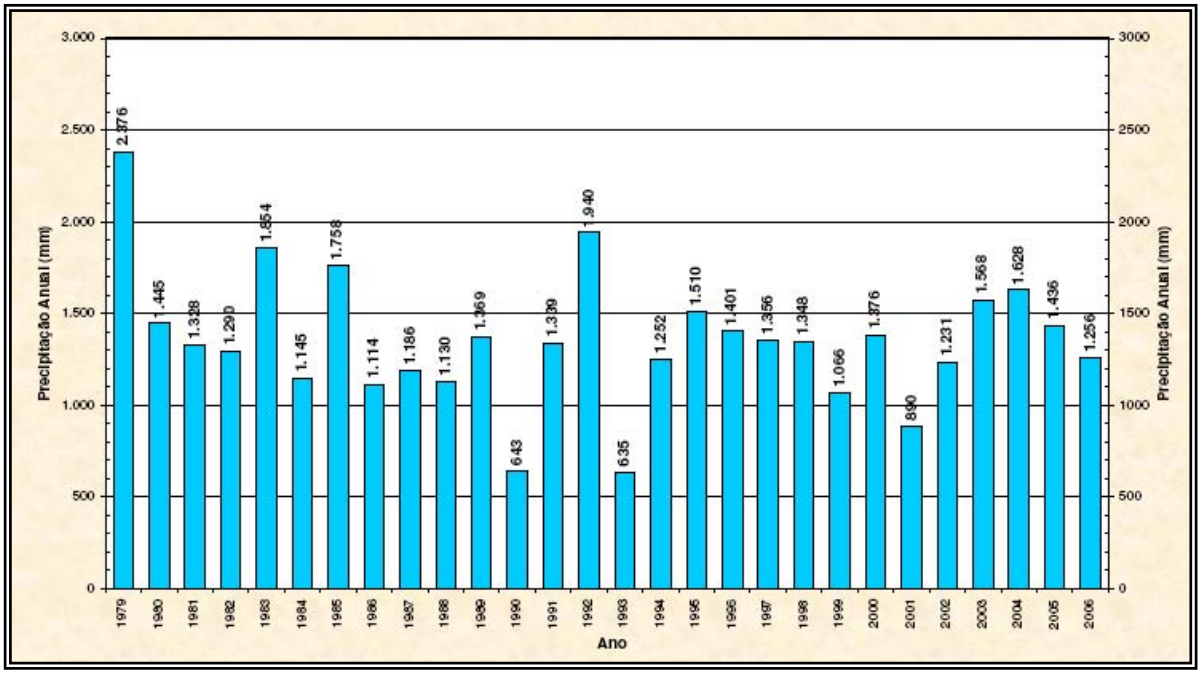


Figura 30 – Variação temporal dos totais anuais médios de precipitação entre 1979 e 2006 (MINÉRIOS &MINERALIS, 2004).

Segundo o Manual de Segurança e Inspeção de Barragens do Ministério da Integração Nacional, BRASIL (2002), no item projeto e construção, enfatiza-se como condição relevante: a reavaliação do projeto e da construção deve ser suficientemente pormenorizada para verificar se as barragens, dispositivos de descarga e taludes do reservatório, satisfazem todos os requisitos de segurança atualmente aplicáveis. A barragem deve permanecer estável, inclusive após cessarem as operações de deposição de rejeitos no reservatório.

3.6 Causas de Ruptura de Barragens de Rejeitos

As barragens de rejeito estão constantemente sujeitas a deslocamentos e deformações, em virtude da sua própria natureza e dimensões, além da ação de agentes internos e externos.

De acordo com Chaves (1994), as mudanças geométricas de uma estrutura podem ocorrer na geometria externa, caracterizando um deslocamento da estrutura no seu todo, ou na geometria interna, caracterizando uma deformação.

As deformações podem ser identificadas por recalques excessivos, aumento da taxa de recalque, recalques localizados ou trincas na crista ou nos taludes.

No caso de um deslocamento, a geometria externa permanece a mesma, sofrendo apenas uma variação na posição e/ou orientação do objeto. Em se tratando de um deslocamento, o mesmo pode ser horizontal ou vertical, bem como envolver apenas uma translação e/ou rotação. Cabe salientar que um deslocamento não necessariamente provoca uma deformação.

Quando ocorre o deslocamento há uma mudança da geometria interna, alterando-se a forma e ou tamanho da estrutura.

A deformabilidade das barragens constitui-se no principal problema que pode surgir durante a vida útil do empreendimento. Ela decorre das deformações do maciço, que ocorrem de forma diferencial, solicitando de forma irregular o paramento, podendo causar fissurações. Vários fatores influenciam nas deformações, entre eles:

- Formato, dimensões e propriedades mecânicas do material matriz;
- Baixa resistência ao cisalhamento dos materiais da barragem;
- Espessura da camada compactada;
- Método de lançamento, direção do movimento de espalhamento e grau de compactação obtido do rejeito;
- Altos valores de poropressão;
- Natureza da fundação devendo possuir permeabilidade compatível com o objetivo de minimizar a percolação;
- Declividade da superfície de fundação, ao longo do eixo longitudinal e seções transversais;
- Variação do nível d’água do reservatório;
- Atividade sísmica da região ou efeitos de detonação pela mineradora.

Diante disto, todo projeto de um sistema de disposição de rejeitos deve possuir um detalhado programa de observação e monitoramento, tendo em vista que a auscultação começa em sua fase de construção e prossegue durante o período de operação e abandono com o objetivo de confirmar hipóteses adotadas no projeto.

Em algumas barragens a implantação de um sistema de auscultação pode ser suprimido, mas devem ser reforçadas as inspeções na obra e manutenções corretivas com auxílio de profissional habilitado para tal tarefa.

Na maioria dos casos, as causas de ruptura podem ser atribuídas não apenas a falhas de projeto, mas devido à falta de fiscalização durante a construção. No primeiro caso, pode-se afirmar que o projeto não foi executado por profissional experiente e, no segundo, que a construção não foi executada por empresa devidamente habilitada para esta atividade.

Durante o planejamento de uma barragem identificam-se alguns modos de ruptura e suas respectivas conseqüências estão apresentas na Tabela 10:

Tabela 10 – Conseqüências devido a vários tipos de ruptura.

Modo de Ruptura	**Conseqüências para o Barramento**
Enchentes	Transbordamento (overtopping)
Período de seca prolongada	Nenhuma
Falhas no sistema de extravasão	Transbordamento (overtopping)
Colmatação no sistema de drenagem	Deformação do maciço
Erosão regressiva interna (piping)	Deformação do maciço
Atividades sísmicas	Deformação do maciço
Liquefação	Deformação do maciço
Deficiências de compactação	Deformação do maciço
Escorregamentos internos ao entorno do reservatório	Deformação do maciço/ Transbordamento (overtopping)
Recalque excessivo do aterro ou fundação	Deformação do maciço
Processos erosivos em longo prazo	Deformação do maciço

No capítulo referente à reavaliação da segurança de barragens do manual de segurança e inspeções de barragens, (BRASIL, 2002), a reavaliação da segurança de uma barragem deve ser executada em intervalos de tempo regulares, para a barragem e suas estruturas associadas, incluindo seus planos de operação, manutenção, inspeção e de emergência, a fim de se determinar se estes são seguros em todos os aspectos e, caso não o sejam, determinar as melhorias necessárias para a segurança.

A primeira reavaliação de segurança da barragem, para uma barragem nova, deve ser complementada em até cinco anos após o enchimento inicial.

Para entender a fixação dos níveis de risco são necessários alguns conceitos, a saber:

Acidente é um fato já ocorrido que teve conseqüências (prejuízos) sociais ou econômicas.

Evento é um fato já ocorrido que não resultou em prejuízo social ou econômico.

Risco (R) é a possibilidade de registro de um acidente e define-se como o produto entre a probabilidade de ocorrência de um evento (P) e as suas conseqüências sociais e econômicas (C), ou seja: R = P x C.

Assim, serão considerados de baixo risco aqueles casos pouco prováveis de acontecerem ou que, mesmo sendo de alta probabilidade de ocorrência, tenham conseqüências pequenas.

Ao contrário, alto risco corresponde aos eventos que podem ter conseqüências desastrosas e que tenham significativa probabilidade de ocorrerem.

Obviamente, os casos intermediários são qualificados como de risco médio. Evidentemente, existe certo grau de subjetividade na fixação do nível de risco (com exceção dos casos flagrantemente de risco muito alto ou muito baixo) o que pode levar a avaliações divergentes por diferentes equipes de especialistas.

Este, certamente, é um aspecto que requer esforço persistente para aperfeiçoamento e uniformização de resultados.

O International Commission on Large Dams (1994), apresenta estudo sobre o envelhecimento de barragens, abordando mais de mil casos históricos de diferentes países. As treze condições de deterioração das barragens de terra mais freqüentes identificadas pela ICOLD, estão apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 – Tipos de deteriorações mais freqüentes em barragens de terra (INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS, 1994).

Tipo de Estrutura Danificada	**Tipo de Deterioração**	**Número de Casos**	**Porcentagem (%)**
Fundação (solo ou rocha)	Deformação	11	3,7
	Perda de resistência e mudança no estado de tensão	24	8,1
	Erosão interna (piping)	64	21,5
	Degragadação da fundação	12	4,0
Corpo da Barragem (materiais de aterro)	Deformação	31	10,4
	Perda de resistência	18	6,1
	Aumento de poropressão	20	6,7
	Erosão regressiva interna (*piping*)	28	9,4
	Deterioração do aterro	32	10,8
	Erosão da face de taludes	56	18,9
Outros	Mudança de permeabilidade	1	0,3
	Perda de aderência entre estruturas de concreto e o aterro	12	4,0
	Fluxo pela face de concreto	7	2,4

3.7 Instrumentação para Barragens de Rejeitos

Em alguns casos de obras de engenharia, principalmente aquelas de grande porte, existe a necessidade de se acompanhar a evolução do seu comportamento após a sua conclusão. Assim, nestes casos são instalados instrumentos apropriados para o acompanhamento, com leituras das informações mais relevantes no que se refere ao seu comportamento.

As técnicas de auscultação do comportamento de barragens incluem a seleção do tipo e a determinação da quantidade de instrumentos a serem utilizados, sua

localização e instalação, a aquisição de dados, análise e a interpretação dos resultados. Esse conjunto de técnicas constitui o que se chama de instrumentação geotécnica, e tem sido objeto de grande interesse e desenvolvimento no Brasil nos últimos dez anos.

Segundo Dunnicliff (1988), a instrumentação geotécnica envolve a união das capacidades dos instrumentos de medida e das capacidades das pessoas. A prática da instrumentação não se restringe apenas à seleção de instrumentos, sendo na verdade um processo que começa com a definição do objetivo e termina com a análise rigorosa dos dados coletados. Cada passo neste processo é relevante para o sucesso do programa de instrumentação.

Dunnicliff, 1988, classifica os instrumentos de medida em duas categorias, dependendo da finalidade:

a) Instrumentos usados para determinar as propriedades de solos e rochas *in situ:* medem parâmetros geotécnicos como resistência, compressibilidade e permeabilidade, sendo usados normalmente durante a fase de projeto das obras (ex. piezocone, palheta, pressiômetro).

b) Instrumentos usados para monitorar o comportamento da obra durante construção/operação: podem envolver medidas de pressão da água subterrânea, tensão total, deformação e/ou carregamento aplicado (ex. piezômetros, células de carga, extensômetros, inclinômetros).

O principal objetivo de um programa de instrumentação é elaborar as diretrizes básicas do monitoramento. Neste plano estão incluídas as justificativas para a instrumentação adotada, a seleção dos tipos de instrumentos necessários, as especificações dos equipamentos, os valores de controle e o projeto de instrumentação. As fases de um programa de monitoramento são apresentadas de maneira sucinta na Figura 31. Somente através do planejamento cuidadoso de cada uma delas os investimentos em observação do comportamento de uma estrutura podem apresentar o retorno esperado.

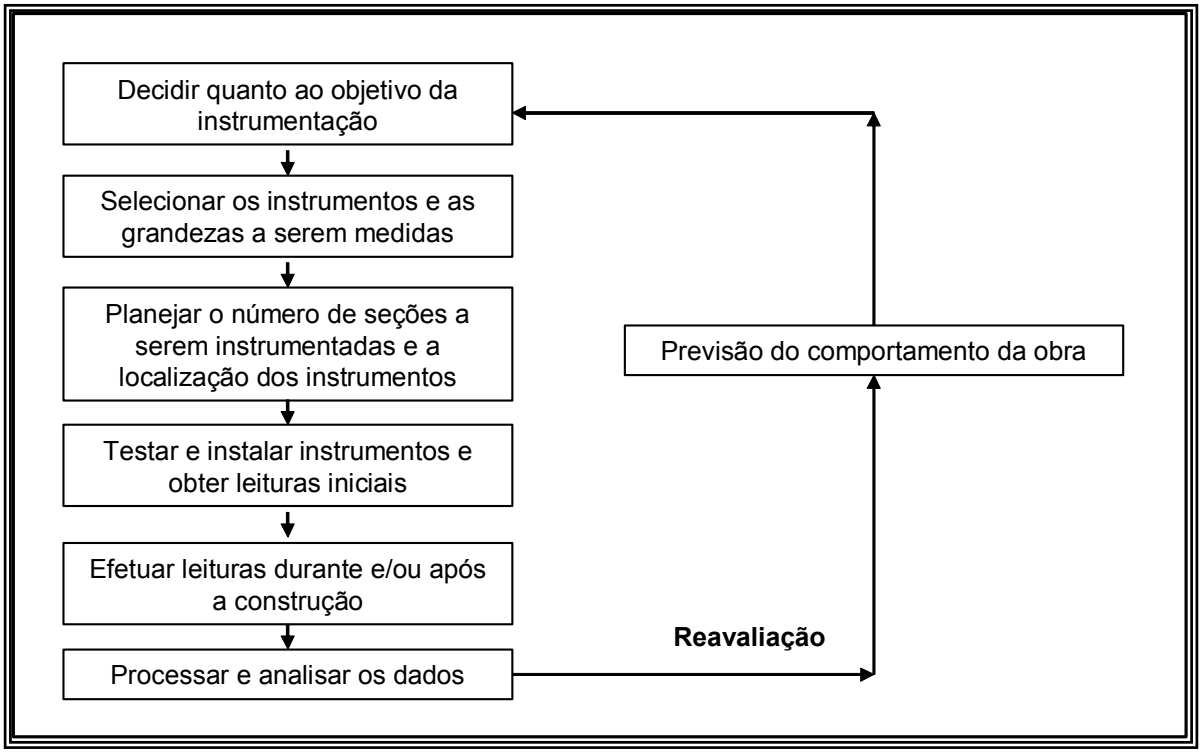


Figura 31 – Fases de um programa de monitoramento.

A instrumentação de auscultação implantada em barragens de rejeitos tem por finalidade avaliar o real comportamento dos rejeitos quanto ao desenvolvimento de deformações e de pressões intersticiais, obter dados de deslocamento, tensão total, vazão, nível d'água e comparar estes dados obtidos através de leituras periódicas aos respectivos valores de controle, máximo e mínimo, especificados nos critérios de projetos. Os relatórios dos programas de inspeção e instrumentação devem ser avaliados tecnicamente de modo a permitir a adoção de ações efetivas imediatas, se necessário.

Segundo relata Kanji 1990, é oportuno distinguir a "instrumentação" dos "testes ou ensaios de campo", uma vez que ambos medem grandezas. Enquanto na instrumentação se observa e se medem os eventos conforme ocorrem, os testes ou ensaios correspondem à medição de eventos propositadamente provocados.

A instrumentação prevista em projeto deve ser instalada no momento adequado assim como observar a freqüência estabelecida de leituras para permitir o acompanhamento e a compreensão dos fenômenos e mecanismos que fundamentam a decisão de instrumentar uma barragem (KANJI e FIGUEIRA, 1990).

Segundo o Simpósio sobre Instrumentação de Barragens (1996), a instrumentação a ser instalada em barragens de rejeitos deve visar dois objetivos básicos de

segurança: a segurança estrutural e a segurança ambiental. Para este controle são adequados os instrumentos apresentados na Tabela 12, considerando as necessidades do projeto.

Tabela 12 – Medições a serem utilizadas para segurança estrutural e ambiental.

Segurança Estrutural		**Segurança Ambiental**
Fundação	**Maciço**	Altura piezométrica do regime de água subterrânea
Deslocamentos verticais	Deslocamentos verticais	Composição química da água subterrânea
Deslocamentos cisalhantes horizontais	Deslocamentos horizontais	
Subpressão	Pressões intersticiais (ou neutra)	
Vazão de infiltração	Pressão da terra	
Medida de materiais sólidos carreados	Vazão de infiltração	
	Medidas dos materiais sólidos carreados	
	Medida de alongamento ao longo de crista e berma	

A rotina de leituras dos instrumentos possibilitará o acompanhamento das variações das grandezas medidas pelos instrumentos em cada fase do empreendimento e a identificação e a análise de qualquer comportamento anômalo que venha a ocorrer adotando-se medidas corretivas aplicadas com rapidez que se fizerem necessárias para garantir os níveis normais de segurança na operação.

A freqüência mínima de leitura deve ser baseada na experiência de outras barragens e recomendações do International Commission on Large Dams (1982). Essa freqüência de leitura não deverá ser encarada como algo rígido e imutável, devendo ser intensificadas quando da observância de valores muito acima dos seus valores limites ou com tendências de crescimento acima do esperado.

Definido o tipo de instrumento necessário que será implantado para monitorar o comportamento das estruturas e fundação, faz-se necessário definir valores teóricos

que, com base em estudos, modelos matemáticos e modelos físicos, possam servir como referência aos resultados obtidos pela instrumentação de campo.

O controle da instrumentação de auscultação deve priorizar os instrumentos que permitam a observação de deslocamentos, subpressão e vazões de percolação, uma vez que constituem, dentre os instrumentos de auscultação de barragens, aqueles com maior facilidade de instalação e interpretação e os mais indicados para o controle da segurança das estruturas.

Para que as leituras sejam confiáveis é necessário que os instrumentos tenham sido calibrados e instalados corretamente, e uma vez instalados, não venham sofrer quaisquer avarias que os prejudiquem.

Em uma data a ser determinada antes do período de início de operação, todos os instrumentos de auscultação deverão ser submetidos a uma rigorosa operação de inspeção e limpeza.

3.8 Danos na Instrumentação

Os danos sofridos pela instrumentação geralmente são ocasionados por descargas elétricas, variação de temperatura, em alguns casos por congelamento d'água, transporte incorreto, estocagem inadequada, manuseio e equipamentos de terraplenagem.

No caso específico dos piezômetros, normalmente, danificam-se por atos de vandalismo, e outros provavelmente por danos provocados por atrito negativo do solo, esmagamento da tubulação quando ocorrem recalques dos alteamentos.

Para que leituras sejam confiáveis, é necessário que os instrumentos tenham sido calibrados e instalados corretamente, e uma vez instalados, os mesmos não venham sofrer quaisquer avarias que os prejudiquem (VIEIRA NETTO, 1975).

Dos danos causados aos instrumentos, a parte mais afetada é a relacionada à precisão. Nem sempre se consegue calibrar o equipamento avariado dentro do padrão original de funcionamento.

Nos projetos de instrumentação devem-se apresentar maneiras seguras de proteger estes instrumentos de avarias atmosféricas e outras causas que não as atmosféricas, com isto obtendo dados regulares, confiáveis e sem interrupção das

leituras. A importância da instrumentação como mais um item de segurança deve ser do conhecimento da equipe de operação da barragem.

3.9 Vida Útil dos Instrumentos

Tendo em vista que os instrumentos de concepção elétrica ou eletrônica, por exemplo, possuem vida útil da ordem de duas a três décadas, pode-se constatar que após cerca de 30 anos de operação, ou até menos, qualquer barragem exigirá uma reavaliação de seu plano de instrumentação original, para se descartar em definitivo os instrumentos danificados ou com comportamento suspeito, permitir a realização de testes de avaliação de instrumentos com comportamento suspeito e a instalação de novos instrumentos em locais de particular interesse ou problemáticos.

O processo de deterioração *(aging)* da instrumentação de auscultação de uma barragem é observado por vários fatores.

Alguns destes fatores estão condicionados à correta instalação, assim como à operação e manutenção dos instrumentos, durante a operação da barragem outros, porém, tais como as condições ambientais e o desenvolvimento técnico podem influenciar em menor grau.

3.10 Automação da Instrumentação

O sucesso de um sistema de automação não é uma meta de fácil obtenção, conforme experiência dos americanos consubstanciada na publicação do U.S. Committee on Large Dams 1995, intitulada *General Guidelines and Current U. S. Practice in Automated Performance Monitoring of Dams* na qual, após 20 anos de experiência na área, os americanos relatam uma série de insucessos obtidos, deixando uma série de recomendações a serem seguidas na automação de novas barragens, para assegurar melhores resultados (SILVEIRA, 2006).

A automação não representa uma solução mágica e confiável em relação ao sistema convencional, devido aos defeitos que surgem nos sensores e equipamentos eletrônicos, sensíveis a reais condições de operação em campo.

A manutenção destes equipamentos eletrônicos eleva o custo de operação do empreendimento devido aos técnicos serem altamente especializados.

Em um plano de automação da instrumentação de auscultação, a automação deve ser parcial em relação à instrumentação instalada, procurando assim, reduzir custos e garantir que as inspeções visuais e leituras continuem a serem realizadas.

Para implantação da automação são selecionados, normalmente, os instrumentos com transdutores elétricos, além de outros de acordo com seu grau de importância na segurança da barragem.

Onde a quantidade de instrumentos de auscultação é relevante, como nos grandes empreendimentos, a automação torna-se perfeitamente viável.

O acompanhamento automático é feito utilizando sistema de aquisição e transmissão automática de dados (SATAD) composta por multiplexadores, interfaces e módulos de medição e controle, enfim, um conjunto de equipamentos eletrônicos. Este sistema é programável e realiza todas as tarefas de medição e controle, incluindo: excitação dos instrumentos, freqüência de leituras segundo procedimento variável em função das leituras anteriores, armazenamento dos dados em memória, transmissão dos dados e emissão de alertas.

Quando a instrumentação é automática, cada local deve ter uma Casa de Controle, onde fica o SATAD, para o qual os dados coletados nos diversos instrumentos são encaminhados e do qual os dados são transmitidos para um ou mais Centros de Controle, para processamento e avaliação.

No(s) Centro(s) de Controle é realizado o gerenciamento dos dados coletados através de Programa de Controle capaz de armazenar e organizar os dados recebidos, indicar a situação de segurança vigente para cada instrumento ou conjunto de instrumentos, modificar a freqüência de leituras, preparar relatório e gráficos (inclusive com animação), emitir alertas sonoros ou visuais em tela e acionar telefones convencionais ou celulares. Modernamente, a transmissão de dados através de sistema ótico se apresenta como solução viável para os grandes empreendimentos. Além da segurança na transmissão dos dados coletados em campo, a redução de custos dos equipamentos de informática é bastante significativa devida a expansão destes sistemas nos últimos anos. O empreendedor deve definir a automação do seu empreendimento analisando suas necessidades operacionais e comparando, custos de aquisição dos instrumentos, operação, manutenção e a melhoria no seu sistema de coleta e transmissão de dados.

4 AUSCULTAÇÃO E CONTROLE EM BARRAGENS DE DISPOSIÇÃO DE REJEITOS

Barragens de rejeitos são estruturas de grande responsabilidade e que necessitam de monitoramento de seu desempenho utilizando diversos equipamentos na instrumentação, que deve ser monitorada, analisada e mantida, para garantir a operação segura da barragem.

A auscultação tem como objetivo obter dados instrumentados para subsidiar o plano de segurança bem como futuras análises para o monitoramento da barragem.

Para que um determinado conjunto de dados de instrumentação seja inserido em certa situação de segurança, o sistema precisa ser nutrido com parâmetros ou critérios de fronteira que indiquem os limites quantitativos entre cada situação.

Esses parâmetros de fronteira devem ser continuamente avaliados e aprimorados com base na experiência anterior. A seleção dos critérios de fronteira é feita em função da geometria e do mecanismo geotécnico que caracterizam cada caso.

4.1 Conceituação de Auscultação

É um sistema de observação e controle com o objetivo de preservar as funções operacionais e estruturais da barragem.

O processo de auscultação das obras civis se faz presente a partir do acompanhamento do projeto de instrumentação e, no período construtivo, através dos resultados dos ensaios, das informações de instalação da instrumentação e das respectivas medições.

A auscultação pode ser realizada por instrumentação utilizando no controle diferentes tipos de instrumentos que fornecem dados sobre o comportamento da barragem.

O outro método são as inspeções visuais através de vistorias periódicas a campo refletindo em um processo qualitativo.

As inspeções de campo e a instrumentação de auscultação das estruturas devem ser encaradas sempre como mutuamente complementares.

Os instrumentos de auscultação apresentaram uma grande evolução nos últimos anos, além de ter-se acumulado uma grande experiência sobre seus desempenhos em condições reais de obra.

Os dados das mesmas devem ser analisados conjuntamente, pois muitas vezes os problemas surgem em regiões não instrumentadas, onde apenas as inspeções de campo podem detectá-los.

Estas inspeções associadas a uma análise criteriosa dos dados fornecidos pela instrumentação de auscultação da barragem, formam a mais importante e eficiente ferramenta para avaliação do comportamento das estruturas do barramento.

Um programa de auscultação pressupõe a determinação de valores previstos para as grandezas de interesse, com base nos critérios de cálculo adotados em projeto e sempre que possível deve estar associado a valores ou níveis de projeto e ou críticos, para confrontação com os observados (LINDQUIST, 1983).

O programa de auscultação deve contemplar a descrição de todos os instrumentos, suas leituras iniciais, limites de projeto, dados e requisitos para sua calibração, faixas normais de operação e níveis de alarme, valores para os quais uma revisão detalhada das leituras é necessária.

Intrínseco a um programa de auscultação está a programação para a leitura dos instrumentos. Não menos importante é a necessidade de instruções bem claras para uma pronta avaliação de dados e uma pronta notificação ao pessoal responsável, quando as observações forem atípicas ou divergirem dos critérios de projeto.

4.2 Objetivos da Auscultação e Controle

O objetivo da auscultação e seu controle surgiram da necessidade de se estimar a segurança das estruturas, prever possíveis regiões de risco, observar o desempenho de áreas críticas, fornecer informações sobre o desempenho vigente da barragem e suas fundações e fornecer dados para avaliar os critérios de projeto. Com estes propósitos da auscultação, se conhece melhor o comportamento da barragem em suas várias etapas de construção, operação e reintegração ambiental.

Ao se iniciar um planejamento de auscultação e controle de instrumentação de uma barragem de rejeitos procura-se detectar os pontos mais críticos a serem

monitorados para que se possa implantar um programa coerente que contenha as diretrizes básicas do monitoramento.

A experiência acumulada em uma barragem, após cerca de três décadas de operação, permite através dos dados da instrumentação e das inspeções de campo saber quais são as regiões potencialmente críticas, concentrando-se sobre estes locais os novos instrumentos de auscultação, podendo contar com um sistema de supervisão e controle das condições de segurança da barragem mais objetivo e abrangente.

O monitoramento inicial é o período em que são ajustados os instrumentos, verificam-se as discrepâncias de calibração dos mesmos, analisados os instrumentos inoperantes, ajustado o sistema de automação. Esta é uma das fases mais importantes no processo, quando então são colocados os dados, razão pela qual a supervisão e manutenção do sistema de monitoramento devem ser realizadas com toda a atenção e zelo.

A análise dos dados é uma etapa que tem como objetivo a organização, verificação da consistência e a avaliação dos dados coletados. Após a comparação das leituras com os valores de controle, podem ser analisados os cenários obtidos: normal, de atenção e de alerta.

A verificação em campo é necessária quando existem dúvidas sobre valores que ultrapassam os limites sem, aparentemente, observar anomalias na estrutura. Este controle passa a ser o gerenciador da auscultação.

Segundo o *U.S. Army Corps of Engineers* (2004), para que seja possível identificar comportamentos anômalos tanto das estruturas quanto dos próprios instrumentos, é importante que exista uma definição de faixas de valores aceitáveis para cada instrumento.

No entanto, deve-se destacar que o fato de uma barragem possuir instrumentos de auscultação não é suficiente, por si só, para garantir que ações visando a sua segurança sejam tomadas em tempo hábil.

É necessário que as leituras sejam realizadas com freqüência adequada a cada instrumento, seus dados sejam trabalhados e seus resultados sejam convenientemente analisados.

O desempenho real da barragem, obtido através da instrumentação, deve ser confrontado com seu desempenho esperado, através de modelos de comportamento a partir de dados experimentais e modelos teóricos.

Um plano de instrumentação sem a correspondente análise periódica e interpretação sistemática dos resultados é inútil, ou mesmo nocivo, na medida em que pode causar uma falsa sensação de segurança em relação ao empreendedor (CRUZ, 1996). Não executar qualquer uma destas tarefas citadas a tempo, é equivalente a não ter instrumentação.

4.3 Período de Realização destas Atividades

Com a finalidade de possibilitar a detecção de problemas relacionados com segurança das estruturas em qualquer fase da obra, efetuam-se medições durante o período construtivo e de enchimento e programa-se sua continuidade para todo o período de operação da barragem.

Cada tipo de informação tem seu período crítico, no qual se faz necessária uma freqüência maior nas observações, de modo que os dados a serem obtidos serão mais ou menos intensamente colhidos ao longo do tempo.

No período de construção das obras, a realização das leituras de instrumentação e dos ensaios de laboratório e campo fica a cargo do empreendedor ou sua contratada, que emite relatórios, cujas informações subsidiam o desenvolvimento e fiscalização do projeto e vão, passo a passo, sendo introduzidas nos dados do controle de segurança da barragem.

Desta maneira, as equipes responsáveis pela elaboração do projeto, construção, fiscalização e segurança da barragem interagem ou sobrepõe funções que compõe o contínuo acompanhamento das condições e do desempenho das obras civis, ao longo da introdução de carregamentos e respectivas alterações de propriedades e estados intrínsecos.

A obtenção de importantes índices medidos na estrutura da barragem é um indicador das condições de funcionamento e eficiência ou condições não ideais que não confirmam as hipóteses de projeto e modelos elaborados na época da concepção da estrutura.

Este controle serve para análise do desempenho da barragem ao longo de sua vida útil e subsidia na correção de eventuais inconformidades de projeto ou situações que coloque em risco o empreendimento.

Após o término do período construtivo da barragem, a equipe operacional passa a coletar dados de campo e deve analisar os dados obtidos e elaborar um conjunto de

ações corretivas em zonas potencialmente instáveis, interrompendo potenciais riscos ou danos estruturais ou evitando o início destes riscos com ações preventivas e corretivas.

Em alguns casos de verificação do desempenho da estrutura do maciço, faz-se necessário diagnóstico de ocorrências, reavaliação de limites de controle para a instrumentação e elaboração de projeto de reparo.

A mesma equipe de operação deve, através deste controle, dar segurança às seguidas etapas de alteamento da barragem para que estes trabalhos sejam realizados dentro de limites de segurança da estrutura e do empreendimento.

Através de auscultação e controle pode-se desenvolver ou aplicar novas tecnologias na construção de barragem de rejeitos.

Desta forma, um dos grandes objetivos deste controle é reduzir incertezas evitando adotar fatores de segurança mais conservadores refletindo no custo de um programa de instrumentação.

4.4 Necessidade da Auscultação e Controle

O atual patamar de desenvolvimento de projetos geotécnicos em nosso país congrega o projeto de instrumentação e monitoramento apenas, ou principalmente, em casos de túneis e barragens.

À conscientização da sociedade e do meio técnico para este procedimento estará sendo incorporado a outros empreendimentos, pois o objetivo é avaliar o desempenho da obra, em relação às previsões de comportamento estimadas na fase do projeto geotécnico.

A instrumentação tem o objetivo de avaliar o comportamento do maciço durante e após a execução da obra, face ao que foi previsto na fase de projeto. O monitoramento nos possibilita detectar os possíveis movimentos que poderiam nos levar aos níveis de alerta e de pré-ruptura durante a execução da obra e também após a sua implantação devido a possíveis acomodações.

Para avaliar a real situação de uma barragem é necessário instalar instrumentos de auscultação adequados. Para isto é importante elaborar um bom projeto de instrumentação e o monitoramento das condições da barragem.

A instrumentação somente será eficiente se existirem hipóteses de cálculo para interpretação dos resultados.

Se assim não for, as informações obtidas serão vistas como valores pontuais e nunca como uma informação comprobatória de um determinado comportamento esperado.

A auscultação e o monitoramento de barragens assumem diferentes características e finalidades dependendo da etapa da obra que se deseja analisar, mas a necessidade básica é investigar comportamentos anômalos da estrutura.

Durante a construção, os instrumentos fornecem dados que possibilitam avaliar o comportamento da obra e, com isso, corrigir e ou aprimorar determinadas premissas de projeto.

Nesta fase, os principais objetivos da instrumentação apontam para a verificação de hipóteses, critérios e parâmetros de projeto, verificação da adequação dos métodos construtivos, verificação das condições de segurança, etc., com isso, busca-se executar um projeto mais econômico e seguro.

Já ao longo de sua vida útil, o monitoramento pode detectar variações nas condições de segurança das barragens, como resultado de processo de envelhecimento e ou alterações ambientais.

Observando os acidentes ocorridos no passado e presente, as causas destas ocorrências são deteriorações da estrutura e ruptura do barramento.

Estudos realizados pelo International Commission on Large Dams (1983), mostram que de 14.400 barragens catalogadas, 1.105 (7,5%) delas sofreram deterioração de um ou mais tipos e 107 (0,7%) vieram a romper. No Brasil existem alguns casos de rompimentos com efeitos danosos ao empreendedor, população e meio ambiente.

4.5 Escolha dos Tipos, Número e Locação dos Instrumentos

Os tipos, as quantidades e a distribuição de instrumentos de auscultação utilizados em barragens são escolhidos com base na geometria e na cinemática dos casos em foco e através de estudos bibliográficos de situações semelhantes e consultas a organismos e indivíduos com experiência no assunto. Existe uma gama enorme de fabricantes e, conseqüentemente, uma variedade de instrumentos no mercado em função da diversidade de princípios de funcionamento, marcas e modelos. O

controle da instrumentação de auscultação deve focar essencialmente sobre os instrumentos que permitam a observação de deslocamentos, subpressões e vazões de percolação, uma vez que constituem, dentre os instrumentos de auscultação de barragens, aqueles de mais fácil interpretação e os mais indicados para o controle da segurança das estruturas. O projetista deve conciliar tendência em adotar inovações mercadológicas sem referências de operação e a corrente conservadora que dispõe de dados operacionais de várias barragens com instrumentos de desempenho conhecido. Os instrumentos mais comuns são os marcos superficiais, os inclinômetros, os piezômetros, os deformímetros e estações meteorológicas. A Figura 32 apresenta o mapeamento dos principais locais e instrumentos possíveis de serem instalados em barragem de terra.

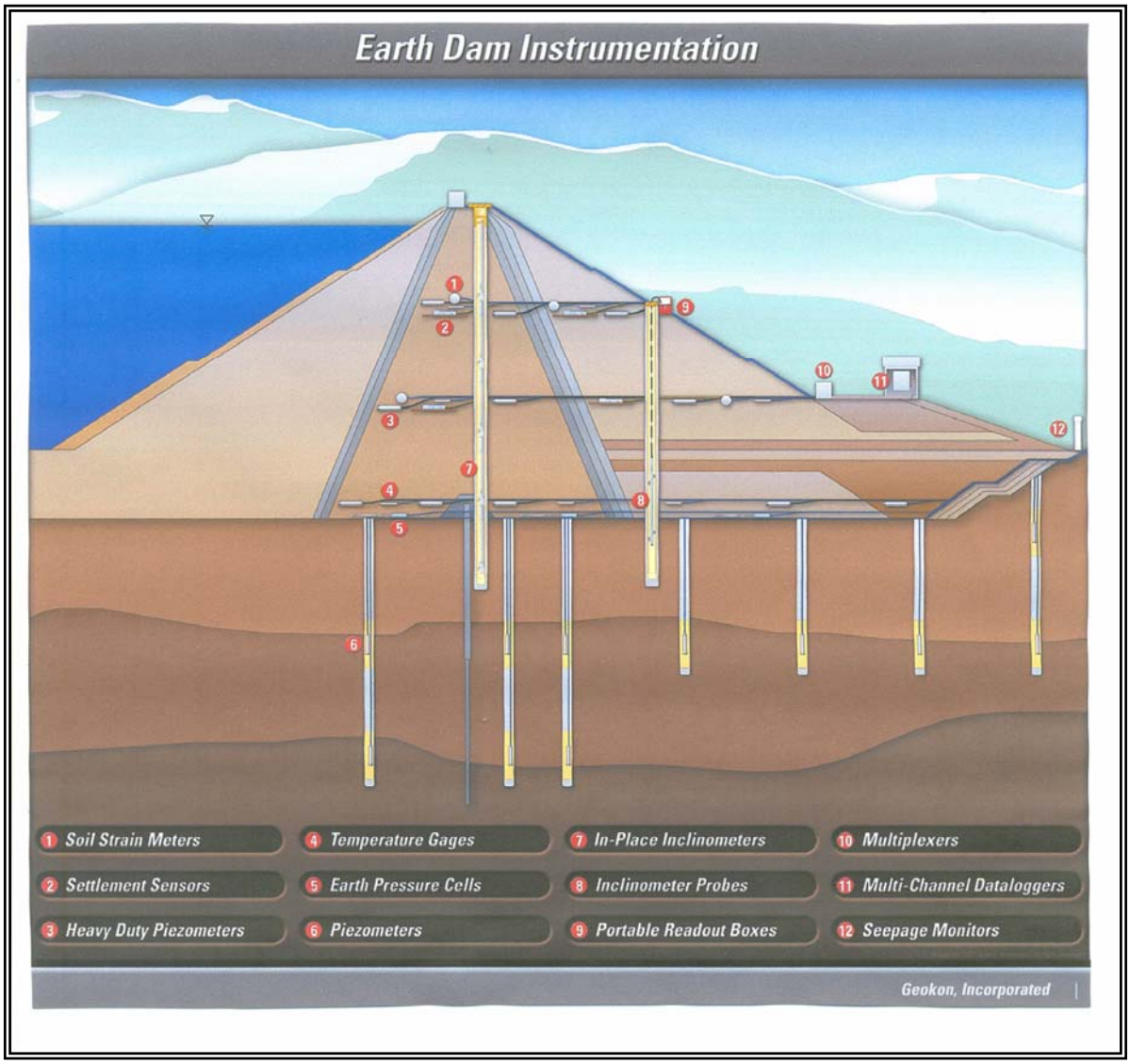


Figura 32 – Instrumentação em barragem de terra
(GEOKON INCORPORATED, 2007).

A solução ideal, dependendo de cada projetista, seria a de especificar uma quantidade reduzida de instrumentos novos no mercado completando com instrumentos de desempenho e eficiência conhecidos.

A fase inicial de um programa de instrumentação deve envolver essencialmente certo número de instrumentos, que se caracterizem pela sua simplicidade, robustez e baixo custo. Considera-se que um instrumento atinge a sua “maturidade”, isto é, possa ser considerado perfeitamente adequado à medição das grandezas a que se propõe, após um prazo mínimo de cinco anos, decorridos de seu projeto original (SILVEIRA, 1976).

O estabelecimento do provável número de instrumentos a serem instalados, deve ser observado nos seguintes fatores:

- Extensão da área a ser auscultada;
- Características geológicas da fundação e do maciço;
- Tipos de instrumentos selecionados;
- Condições de acesso ao local de instalação;
- Disponibilidade orçamentária.

Uma barragem pode ser considerada bem instrumentada desde que siga um programa de instrumentação criterioso e intuitivo com definições claras das questões fundamentais e com respostas para as perguntas:

- Por que instrumentar ?;
- O que instrumentar ?;
- Onde instrumentar ?;
- Quais os níveis previstos em projeto bem como os críticos ?;
- Que providências adotar se os níveis estabelecidos forem ultrapassados ? (LINDQUIST, 1983).

As principais grandezas comumente monitoradas em barragens de terra e rejeito são:

- Deslocamentos;
- Deformações e tensões;
- Níveis piezométricos em fundação;
- Pressões de água;
- Vazão.

Os instrumentos na sua origem devem ser confeccionados e calibrados sob supervisão adequada, assim como sua instalação deve ser realizada por equipe credenciada e experiente.

Lembrando sempre que o melhor instrumento disponível no mercado será inútil se não contar com uma aferição adequada e manutenção preventiva e corretiva, podendo torna-se nocivo e causar uma falsa impressão de segurança em relação ao empreendimento.

Duas modalidades de obtenção de dados da instrumentação são utilizadas, sendo:

- Aquisição Manual: sistema tradicional de coleta de dados, utilizado em diversas barragens. Os dados, após terem sido coletados manualmente através de instrumentos de leitura visual pelo leiturista, são transcritos em tabelas para serem, posteriormente, interpretados e colocados sob forma de gráfico;
- Aquisição Automatizada: o sistema automático é uma prática muito difundida atualmente, apesar de estar ainda limitado a um pequeno número de barragens. Este sistema oferece um número considerável de medidas ao longo do dia. Neste processo evita-se erros de leitura obtidos por leitura manual.

Um período crítico para todos os instrumentos e conseqüentemente para todos os dados a serem obtidos é durante a ocasião da instalação.

Quanto mais informações forem coletadas na época da instalação de determinado aparelho, mais fácil será a análise dos dados obtidos com o mesmo.

De acordo com o resultado dos controles realizados, pode ser assinalada a presença de uma eventual anomalia para cada medida.

Dunnicliff, Deere e Peck (1984), afirmam que a instrumentação é freqüentemente subutilizada apesar de viabilizar a quantificação de parâmetros e resolver questões importantes.

Os sistemas de obtenção de dados podem ser mecânicos, hidráulicos, pneumáticos ou elétricos.

No capítulo 5 serão apresentados alguns dos principais instrumentos utilizados em barragens de rejeitos.

5 INSTRUMENTAÇÃO PARA MEDIÇÕES DO COMPORTAMENTO DO NÍVEL D'ÁGUA

Este capítulo aborda instrumentos destinados a medição de parâmetros relativos ao fluxo em barragens, seja por meio da fundação ou através do maciço da barragem.

O conhecimento da posição da linha freática é fundamental em estudos de comportamento geotécnico de barragens.

O sistema de medição das ocorrências hidráulicas é, tipicamente, um dispositivo para registro contínuo dos níveis de água que constituem o limite para desencadeamento de um nível de alerta e ação da medida corretiva para tal anomalia.

Os instrumentos de piezometria têm sido amplamente utilizados no monitoramento e previsão de comportamento de diversas barragens em todo o mundo.

A variação dos registros piezométricos pode ocorrer quando se verifica uma das seguintes condições:

- Aumento da vazão de percolação;
- Elevação do nível d'água de montante e jusante;
- Aumento da permeabilidade de materiais a montante do piezômetro;
- Redução da permeabilidade de materiais a jusante do piezômetro.

São instrumentos que permitem a medida dos níveis piezométricos no contato maciço/fundação, possibilitando uma avaliação dos critérios de subpressão adotados no projeto. Estes instrumentos podem ser instalados em diferentes profundidades a jusante da barragem.

A localização dos instrumentos deverá ser definida em campo, por geólogo de engenharia ou engenheiro geotécnico experiente, depois de concluídas as perfurações nos locais indicados pelo projeto.

Estes instrumentos não devem ser instalados em locais onde o maciço rochoso seja pouco fraturado com fraturas totalmente fechadas, ou onde o ensaio de perda d'água sob pressão, no furo, indique não haver perda d'água.

A localização dos instrumentos para medidas de pressão d'água numa obra depende de diversos fatores, entre os quais recomenda:

- A localização ideal do piezômetro, no plano e em profundidade irá depender dos dados a serem obtidos (dados do maciço ou fundação);

- Para as regiões rochosas, instalar os piezômetros em cotas diferentes;
- Quanto aos tipos de piezômetros a serem instalados, os mais convenientes são os do modelo Casagrande, pois detectam as pressões d'água com boa precisão.

Os instrumentos somente poderão ser montados, instalados e operados por pessoas com experiência e especializadas em instrumentação de obras civis.

A instalação dos instrumentos deverá ser sempre precedida de uma programação de trabalho com o intuito de interferir o mínimo com as outras atividades de construção ou operação da barragem, evitando que estas possam vir a provocar danos aos instrumentos.

Atualmente existem diversos tipos de piezômetros, com características peculiares. Dentre os vários tipos de piezômetros existentes, o mais simples é o hidráulico, pois não envolve necessariamente dispositivos elétricos ou eletrônicos sofisticados. Estes instrumentos utilizam fluidos hidráulicos (água, óleo, etc), em seus sistemas de medidas.

Os instrumentos mecânicos baseiam-se no comportamento elástico linear do aço, empregando dispositivos simples, tais como a deformação de uma mola, a flexão de uma lâmina, a compressão diametral de um anel, engrenagens, fios tensionados, pêndulos, roldanas,etc.

Os instrumentos operados pneumaticamente utilizam princípio de funcionamento idêntico aos hidráulicos, mudando apenas o fluido. No passado utilizava-se ar e atualmente o gás nitrogênio.

Instrumentos dotados de transdutores de deformação que utilizam extensômetros elétricos de resistência enquadram-se nos instrumentos elétricos. São instrumentos sensíveis a variação de temperatura.

Idealizado por Schafer, em 1.919, o transdutor de corda vibrante (ou acústico) foi desenvolvido na década de 30 sendo atualmente empregado largamente na observação de estruturas de barragens. Baseado na variação de freqüência das cordas vibrantes, em função da tensão a elas aplicada.

Segundo Dunnicliff 1.988, não existe um consenso sobre qual o melhor instrumento a ser utilizado. Entre os modelos de instrumentos comercializados, os mais utilizados são:

- Medidor de nível d'água;
- Tubo aberto (standpipe);
- Pneumáticos;
- Hidráulicos;
- Elétricos;
- Corda Vibrante.

Na observação de pressões em maciços rochosos e pressões neutras em solo, os mais comuns são os medidores de tubo aberto e os de nível d'água. A seguir são descritos os piezômetros mais utilizados.

5.1 Medidor de Nível d'Água

É provavelmente o instrumento mais simples de construir e operar e é utilizado com o objetivo de determinar a posição da linha freática, ver Figura 33.

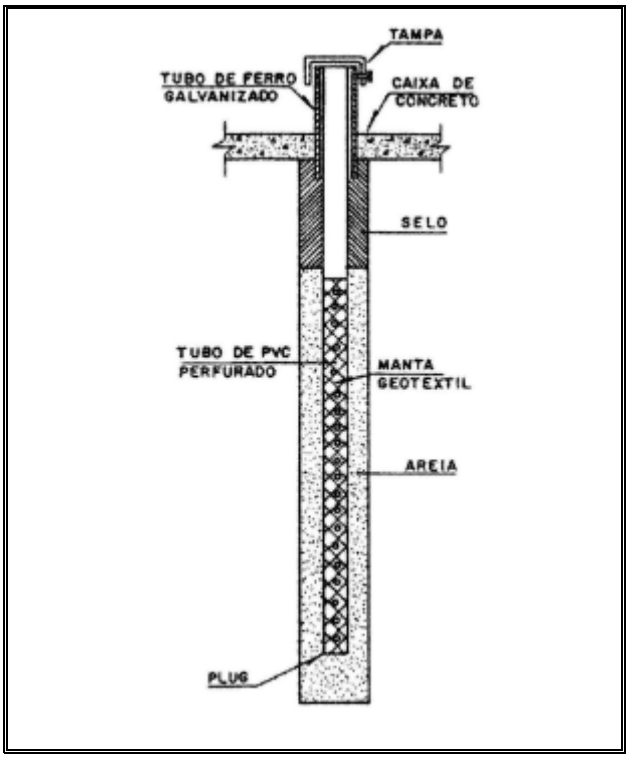


Figura 33 – Esquema do medidor de nível d'água (CRUZ, 1996).

O medidor de nível d'água têm a mesma configuração do piezômetro, porém o trecho perfurado do tubo do piezômetro pode ser de extensão maior, atingindo a espessura do nível d'água no interior da fundação da barragem.

O uso do medidor de nível d'água é produtivo quando se busca determinar a linha freática ao longo do maciço.

Para sua instalação é necessário apenas a execução de um furo de sondagem ou poço, ver Figura 34, com a determinação da cota do nível d'água por qualquer tipo de sistema de aquisição de dados.

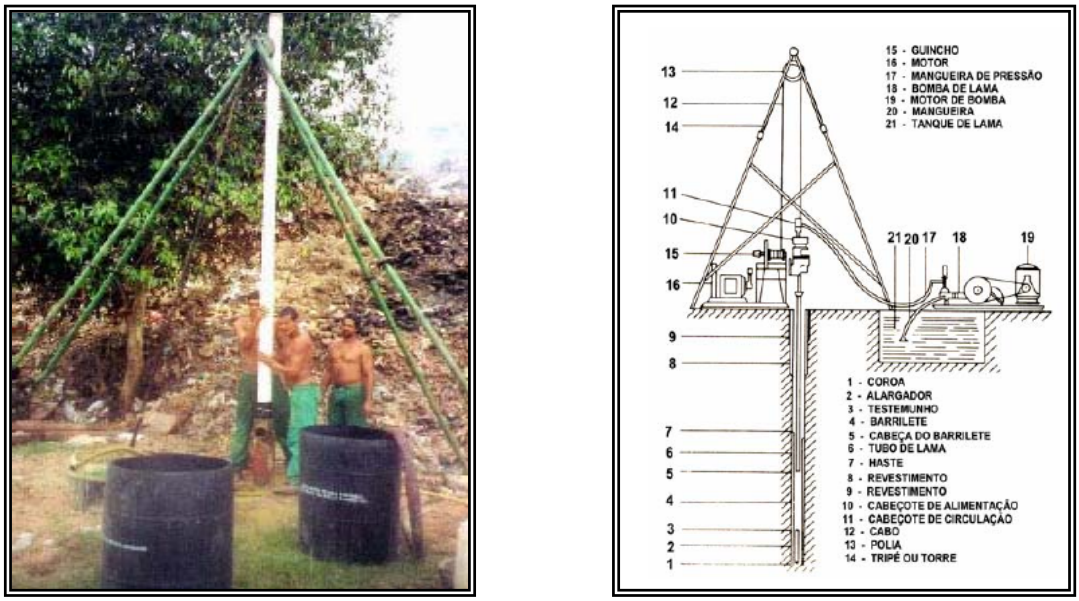


Figura 34 – Furo de sondagem e instalação do tubo de PVC (SCHUELER, 2005).

O medidor de nível d'água consiste de um tubo, geralmente de PVC para evitar corrosão, com perfurações em sua ponta para permitir a entrada de água em seu interior. Na extremidade inferior do tubo coloca-se tampa estanque e envolta em material filtrante (por exemplo manta Geotéxtil), ver Figura 35.

Figura 35 – Tubo envolvido por manta geotéxtil (SCHUELER, 2005).

No local de instalação do instrumento deve-se construir uma pequena caixa de proteção em concreto simples para fixação externa do tubo e também servindo como selo entre o furo de sondagem e o tubo de PVC.

Esta proteção evita infiltração de águas superficiais (chuva e outras) que podem inviabilizar a leitura correta do instrumento. Acima do nível do terreno deve-se colocar um pedaço de tubo PVC com a ponta tamponada.

O tubo deve ser fixado e abaixo da caixa de concreto, selado com argamassa de cimento e areia limpa, saturada e bem graduada (entre 2 a 4,8 mm) ou lama bentonítica em sua parte superior próximo a superfície do terreno ou em camada acima da posição do nível freático (NF), que é definido como a superfície superior de um corpo d'água subterrâneo, na qual a pressão corresponde à atmosférica.

Abaixo do NF o furo deve ser preenchido com areia limpa ou areia com pedregulho com graduação entre 4,8 a 9,5 mm e o tubo envolto por material filtrante.

A medição é feita de maneira manual, com uma escala, ou equipamento, ver Figura 36, que identifique a superfície da água no interior do tubo, que no caso deste instrumento corresponderá sempre, exatamente ao nível freático.

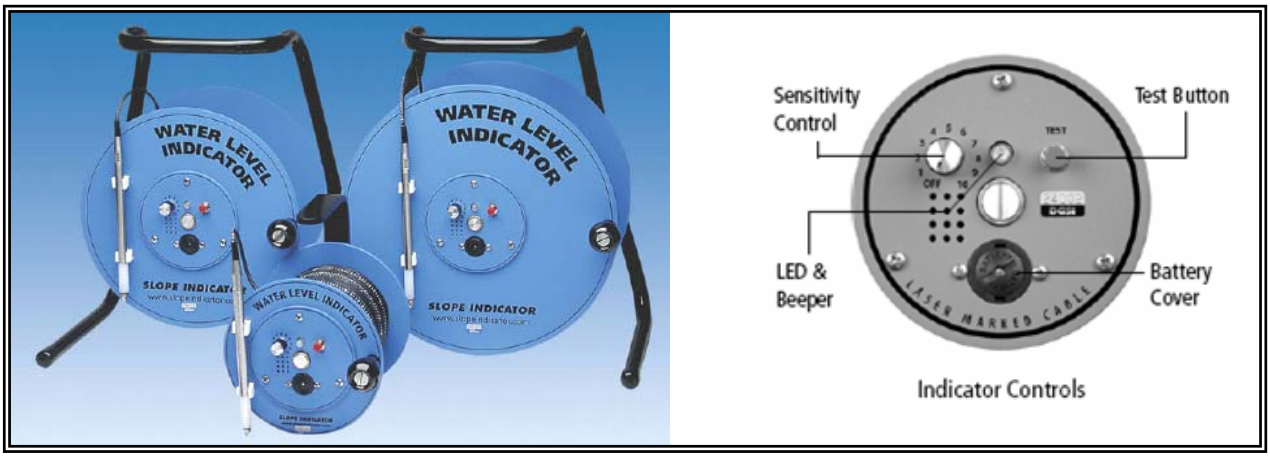


Figura 36 – Indicador de nível d'água (SLOPE INDICATOR COMPANY, 2007).

Este instrumento perde sensibilidade de leitura ou torna-se inoperante pelas seguintes causas:

- Obstrução interior do tubo devido à queda de objetos;
- Cisalhamento do tubo inserido no maciço;
- Colmatação dos orifícios do tubo de PVC ou do material drenante;
- Ruptura do tubo plástico;
- Elevado tempo de resposta na leitura do instrumento devido à colmatação;

Se a obstrução no interior do tubo de PVC estiver localizada acima da faixa de leitura do instrumento, nível d'água, o instrumento passa a ser inoperante. Após a verificação das condições de instalação e operação dos instrumentos, deve-se efetuar leitura cuidadosa de todos os instrumentos. Estas leituras constituirão a referência zero para o acompanhamento específico do período de enchimento do reservatório.

Deve-se também realizar uma medida da profundidade dos medidores de níveis d'água, para verificação de possíveis obstruções futuras. No local de instalação do instrumento deve ser feita proteção para evitar danos por acidente ou vandalismo.

5.2 Piezômetro de Tubo Aberto ou *Standpipe* (Casagrande)

Trata-se de um aperfeiçoamento do medidor de nível d'água. É um instrumento simples para operar e freqüentemente utilizado em obras de barragens, onde o modelo construído por Casagrande é o mais conhecido e utilizado. Foi desenvolvido por Casagrande durante a construção do aeroporto de Logan, Boston (DUNNICLIFF,

1988). Seus atrativos são a facilidade de instalação e custo reduzido gerando bons resultados em termos de monitoramento. O processo construtivo é semelhante ao medidor de nível de água e as principais diferenças são: o comprimento do trecho perfurado e, na extensão do trecho do furo preenchido com material drenante, geralmente limitado entre 1,0 a 1,5 metros.

A extremidade inferior do tubo deve ser envolta com material filtrante, areia grossa e brita e, sobre estas camadas areia fina. Para que se obtenha bons resultados, deve-se garantir um bom confinamento da região onde o piezômetro está colocado. O piezômetro mede pressão hidrostática ou poropressão (pressão neutra) no nível da ponta porosa.

Acima do ponto de medição deverá ser preenchido com calda de cimento, bentonita ou argila plástica até a boca do furo para que o piezômetro opere hidraulicamente isolado (barreira vertical).

O local da medição deve ser isolado de qualquer possibilidade de contato com a pressão atmosférica ou com outra camada do terreno diferente daquela onde se deseja fazer a medição.

Como curiosidade, o nome bentonita foi adotado em função do depósito descoberto em folhelhos argilosos de *Fort Benton, Wyoming, EUA*, onde essa argila foi pela primeira vez caracterizada como um tipo especial de argila.

A elevada afinidade da bentonita com a água e sua alta capacidade de expansão são características que conferem a este material características vedante, resistência à passagem de água.

Quando o piezômetro acusar pressões superiores a cota da boca do tubo, coloca-se uma mangueira plástica transparente para prolongar a altura da boca.

Mesmo assim se o nível continuar subido realiza-se a medição através de manômetro. As principais vantagens e limitações deste instrumento estão destacadas na Tabela 13.

Tabela 13 – Vantagens e limitações do piezômetro aberto.

Vantagens	Limitações
Confiabilidade / durabilidade / sensibilidade.	Interferência na área do empreendimento susceptível a serem danificados.
Possibilidade de verificação de seu funcionamento através de ensaio de recuperação do nível d'água.	Não ser adequado para determinar poropressão no período construtivo.
Permite uma estimativa do coeficiente de permeabilidade do solo próximo ao instrumento.	Dificuldade de instalação a montante da barragem devido ao reservatório (dificuldade de acesso para leituras).
Componentes de baixo custo e não necessitam ser calibrados.	Tempo de resposta elevado em solos de baixa permeabilidade (alguns minutos até semanas, segundo Cruz, 1996).
Simplicidade para realizar leitura.	A precisão da leitura depende da habilidade do operador.
Não elétrico.	Mais lento para mostrar mudanças bruscas da subpressão.
Confiabilidade em longo prazo.	Não é possível a aquisição remota de leituras.

É importante ressaltar a limitação na utilização de piezômetro de tubo aberto para monitoramento, nos casos de mudanças bruscas de nível d'água nos reservatórios de barragens com fundação de baixa permeabilidade.

Neste caso o piezômetro apresenta atraso na resposta a esta variação devido ao fluxo de água que ocorre no seu tubo até a equalização da pressão.

O procedimento de leitura do nível de água para piezômetros de tubo aberto é constituído de um cabo elétrico com dois condutores, graduado de metro em metro, possuindo na extremidade um sensor constituído por eletrodos dispostos concentricamente, isolados eletricamente entre si, conforme Figura 37.

O sensor ao atingir o nível de água no interior do tubo é fechado o circuito elétrico formado pelo conjunto sensor/cabo/sinalizador/bateria. A condição de leitura é percebida pelo sinalizador que pode ser sonoro, por luz ou um galvanômetro.

Figura 37 - Medidor do nível de água para piezômetros de Tubo Aberto (COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO, 2007).

A Figura 38 mostra a leitura em campo do nível piezométrico e caixa fechada construída em alvenaria para proteção do equipamento.

Figura 38 - Leitura do nível piezométrico para piezômetro de tubo aberto (SCHUELER, 2005).

A cota piezométrica, ver Figura 39, é a cota da boca menos a leitura do comprimento do cabo.

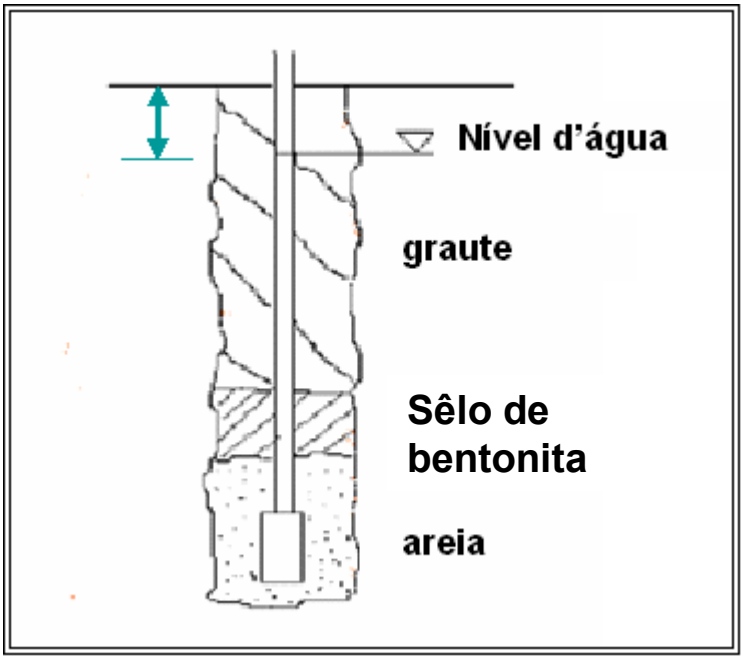


Figura 39 – Medição da cota piezométrica
(GEO-SLOPE INTERNATIONAL LTD, 2007, modificado).

Em ambos os casos, sabendo-se a elevação topográfica do topo do tubo, calcula-se a elevação do nível de água no interior do tubo que vem a ser a *cota piezométrica* que ocorre no solo ao redor da ponteira.

Deverá ser anotado o nível d'água do reservatório na ocasião da leitura. Por efeito de vasos comunicantes, o nível de água no interior do tubo do piezômetro fica em equilíbrio com o nível piezométrico no solo que circunda a ponteira.

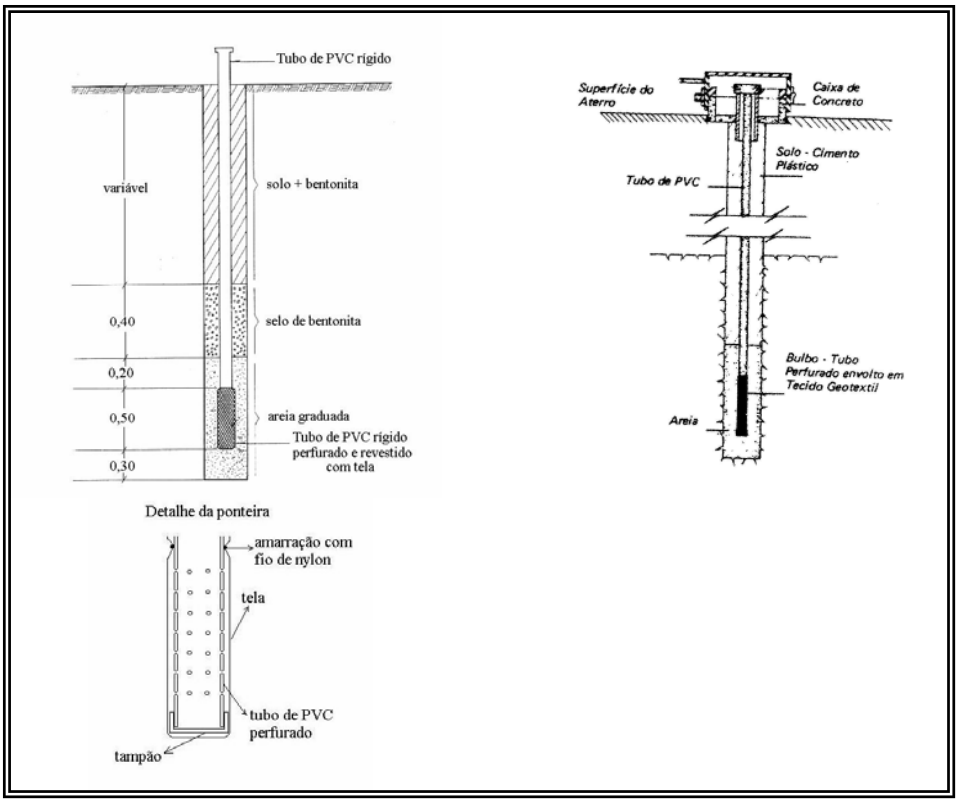


Figura 40 – Esquema do piezômetro de tubo aberto (CRUZ, 1996).

A freqüência de leitura para cada fase do empreendimento deve ser:

- Fase de instalação: durante pelo menos duas semanas após a instalação efetuar duas leituras semanais até a estabilização;
- Fase de enchimento: duas leituras semanais;
- Fase de operação: uma leitura semanal.

Os piezômetros são normalmente instalados e numerados em ordem crescente de montante para jusante.

A leitura dos piezômetros modelo Casagrande é realizada manualmente por um operador qualificado.

Os dados obtidos em campo são registrados em planilhas, ver Tabela 14, para posteriormente traçar os gráficos dos níveis piezométricos.

Tabela 14 – Dados de instalação de piezômetros modelo Casagrande (SARÉ, 2003).

Piezômetro Número	Estaca	Localização	Posição (m)*	Cota da Boca (m)	Cota da Instalação (m)	Profundidade de Instalação (m)
P-2	35	Barragem	0,00	71,13	58,45	12,68
P-4	35	Barragem	8,00	70,95	59,32	11,63
P-6	35	Barragem	21,50	65,89	57,56	8,33
P-8	35	Fundação	32,50	59,00	48,23	10,77
P-11	35	Fundação	45,00	56,00	48,70	7,30
P-3	38	Fundação	0,00	71,14	50,85	20,29
P-7	38	Fundação	24,00	65,89	49,04	16,85
P-18	38	Barragem	33,00	59,74	53,91	5,83
P-9	38	Fundação	37,00	60,77	50,31	10,46
P-12	38	Fundação	46,00	54,22	45,70	8,52
P-26	38	Fundação	70,00	54,59	47,68	6,91
* Posição tomada em relação à extremidade montante da crista da barragem						

As Figuras 41 e 42 mostram o posicionamento dos piezômetros nas seções das estacas 35 e 38 da Tabela 14.

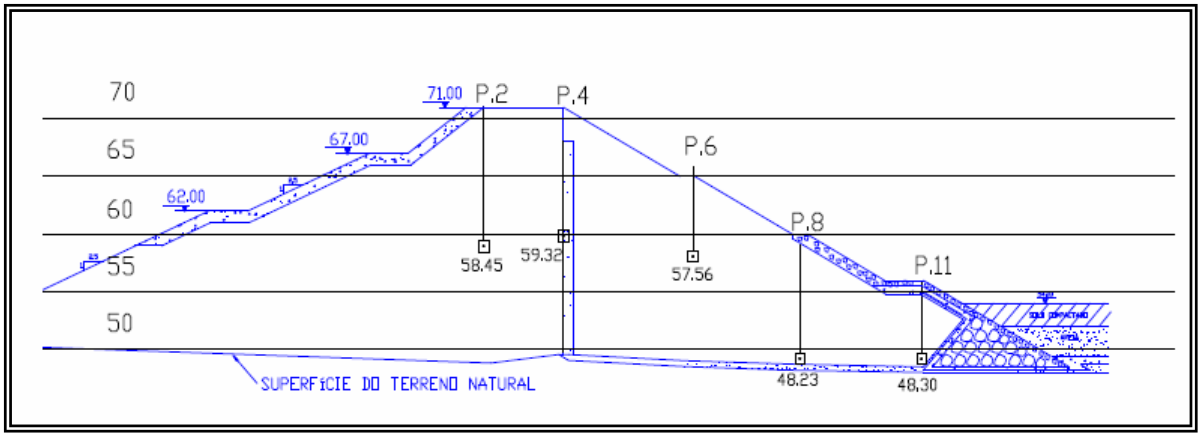


Figura 41 – Piezômetros na seção da estaca 35 (SARÉ, 2003).

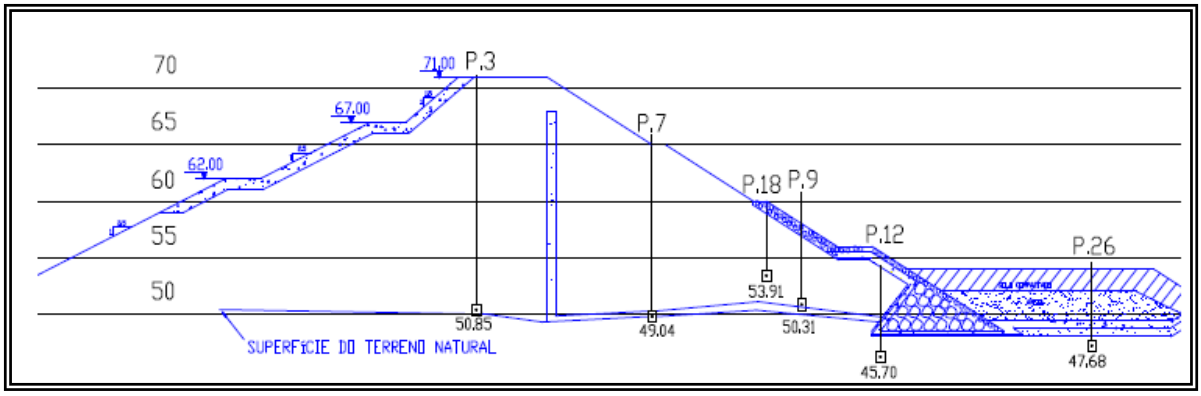


Figura 42 – Piezômetros na seção da estaca 38 (SARÉ, 2003).

A Figura 43 mostra registros dos piezômetros instalados na seção da estaca 35 ao longo do ano de 2001.

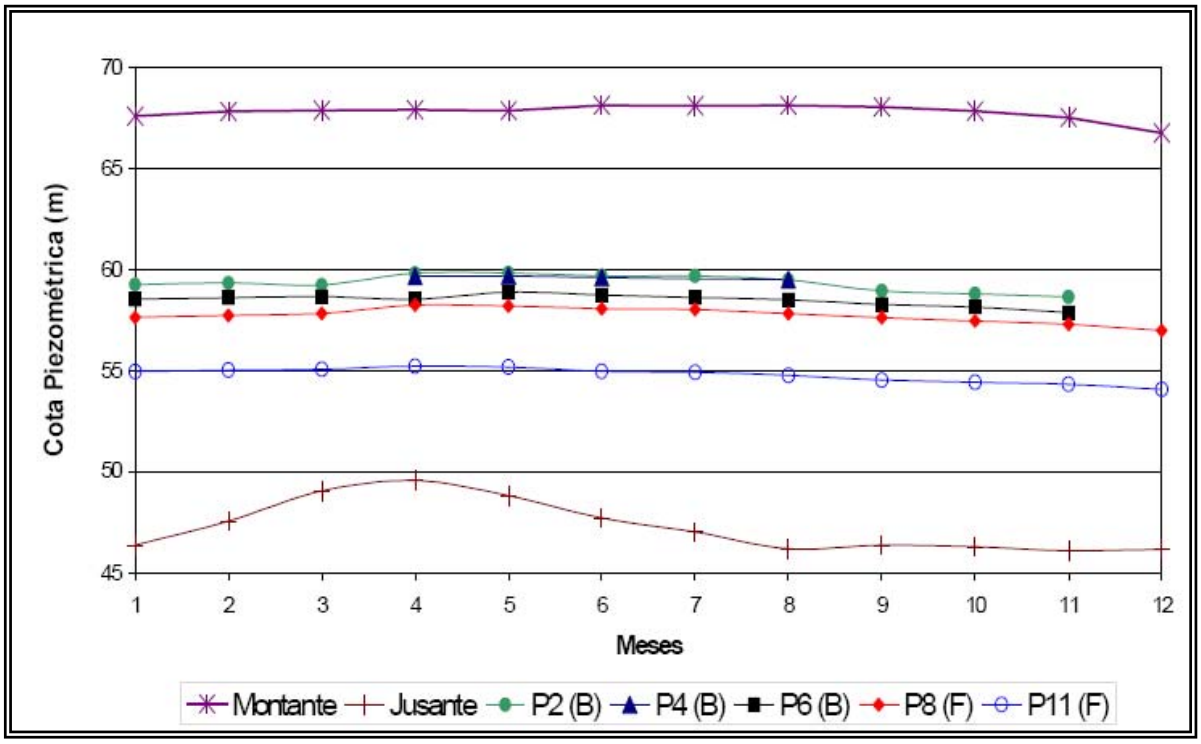


Figura 43 – Piezômetro na estaca 35 ano de 2001 (B – barragem; F – fundação) (SARÉ, 2003).

A Figura 44 apresenta o comportamento dos piezômetros instalados na seção da estaca 38, para o mesmo período do ano de 2001.

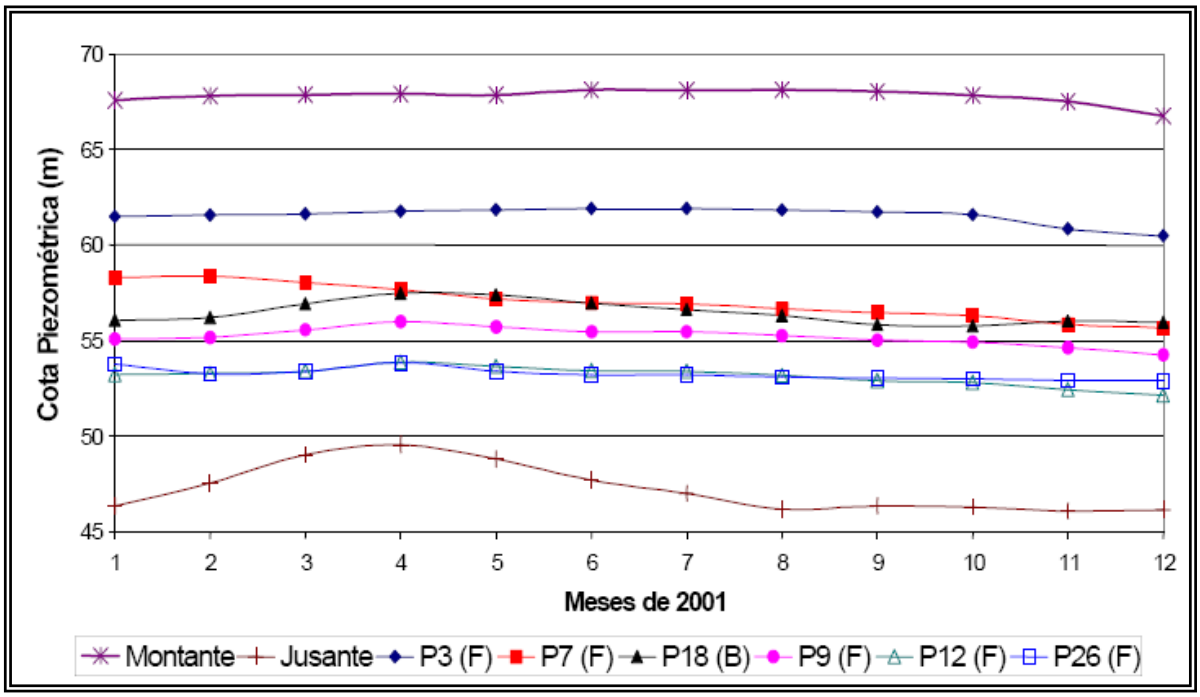


Figura 44 – Piezômetro na estaca 38 - (B – barragem; F – fundação) (SARÉ, 2003).

Os registros indicam estabilidade nas leituras, sem variações muito significativas, com exceção do medidor de jusante. Os pequenos desvios nas cotas piezométricas refletem alterações do nível do reservatório. O nível d'água médio do reservatório é de 67,87 metros.

Os dados da piezometria mostram que os meses de maio e abril são os períodos críticos, isto é, períodos do ano onde as cotas piezométricas estão mais elevadas. Estes resultados são coerentes, pois coincidem com o período chuvoso da região. Por sua vez, os meses de novembro e dezembro são aqueles que apresentam os menores valores para as cotas piezométricas, correspondendo ao período seco da região.

Em alguns casos deseja-se obter ou conhecer pressões em locais onde existe a impossibilidade de instalação de piezômetro de tubo aberto. Nestes locais utiliza-se os piezômetros de corda vibrante e os pneumáticos. Outros tipos de leitura são transdutores de poropressão (resistência elétrica, pneumáticos, corda vibrante ou "*strain gage*") que podem ser instalados na tubulação do piezômetro, em posição

abaixo do menor nível piezométrico esperado. A principal vantagem é a possibilidade de fornecer leituras de forma remota e a desvantagem á a necessidade de calibração periódica dos transdutores. Outro dispositivo de obtenção de dados é o leitor auditivo (ohmímetro) constituído de um circuito com uma fonte sonora que em contato com a água o sistema fecha o circuito e a emissão sonora é interrompida. Vale lembrar que em um mesmo ponto de um maciço de terra ou rocha, as medições obtidas com piezômetro e com medidor de nível d'água podem ser diferentes. A Figura 45 apresenta um exemplo típico desta situação onde no ponto "1" no interior de uma barragem, obtem-se a leitura do medidor de nível d'água (MNA) superior a do piezômetro (PZ). A representação gráfica da rede de fluxo na figura indica os níveis das colunas d'água nos instrumentos, tornando claro que esta diferença se deve a perda de carga hidráulica verificada no ponto medido pelo piezômetro, devido ao fluxo através da massa de terra.

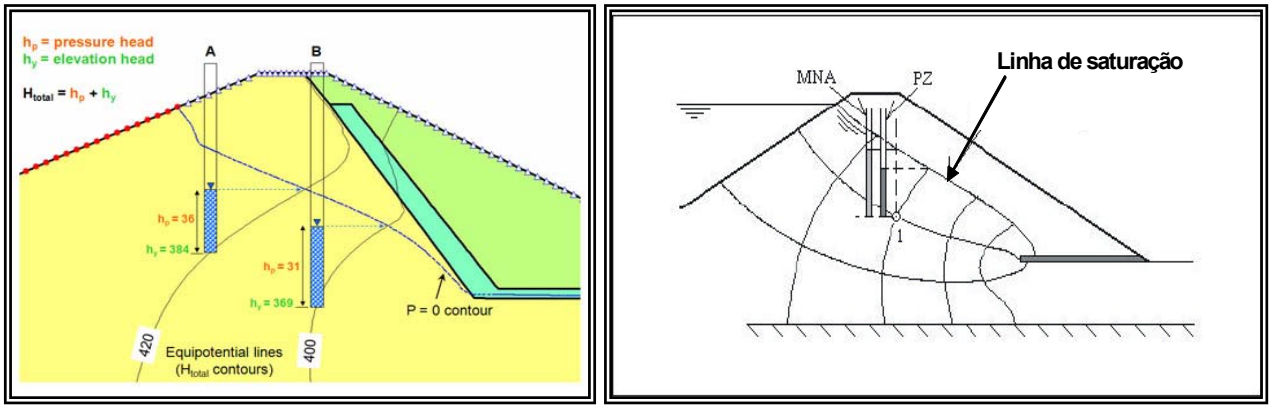


Figura 45 – Medições com piezômetro e medidor de nível d'água em um mesmo ponto (GEO-SLOPE INTERNATIONAL LTD, 2007).

Em barragens de rejeito, devido à sua construção ser em várias etapas por alteamentos sucessivos, estes piezômetros também são instalados em várias etapas seguindo o processo evolutivo da barragem. Em alguns casos, existe a necessidade de desativação quando da construção das etapas futuras, método de jusante e linha de centro. Porém, alguns destes piezômetros, ver Figura 46, podem ser preservados por mais alguns períodos de operação, procedendo-se a um prolongamento de sua tubulação para jusante, horizontalmente através do aterro compactado, de modo a possibilitar a sua leitura nas proximidades da nova crista da barragem.

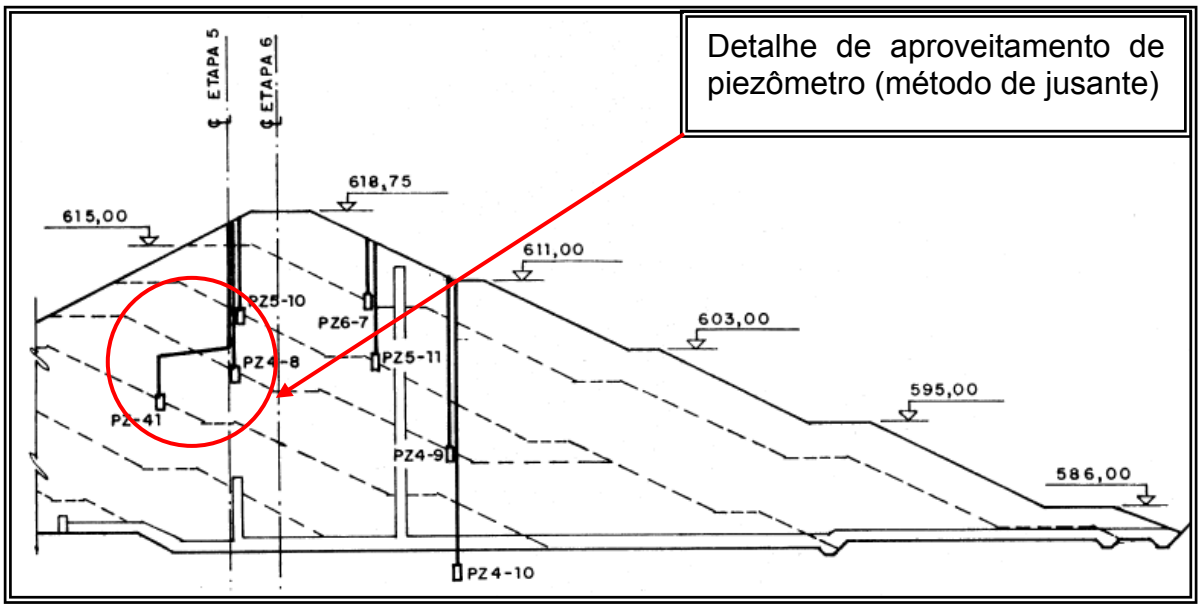


Figura 46 – Detalhe de prolongamento horizontal de tubulação para jusante (BORGES et al, 1996).

Dunnicliff (1988), descreve alguns tipos especiais de piezômetros de tubo aberto, especificamente projetados para serem instalados em solos não saturados, solos em adensamento e para regiões onde existe risco de congelamento da água do solo.

5.3 Piezômetro Pneumático

Sua aplicação é na determinação de pressões neutras e sub-pressões em maciços de terra, taludes e fundações, ver Figura 47. O princípio de funcionamento baseia-se no equilíbrio de pressões atuantes em um diafragma flexível, onde de um lado atua pressão de água que se deseja medir, e de outro lado atua um gás sob pressão, que é variável e conhecida através de um manômetro (gás é geralmente nitrogênio comprimido). Quando uma leitura é solicitada um indicador pneumático é conectado ao terminal ou diretamente na tubulação. A pressão deste gás é variável e controlada por manômetro situado em um painel de controle. A conexão pneumática entre o piezômetro e o painel é feita com dois tubos flexíveis, denominados de alimentação e retorno. Esta tubulação é conectada em um diafragma flexível por dois orifícios.

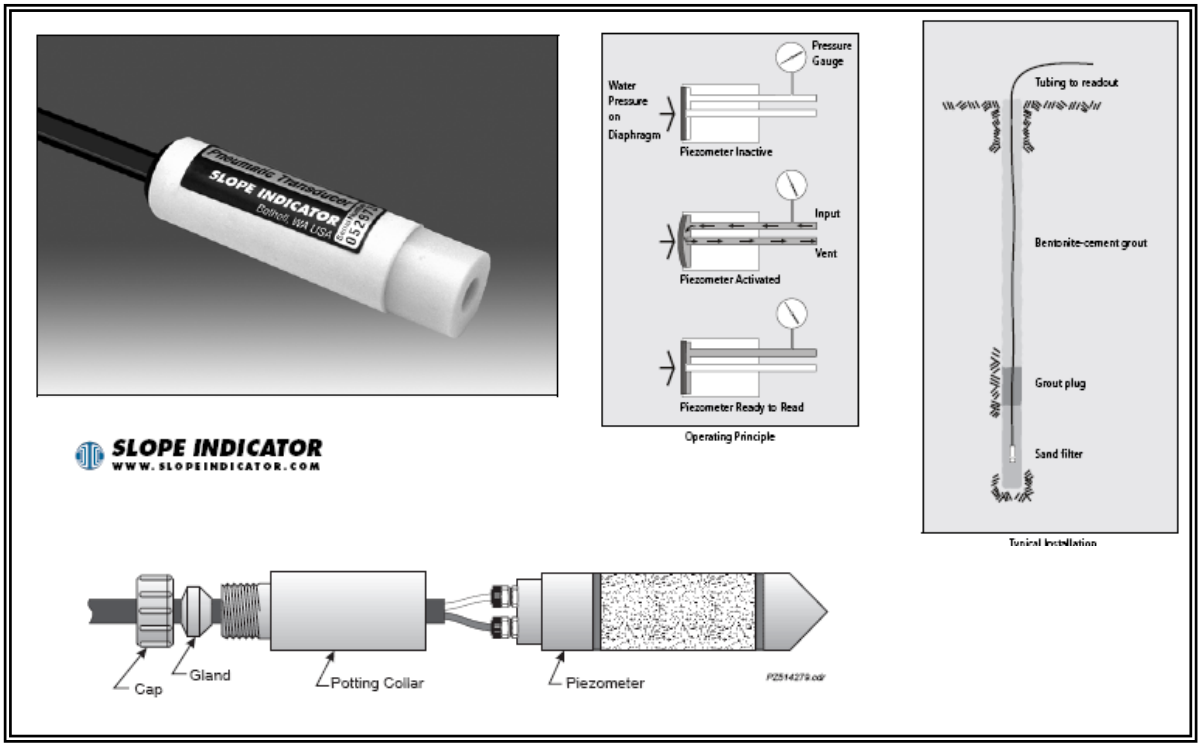


Figura 47 – Detalhe do equipamento, princípio de leitura e instalação (SLOPE INDICATOR COMPANY, 2007).

Existe uma cavidade, Figura 48, preenchida por água, responsável por transmitir a poropressão do solo ao diafragma. Esta cavidade está em contato com o solo por uma pedra porosa cerâmica ou de bronze sintetizado.

Figura 48 - Pedra porosa, diafragma e conexões para fixação da tubulação flexível. (COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO, 2007).

Quando a pressão da água supera a do gás, o diafragma veda os dois orifícios e não há fluxo (retorno) do gás. Quando a pressão do gás supera a da água, a membrana deforma ligeiramente, permitindo que o excesso de gás escape através desse tubo. Quando o refluxo de gás é detectado na superfície, o suprimento de gás é cortado. A pressão do gás no piezômetro decresce até a pressão da água forçar o diafragma para sua posição inicial, prevenindo fugas adicionais de gás através do tubo de ventilação. Neste ponto a pressão do gás iguala a pressão da água e o indicador pneumático indica a leitura no seu medidor de pressão. A Figura 49 apresenta unidade de leitura portátil para instrumentos pneumáticos montada em gabinete metálico, contendo um reservatório de nitrogênio recarregável, engates rápidos, registros, válvulas e manômetros.

Figura 49 – Unidade de leitura portátil para instrumentos pneumáticos (COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO, 2007).

As principais vantagens e limitações deste instrumento estão destacadas na Tabela 15.

Tabela 15 – Vantagens e limitações do piezômetro pneumático.

Vantagens	Limitações
Menor interferência na área do empreendimento.	Necessidade de calibração periódica dos manômetros e recarga das ampolas de gás comprimido (nitrogênio).
Recalques sofridos pelo instrumento não interfere nas leituras.	Deformação do diafragma flexível.
Leitura centralizada, simples e rápida.	Menor confiabilidade para medida de poropressão negativa.
Não tem limitação quanto à localização do instrumento.	Segundo Cruz, 1996, alguns tipos deste instrumento devido a deficiências de projeto e fabricação, apresentam alta porcentagem de perda, até mesmo antes da instalação.
Pressão atmosférica não interfere	
Tempo de resposta de leitura relativamente pequeno.	
Tecnologia de fabricação não complexa.	

O procedimento de leitura, ver Figura 50, consiste basicamente em aumentar gradativamente a pressão do gás comprimido e observar a indicação de retorno no painel de controle. Deve-se então, fechar as válvulas de pressão de gás e aguardar a estabilização da pressão lida no manômetro.

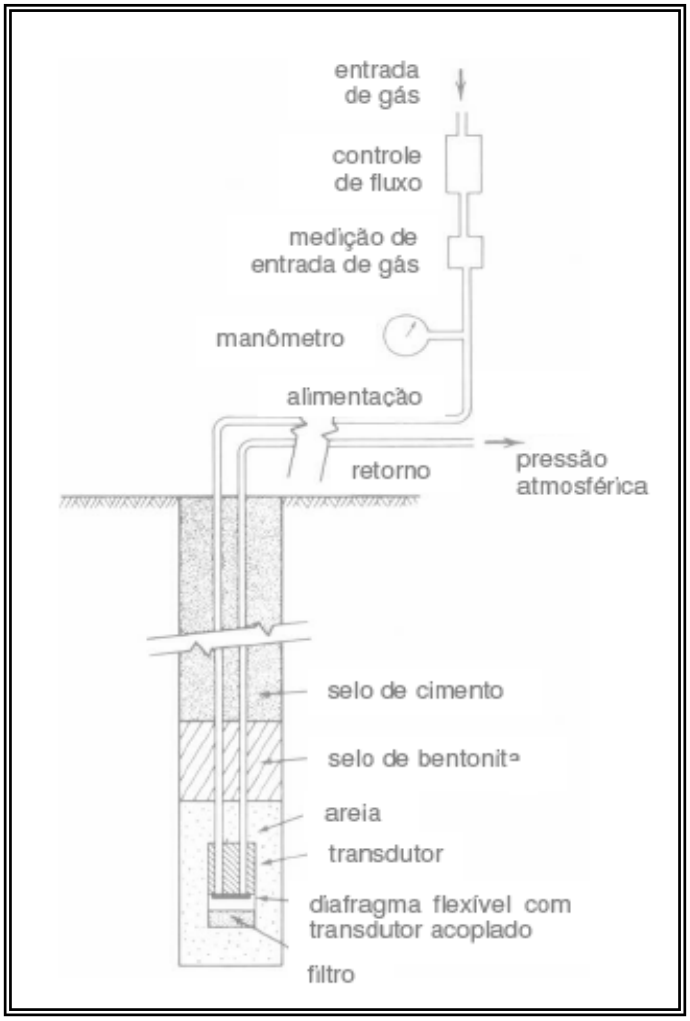


Figura 50 – Esquema de piezômetro pneumático (DUNNICLIFF, 1988, adaptado).

5.4 Piezômetro Hidráulico de Tubo Duplo ou Aberto

Este instrumento, Figura 51, foi desenvolvido para ser instalado em fundação ou aterro durante o período da obra. Neste tipo de piezômetro a diferença principal em relação ao pneumático, o ar é substituído por óleo e não existe membrana diafragma, mantendo-se o princípio de funcionamento. Neste tipo de instrumento a água contida nos vazios do solo fica em contato direto com a água contida no instrumento.

O sistema consiste em um elemento de filtro poroso conectado a dois tubos flexíveis que possuem manômetro na outra extremidade. Este tipo de instrumento é indicado normalmente para monitoramento durante a fase de operação da barragem e

projetado para ter vida útil longa. Em algumas ocasiões pode-se utilizar para medição de poropressão nas fases de construção e enchimento de barragens de terra. A leitura do nível piezométrico é fornecida pela soma da carga de elevação e a soma da carga de pressão dos manômetros. Adota-se o valor médio indicado nos manômetros como nível piezométrico. Quando os tubos flexíveis estão saturados, os dois manômetros indicam o mesmo nível piezométrico.

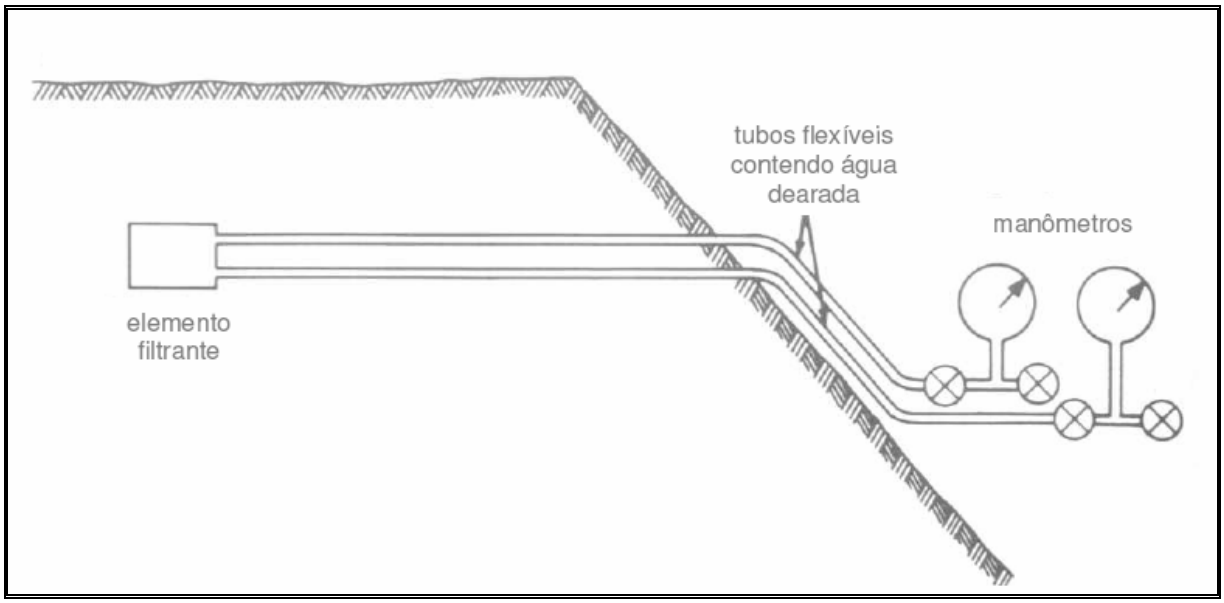


Figura 51 – Esquema de instalação de piezômetro hidráulico de tubo duplo ou aberto (DUNNICLIFF, 1988, adaptado).

Mesmo em solos argilosos saturados poderá ocorrer a formação de gases proveniente de decomposição de matéria orgânica, por exemplo. Desde que estes penetrem no sistema de piezômetros, as leituras de pressão serão errôneas e daí a necessidade de circulação de água deaerada. Uma indicação da necessidade de desaerar é verificada quando pressões diferentes são medidas nos dois tubos de um mesmo piezômetro. Isso certamente é devido à presença de ar em quantidades diferentes nos dois ramos da tubulação. Notando-se evidências ou suspeita de entrada de ar no sistema, a saturação dos tubos flexíveis é feita circulando-se água destilada e deaerada. A formação de bolhas de ar na tubulação tem causas de diversas naturezas, tais como defeitos de instalação, ocorrências de naturezas diversas no comportamento da barragem, falta de regularidade na troca de água e, principalmente, por falha de operação. A troca de água dos tubos de leitura deve ser feita regularmente com periodicidade inferior a seis meses para o caso de barragem

em operação. As principais vantagens e limitações deste instrumento estão destacadas na Tabela 16:

Tabela 16 – Vantagens e limitações do piezômetro hidráulico.

Vantagens	Limitações
Técnica e construção simples.	Não indicado para cotas de instalação muito superiores que a do terminal de leitura.
Permite avaliação de poropressão negativas.	Possibilidade de fornecer água ao maciço durante operação de deaeração das tubulações, situação prejudicial quando a altura do aterro sobre o instrumento é pequena (Cruz, 1996).
O sensor é acessível.	Necessidade de operação demorada e relativamente complexa para deaeração das tubulações e manutenção do sistema.
Permite a realização de ensaio de permeabilidade.	Tempo de resposta muito grande quando instalado em solos de baixa permeabilidade.
Custo médio e alta durabilidade.	Eventuais influências de recalques nas leituras dos instrumentos.

5.5 Piezômetro Elétrico

Os aparelhos elétricos correlacionam sinais elétricos a grandezas físicas. A pressão da água é monitorada por um transdutor elétrico. Este piezômetro apresenta o mais baixo tempo de resposta devido ao pequeno volume de água que o maciço precisa fornecer para o diafragma do transdutor deslocar. Utilizado para obtenção de pressões neutras e subpressões em maciços de terra, taludes e fundações. Este instrumento é composto de um dispositivo cilíndrico metálico dotado de pedra porosa e diafragma, instrumentado com extensômetros elétricos de resistência.

A pressão externa aplicada ao diafragma produz um sinal elétrico de saída proporcional à posição do núcleo, que é lida com equipamento específico. Este instrumento possibilita efetuar medidas dinâmicas de poropressão com registro contínuo, recurso importante para instrumentação de barragens em regiões que apresentam sismicidade significativa. Possui vantagem alternativa de automação de

leituras possibilitando monitoramento remoto das medidas de poropressão negativa. Este piezômetro deve ser protegido contra descargas elétricas sendo sua carcaça aterrada e um dispositivo denominado varistor.

Varistor ou VDR (*voltage depedent resistor*) é um componente eletrônico que oferece proteção contra transientes de tensão em circuitos eletrônicos. Sua característica é de *limitador de tensão*, impedindo que descargas de pequena duração cheguem ao circuito.

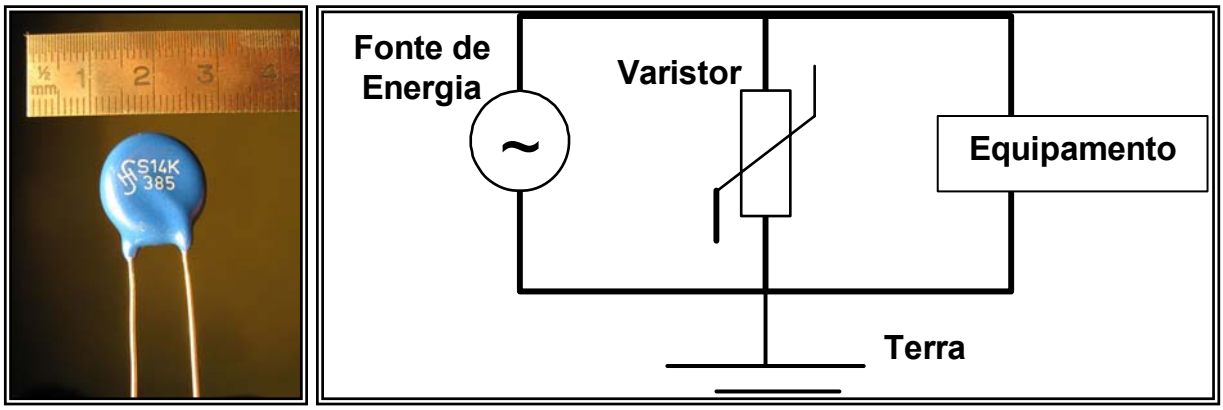


Figura 52 – Circuito eletrônico contendo o sistema varistor aplicado à proteção de um equipamento eletrônico.

Os cabos, ver Figura 53, dos piezômetros devem ser protegidos individualmente e através de blindagem e devem ser aterrados. Os instrumentos de leitura devem ser do tipo digital.

Figura 53 – Piezômetro elétrico
(COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO, 2007).

5.6 Piezômetro de Corda Vibrante

Sistemas de medição de corda vibrante (*vibrating wire*) têm como princípio de operação do sensor o cálculo de um parâmetro físico pela medição da mudança na freqüência de uma corda vibrante, estendida num corpo de uma estrutura que se deforma com ou pela quantidade a ser medida. Projetados para oferecer precisão e confiabilidade em longo prazo sob condições geotécnicas severas. Os dispositivos de corda vibrante deste instrumento toleram umidade, comum em aplicação geotécnica, pois é construído em um cilindro selado contendo um transdutor de pressão. Converte a pressão da água a um sinal da freqüência através de um diafragma metálico, de um fio de aço tensionado e de uma bobina eletromagnética colocada em seu ponto médio. Este diafragma metálico separa a água do solo do sistema de medição. O piezômetro é colocado no ponto a ser monitorado e é ligado a um cabo que se estende até a superfície onde é conectado a um aparelho de aquisição de dados. O transdutor de pressão, Figura 54, é uma cápsula selada com um diafragma sensível a pressão em uma extremidade. Uma corda tensionada é ligada a parte interna do diafragma.

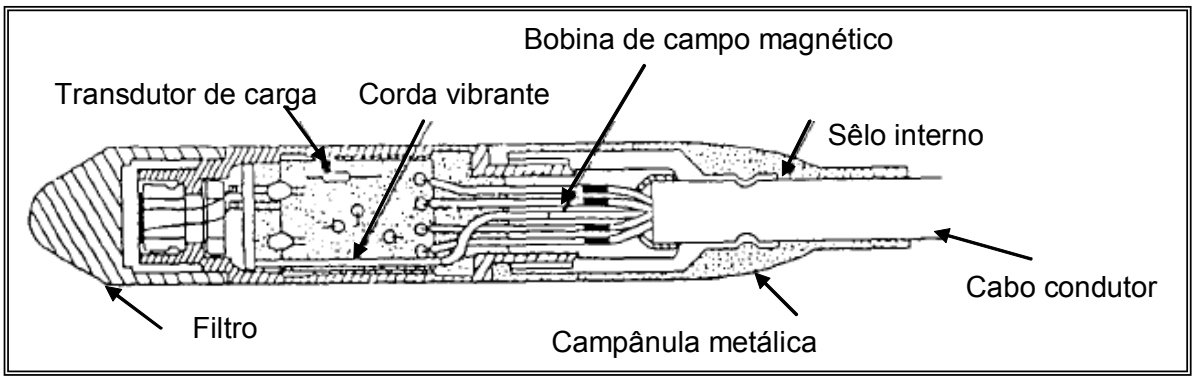


Figura 54 – Transdutor de pressão (RST INSTRUMENTS LTD, 2007).

O piezômetro, Figura 55, é projetado de modo que quando o diafragma deflete com uma mudança na poropressão, cause uma mudança na tensão do fio e o mesmo acontece com a freqüência natural da corda. Quando excitado pela bobina eletromagnética, o fio vibra em sua freqüência natural. A vibração do fio na proximidade da bobina gera um sinal da freqüência que será transmitido ao dispositivo de leitura. O dispositivo de leitura processa o sinal, aplica fatores da calibração, e indica uma leitura na unidade de medida de pressão. É capaz de

transmitir sinais entre dois a três quilômetros sem perdas e sua freqüência de saída é imune a ruídos elétricos externos.

Os sensores (também chamados de transdutores) são elementos muito importantes nos instrumentos modernos. Os transdutores convertem a deformação produzida por uma força em uma tensão elétrica proporcional à força aplicada. Mais e mais os sensores mecânicos vêm sendo substituídos por sensores elétricos ou eletrônicos por facilitarem o interfaceamento com computadores, o armazenamento e posterior processamento e análise da informação e o controle de processos à distância em tempo real.

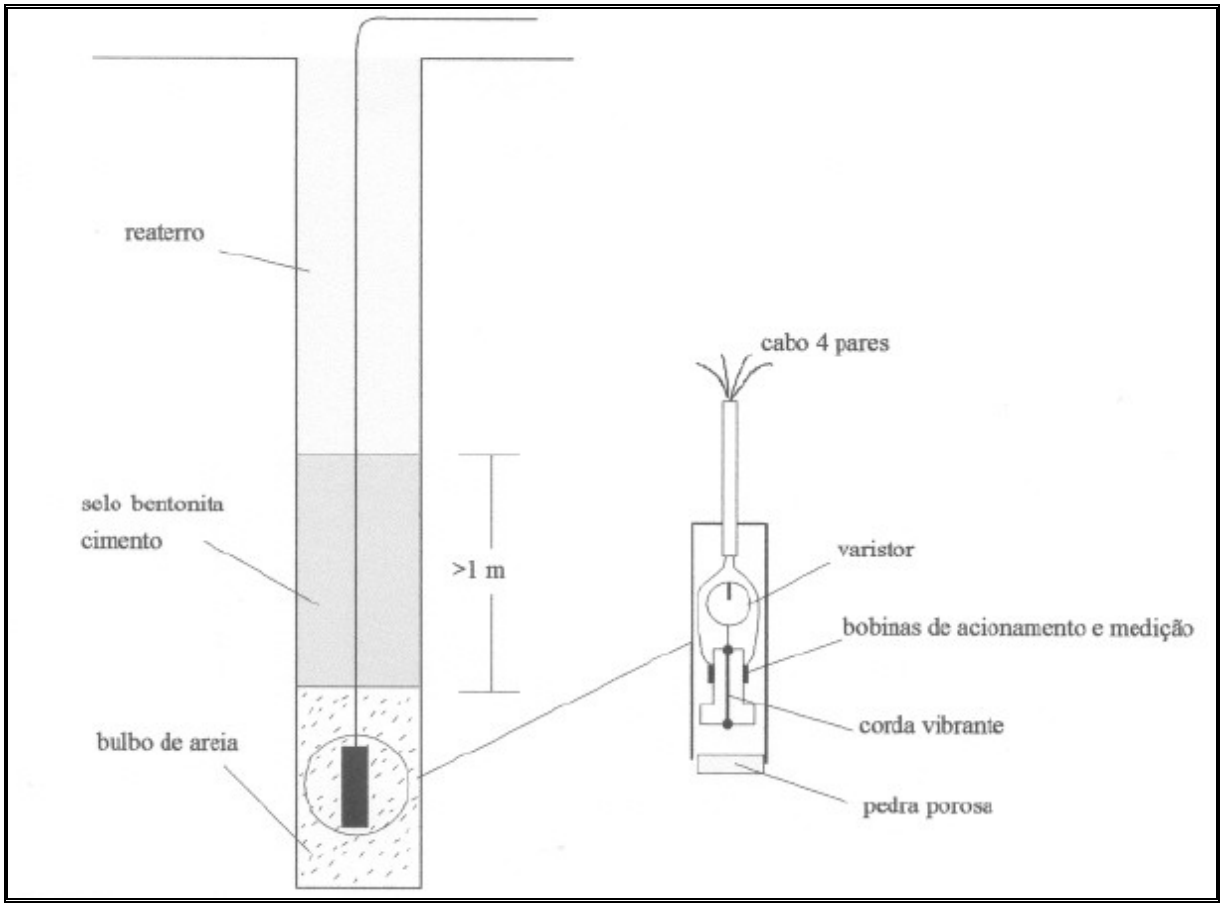


Figura 55 – Piezômetro elétrico de corda vibrante (BRASIL, 2007).

A medição da poropressão neste instrumento, ver Figura 56, e feita por uma corda tensionada acoplada ao centro do diafragma. Um deslocamento do diafragma causa uma mudança de tensão na corda.

Figura 56 – Piezômetro de corda vibrante (SLOPE INDICATOR COMPANY, 2007).

A Figura 57 é um esquema ilustrativo da seqüência construtiva de instalação de um piezômetro de corda vibrante em furo de sondagem.

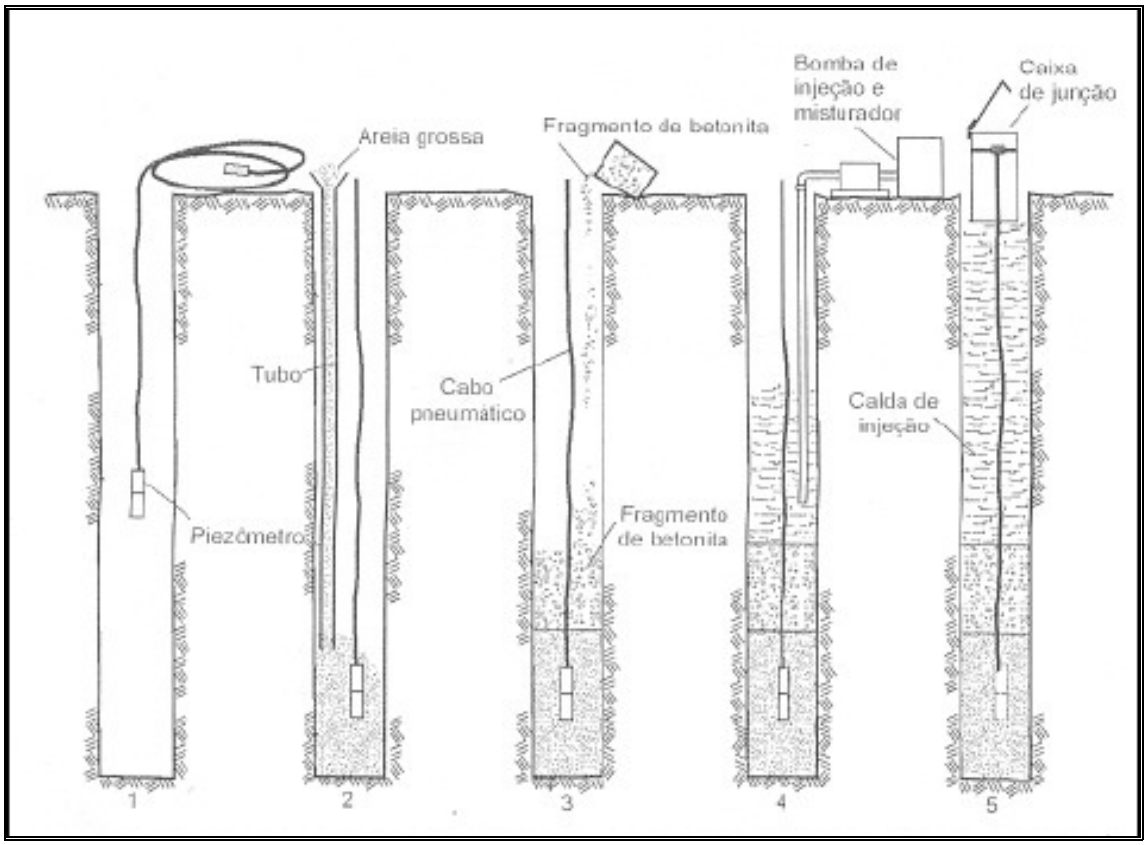


Figura 57 – Instalação de um piezômetro de corda vibrante em furo de sondagem (SILVEIRA, 2006).

As principais vantagens e limitações deste instrumento estão destacadas na Tabela 17:

Tabela 17 – Vantagens e limitações do piezômetro de corda vibrante.

Vantagens	**Limitações**
Alta resolução e precisão.	Podem ser danificados por descarga elétrica e custo elevado de aquisição.
Resposta rápida.	
Os sinais podem ser transmitidos à longa distância.	
Facilidade de instalação e simples leitura.	
Possibilidade de automação das leituras.	

Cruz (1996), alerta para a necessidade de blindagem eletromagnética deste instrumento, pois pode sofrer influência do meio no sistema de medições. Campos eletromagnéticos provocados por linhas de alta tensão, subestações, unidades geradoras, etc., podem reduzir o nível de confiabilidade da leitura deste instrumento. Dunnicliff (1988), sugere que piezômetros de corda vibrante, blindados, manufaturados, são confiáveis, precisos e tem tempo de resposta curto.

6 INSTRUMENTAÇÃO PARA MEDIÇÕES DE DESLOCAMENTOS

O objetivo deste capítulo é apresentar os instrumentos geotécnicos que permitem determinar em superfícies as deformações do maciço, traduzidas pelos parâmetros de deslocamentos verticais e horizontais (que, quando referidos a um comprimento conhecido, podem ser convertidos em deformação), e internamente, as pressões de percolação (que podem ser convertidas em força). Dentre os processos usuais destacam-se a leitura dos deslocamentos internos no corpo do maciço, medidores de deslocamentos horizontais e deslocamentos de superfície.

As barragens de terra e rejeitos estão constantemente sujeitas a deslocamentos e deformações, em virtude de sua própria natureza e dimensões, além de agentes internos e externos. Deste modo, é importante estudar melhor o fenômeno e o emprego de novas metodologias e tecnologias que possam contribuir para o monitoramento da barragem.

Mensurar deslocamentos e deformações significa sistematizar as observações sobre o comportamento dos mesmos, sendo atualmente prática crescente em grau de importância, devido ao porte que as barragens de rejeitos atingem com alteamentos sucessivos, reflexo da crescente produção das minas, gerando quantidade maior de rejeitos, o que reforça a importância destas medições. O engenheiro deve então estar familiarizado com os métodos e técnicas de medida e com a análise de dados experimentais. De maneira geral, pode-se afirmar que o engenheiro deve estar capacitado a executar três tarefas distintas:

- especificar as variáveis físicas a serem investigadas e conhecer o papel destas no trabalho analítico posterior;
- conhecer os princípios básicos de funcionamento de uma larga gama de instrumentos para construir sua especificação;
- ter uma compreensão profunda dos princípios físicos envolvidos nos fenômenos estudados, bem como das limitações dos dados experimentais, para que possa analisar os dados coletados.

Assim, é necessário que o engenheiro conheça as técnicas de medição, os instrumentos e a forma adequada de aplicá-los.

Diante disto, existe a necessidade de acompanhamento contínuo das diversas variáveis identificadas no projeto, para verificar possíveis discrepâncias entre valores

previstos e obtidos através de leituras "*in situ*" ou identificar fenômenos que possam provocar a instabilidade da barragem.

A Figura 58 apresenta os elementos funcionais de um sistema de medição, isto é, do instrumento, e não seus elementos físicos. Ele inclui todos os elementos que executam as funções básicas consideradas necessárias para a constituição de qualquer instrumento.

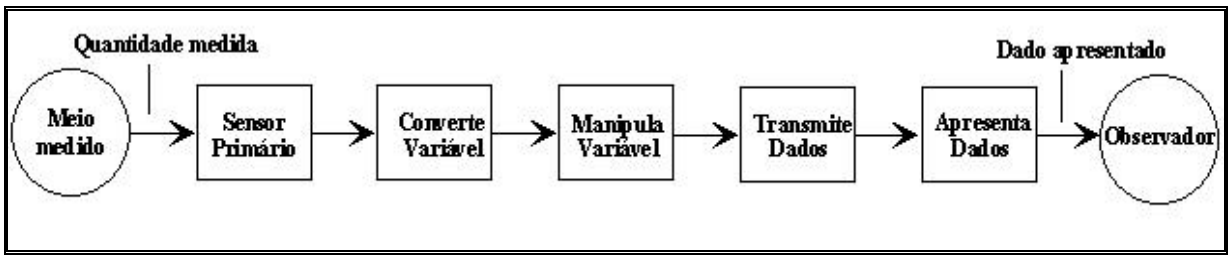


Figura 58 - Elementos funcionais de um sistema de medição
(UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS, 2007).

Dentre as grandezas mais comumente controladas no campo, estão os deslocamentos e deformações. As maiores dificuldades estão em geral associadas com medidas de deformação e deslocamentos horizontais e distorções. Medir deslocamentos em obras de grande porte, como barragens de terra, é uma tarefa que exige engenhosidade e capacidade técnica. Nas últimas décadas, não somente o número, mas também a altura das barragens vem crescendo consideravelmente. Por isto, aumentou também a exigência por qualidade e precisão nos métodos de instrumentação e auscultação.

Para o caso de deslocamentos de barragens, a maioria dos instrumentos existentes baseia-se no controle de movimentação sendo as medidas de deformação relacionadas com o tempo e lançadas graficamente para análise.

Dunnicliff (1988), classifica os instrumentos de medida em duas categorias dependendo de sua finalidade, sendo instrumentos utilizados para determinar as propriedades de solos e rochas (parâmetros geotécnicos) e instrumentos utilizados para monitoramento de comportamento da obra durante construção e operação.

6.1 Medidores de Deslocamentos de Superfície

Todos os materiais estão sujeitos à deformação, ou seja, alteração da geometria interna, quando submetidos à aplicação de esforços.

No caso de solos moles muito compressíveis, estas deformações ocorrem ao longo do tempo e não imediatamente após a aplicação do carregamento. O monitoramento de barragens é realizado por meios geotécnicos e em algumas barragens por levantamentos topográficos.

Podemos citar outras técnicas para determinar deslocamentos de estruturas que demandam monitoramento rigoroso e preciso dos deslocamentos horizontais, como por exemplo, o sistema de posicionamento com base em informações por uma rede de satélites artificiais, denominado de GPS (Global Positioning System – Sistema de Posicionamento Global), triangulação (resolução de triângulos retângulos) e nivelamento geométrico.

Os instrumentos normalmente utilizados para determinar deslocamentos horizontais, superficiais e subsuperficiais, que indicam a alteração da geometria externa, são baseados em princípios relativamente simples.

Porém, para que se alcance os níveis elevados de acurácia, precisão e confiabilidade atualmente requeridos para as medições de campo, torna-se necessários instrumentos cada vez mais sofisticados.

A determinação de deslocamentos horizontais e verticais da obra é realizada em campanhas de coleta de dados. Todas as observações devem ser realizadas em períodos que a temperatura ambiente não esteja muito elevada, reduzindo as distorções de leitura (refração).

Ao amanhecer, finais de tarde e mesmo períodos noturnos são aconselhados. No levantamento realizado com base no método de triangulação, utilizando a técnica de intersecção à vante, efetuam-se medidas angulares entre a direção de uma base geodésica, definida por dois pontos de coordenadas conhecidas (oficial), localizadas a jusante da barragem, e a direção de pontos (marcos superficiais, ver Figura 59) que teriam suas coordenadas a determinar.

A variação das coordenadas indica alterações planimétricas ou altimétricas. As medidas angulares são efetuadas com uma estação total (distanciômetro eletrônico).

O nivelamento geométrico é realizado em marcos superficiais, localizados na crista da barragem, para determinar as diferenças altimétricas.

Utiliza-se basicamente um nível e um par de miras com graduação em fita de Invar.

O nivelamento geométrico é um método de levantamento topográfico no qual a medição fundamental é a diferença (desníveis) determinada por visadas horizontais entre pontos próximos ocupados por um par de miras (ou uma única mira colocada sucessivamente em ambos os lados do nível).

Os marcos superficiais de deslocamentos correspondem a pontos de referência para controle dos deslocamentos horizontais e verticais do maciço (recalques).

No assentamento dos marcos referenciais deve-se atentar para suas condições de fundação, de modo a impedir qualquer deslocamento.

A locação e a densidade das estações de observação topográficas estão condicionadas diretamente às características e necessidades de cada empreendimento.

O deslocamento relativo (medido por métodos físicos) refere-se a pontos que estão ligados a estrutura do maciço e os deslocamentos absolutos (medidos por métodos geodésicos) são medidos com pontos fixos fora da estrutura do maciço e em pontos seguros.

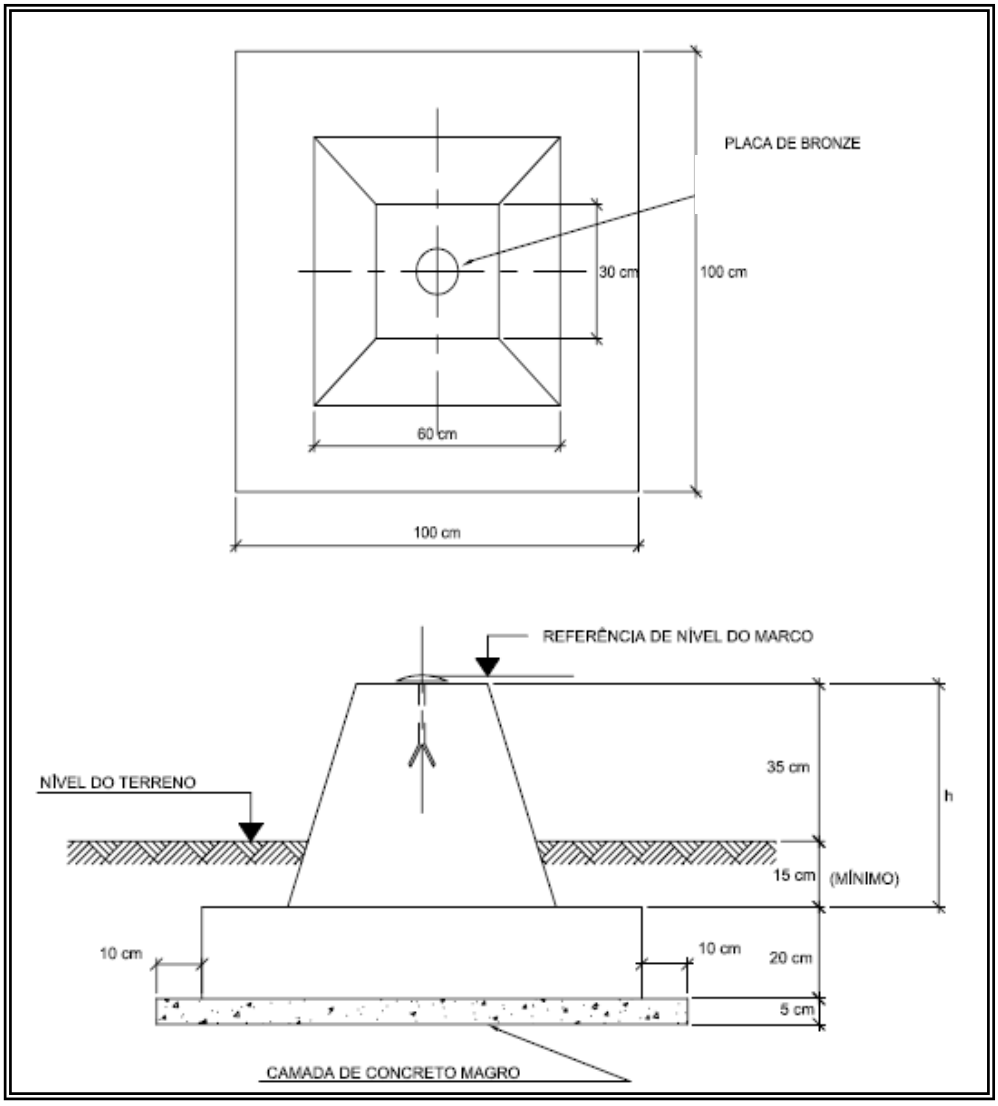


Figura 59 – Referência de nível materializado por marco topográfico (PETRÓLEO BRASILEIRO S.A., 2005).

Os métodos de monitoração são geodésicos (convencional e moderno) e fotogramétricos. Os trabalhos de monitoramento geodésico buscam detectar variações de coordenadas (planimétricas e /ou altimétricas) de um conjunto de pontos, dentro de um período específico de tempo. Os resultados obtidos pelas técnicas geodésicas indicam se os pontos tiveram suas coordenadas modificadas (deslocamento). Uma etapa posterior, realizada em conjunto com profissionais especialistas em estruturas, é verificar se estes deslocamentos causaram uma deformação na estrutura da barragem.

A distribuição espacial dos marcos superficiais de deslocamentos no aterro é definida em função das necessidades de avaliação e interpretação do comportamento deformacional do maciço. Recomenda-se para grandes barragens instalação de marcos a cada 100 metros e nas de porte médio a cada 50 metros.

Normalmente eles estão distribuídos em um mesmo alinhamento ao longo de seções transversais aos taludes do aterro, possibilitando a instrumentação de segmentos representativos do maciço. A precisão das informações requeridas, assim como o tamanho e a forma da barragem, influenciam a seleção do sistema de monitoração a ser empregado. Segundo Silveira (2006), a precisão e a confiabilidade das medições de deslocamentos empregando métodos de topografia dependem:

- Tipo de instrumentos empregados;
- Repetição na centralização e no posicionamento dos instrumentos de medida nas estações de referência;
- Estabilidade (imobilidade) das estações de referência;
- Proteção dos pilares e outras referências contra acidentes e vandalismo;
- Experiência da equipe de topografia ou geodésia;
- Influência das condições meteorológicas;
- Extensão das distâncias de visada.

Para barragens muito extensas, algumas com vários quilômetros de comprimento, geralmente não se recomenda o emprego de medições topográficas e nem geodésicas, visto que não se dispõe normalmente de instrumentos com precisão suficiente ou, então, o custo de aquisição dos mesmos seria extremamente elevado.

No entanto, as informações fornecidas pelos marcos superficiais se referem apenas aos movimentos da superfície, nada dizendo sobre qual a profundidade onde está

situada a superfície de escorregamento. A deformabilidade da fundação é em parte pelos deslocamentos da estrutura, sendo necessária medidas diretas no interior do maciço. Estas medidas podem ser realizadas por extensiometria mecânica elétrica ou piezométrica, aliadas a nivelamento de precisão. As leituras geodésicas destes marcos são feitas de forma sistemática e periódica por meio de levantamento topográfico eletrônico de precisão, estação total, que consiste em um conjunto definido por um teodolito eletrônico, um distanciômetro a ele incorporado e um microprocessador. O método consiste basicamente no estabelecimento de uma rede de estações de observações, a partir da qual, determinam-se os deslocamentos diferenciais de marcos visados. As estações de referência para medição dos deslocamentos horizontais requerem um pilar de concreto armado, conforme Figura 60, recomendando-se altura de 5,0 metros para evitar perda de rigidez tornando-se flexível. É recomendável pintar estes pilares de branco, reduzindo-se o aquecimento pelos raios solares ou um isolante térmico.

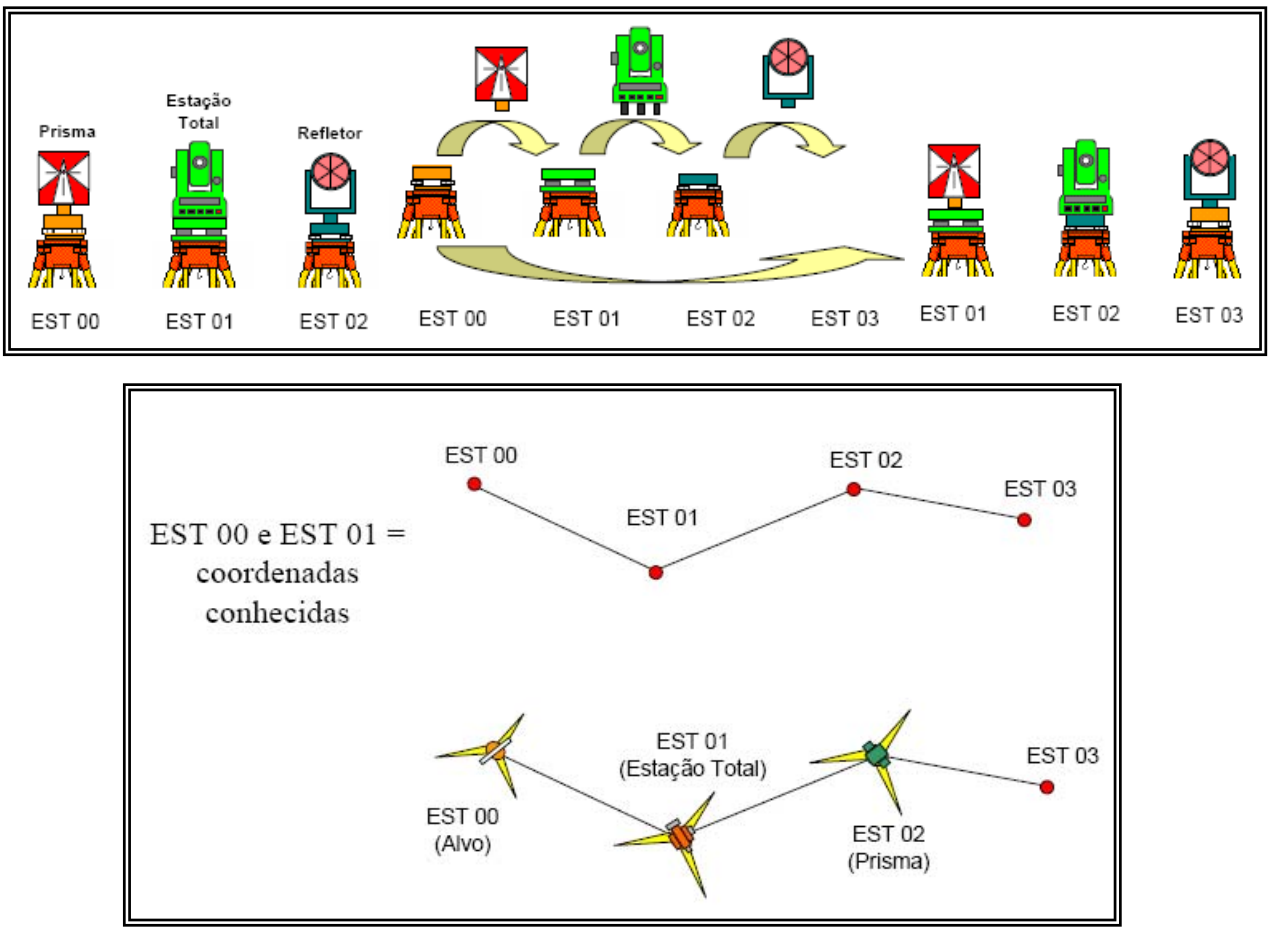


Figura 60 – Esquema de levantamento de campo
(LEICA GEOSYSTEMS AG, 2007)

No seu topo o pilar é dotado de uma placa de apoio especial, para centralização do teodolito ou do aparelho para medição eletrônica de distância (estação total). Por serem instrumentos simples, os marcos superficiais, em geral, são instalados diretamente sobre a superfície do talude.

Deve-se observar movimentos de rastejo superficial, que podem afetar os deslocamentos a serem medidos pelos marcos superficiais. A Estação Total, uma vez estacionada, ajusta seu nivelamento automaticamente. Para dar início à leitura é visado um marco de referência (*benchmark*), Figura 61, e em seguida os marcos desejados para medição dos deslocamentos horizontais, designado de *horizontal control station* ou de *reference monument*, conforme observação de Dunnicliff (1988).

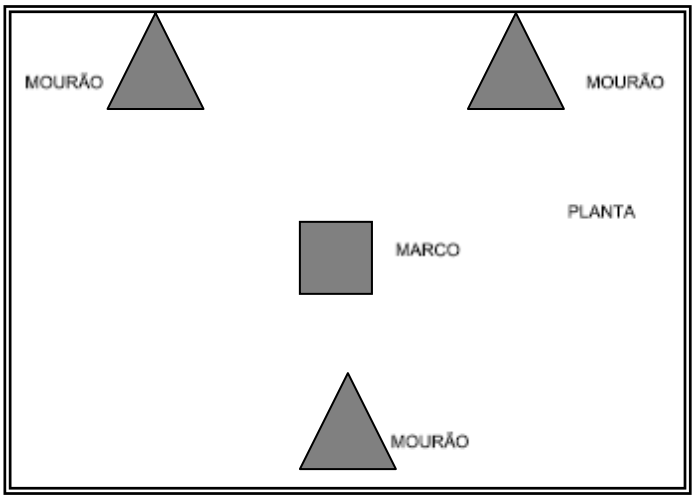


Figura 61 – Preservação de marcos topográficos instalados em áreas externas (PETRÓLEO BRASILEIRO S.A, 2005).

Os recalques são determinados por meio de nivelamento de precisão, Figura 62, e os deslocamentos horizontais por meio de triangulação ou colimações geodésicas. A triangulação é um método em que se obtém figuras geométricas a partir de triângulos, justapostos ou sobrepostos, formados através da medição dos ângulos subentendidos pelos vértices, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (1984).

Para a realização da triangulação, sugere-se a utilização das especificações do Boletim de Serviço nº. 1602/1983 (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística 1983), para levantamentos geodésicos de precisão em áreas menos desenvolvidas.

Figura 62 - Medição de deslocamentos dos marcos superficiais através de levantamentos topográficos (LEICA GEOSYSTEMS AG, 2007).

Os nivelamentos podem ser classificados em diretos e indiretos. Os primeiros são realizados com níveis ao longo de extensões aproximadamente horizontais, por exemplo ao longo das bermas e da crista de uma barragem. Para os nivelamentos de precisão, utilizam-se os níveis de maior precisão e mira de aço Invar, fibra de vidro, liga de aço e níquel com baixo coeficiente de dilatação linear, pequeno diâmetro e leve com alta precisão e acurácia (exatidão), o que permite leituras de recalque com sensibilidade da ordem de ± 1,0 milímetro, para distâncias da ordem de 1,0 quilômetro. Os nivelamentos indiretos, ver Figura 63, são realizados empregando-se o teodolito, sendo menos precisos que os nivelamentos diretos, porque os ângulos verticais medidos pelo teodolito apresentam a metade da precisão dos ângulos medidos na horizontal. As leituras obtidas são anotadas. Todas as medidas ou observações feitas estão afetadas de erros de diferentes classes. Assim é impossível determinar a verdadeira magnitude de uma distância ou de um ângulo medido.

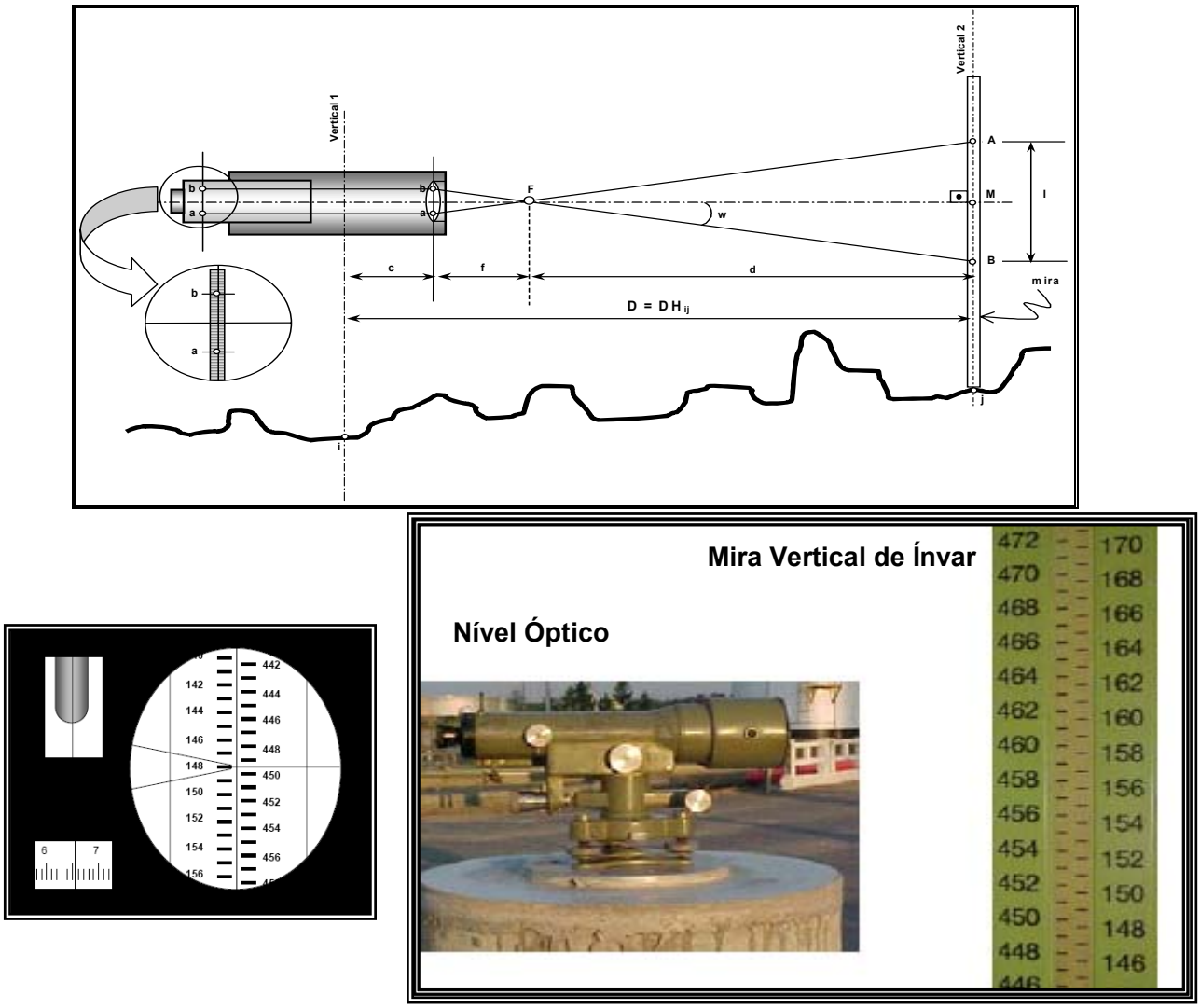


Figura 63 - Medição indireta ótica de distância horizontal
(LEICA GEOSYSTEMS AG, 2007).

Os resultados das leituras e o acompanhamento das movimentações em superfície permitem obter o rumo e a intensidade dos deslocamentos horizontais e a variação de magnitude e a velocidade dos deslocamentos verticais ao longo do tempo.

A principal característica deste tipo de instrumento é a facilidade de instalação e manutenção. Os marcos são constituídos de uma haste metálica, simplesmente fixada em uma base de concreto e posicionados em pontos de interesse da barragem. Por ser de fácil acesso e por ficarem expostos ao ambiente, há o risco de danos aos marcos topográficos. Mesmo com sinalização da área onde estão instalados os marcos, nota-se com freqüência a destruição destes instrumentos, seja por acidentes, seja por atos de vandalismo. O projeto de instrumentação de

barragens deve contemplar a possibilidade de perda ou inutilização de 10 a 20% dos marcos superficiais instalados durante a construção. O monitoramento de barragens aplicando conceitos da geodésia geométrica fornece dados acurados e confiáveis sobre a real condição estrutural de uma obra. Desta forma é perfeitamente viável e justificável a implantação de uma rede de monitoramento geodésico para controle de deslocamentos estruturais, sendo esta o referencial para garantir resultados precisos e de confiança.

6.2 Medição de Deslocamentos com Inclinômetros

Os inclinômetros são utilizados com o objetivo de mensurar deslocamentos horizontais, superficiais e em subsuperfície. Os movimentos horizontais são decorrentes da compressibilidade dos materiais do aterro da barragem. No sentido longitudinal da barragem em, vales simétricos, por exemplo, os deslocamentos verticais atingem geralmente seus maiores valores na seção central da barragem (aumento da tensão horizontal de compressão), enquanto os deslocamentos horizontais são praticamente nulos, porém à medida que se aproxima das ombreiras da barragem, aumentam os deslocamentos horizontais (tensão de compressão anula e tem-se tensão de tração).

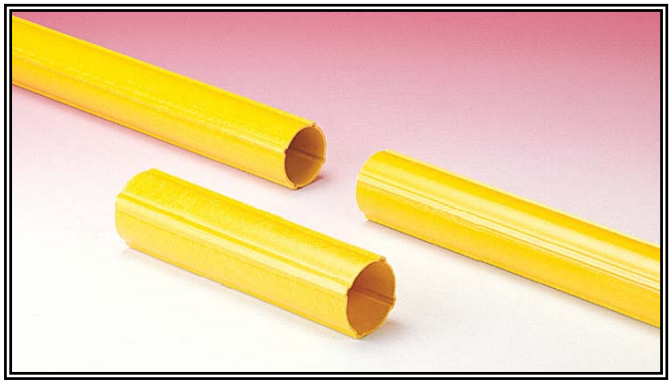
Os deslocamentos horizontais ao longo da barragem podem desenvolver:

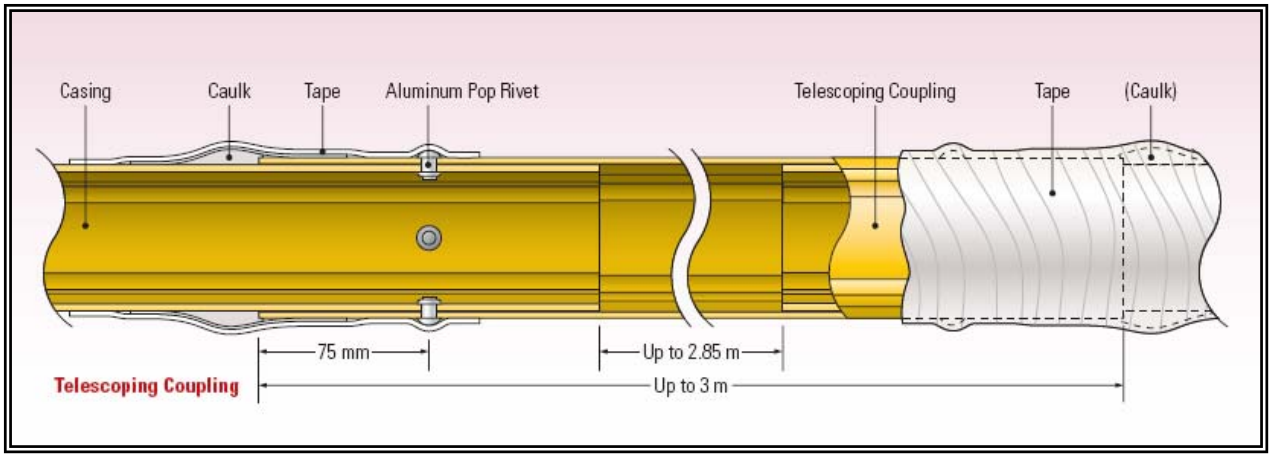
- Fissuras transversais no aterro;
- Ocorrência de erosão interna;
- Erosão interna induz a superfícies potenciais de ruptura.

Em especial, inclinômetros vêm sendo utilizados extensivamente para medição e registro dos dados referentes ao deslocamento horizontal de um determinado ponto no interior de um maciço, avaliando a estabilidade de taludes em barragens, obras rodoviárias, escavações a céu aberto, mineração, etc.

Os inclinômetros podem medir deformações e deslocamentos horizontais de massas de solo bem como para detectar regiões com concentração de deformações, isto é, superfícies potenciais de ruptura, estando particularmente capacitados para tal, pois são feitas medidas no interior da massa de solo. Para esta finalidade são empregados os inclinômetros *slope indicators*. O inclinômetro é um instrumento que

realiza medidas de inclinação composto normalmente de um conjunto de tubos de material plástico, confeccionado especialmente para esta finalidade, com dois pares de ranhuras internas, diametralmente opostas, montados através de luvas telescópicas em posição a subvertical, ver Figura 64, instalado em um furo de sondagem vertical e deve ser instalado até a profundidade de pelo menos 3 metros abaixo da superfície ou zona de escorregamento.





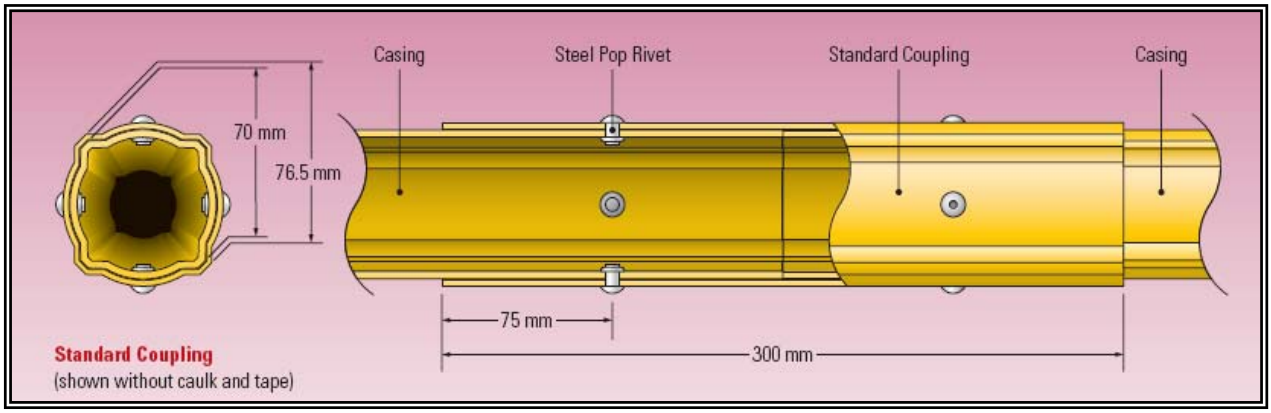


Figura 64 – Tubos de plástico com ranhuras e encaixe por pressão e colagem (SLOPE INDICATOR COMPANY, 2007).

Neste tubo plástico, com quatro guias ranhuradas, instala-se um instrumento de leitura com haste cilíndrica denominada *torpedo*. Este instrumento é resistente à água e dotado de um pêndulo em seu interior que mede com grande precisão a inclinação do instrumento em relação aos deslocamentos e portanto a inclinação do tubo no ponto considerado.

O princípio de funcionamento do sensor é o de um acelerômetro de equilíbrio de forças. A explicação física do acelerômetro, ver Figura 65, está baseada em um pêndulo suspenso e fixo.

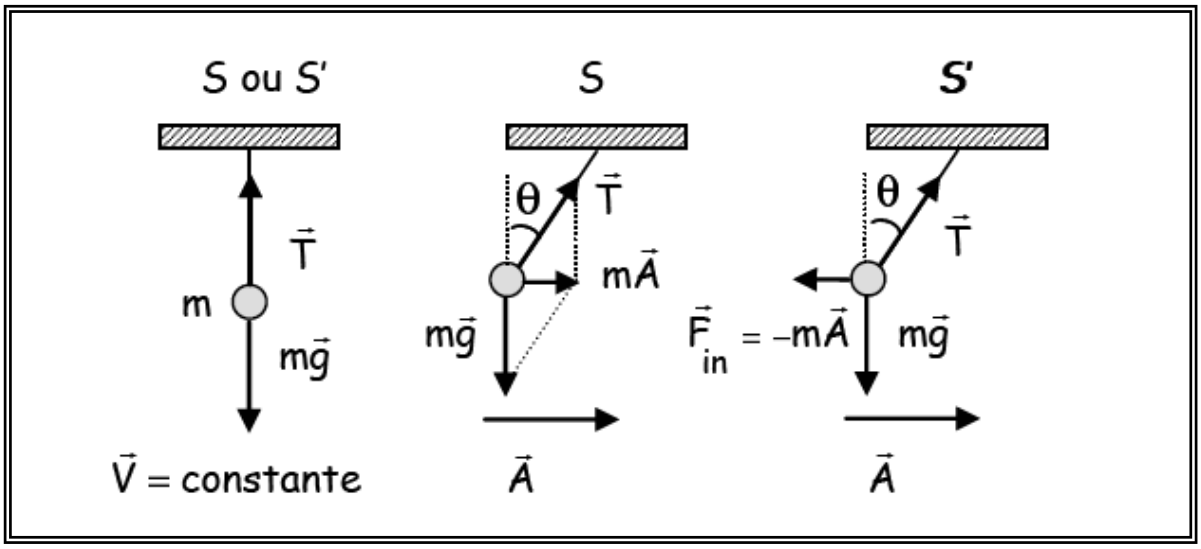


Figura 65 – Princípio de funcionamento do sensor - pêndulo suspenso.

Não tendo movimento o pêndulo permanece em repouso na posição vertical em S e S' e nos dois referencias $\vec{T}+(m\vec{g})=0$. Se houver uma aceleração $\vec{A}$ o fio passa a formar um ângulo "**θ**" com a vertical. Em S temos $\vec{T}+(m\vec{g})=m\vec{A}$. Em S' o pêndulo está em equilíbrio sob ação da força peso, da tensão do fio e da força inercial, ou seja: $\vec{T}+(m\vec{g})-(m\vec{A})=0$ ou em termos de componentes $\vec{T}.\cos\theta=m\vec{g}$ e $\vec{T}.sen\theta=m\vec{A}$ => $\vec{A}=\vec{g}.tg\theta$. A diferença fundamental entre forças de inércia e forças verdadeiras é que as forças de inércia não resultam da interação entre sistemas físicos e, portanto, não obedecem ao princípio da ação e reação.

O acelerômetro, segundo relata Craig 2007, consiste em uma massa suspensa entre dois eletromagnetos, uma bobina detectora e uma bobina restauradora. Um movimento lateral da massa causa uma corrente na bobina detectora. A corrente é

conduzida por meio de um servoamplificador à bobina restauradora que transmite à massa uma força eletromotriz igual e oposta ao componente da força gravitacional que causou movimento inicial. Dessa forma, as forças são equilibradas, e na realidade, a massa não se move.

A voltagem através do resistor no circuito de restauração é proporcional à força restauradora e, por conseguinte, ao ângulo de inclinação de inclinação da sonda. Essa voltagem é medida e o voltímetro pode ser calibrado para fornecer tanto o deslocamento angular como horizontal. A posição vertical da sonda é obtida a partir das marcações graduadas no cabo preso ao dispositivo. O uso de outro par de ranhuras permite que sejam determinados os movimentos na direção ortogonal. A Figura 66, apresenta esquematicamente o acelerômetro de equilíbrio de forças.

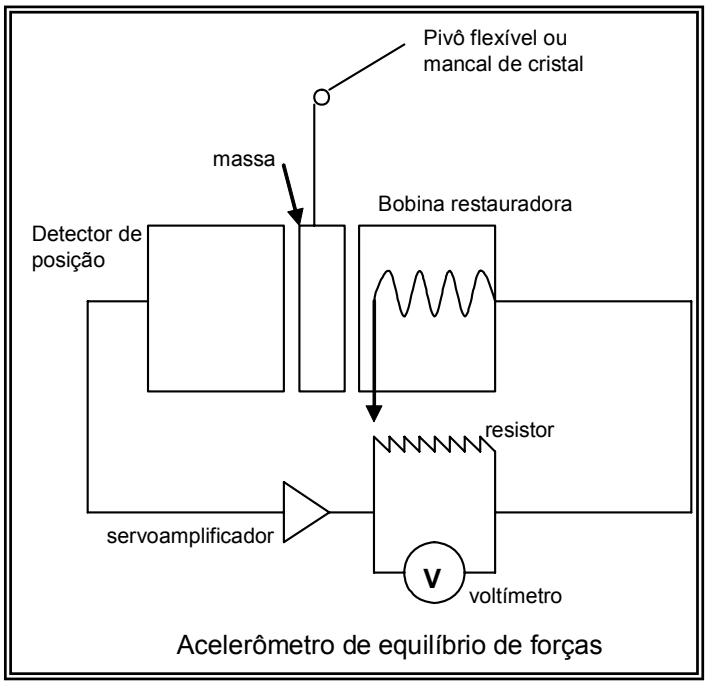


Figura 66 – Esquema de um acelerômetro (CRAIG, 2007).

O inclinômetro, ver Figura 67, é composto de haste cilíndrica (torpedo), cabo do torpedo, unidade de leitura e tubo flexível. O torpedo possui no seu interior um sensor e duas ou quatro rodas distribuídas nas laterais.

As rodas do torpedo se encaixam nas ranhuras que servem de guia para o instrumento efetuar as leituras de inclinação.

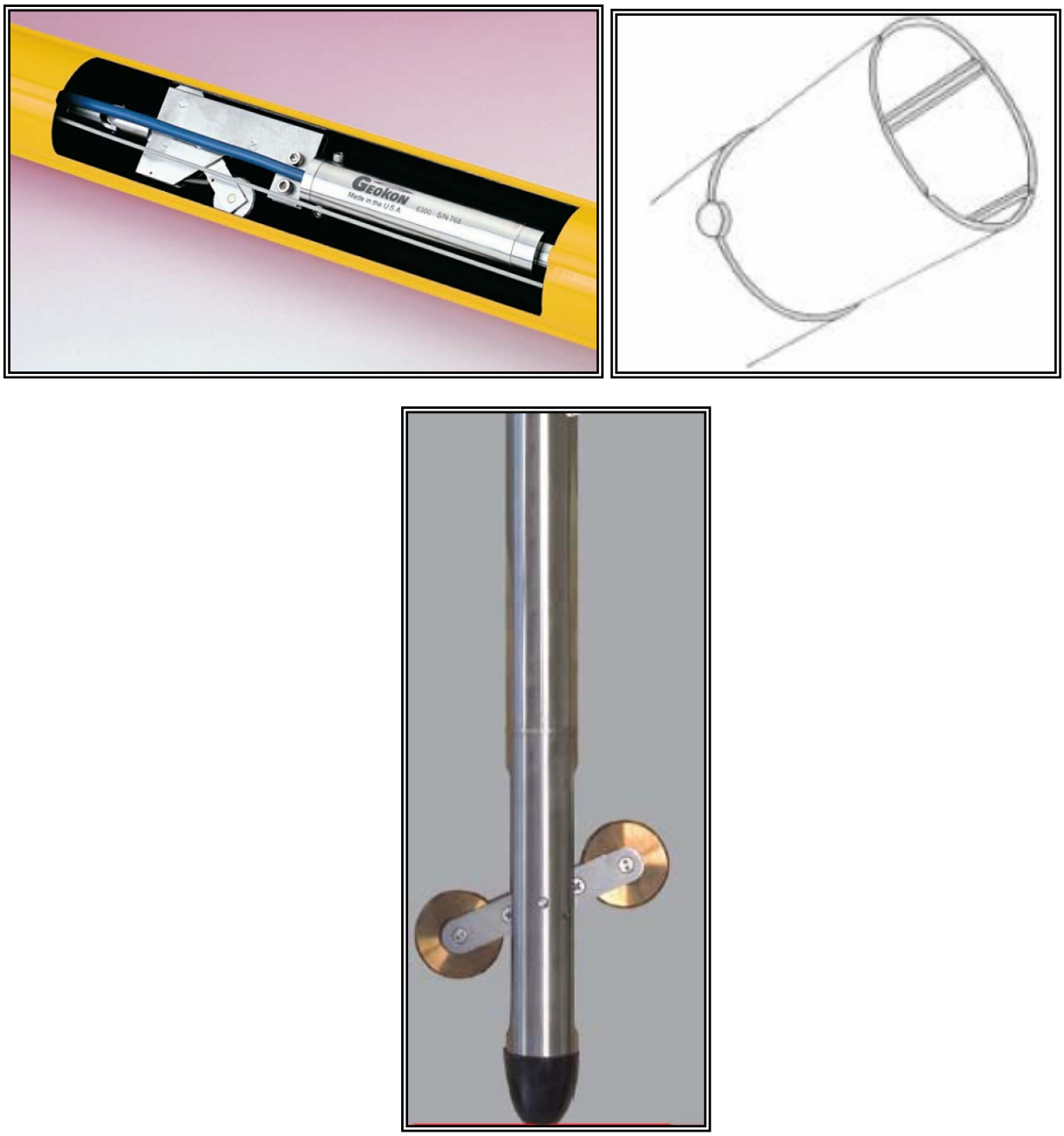


Figura 67 – Detalhes das polias, sensor (torpedo), guia das polias (GEOKON INCORPORATED, 2007).

A inclinação do tubo é medida em intervalos constantes para obtenção dos deslocamentos horizontais. A instalação do tubo de inclinômetro pode ser feita em furo de sondagem, o qual deve se prolongar até camadas de alta rigidez ou até alcançar profundidades não afetadas pela construção do aterro da barragem. Os inclinômetros são instrumentos que instalados em furos de sondagem verticais, detectam as variações de inclinação destes furos em relação à vertical.

Quando instalados em furo de sondagem, o espaço entre o furo e os tubos deve ser preenchido com mistura de solo, cimento e bentonita, e não com areia, pois esta última alternativa causa maior dispersão de resultados. Sua extremidade inferior deve ser vedada com um *cap*.

A técnica de injeção é muito recomendada nas proximidades das juntas dos tubos, pois qualquer deslocamento cisalhante, ao longo das mesmas, poderá provocar uma deformação excessiva do tubo guia, impedindo desta forma a passagem do torpedo.

A mudança da curvatura do tubo é acompanhada ao longo do tempo e, se existe uma superfície de escorregamento, ela fica claramente identificada. Suas leituras podem ser convertidas, por integração, em registro dos deslocamentos perpendiculares ao eixo da sondagem. Estes dados são lançados nos gráficos, capaz de quantificar a inclinação de cada trecho em relação ao eixo do furo/tubo guia.

O instrumento permite acompanhar movimentos lentos ao longo dos anos. A repetição de tal procedimento permite a computação de deslocamentos transversais dos diversos pontos do inclinômetro.

A sensibilidade das leituras (resolução) dos inclinômetros, dependendo do fabricante, é em regra de 1/1.000 ou 1/10.000, o que representa detectar um deslocamento transversal de 10 mm ou 1 mm respectivamente em 10 metros de sondagem (0,005 a 500 mm – RST INSTRUMENTS LTD, 2007). O campo de medida (leitura) varia geralmente ± 35º da horizontal.

A realização de leituras, Figura 68, do inclinômetro, exige uma equipe de técnicos qualificados e experientes, devido à delicadeza dos instrumentos e a complexidade da operação.

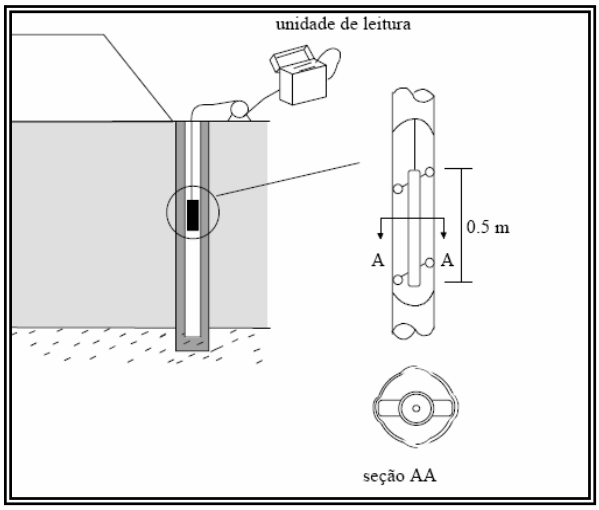


Figura 68 – Sonda e cabo de medição instalado dentro do tubo do inclinômetro (GEODATA ANDINA SA, 2007).

Os dados devem ser tratados manualmente ou de preferência com auxilio de programas de computadores.

O processo resume-se na medição do deslocamento horizontal de um determinado ponto em relação a uma leitura inicial (L), quando da sua instalação. Medido a inclinação "**θ**" a uma dada profundidade, o deslocamento horizontal (d_1 a d_n) em relação à vertical é dado pela fórmula da Figura 69.

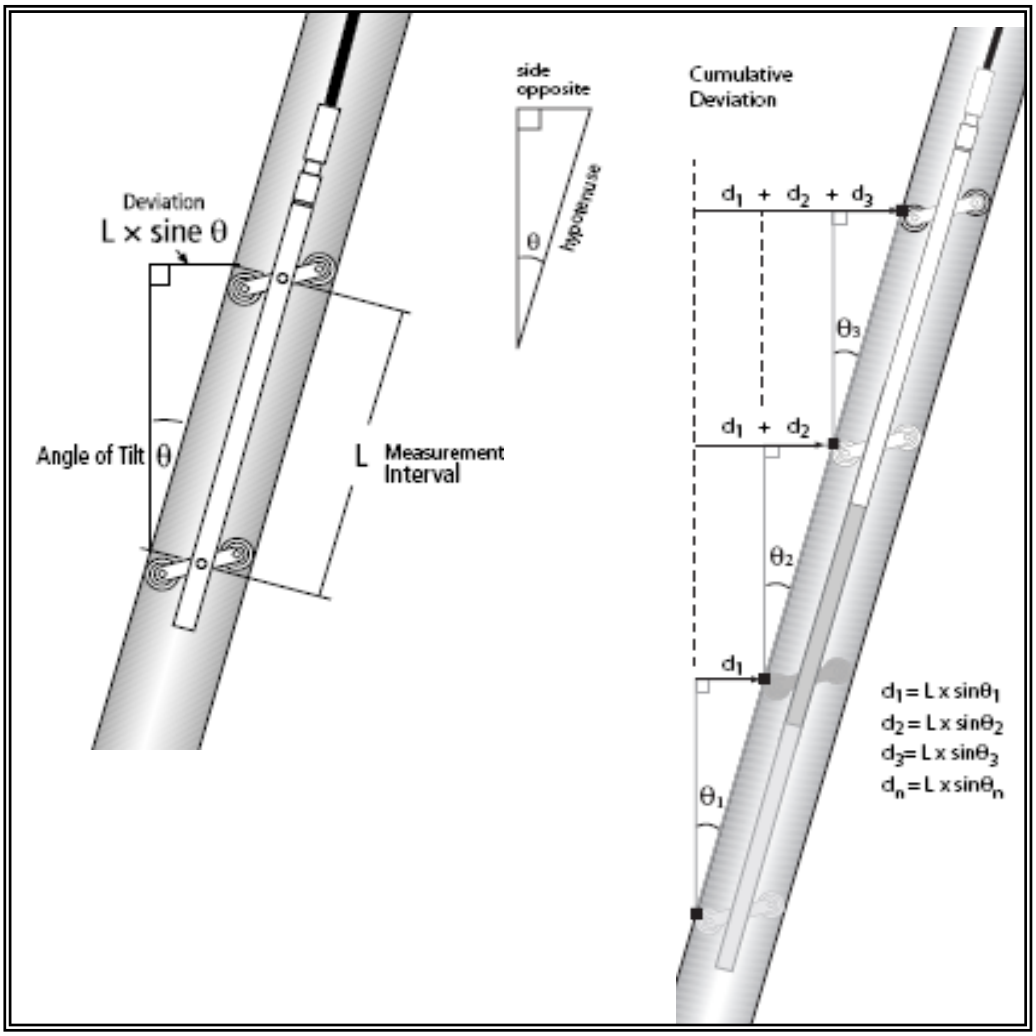


Figura 69 – Princípio para determinação do deslocamento horizontal com o inclinômetro removível (DUNNICLIFF, 1988, adaptado).

Para tanto há necessidade da introdução de um torpedo dotado, de servo-acelerômetro ligado a um cabo elétrico, graduado de metro em metro, numa perfuração vertical previamente realizada no terreno. Durante sua operação o torpedo é abaixado até a base da tubulação e erguido lentamente, realizando leituras do deslocamento angular a cada meio metro ou sessenta centímetros. A inclinação do torpedo e conseqüentemente do tubo guia, é convertido em desvio horizontal de deslocamento, comparado com a primeira leitura realizada, imediatamente após a instalação. Pode-se determinar qual a variação dos deslocamentos horizontais no período, os quais, acumulados desde a base até o topo, permitem a determinação das deformações elásticas da estrutura.

Para verificação da conformidade, é adotado o seguinte procedimento:

- Após o término da instalação, introduz-se um torpedo teste no interior do tubo de alumínio ou plástico até o fundo, para certificar-se que o mesmo não esteja obstruído. Será considerado conforme quando esta operação não apresentar indicação de obstrução.

- Caso se apresente alguma dificuldade, o tubo deverá ser lavado com água por circulação e submetido a um novo teste. Persistindo o problema, o instrumento será considerado não conforme e deverá ser substituído por outro com as mesmas características, instalado em um furo em local próximo ou determinado pelo cliente.

- Em seguida efetua-se uma leitura inicial (L) para servir de parâmetro de comparação com as seguintes, tendo-se o cuidado de, nesta etapa, adotar-se para L a média de pelo menos três determinações.

As medições são registradas numa planilha de campo apropriada e posteriormente apresentadas na forma de gráficos e/ou tabelas, ver Figura 70.

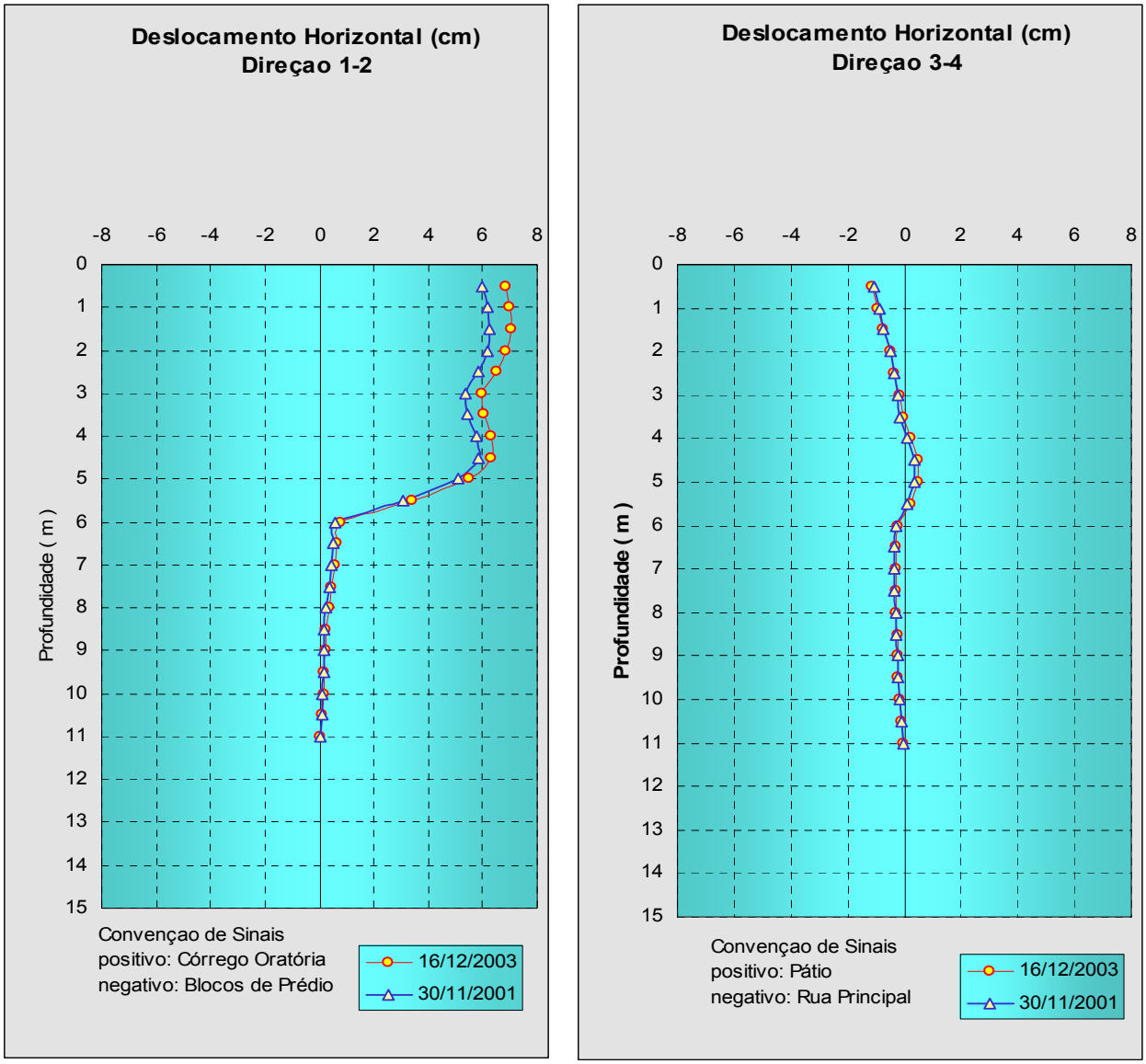


Figura 70 – Gráfico indicando duas seqüências de leituras durante dois anos de operação de um inclinômetro em duas direções.

Concluída a etapa de instalação, o técnico de instrumentação elabora um esquema da instalação indicando as medidas principais. Com base no esquema de instalação é emitido o boletim de instalação do instrumento.

Este documento indica todas as características da instalação devendo ser enviado à operação.

Na periodicidade especificada pelo programa de instrumentação, o técnico de instrumentação, efetua a leitura, (unidade de leitura, Figura 71), procedendo da mesma maneira como foi feita para a realização da leitura inicial. Os dados são registrados, para serem processados em “software” específico, gerando tabelas e gráficos para serem analisados.

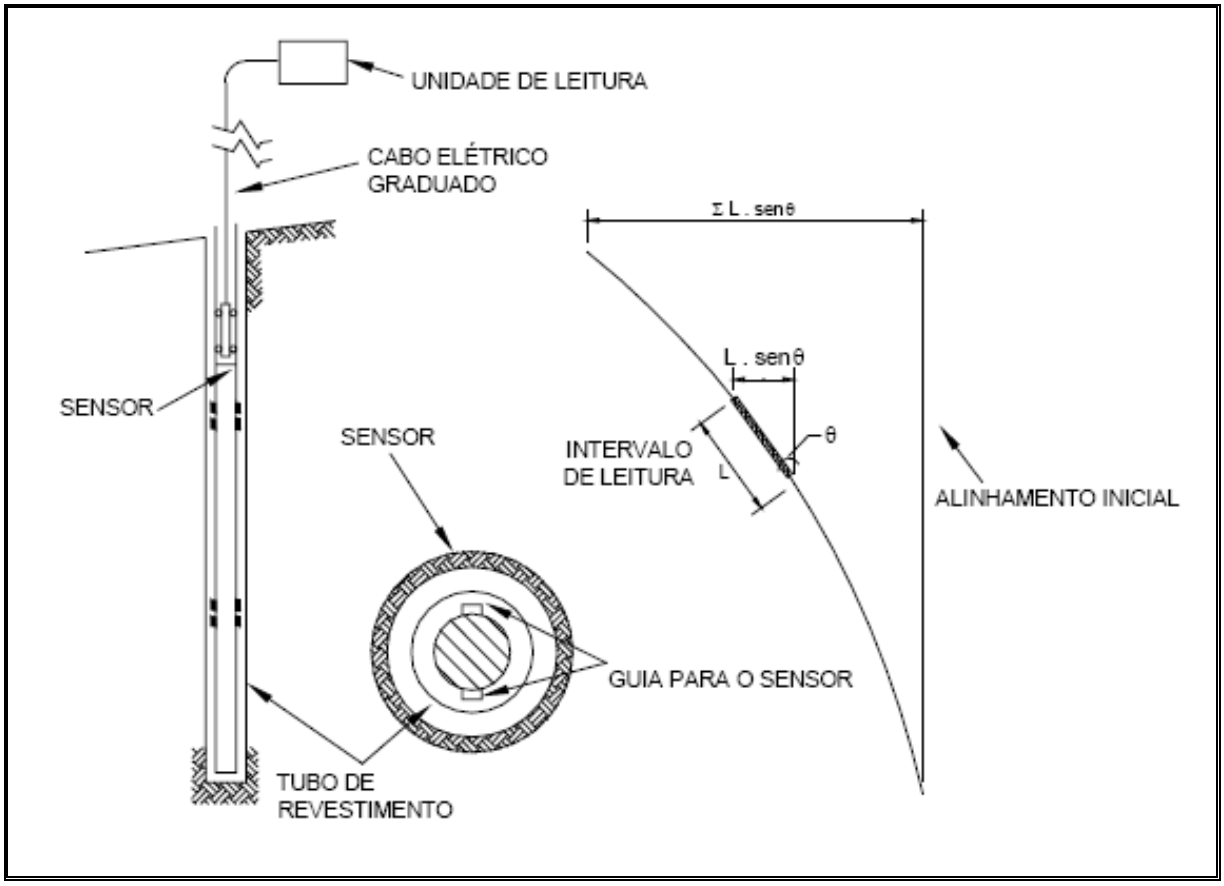


Figura 71 – Princípio de operação do inclinômetro (DUNNICLIFF, 1988)

Os registros de campo serão conferidos e aprovados para serem processados. Caso durante a conferência uma ou mais leituras sejam consideradas duvidosas ou discrepantes, por não existirem causas aparentes que justifiquem as variações bruscas ou acentuadas, as leituras serão refeitas.

Os inclinômetros apresentam como principais características:

- Possibilidade da determinação dos componentes dos deslocamentos horizontais em duas direções ortogonais, ao longo do instrumento;
- Leitura e cálculo (manual) relativamente demorados;

- Interferência na área de trabalho da barragem;
- Possibilidade de instalação em furos verticais ou inclinados.

A comunicação sem fio entre o cabo de controle do torpedo e o dispositivo de leitura garante facilidade de utilização e confiabilidade, eliminando dois pontos fracos dos sistemas convencionais analógicos. O sistema inclui, além do sensor digital, cabo para controle do torpedo, carretel com alimentação a bateria e um computador de bolso com operação em ambiente Windows, que funciona como dispositivo de leitura, análise e armazenamento de dados, ver Figura 72.

Figura 72 – Inclinômetro com comunicação sem fio e tecnologia digital (RST INSTRUMENTS LTD, 2007).

7 CUSTOS ENVOLVIDOS EM UM PROJETO DE INSTRUMENTAÇÃO

Os custos de um programa de auscultação e instrumentação devem ser avaliados em detalhe, pois se sabe que em obras de engenharia custos elevados podem ser fatores restritivos à utilização de tecnologia mais avançada. O custo de um instrumento é extremamente pequeno se comparado ao custo de sua instalação.

Observa-se que *caro* é o instrumento de instalação barata que não opera corretamente e suas respostas não são confiáveis em muitos casos (PENMAN, SAXENA; SHARMA, 1999).

O projeto de instrumentação deve ser concebido com justificativas claras e objetivas da sua necessidade de utilização.

Pesquisando dados na literatura, o custo que envolve um programa de instrumentação em barragens situa-se em índices que variam de 0,5 a 1,0% do custo global do empreendimento. No passado o custo variava entre 20 a 30% devido ao custo de importação dos equipamentos (SILVEIRA, 1976).

Evidentemente estes valores sofrem variações e podem ser aceitos perfeitamente, devido às condições peculiares e problemas enfrentados em cada projeto.

É importante ressaltar que a observação do comportamento de uma obra instrumentada pode levar a uma redução de custos operacionais e ao aumento da segurança e da confiabilidade. O custo de um programa de observação atinge no máximo 3% do custo total da construção, sendo, portanto, insignificante em relação ao custo total da obra.

O Simpósio sobre Instrumentação de Barragens (1996), considera custos da ordem de 1 a 3% nos programas de instrumentação contabilizando neste cálculo custos relativos com o projeto, aquisição dos instrumentos, instalação, operação, processamento e análise dos dados obtidos.

O custo de um projeto de instrumentação inicia-se pelo plano de instrumentação em sua concepção básica analisando as necessidades da barragem, tipos de instrumento, quantidades necessárias, definição dos pontos a monitorar, tipo de medida a ser obtida como também a freqüência das leituras.

Nesta etapa participam equipes multidisciplinares envolvendo engenheiros mecânicos, elétricos, geotécnicos e civis que assessoram tecnicamente o desenvolvimento do projeto.

Os resultados aparecem em forma de relatórios técnicos, listas de instrumentos, especificações técnicas de instalação e operação, detalhamento de desenhos e elaboração de manual de operação dos instrumentos para as diversas fases construtivas e operacionais da barragem.

Segundo o Simpósio sobre Instrumentação de Barragens (1996), este custo costuma representar de 5 a 20% do custo total da instrumentação da barragem.

O custo dos instrumentos está dividido entre aquisições nacionais e em alguns casos equipamentos importados. No caso de barragens de terra a instrumentação pode ser adquirida quase totalmente no mercado nacional exceto inclinômetros e eletroníveis.

O custo de aquisição dos instrumentos representa geralmente entre 10 a 30% do custo da instrumentação de uma barragem.

O custo da instalação dos instrumentos possui na sua composição orçamentária os técnicos envolvidos na instalação, aquisição de peças e acessórios necessários à instalação e sondagem para instalação dos instrumentos.

O custo de sondagem pode representar um item relevante na planilha de custos e, em alguns casos, pode ocorrer da sondagem representar custo superior ao valor de aquisição do instrumento. O custo da instalação representa geralmente 20 a 40% do custo da instrumentação.

Os custos analisados até o momento representam custo fixos e bem determinados. Mas os custos envolvendo operação e análise de dados são custos variáveis ao longo do tempo de operação considerado. Este custo é lançado na contabilidade do empreendimento desde a instalação do instrumento, passando pelo início da operação e prolongando-se até a finalização do empreendimento.

Devido a este extenso tempo de análise, este custo deve ser mensurado em valores anuais ou custo total durante a vida útil do empreendimento.

Este custo varia de acordo com o tipo e porte da barragem, necessidades operacionais, quantidade de mão de obra técnica, quantidade de instrumentos

operando, custo de manutenção e reposição de instrumentos inoperantes e danificados, sendo este último valor, variável em cada empreendimento.

O custo de instalação está associado ao número de instrumentos projetados. No caso de instrumentos que utilizam furos de sondagens este custo é relativamente superior devido ao custo de execução destas sondagens que é representativo em relação ao custo total da instrumentação.

Adicionado ao custo de sondagem acrescentam-se os custos de instalação e montagem dos instrumentos, injeções de materiais ao longo do furo e homens/hora gastos nesta atividade.

Demais custos, operação, manutenção e novas aquisições, são diluídos no custo operacional do empreendimento. Os custos relativos a cada uma das fases são apresentados resumidamente na Tabela 18.

Tabela 18 – Custo relativo de cada fase da auscultação

FASE	CUSTO (%)
Aquisição do instrumento	10
Instalação	20
Aquisição de dados	20
Análise	50
TOTAL	**100**

Observa-se que o custo relativo das fases de aquisição de dados (leitura) e análise representa 70% do custo da instrumentação. É importante ressaltar, porém, que a experiência demonstra que muitos programas de observação de obras resultam em insucesso, mais por insuficiência de alocação de recursos em aquisição de dados e análise do que por falha na qualidade de instrumentos ou em sua instalação.

8 CONCLUSÕES

O trabalho apresentado buscou mostrar uma revisão detalhada das principais técnicas de instrumentação em barragens de rejeito.

Mostrou que a instrumentação busca a uniformização e simplificação do acesso aos dados de diferentes instrumentos.

Foram descritas as principais características, vantagens e limitações dos instrumentos usuais, com vistas a auxiliar o processo de seleção dos instrumentos e o projeto de instrumentação de barragens.

Alguns instrumentos, por sua simplicidade, podem ser fabricados na própria barragem, estando incluídos nessa classificação o piezômetro Casagrande, o medidor de nível d'água e o marco superficial.

A instrumentação em barragens de rejeitos é uma tarefa simples pela facilidade de uso pelas equipes de campo, agilização de processo, aumento de qualidade de informações, minimização de erros, redução de custos pela redução de erros e agilidade no tratamento de informações.

Também ficou claro que exige capacitação técnica para elaboração de um plano de instrumentação, seleção de instrumentos, inspeção e avaliação quanto à funcionalidade e confiabilidade dos instrumentos, assim como análise dos dados disponíveis da instrumentação.

Atualmente o número de barragens e suas alturas estão aumentando consideravelmente.

E estas barragens necessitam, para manter a segurança, de manual de operação e segurança e dos procedimentos de emergência.

Isto permite garantir adequada segurança à construção de uma estrutura simples e econômica que é uma barragem de rejeitos.

A segurança das barragens é um tema prioritário e de extrema importância para a mineração. O setor precisa se conscientizar da importância da prevenção de acidentes para a sustentabilidade do próprio negócio. As grandes mineradoras usam todas as normas de seguranças, mas naquelas de pequeno e médio porte a prevenção ainda necessita ser intensificada.

É importante ressaltar que a auscultação de uma barragem reduz consideravelmente os custos de operação e manutenção e aumenta a segurança e confiabilidade.

O custo de um programa de monitoramento por instrumentos significa no máximo 3% do custo total de construção do empreendimento e a cerca de 10% dos custos de recuperação de uma barragem.

Desta forma pode-se proporcionar economia durante sua construção e na continuidade durante a fase de operação.

Diante disto, concluímos que a exigência por qualidade e precisão nos métodos de instrumentação e auscultação devem ser aprimorados na área da mineração, para que se alcance os níveis de acurácia, precisão e confiabilidade para as medições de campo.

No área ambiental, torna-se necessário um planejamento efetivo, desde a implantação do projeto da mina, de modo que quando da sua reintegração ambiental os impactos sociais e ambientais sejam minimizados, possibilitando sempre enquadrar a atividade mineral no conceito do desenvolvimento sustentável.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE FILHO, L.H. **Avaliação do comportamento geotécnico de barragem de rejeitos de minério de ferro através de ensaios de Piezocone**. 2004. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2004.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C136-06 Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. Disponível em: <http://www.astm.org> . Acesso em: junho/2007.

Anuário Mineral Brasileiro. DNPM, 2005. Apêndices. Disponível em: http://www.dnpm.gov.br/assets/galeriaDocumento/AMB2005/5_AMB%202005%20 Apendices.pdf. Acesso em: maio/2007.

Anuário Mineral Brasileiro. Brasília: DNPM, 2006. Parte I – Estatística Brasil. Disponível em: http://www.dnpm.gov.br/assets/galeriaDocumento/AMB2006/I_2006.pdf. Acesso em: maio/2007.

ARAÚJO, C.B. **Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro.** 2006. 143 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-6502:** rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995.

BATES, J. **Barragens de rejeitos.** São Paulo: Signus editora, 2002.

BJELKEVIK, A. **Stability of tailings dams – focus on water cover closure**. Suécia, Lulea University of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering, Division of Geotechnology, 2005. Disponível em: http://epubl.ltu.se/1402-1757/2005/85/LTU-LIC-0585-SE.pdf. Acesso em: dezembro/2006.

BORGES, A.L.; PAIVA, P.R.; GAIOTO, N.; SILVEIRA, J.F.A. **O comportamento da barragem do Morro do Ouro nas várias etapas de alteamento**. In: SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS, 2., 1996, Belo Horizonte.

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional da Habitação. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Artigo 1º da Resolução CONAMA nº. 001, de 23 de janeiro de 1986. Dispõe sobre critérios básicos e diretrizes gerais para o Relatório de Impacto Ambiental. **Diário Oficial da União,** Brasília, 17 fev. 1986.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. Secretaria de Infra-Estrutura Hídrica. **Manual de segurança e inspeção de barragens**. Brasília, 2002.

BRASIL. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. **Projeto de aterros sobre solos moles para obras viárias.** (Procedimento DNER-PRO-381/98). Disponível em: http://www.dnit.gov.br/menu/servicos/ipr/produtos/arquivos/DNER-PRO381-98.pdf Acesso em: janeiro 2007.

CARVALHO, L. H. **Curso de barragens de terra: com vista ao nordeste Brasileiro**. Fortaleza, CE: DNCOS, 1984.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. Ciência, Tecnologia e Inovação. **Mineração e meio ambiente no Brasil**. Brasília: 2002

CHAMMAS, R. **Contribuição ao estudo dos rejeitos da mineração e dos seus sistemas de contenção.** In: SIMPÓSIO SOBRE BARRAGENS DE CONTENÇÃO REJEITOS, 1986, Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 1986.

CHAVES, A.P. **Teoria e prática do tratamento de minérios.** São Paulo: Signus, 1996. v. 1.

CHAVES, A.P.; PERES, A.E.C. **Teoria e prática do tratamento de minérios:** britagem, peneiramento e moagem. 3. ed. São Paulo: Signus, 2006. v.3.

CHAVES, J.C. **Controle de deformações em barragens**: métodos de monitoramento e viabilidade da utilização do GPS. 1994. 197 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Segurança de sistemas de barragem de rejeitos contendo radionuclídeos:** norma CNEN-NE-1.10. Rio de Janeiro, 1980. Resolução CNEN nº. 07/80 - Instalações nucleares. Disponível em: http://www.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/Nrm110.pdf. Acesso em: janeiro/2007

COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO. **Laboratório CESP de engenharia civil**. Disponível em: http://www.cesp.com.br. Acesso em: abril/2007.

CRAIG, R.F. **Mecânica dos solos**, Rio de Janeiro, LTC, 2007;

CRUZ, P. T. **100 barragens brasileiras:** casos históricos, materiais de construção, projeto. São Paulo: Oficina de Textos, 1996.

DUNNICLIFF, J. **Geotechnical instrumentation for monitoring field performance**. New York: Wiley, 1988.

DUNNICLIFF, J.; DEERE, D.U.; PECK, R. B. **Judgment in geotechnical engineering**. New York: Wiley, 1984.

EUROPEAN COMMISSION. **Reference document on best available Techniques for management on tailings and waste-rock in mining activities.** Espanha, July 2004. European IPPC Bureau. Disponível em: http://www.wise-uranium.org/mdiss.html#EC. Acesso em: novembro/2006.

GEODATA ANDINA S.A. – Apresenta informações sobre a empresa: serviços, produtos, etc. Disponível em: www.geodataandina.cl. Acesso em: abril/2007.

GEOKON INCORPORATED. **Geotechnical instrumentation**. Lebanon, New Hampshire. Disponível em: http://www.geokon.com. Acesso em: fevereiro/2007.

GEO-SLOPE INTERNATIONAL LTD. Calgary. Apresenta informações sobre a empresa: serviços, produtos, etc. Disponível em: www.geo-slope.com. Acesso em: julho/2007.

GOLDIN, A.L., RASSKAZOV, L.N. **Design of earth dams.** Rotterdam; Brookfield: A.A. Balkema, 1992.

INFORME MINERAL: Desenvolvimento & economia mineral. Brasília: DNPM, v. 5, 1º semestre 2007.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – **Boletim de serviço nº. 1.602 (suplemento)**, Rio de Janeiro, 1983.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – DGC – **Nivelamento geodésico – manual de operações**, Rio de Janeiro, 1984.

INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. **Manual on tailings dams and dumps. Paris**, 1982. (Bulletin nº 45).

INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. **Deterioration of dams and reservoirs. Paris**, 1983.

INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. **Tailings dam design drainage**. Paris, 1994. (Bulletin nº 97).

KANJI, M. A. **Algumas reflexões sobre a instrumentação de barragens**. In: SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO GEOTÉCNICA DE CAMPO, 1990, Rio de Janeiro.

KANJI, M.A.; FIGUEIRA, P. C. S., **Quantificação tentativa do uso de instrumentação em barragens**. In: SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO GEOTÉCNICA DE CAMPO, 1990, Rio de Janeiro.

LEICA GEOSYSTEMS AG. Heerbrugg. Apresenta os recursos e produtos da empresa. Disponível em: http://www.leica-geosystems.com/corporate/en/lgs_405.htm. Acesso em: maio/2007.

LINDQUIST, L.N. **Instrumentação geotécnica: tipos, desempenho, confiabilidade, eficiência da qualidade e quantidade**. In: SIMPÓSIO SOBRE A GEOTECNIA DA BACIA DO ALTO PARANÁ, 1983, São Paulo**. Anais.** São Paulo: Abge/Abms, 1983.

MELLO, V.F.B. **Diferenças seriais entre barragens de acumulação de água e de rejeitos.** In: SIMPÓSIO SOBRE BARRAGENS DE REJEITOS E DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS E DE MINERAÇÃO, 1987, Rio de Janeiro. **Barragens de rejeitos e disposição de resíduos industriais e de mineração:** anais. Rio de Janeiro: ABMS/ABGE/CBGB/DTG-CE, 1987.

MILIOLI, G. Abordagem ecossistêmica para a mineração: uma perspectiva comparativa para Brasil e Canadá. 1999. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina.

MINERAÇÃO RIO DO NORTE. **Sistema de disposição de rejeitos.** Porto Trombetas. Disponível em: http://www.mrn.com.br/index_1024.htm. Acesso em: abril/2007.

MINÉRIOS & MINERALIS, Estação Mina do Andrade, Precipitação Anual Média, 2004.

METSO MINERALS, Manual de britagem – moagem – conceitos gerais, disponível em: http://www.metsominerals.com/inetMinerals/Brazil/mm_Brazilcontent.nsf/WebWID/WTB-050629-2256F-C7153/$File/Capitulo_4_Moagem.pdf. Acesso em: abril/2007.

NAMBA, M.; CAMARGO, F.L.; QUEIROZ, P.I.B.; TERRA, L.E.M.; JÚNIOR, A. N. **Projeto e construção de uma barragem de contenção de rejeitos sobre solos** moles em área urbana. In: XII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e

Engenharia de Fundações. São Paulo : Associação Brasileira de Mecânica dos Solos, 2002. v. 1. p. 1103-1112.

NEWSLETTER. Brasília: Instituto Brasileiro de Mineração, v. 2, n. 7, 2007. Disponível em: http://www.ibram.org.br. Acesso em: março/2007.

PENMAN, A.D.M.; SAXENA, K.R.; SHARMA, V.M. **Instrumentation, monitoring and surveillance:** embankment dams. Rotterdam: A.A. Balkema, 1999.

PENMAN, A.D.M. The design and use of instrumentation. In: CONFERENCE ON CLAY BARRIERS FOR EMBANKMENT DAMS**,** 1989, London. **Proceedings.** London: Thomas Telford, 1990. p. 131-148.

PEREIRA, L. E. **Estudo do potencial de liquefação de rejeitos de minério de ferro sob carregamento estático.** Ouro Preto: Escola de Minas. Universidade Federal de Ouro Preto, 2006.

PETRÓLEO BRASILEIRO S.A. **Norma N-47: levantamento topográfico.** Revisão F. Rio de Janeiro, maio 2005.

RIBEIRO, J. T. M. **Monitoramento da vibração causada por detonações em mina subterrânea de carvão**. 2003. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, São Paulo, 2003.

RST INSTRUMENTS LTD. Coquitlam. Apresenta informações sobre a empresa: serviços, produtos, etc. Disponível em: www.rstinstruments.com. Acesso em: janeiro/ 2007.

SARÉ, A.R. **Análise das condições de fluxo na barragem de Curuá-Una, Pará.** 2003. Dissertação (Mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

SCHUELER, A.S. **Estudo de caso e proposta para classificação de áreas degradadas por disposição de resíduos.** 2005. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

SILVEIRA, J.F.A. **Instrumentação de auscultação de maciços rochosos em minas a céu aberto.** 1976. 125 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1976.

SILVEIRA, J.F.A. **Instrumentação e segurança de barragens de terra e enrocamento.** São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE CAMPO EM ENGENHARIA DE SOLOS E FUNDAÇÕES, 1975, Rio de Janeiro. **Anais.** Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 1975. 2 v.

SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO GEOTÉCNICA DE CAMPO, Rio de Janeiro. **Instrumentação geotécnica de campo:** anais. Rio de Janeiro: PUC, 1990.

SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS, 2, **Anais: Auscultação e instrumentação de barragens no Brasil**, Belo Horizonte: CBDB, 1996, v.1, 123 p

SLOPE INDICATOR COMPANY. Mukilteo. Apresenta informações sobre a empresa: serviços, produtos, etc. Disponível em: www.slopeindicator.com. Acesso em: maio/ 2007.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS. Faculdade de Engenharia Mecânica. Instrumentação e Medidas: Grandezas Mecânicas, Disponível em: www.fem.unicamp.br/~instmed/Instrumentacao_Medidas_Grandezas_Mecanicas. pdf. Acesso em maio/2007.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. Department of the Army**. Appendix E – Process for establishing performance parameters.** 30 June 2004. (Engineer Manual nº. 1100-2-2300). Disponível em:

http://www.usace.army.mil/publications/eng-manuals/em1110-2-2300/a-e.pdf. Acesso em: junho/2006.

U.S. COMMITTEE ON LARGE DAMS. **General guidelines and current U.S. practice in automated performance monitoring of dams.** Washington, May 1993.

VARGAS, M. **Introdução à mecânica dos solos.** São Paulo: Ed. McGraw-Hill, 1978.

VICK, S.G. **Planning, design and analysis of tailing dams.** Vancouver: BiTech Publishers, 1990.

VIEIRA NETTO, A. Danificação da instrumentação de barragens de terra e enrocamento, In: SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE CAMPO EM ENGENHARIA DE SOLOS E FUNDAÇÕES, 1975, Rio de Janeiro. Anais. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 1975. v. 1, p. 101 - 118.

WHA, C.K. **Aplicabilidade dos eletroníveis na instrumentação geotécnica.** 1999. [72 p.] Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.

WILSON, D. (Ed.). **Design and construction of tailings dams:** proceedings of a Seminar, 1980, Cosponsored by the Colorado School of Mines and Klohn Leonoff, Inc. Golden, CO: Colorado School of Mines Press, 1981.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **Guidelines for instrumentation and measurements for monitoring dam performance**. Reston: 2000.

AMORIM, N.R. **Barragem para contenção de rejeitos:** avaliação do efeito da deposição dos rejeitos na percolação de água do aterro e da fundação. 1993. 96 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1993.

AMORIM, P.C. **Análise da percolação na barragem de Curuá-Una pelo método dos elementos finitos.** 1976. 86 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1976.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-13028:** mineração: elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água. Rio de Janeiro, 2006.

BOURDEAUX, G.H.R.M. **Projetos de barragens de terra e enrocamento**. [Fortaleza]: DNOCS/Governo do Ceará, 1979. Curso de Projetos e Construção de Pequenas Barragens.

CHAMMAS, R. **Barragens de contenção de rejeitos**. Ouro Preto: Universidade de Ouro Preto, 1989. Notas de Aula do Curso de Especialização em Engenharia de Barragens.

DIVINO, P.L.; FUSARO, T.C. Manual da instrumentação: o elo entre projeto e operação de barragens. In: SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS, 3., São Paulo, 2006. **Anais.** São Paulo: CBGB, 2006.

FELL, R.M.P.; STAPLEDON, D.B.G. **Geotechnical engineering of dams**. Leiden; New York: A.A. Balkema, 2005.

OLIVEIRA, A.M.S.; BRITO, S.N.A. (Ed.). **Geologia de engenharia.** São Paulo: ABGE, 1998.

HANNA, T.H. **Field instrumentation in geotechnical engineering.** Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications, 1985.

INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. **Mine and industrial tailings dams and dumps. Paris**, 1982. (Bulletin nº 44).

INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. **Tailings dams safety guidelines**. Paris, 1989. (Bulletin nº. 74).

INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. **Monitoring of tailing dams: review and recommendations.** Paris, 1996. (Bulletin nº. 104).

LINDQUIST, L.N. **Instrumentação de barragens:** curso de especialização em barragens. Ouro Preto: UFMG, 1989.

LINDQUIST, L.N.; PEREIRA, J. L. **Apresentação e desempenho de instrumentos não convencionais, aplicáveis a barragens**. In: SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS, 2, v. 2, 1996, Belo Horizonte. p. 21.

MACHADO, W.G.F.; PERCI, R.D. **Principais causas geológicas e geotécnicas de acidentes em barragens de contenção de rejeitos.** São Paulo: EPUSP, 2000. Seminário apresentado para disciplina de pós-graduação do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, PMI-5883 - Barragens de Rejeitos: metodologia de implantação, operação e manutenção.

RACHEL, R. M. **Instrumentação em barragens de rejeitos**. 25 p. Trabalho de Formatura (Curso de Graduação) - Departamento de Engenharia de Minas.Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

SARÉ, A.R.; LIGOCKI, L. P.; PINHEIRO, G. F.; REDE DELPA; GERSCOVICH, D. M. S.; SAYÃO, A. S. F. J. **Monitoramento da UHE Curuá-Una: elemento de**

avaliação de segurança. In: CONGRESSO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA EM ENERGIA ELÉTRICA, 2, 2003, Salvador. **CITENEL 2003:** anais. Brasília: ANEEL, 2003. v. 1. p. 480.

SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 23., 1999, Belo Horizonte. **Guia básico de segurança de barragens**. São Paulo: Núcleo Regional de São Paulo/CBGB, 1999.

SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 26., 2005, Goiânia. **Sistemas de monitoramento automático das barragens – recomendações e exemplos.** [Goiânia]: CBDB, 2005. (Boletim 118).

SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 27., 2007, Belém. **Segurança de Barragens, Legislação e Desempenho.** [Belém]: CBDB, 2007. (Tema 101).

SILVEIRA, J.F.A. **Glossário de instrumentação.** São Paulo: ABGE, 1979.

SIMPÓSIO SOBRE BARRAGENS DE REJEITOS E DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS E DE MINERAÇÃO, 1987, Rio de Janeiro. **Anais.** Rio de Janeiro: ABMS/ABGE/CBGB/DTG-CE, 1987.

UNITED STATES SOCIETY ON DAMS. General guidelines for automated performance monitoring of dams. Revised edition. 2002. Consultar em: http://www.ussdams.org/02monitor.html. Acesso em: maio/2006.

U.S. COMMITTEE ON LARGE DAMS. Instrumentation of embankment dams and levees. Washington, 1995. (Engineer Manual nº. 1110-2-1908). Disponível em: http://www.usace.army.mil/publications/eng-manuals/em1110-2-1908/basdoc.pdf. Acesso: junho/2007.