

## 4. INSTRUMENTAÇÃO PARA MEDIDA DE DESLOCAMENTOS

Neste capítulo, são citados inicialmente os principais métodos utilizados para instrumentação de barragens, com breve explicação dos respectivos princípios de funcionamento. Em seguida, são detalhados os principais instrumentos utilizados nas medidas de deslocamentos em barragens de enrocamento.

### 4.1. Conceitos de Instrumentos

Sistemas pneumáticos: são utilizados por piezômetros pneumáticos e células de pressão. O arranjo básico é o mostrado na Figura 17, onde  $P$  é a pressão de interesse a ser registrada. Uma pressão crescente de gás é aplicada ao tubo de entrada e, quando a pressão do gás excede  $P$ , o diafragma se deforma, permitindo que o gás circule para o tubo de saída. Um detector de fluxo de gás é instalado no sistema, comprovando a ocorrência de fluxo. O suprimento de gás é interrompido na válvula de entrada, e qualquer pressão nos tubos maior que o valor de  $P$  é dissipada. Isto faz que o diafragma volte à sua posição original, garantindo a pressão nos tubos igual a  $P$ . Esta pressão é lida em um medidor elétrico.

Sistemas de corda vibrante: são utilizados em sensores de pressão para piezômetros, células de pressão, medidores hidrostáticos de recalque e em medidores de deformação. Os equipamentos de corda vibrante são basicamente compostos de um fio de aço grampeado e tensionado, o qual fica livre para vibrar em sua frequência natural. Tal como uma corda de piano, a frequência de vibração do fio de aço varia. O fio pode então ser usado como sensor de pressão como, mostrado na Figura 18. Uma espiral elétrica é presa magneticamente próxima à metade do fio, sendo esta espiral utilizada para medir o período ou a frequência de vibração. A frequência  $f$  depende da curvatura do diafragma e da pressão  $P$ .

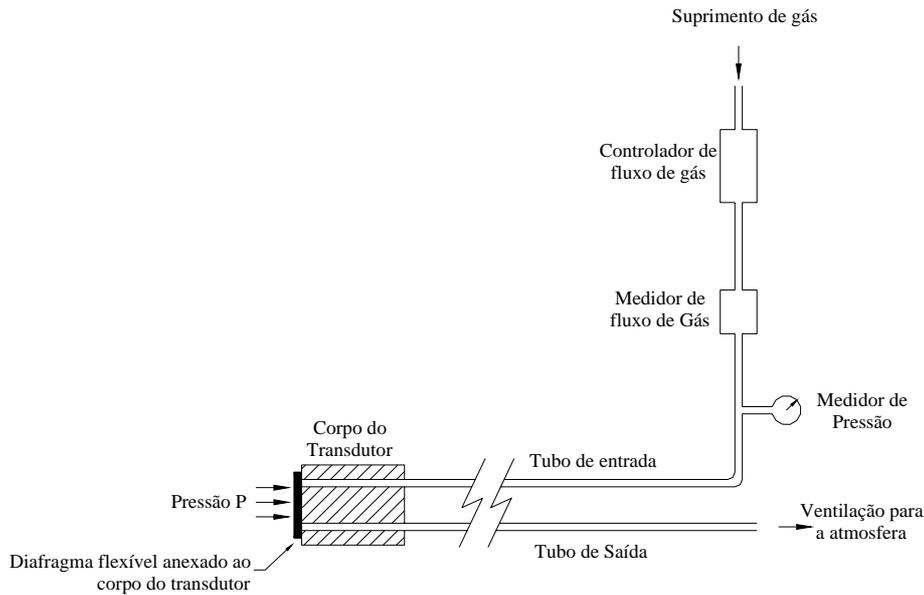


Figura 17 - Transdutor pneumático fechado com dois tubos e leitura de fluxo de gás (Dunnicliff, 1988).

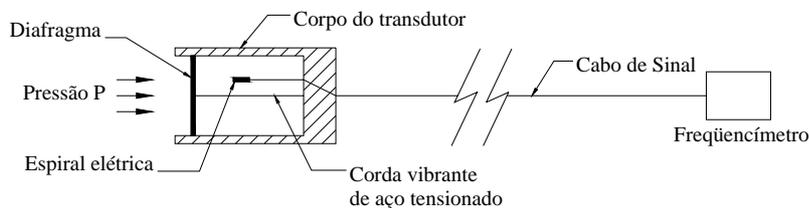


Figura 18 - Esquema do sensor de corda vibrante (Dunnicliff, 1988).

Sistemas de medição de deformações por resistência elétrica: a maior parte dos métodos eletro-eletrônicos de medida consiste de três componentes: um transdutor, um sistema de aquisição de dados e uma sistema de ligação entre estes dois componentes.

Um transdutor eletrônico é um componente que converte alterações físicas em um sinal elétrico de saída. Sistemas de aquisição de dados vão desde simples unidades portáteis até complexos sistemas automatizados.

Um medidor de deformações por resistência elétrica é um condutor com a característica básica de modificar sua resistência em proporção direta com a mudança em seu comprimento. A relação entre variação unitária de resistência  $\Delta R$  e variação unitária de comprimento  $\Delta L$  é dada pelo fator de medição GF onde:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta L}{L} \times GF \quad (2)$$

A resistência medida pode ser fortemente influenciada por fatores como comprimento do cabo, contato, umidade e temperatura. Entretanto, a correção para estes fatores pode ser feita através da medição individual da resistência de vários componentes do sistema (cabo, contato, etc...).

Transdutores elétricos para medição de deslocamento linear: um transformador variável diferencial linear, ou LVDT (*linear variable differential transformer*) consiste em um núcleo magnético móvel passando através de uma bobina primária e de duas bobinas secundárias. Uma tensão alternada é aplicada à primeira bobina, induzindo uma tensão alternada à segunda bobina, com magnitude que depende da proximidade do núcleo magnético de cada bobina secundária. Esta voltagem secundária é conectada em série, e a saída do LVDT é a diferença entre estas duas voltagens. Quando o núcleo está na posição média, a voltagem é zero. Quando o núcleo se afasta do centro, a voltagem de saída cresce linearmente com a magnitude, com polaridade dependendo do sentido do movimento do núcleo. A Figura 19 ilustra o esquema de funcionamento do LVDT.

Desde que o núcleo do LVDT não toque nas bobinas, não há atrito. Não há histerese e os LVDTs são particularmente capazes de medir movimentos dinâmicos e deslocamentos muito pequenos. Muitos tipos de LVDTs têm excelente resistência à umidade e corrosão e boa estabilidade de longo prazo nas leituras. Porém, a transmissão de correntes alternadas através de cabos longos introduz efeitos indesejáveis, que podem degradar seriamente o sinal de saída.

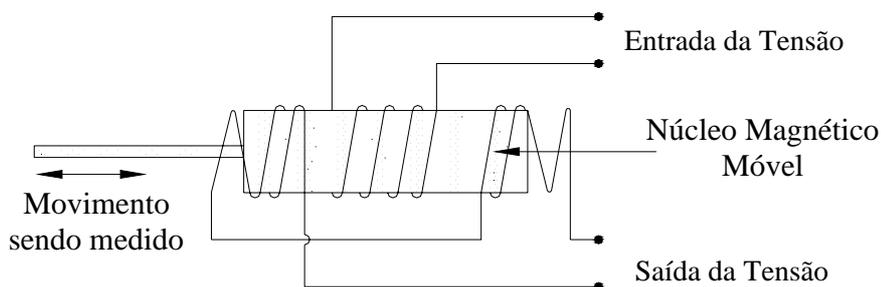


Figura 19 - Esquema de LVDT (Dunnicliff, 1988).

## 4.2. Medidas de Deslocamentos

A seguir serão apresentados os principais medidores de deslocamentos utilizados para a instrumentação de barragens.

### 4.2.1. Medidores internos de deslocamentos verticais

#### 4.2.1.1. Medidor Magnético de Recalque (MMR)

É constituído por um conjunto de placas dotadas de orifício na posição central e de um ímã permanente tipo ferrite. Estas placas são dispostas ao longo de um tubo de PVC vertical, com emendas telescópicas, conforme ilustrado na Figura 20. O sensor utilizado para realizar as leituras desce ao longo do tubo de PVC, suspenso por uma trena metálica milimetrada. Ao atingir a posição do ímã de uma placa, o campo magnético aciona um contato existente dentro do sensor. Esta condição é percebida pelo leitorista através do deslocamento do ponteiro de um galvanômetro, ou de sinal sonoro emitido por um circuito apropriado.

Cada placa com ímã fornece em geral duas posições de leitura, uma logo acima e outra logo abaixo da placa. Pode-se optar pelo uso do ponto superior ou do inferior, ou ainda por ambos, adotando-se neste caso a média das duas leituras. As medições da posição do sensor são sempre referidas à posição do ímã de referência (indeslocável) na base do tubo.

As principais vantagens do MMR são: a facilidade de construção, de instalação e de manutenção (eventuais reparos); baixo custo; durabilidade e não limitação do número de placas. É possível a instalação de medidores magnéticos

no solo de fundação, sendo neste caso normalmente denominados “aranhas magnéticas”. Como limitações podem-se citar a dispersão de leituras, com precisão da ordem de milímetro em função da profundidade da placa. Além disso, o procedimento de leitura é relativamente demorado. A Figura 21 ilustra uma operação de leitura deste instrumento.

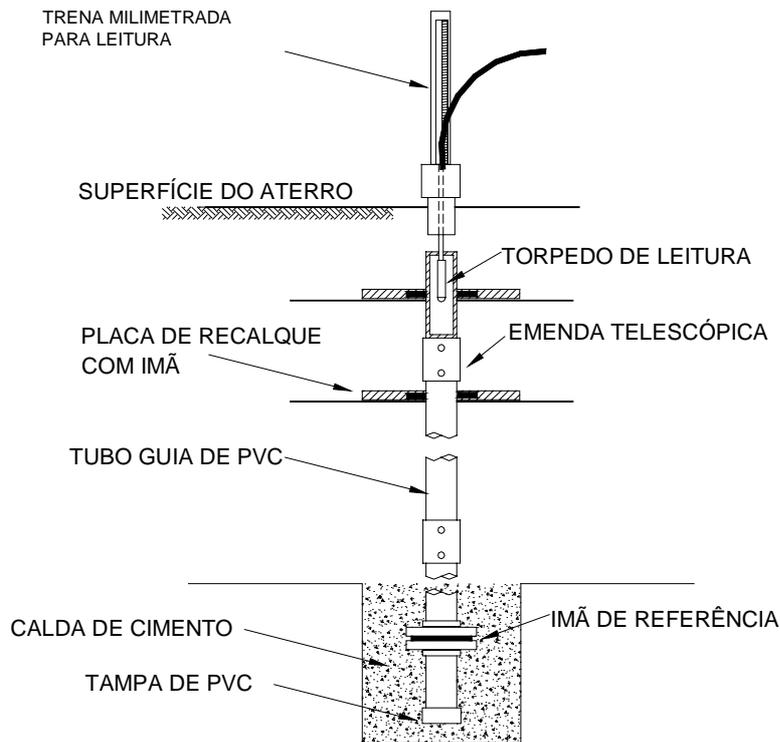


Figura 20 - Medidor Magnético de Recalque (Cruz, 1996).



Figura 21 - Operação de Leitura no Medidor Magnético de Recalque.

## 4.2.1.2. Medidor de recalque tipo KM

É construído e instalado de tal modo que cada placa fica solidária a uma haste de aço trefilado (usualmente de diâmetro igual a 10mm). O medidor é composto por vários segmentos adicionados à medida que o aterro sobe. A referência consiste de um tubo galvanizado de 25mm de diâmetro, fixado na rocha. As hastes correspondentes a cada placa, dispostas em torno do tubo de referência, são mantidas na posição vertical por meio de discos perfurados que funcionam como espaçadores. As placas são mantidas livres do contato com o solo através de um conjunto de segmentos de tubos galvanizados emendados por juntas telescópicas, e que as envolve totalmente, conforme a Figura 22.

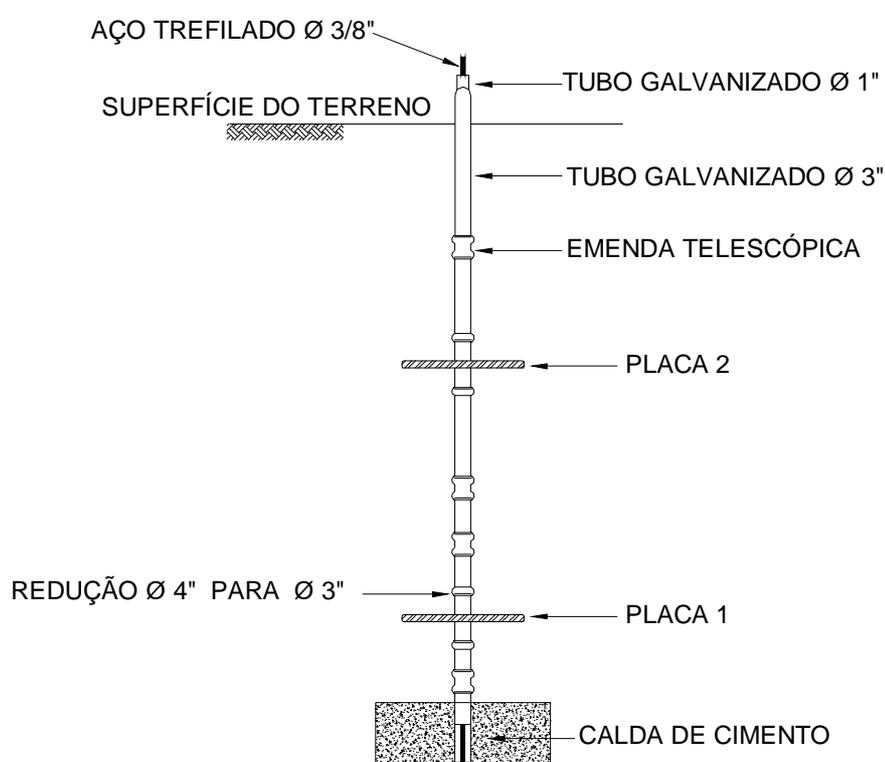


Figura 22 - Medidor de Recalques tipo KM (Cruz, 1996).

As medidas são efetuadas através de um paquímetro adaptado, cujo corpo se encaixa adequadamente no tubo de referência, e cujo bico móvel é apoiado na extremidade superior de cada haste.

Como principais vantagens devem ser mencionadas a reduzida dispersão de leituras (com precisão da ordem de décimos de milímetros), a facilidade de leitura e a possibilidade de número de placas da ordem de uma dezena. A

durabilidade está em grande medida associada à proteção contra oxidação (galvanização), aplicada às hastes e aos espaçadores. A confiabilidade é em geral regular, tendo porém sido constatados alguns casos de deslocamentos repentinos ou mesmo expansões, de difícil interpretação.

Outras limitações são as complexidades de construção, de instalação e de reparos a danos causados por acidentes, além do elevado custo.

#### 4.2.1.3. Medidor de Recalque Telescópico (IPT)

Na década de 1960, este foi o medidor mais utilizado em obras de barragem de terra no país. Consiste de um tubo galvanizado de diâmetro 25mm, chumbado em rocha sã (considerada como incompressível, em termos práticos), e de uma ou mais placas solidárias a tubos também galvanizados. Os tubos são instalados de tal modo que os de maior diâmetro são associados às placas situadas em cotas mais elevadas, conforme indicado na Figura 23.

A leitura é realizada da seguinte maneira: na extremidade superior de cada tubo é feito um punçionamento. A leitura de cada placa, numa determinada data, é obtida ajustando um compasso metálico com pontas secas nas punções do tubo de referência (diâmetro 25mm) e do tubo correspondente à placa em questão, e medindo a distância entre as pontas do referido compasso numa escala milimetrada. O recalque de cada uma das placas é obtido através variação de leitura de cada placa.

Deve-se lembrar que durante a construção do aterro são acrescentados vários conjuntos de tubos concêntricos, à medida que sobe a barragem, procedendo-se em cada conjunto da forma acima indicada.

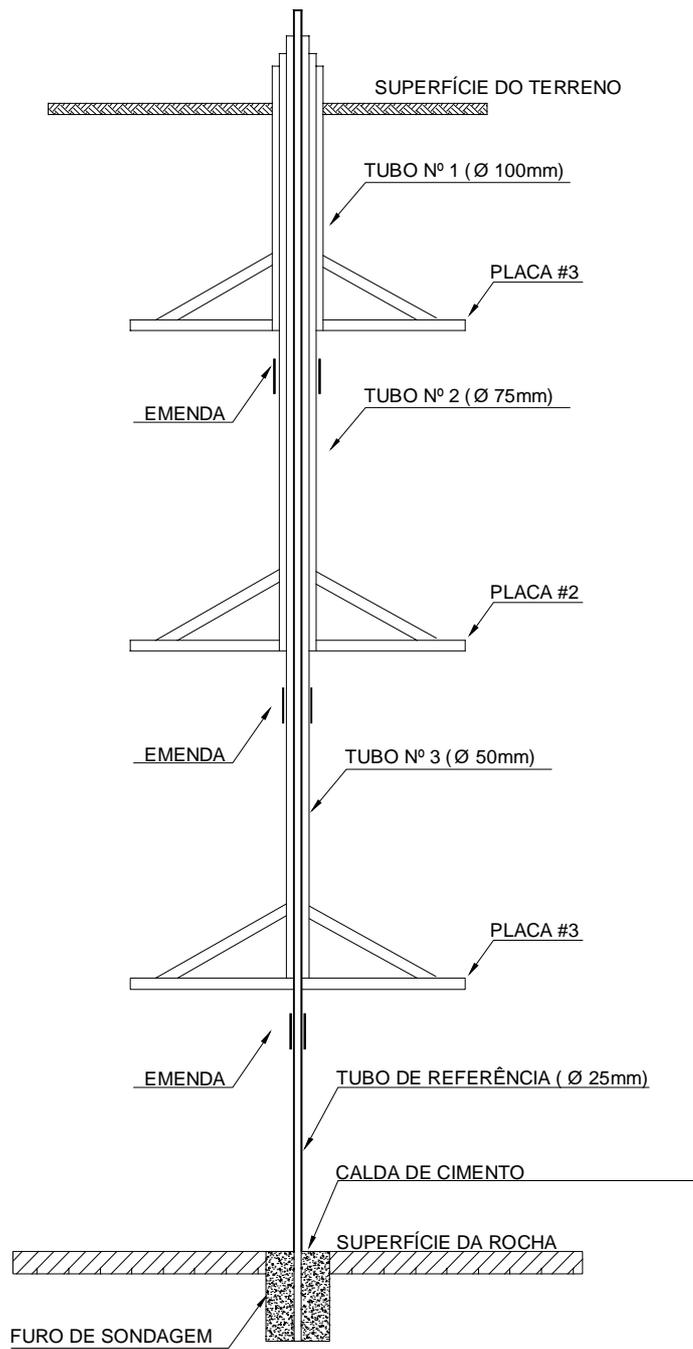


Figura 23 - Medidor de Recalques Telescópico IPT (Cruz, 1996).

Para os recalques das camadas tem-se:

Recalque da camada 0/1 = recalque da placa 1;

Recalque da camada 1/2 = recalque da placa 2 – recalque da placa 1 + recalque da placa 1 quando a placa 2 foi instalada

Recalque da camada  $i-1/i$  = recalque placa  $i$  – recalque placa  $i-1$  + recalque placa  $i-1$  quando a placa  $i$  foi instalada.

O medidor telescópico apresenta como principais vantagens a simplicidade de construção e de leitura, a durabilidade e a confiabilidade (nas condições em que é aplicável). As maiores limitações são quanto ao número máximo de placas (quatro), diferenças de cotas entre placas consecutivas, em função da necessidade de se evitar atrito lateral entre tubos. Deve-se observar que, com a evolução do aterro, aumentam as tensões de compressão nos tubos em contato com o solo. Ainda como limitações, pode-se citar a interferência na praça, o manuseio difícil das placas devido ao peso, a dificuldade de eventuais reparos e a dispersão de leituras (com precisão da ordem de milímetros).

Os esforços axiais de compressão nos tubos externos deste medidor podem ser minimizados através do recobrimento dos mesmos por uma camada de graxa e da colocação de anel de material deformável (por exemplo, isopor) envolvendo as luvas de emenda dos vários segmentos de tubo.

#### 4.2.1.4. Medidor hidrostático de recalques (caixa sueca)

O medidor hidrostático de recalques, também conhecido no meio técnico de instrumentação de barragens por caixa sueca, utiliza o princípio dos vasos comunicantes para efetuar a medida de recalques no interior do aterro. O método de medida é semelhante, porém mais preciso, ao popular “nível de mangueira” (ou de pedreiro), largamente difundido em obras de pequeno porte.

O equipamento é formado por tubos de leitura, instalados no interior do maciço em pontos onde se deseja conhecer o deslocamento vertical. Estes tubos são protegidos por uma caixa (caixa sueca) e levados até a face de jusante, onde um painel de leitura possibilita a medição dos recalques. Para cada painel de leitura, costuma-se instalar várias caixas suecas, aproximadamente na mesma cota.

É importante ressaltar que para, para barragens do tipo BEFC, pode-se instalar caixas suecas ao longo de todo o corpo do aterro. Em contrapartida, para as BENA, deve-se restringir a instalação das caixas suecas ao núcleo e à porção de enrocamento de jusante, como mostra a Figura 24. Este procedimento é obrigatório para impedir que a água percole da porção de enrocamento de montante para o núcleo argiloso, o que ocorreria pela interface da tubulação da caixa sueca com o aterro, causando *pipping* no núcleo argiloso.

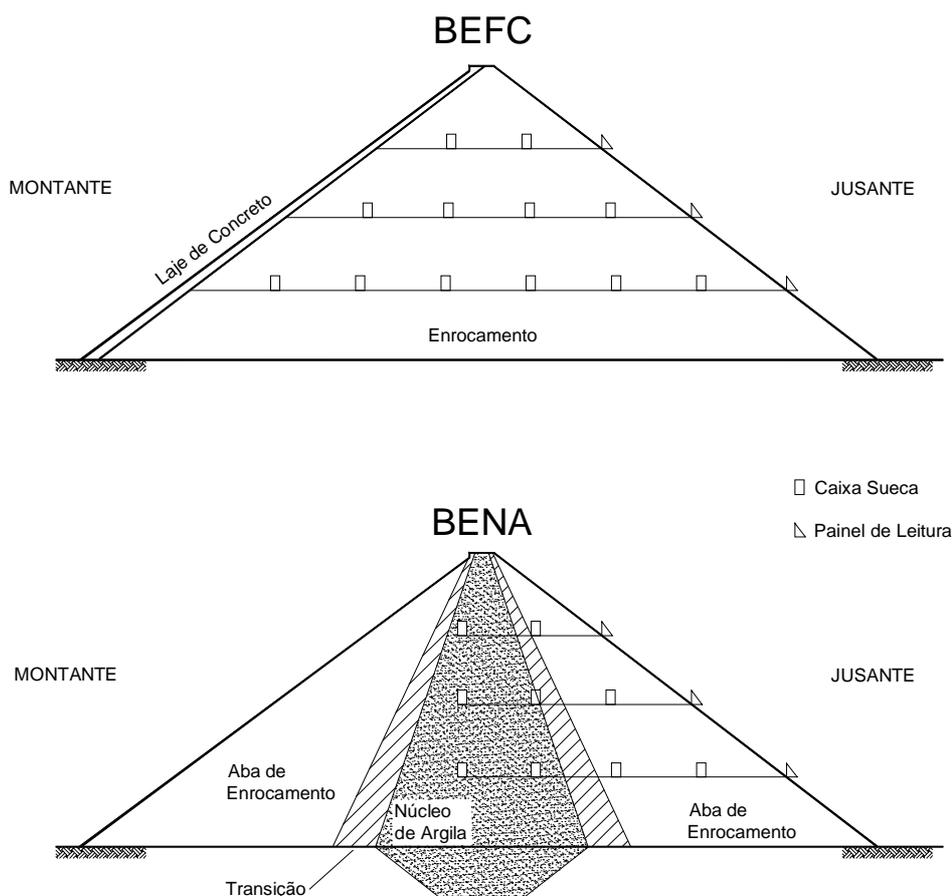


Figura 24 - Seções de barragens instrumentadas com caixas suecas (Oliveira e Sayão, 2004).

A configuração atual do equipamento consiste em uma caixa que encerra 4 tubos, conforme ilustra a Figura 25:

- Tubo A - de aeração: responsável pela manutenção da pressão atmosférica dentro da caixa sueca. Pode ser levado até o painel de leitura no caso de barragens de terra. Ao trabalhar com enrocamentos, não há necessidade de levá-lo até o painel, uma vez que os vazios do

enrocamento permitem a manutenção da pressão. O material utilizado comumente é o polietileno;

- Tubos B e C – de leitura e circulação: no início do emprego deste instrumento, utilizava-se apenas um tubo de leitura. Com o avanço da técnica, adotou-se configurações com dois tubos para verificar a ocorrência de bolhas de ar na tubulação e outras causas de erros de leitura. O material utilizado na tubulação é o polietileno. Ao instalar-se o equipamento, realiza-se a circulação de água destilada e deaerada no sistema. Pelo princípio dos vasos comunicantes, e com a pressão atmosférica mantida na caixa sueca pelo tubo de aeração, garante-se que o nível d'água fique estabilizado no painel de leitura, enquanto não ocorrerem deslocamentos verticais no maciço;
- Tubo D – de drenagem: a função desta tubulação é escoar o excesso de água que porventura ocorra dentro da caixa sueca. Há duas situações: para barragens do tipo BENA, o tubo de drenagem é levado até a cabine de leitura, para evitar infiltrações no núcleo argiloso. Já para barragens do tipo BEFC, o tubo de drenagem pode ser disposto no enrocamento por não apresentar riscos ao maciço.

Uma questão relevante sobre as caixas suecas refere-se ao diâmetro das tubulações. Dunnicliff (1988) considera que o diâmetro ideal é de 6mm para leitura e circulação. O Comitê Suíço de Barragens (SNCLD, 1991) menciona que o tubo de leitura deve ter de 3 a 4 mm de diâmetro interno, fabricados em nylon, e os tubos de ventilação devem ter de 6 a 7mm de diâmetro. No Brasil, cada fabricante adota diâmetros comercialmente acessíveis, normalmente dentro da faixa determinada na literatura. Um dos objetivos desta pesquisa, realizada em colaboração com FURNAS, e que será posteriormente detalhada neste estudo, é a determinação de um diâmetro adequado que garanta precisão das leituras e facilidade de operação do instrumento.

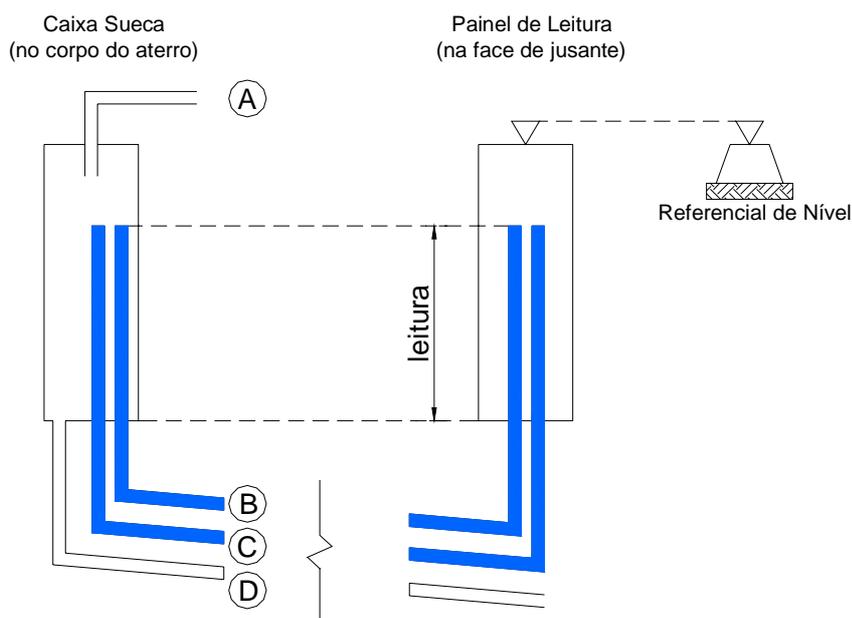


Figura 25 - Esquema de funcionamento do medidor hidrostático de recalques (Oliveira e Sayão, 2004).

Sobre a água utilizada para as medidas, duas exigências são feitas: inexistência de bolhas de ar, para não falsear as leituras de nível e inexistência de impurezas e microorganismos, o que é obtido através da destilação. Com o passar do tempo, a água destilada e deaerada deve ser trocada, para garantir a confiabilidade das leituras. Como esta troca ou circulação de água é um processo lento, devido à grande extensão da tubulação (a qual atravessa todo o maciço da barragem) e ao seu pequeno diâmetro, recomenda-se uma periodicidade de 6 a 12 meses para a troca.

O painel de leitura, encerrado na cabine de leitura, a jusante da barragem, é o local por onde se realiza a operação de circulação de água. Para calcular o deslocamento vertical, devemos considerar o recalque do Painel de Leitura, obtido através de nivelamento topográfico em relação ao referencial de nível, somado ao recalque da caixa sueca.

Isto requer que todo o sistema que compõe a caixa sueca esteja montado e as tubulações saturadas, para que se obtenha a leitura inicial. Quando não é possível, devido a atrasos na montagem dos sistemas, o levantamento topográfico inicial da extremidade do tubo na caixa sueca deve ser realizado

rigorosamente, com leituras repetidas e determinação estatística da confiabilidade dos resultados (Oliveira e Sayão, 2004).

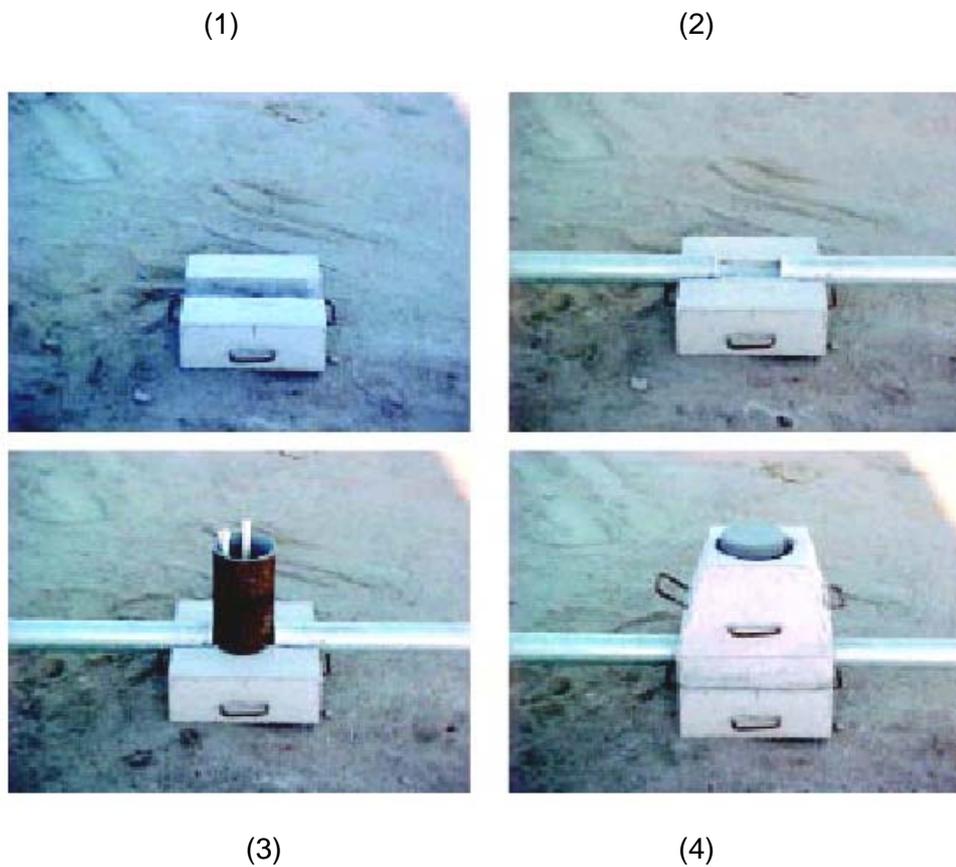
### **Aspectos construtivos e instalação**

Segundo estudos apresentados no II Simpósio sobre Instrumentação de Barragens (CDBD, 1996), a caixa sueca pode ser construída com um tubo de aço com 110mm de diâmetro por 300mm de comprimento, vedado nas extremidades por chapas de aço com espessura de 6mm. Em sua parte inferior ficam conectados tubos de leitura e drenagem e na parte superior o tubo de aeração. Os tubos de ligação entre a caixa sueca e o painel de leitura podem ser de PVC rígido, polietileno ou nylon. Para a proteção do instrumento, o cilindro metálico é envolvido em uma caixa de concreto pré-moldado e as tubulações são envolvidas por tubulação de aço galvanizado que segue pelo corpo do aterro até o painel de leitura.

Em casos de obras onde o construtor está contratualmente apto a introduzir modificações no projeto dos instrumentos, visando uma redução de custos e prazos, mas sem comprometer o bom funcionamento dos equipamentos, é possível alterar as dimensões e os materiais da caixa sueca. A Figura 26 mostra a seqüência de montagem da célula de recalque de um medidor hidrostático, no campo.

A instalação da caixa sueca consiste em abrir uma vala na barragem até a cota onde foi projetada a instalação do instrumento, fixando sua base em concreto. A partir do ponto de instalação, elabora-se um “berço” com cascalho para proteger os tubos e conduzi-los ao painel de leituras.

Outro método utilizado, ao invés da abertura de vala na barragem, é a construção de uma berma, na cota de projeto para instalação do instrumento. Este método interfere menos na praça de aterro e permite maior rapidez na execução do serviço (Oliveira, 2004). A Figura 27 mostra a instalação da instrumentação no campo.



- (1) Instalação da base da caixa de concreto no local e na cota de projeto;
- (2) Instalação dos tubos-guia em aço galvanizado;
- (3) Instalação do cilindro metálico e das tubulações;
- (4) Fechamento do cilindro e instalação do topo da caixa de concreto;

Figura 26 - Seqüência de montagem da célula de recalque no campo  
(Belitardo e Pereira, 2001).



(a) Locação topográfica da caixa sueca



(b) Instalação de uma linha de caixas suecas ao lado de uma linha de extensômetro horizontal de hastes múltiplas

Figura 27 - Detalhes de instalação de caixas suecas e extensômetros.

As Figuras 28 e 29 mostram o painel de leitura e a cabine de leitura, instalados à jusante da barragem. O painel consiste em duas tubulações com graduação para medida dos recalques, a saída do tubo de drenagem e a saída do tubo de aeração, quando for o caso.

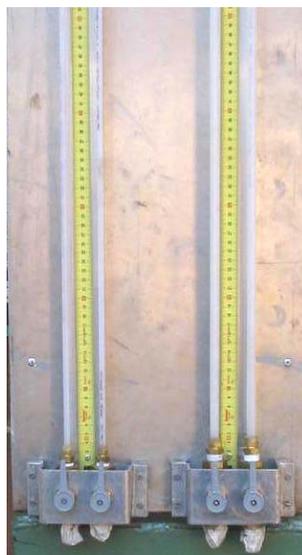


Figura 28 - Painel de leitura de caixas suecas.



Figura 29 - Cabine de leitura em concreto pré-moldado, concentra os pontos de leitura de caixas suecas e extensômetros horizontais de hastes múltiplas.

Os estudos atualmente em andamento nos laboratórios de FURNAS têm por objetivo o aprimoramento tecnológico desses medidores hidrostáticos. Simulações diversas do funcionamento de células de recalque, com tubos de até 380 m de extensão, estão sendo procedidas. Estes estudos, realizados sob condições controladas no laboratório, visam identificar as causas mais prováveis de discrepâncias nas leituras de caixas suecas em obras no campo. Dentre as principais causas, pode-se citar:

- Decréscimo rápido da coluna d'água, durante a leitura, causando o refluxo e a conseqüente estabilização em nível inferior ao topo do tubo de leitura;
- Presença de ar na tubulação de leitura;
- Vazamento de água ou rompimento da tubulação de leitura que fica enterrada no maciço;
- Entupimento ou colmatação do tubo suspiro, provocando o desequilíbrio dos níveis d'água;
- Entupimento ou colmatação do tubo dreno, provocando inundação no interior da célula;
- Entupimento ou colmatação da tubulação de leitura, por desenvolvimento de musgo ou microorganismos na água.

Finalmente, como características principais das caixas suecas, pode-se citar: interferência na praça de construção apenas durante a instalação; terminal

de leituras aproximadamente à mesma cota que a caixa para a determinação dos recalques absolutos, necessidade de associação com referência profunda de nível (*benchmark*) ou outro sistema.

#### 4.2.2. Medidores internos de deslocamentos horizontais

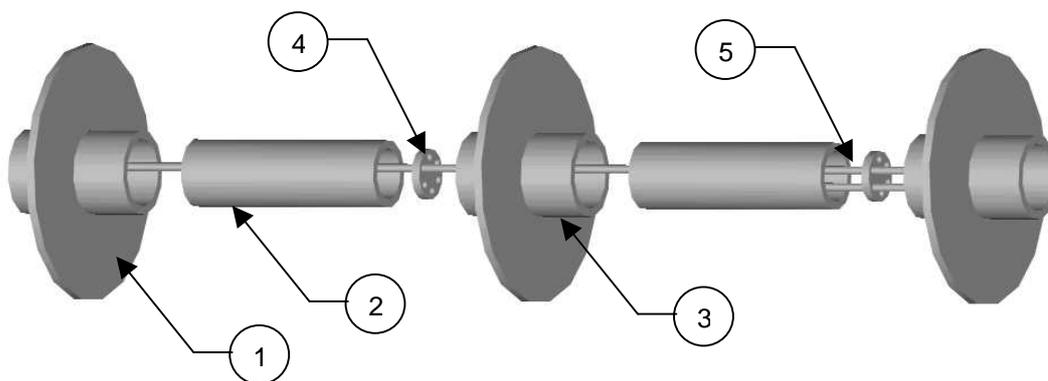
##### 4.2.2.1. Extensômetros de hastes múltiplas

Objetiva a determinação da deformabilidade de maciços rochosos e/ou deslocamentos dos blocos de estruturas de concreto na direção horizontal.

Este equipamento é constituído por placas de deslocamento (circulares ou quadradas), acopladas a hastes de leitura em aço inóx, conforme indicado na Figura 30. As placas são instaladas nos pontos de interesse do maciço e as hastes, solidárias às respectivas placas, são conduzidas até a cabine de leitura à jusante da barragem. Para permitir deslocamentos das placas no interior do maciço, são instaladas luvas de emenda na tubulação que conduz as hastes para a cabine de leitura. A referência das leituras é feita a partir da medição inicial (logo após a instalação) de cada haste, sendo medidos os deslocamentos a partir de uma placa fixada na saída das hastes na cabine de leitura. As medidas são feitas com uma régua graduada em milímetros.

As principais vantagens a serem citadas são a facilidade de leitura, a possibilidade de instalação de um número razoável de placas de deslocamento e a reduzida dispersão de leituras.

Como limitações, pode-se citar a complexidade construtiva, a necessidade de proteção contra a oxidação das peças galvanizadas, a dificuldade para se executar reparos no conjunto e a possível ocorrência de deslocamentos repentinos de difícil interpretação.



- 1 – Placa de deslocamento horizontal (aço galvanizado)
- 2 – Tubo de emenda para prolongamento (aço galvanizado)
- 3 – Luva de emenda (aço galvanizado)
- 4 – Flange guia das hastes (aço inox)
- 5 – Haste de leitura (aço inox)

Figura 30 - Componentes do Extensômetro Horizontal de Hastes Múltiplas (Belitardo e Pereira - 2001, com modificações).

#### 4.2.2.2. Inclínômetros

Estes instrumentos são utilizados com o objetivo de determinar deslocamentos horizontais, superficiais e em subsuperfície. Consistem de um conjunto de segmentos de tubos de plástico ou de alumínio, confeccionados especialmente para esta finalidade, montados através de luvas telescópicas em posição subvertical. Tais tubos possuem dois pares de ranhuras, diametralmente opostas, com os dois diâmetros assim formados perpendiculares entre si, dispostos na barragem nas direções montante/jusante e ombreira esquerda/ombreira direita. As ranhuras servem de guia para as rodas do sensor introduzido para efetuar as leituras, conforme mostra a Figura 31.

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.

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.

À medida que o aterro sobe, os tubos de inclinômetro são simplesmente emendados, procedendo-se a compactação cuidadosa (manual) no entorno dos tubos.

Os equipamentos de leitura mais utilizados são da marca SINCO (Slope Indicator Company), existentes em dois modelos – série 200-B (mais antigo) e Digitilt (mais moderno).

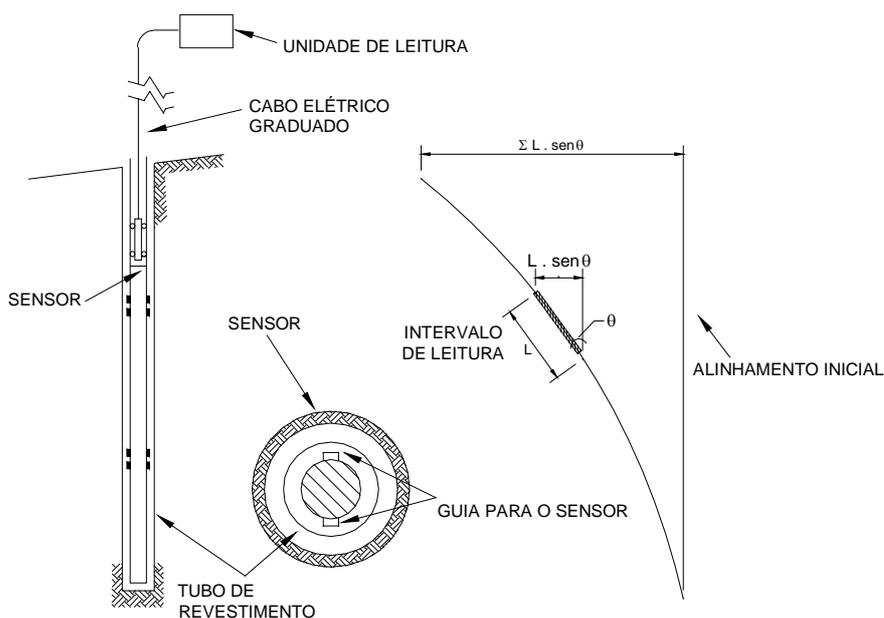


Figura 31 - Princípio de operação do inclinômetro (Dunnicliff, 1988).

Os inclinômetros apresentam como principais características: a possibilidade da determinação dos componentes dos deslocamentos horizontais em duas direções ortogonais, ao longo do comprimento do instrumento; leitura e cálculo (manual) relativamente demorados; interferência na praça de trabalho; a possibilidade de instalação em furos verticais ou inclinados.

#### 4.2.3. Medidores de deslocamentos de superfície

##### 4.2.3.1. De movimento angular (eletrônicos)

Segundo Wha (1999), os eletrônicos são sensores elétricos que indicam a rotação ou a distorção angular através da variação da resistência elétrica entre

os pinos que constituem o elemento de medição. Este elemento é em geral uma ampola preenchida com um líquido eletrolítico.

Os eletrônives foram desenvolvidos para a indústria aeronáutica há mais de 50 anos. Os primeiros trabalhos com esta técnica de instrumentação aplicada à geotecnia foram desenvolvidos na Inglaterra, no estudo do comportamento de estacas submetidas a carregamento lateral (Cooke e Price, 1974).

Posteriormente, a instrumentação com eletrônives foi aplicada na medição da convergência dos túneis do metrô de Londres e também na medição de recalques dos edifícios ocasionados pelo processo construtivo dos túneis.

No Brasil, a primeira utilização do eletrônível foi na medição de deformações de corpos de prova em ensaios triaxiais instrumentados. Em obras geotécnicas, os eletrônives foram aplicados pioneiramente para a determinação da deflexão da face de concreto durante o enchimento do reservatório da barragem de Xingó (Rocha Filho, 1995).

O eletrônível pode ser considerado como um sensor elétrico equivalente ao tradicional nível utilizado na construção civil, como ilustrado na Figura 32. Entretanto, ao invés de se usar dentro da ampola um álcool com um bulbo de ar que é nivelado visualmente, o eletrônível contém uma solução condutora de eletricidade. O nível líquido consiste de um eletrólito selado em uma cápsula de vidro sendo que os projetos mais recentes envolvem o uso de cápsulas de plástico ou de cerâmica. Três eletrodos coplanares penetram a cápsula e são parcialmente imersos neste líquido. A resistência entre o eletrodo central e os eletrodos da extremidade varia em função da inclinação à qual é submetida a cápsula.

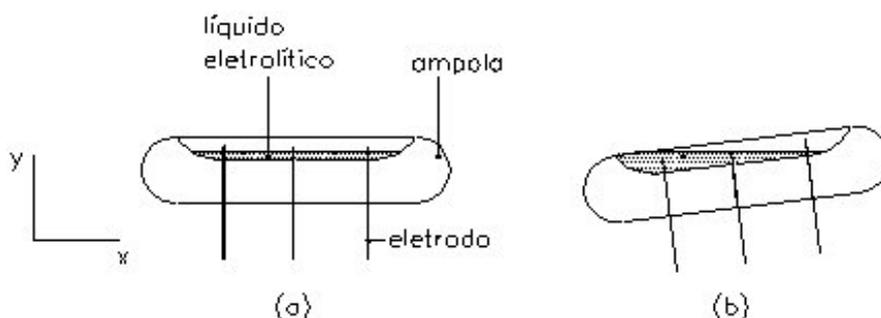


Figura 32 - Variação da altura do líquido eletrolítico entre os eletrodos (Wha, 1999).

A ampola, ao sofrer uma inclinação, no plano dos eletrodos, provoca uma variação na tensão decorrente da variação angular do eletrônível. Assim, ao se induzir uma variação angular do eletrônível, obtém-se uma variação de tensão elétrica. A ampola e os eletrodos ficam protegidos por um cilindro metálico, constituído por material resistente e que garante vedação ao sistema, ou seja, não permite o contato da ampola e dos eletrodos com água. Um cabo elétrico, que mede a variação da tensão, é conectado a uma leitora digital ou analógica que permite registrar a variação angular. A Figura 33 exibe o funcionamento do eletrônível. As Figuras 34 e 35 mostram fotografias do instrumento pronto para utilização.

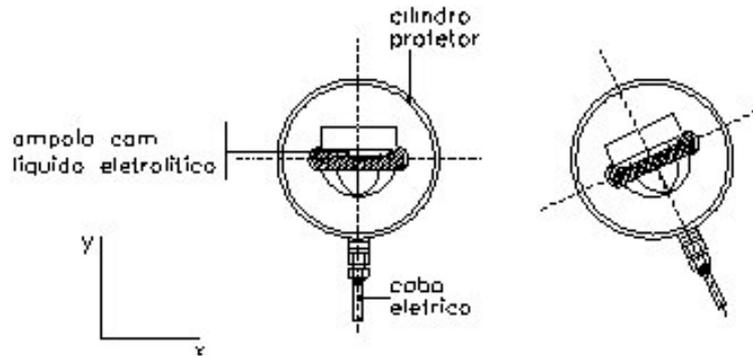


Figura 33 - Funcionamento do eletrônível (Wha, 1999).

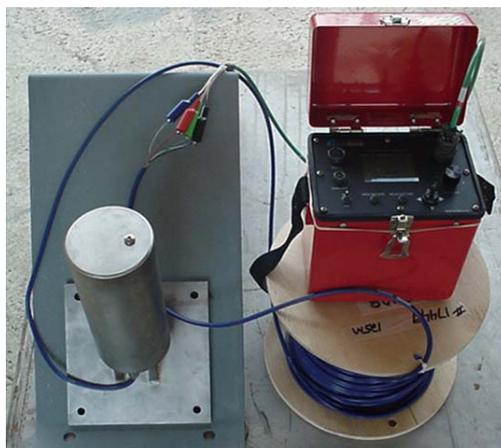


Figura 34 - Cilindro metálico para proteção da ampola, cabos elétricos e leitora.



(a) Vista externa do cilindro



(b) Vista interna do cilindro

Figura 35 - Detalhes da proteção da ampola do eletrônível.

O conjunto de eletrôníveis a ser utilizado para instrumentação de barragens deve ser previamente calibrado. A finalidade do procedimento de calibração é a determinação do coeficiente de calibração ( $C_f$ ) para cada um dos eletrôníveis empregados. Objetiva-se determinar uma curva que forneça a variação das leituras dos eletrôníveis em função da variação angular. Com isso, é possível determinar um coeficiente de calibração para cada eletrônível, o qual

poderá ser utilizado na determinação das rotações e deflexões durante a fase de monitoramento no campo.

Os eletrôníveis podem sofrer rotações com relação à linha normal vertical que passa pelo eixo do eletrônível de até  $\pm 6^\circ$ , ou podem assumir outra faixa de valores dependendo do fabricante. Esta variação angular é tomada em relação à linha normal ao eletrônível. Para rotações superiores à especificada pelo fabricante, o eletrônível pode apresentar um comportamento não linear. A Figura 36 mostra a instalação de eletrôníveis na face de concreto de um BEFC.

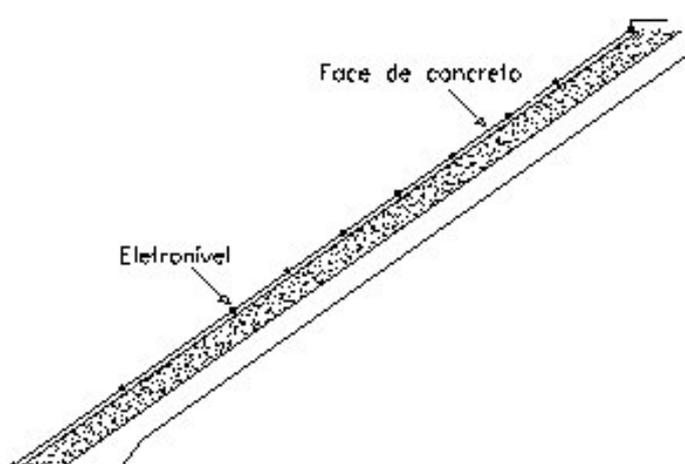


Figura 36 - Localização dos eletrôníveis na face de concreto de barragem de enrocamento (Wha, 1999).

#### 4.2.3.2. De abertura de juntas

Este medidor é um instrumento elétrico, embutido no concreto da laje em barragens de enrocamento com face de concreto. Deve ser resistente às pressões hidrostáticas do reservatório, necessita de calibração prévia e de proteção contra sobrecargas elétricas.

Durante a instalação, deve-se adotar cuidados adicionais para que o lançamento e a vibração do concreto não danifiquem o instrumento. A Figura 37 ilustra o instrumento instalado na laje de uma barragem.



Figura 37 - Medidor de abertura de juntas.

#### 4.2.3.3. Triortogonal de junta perimetral

Estes medidores são geralmente instalados nas juntas de contração e fissuras mais significativas, para o acompanhamento dos deslocamentos diferenciais entre blocos ou da movimentação diferencial entre os lados opostos de uma fissura. A Figura 38 ilustra a instalação deste medidor. A grande vantagem dos medidores triortogonais é possibilitar a medição dos deslocamentos diferenciais segundo um sistema de eixos ortogonais entre si, a saber:

- Eixo X – deslocamento abertura/fechamento;
- Eixo Y – deslocamento cisalhante horizontal;
- Eixo Z – deslocamento cisalhante vertical.

Através dos acompanhamentos dos deslocamentos diferenciais entre blocos ou da movimentação das fissuras mais significativas, pode-se ter uma indicação da continuação do processo de fissuração.



Figura 38 - Medidor triortogonal.

#### 4.2.3.4. Marcos topográficos

Distribuídos sobre a superfície do aterro, estes instrumentos são utilizados como referências para obtenção de deslocamentos horizontais e verticais, através de topografia de precisão. Devido à nova tendência de utilização de distanciômetros eletrônicos em sistemas geodésicos, FURNAS e PUC-Rio estão iniciando uma pesquisa para a utilização destes aparelhos com vistas à instrumentação de barragens.

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 serem 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, nota-se com frequência a destruição deste 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.