

2

Revisão Bibliográfica

2.1.

Breve Histórico de barragens de enrocamento com vedação a montante (BEVMs)

Cruz, Materón & Freitas (2009) citam que a barragem La Granjilla, com 13 metros de altura e 460 metros de comprimento, foi construída na Espanha já em 1660, com face impermeável de argamassa e cal. Seu corpo foi construído com solo e enrocamento. No Brasil, a barragem Saturnino de Brito, em Poços de Caldas/MG é uma das barragens construídas com face impermeável no começo do século XX.

Nos Estados Unidos, a construção das barragens de enrocamento começou na era moderna, entre 1850 e 1870, para armazenamento de água para exploração de ouro nas montanhas de Serra Nevada, no Estado da Califórnia. A face a montante do dique dessas barragens era inicialmente de placas de madeira e, mais tarde, de concreto. Duas das barragens de enrocamento com face de madeira são as barragens Inglesa (Figura 2.1), com 24 metros de altura, construída em 1856, e Meadow Lake, construída também na Califórnia, em 1903, com 23m de altura. A ocorrência de queimadas, principalmente na estação seca, e sua vulnerabilidade à deterioração a longo prazo, causou a mudança da face a montante de madeira para concreto. (Cruz, Materón & Freitas, 2009).



Figura 2.1 – Barragem Inglesa (1856) (<http://sunsite.berkeley.edu>).

Até 1900, 60% das barragens de enrocamento usavam madeira como elemento vedante. A partir de então, até o ano de 1945, a percentagem desse tipo de barragem caiu para 18% enquanto que as barragens com revestimento de concreto experimentaram um aumento de 27% para 48% no mesmo período. Para o caso da utilização de revestimento em aço, este número manteve-se constante na faixa de 8%. (Justin, 1945, apud Saboya, 1993).

No que se refere ao conceito dos aterros de enrocamento, a primeira grande mudança foi que esses deveriam ser construídos em camadas relativamente mais delgadas, com molhagem e compactação. Dentre as primeiras barragens construídas com enrocamento compactado pode-se citar a barragem de El Infiernillo no México e a barragem de Quioch na Escócia, cujas obras foram terminadas em 1963 e 1969, respectivamente. (Saboya, 1993).

Durante o período compreendido entre 1960 e 1965, os projetos e a construção de barragens de enrocamento passaram por uma fase de transição entre o enrocamento lançado e compactado. A necessidade da construção de barragens relativamente altas, aliada, em alguns casos, à ausência de rochas de boa qualidade e ao desenvolvimento de máquinas pesadas de compactação contribuíram sobremaneira para o desenvolvimento de novos projetos de barragens de enrocamento. (Saboya, 1993).

Nas últimas décadas, o desenvolvimento tecnológico dos equipamentos de escavação em rocha, transporte e lançamento, bem como dos rolos compactadores, somados a um bom planejamento dos acessos às frentes de lançamento, permite que a produção do maciço de enrocamento alcance picos mensais superiores a 1.000.000 m³. (Cruz, Materón & Freitas, 2009).

O projeto das BEFCs evoluiu empiricamente, ou seja, guiado por experiência, e não por teorias. A complexidade do problema físico a ser analisado analiticamente põe um limite natural ao que pode ser obtido por um modelo matemático. Uma experiência bem compreendida e avaliada continua a ser a melhor e, em essência, a única opção de projeto para as BEFCs, incluindo as muito altas. (Pinto, 2007).

As BEFCs vêm sendo construídas por todo o mundo, apresentando como vantagens sua estabilidade, flexibilidade construtiva, custo atrativo, implementação de taludes relativamente íngremes, melhor adaptação à geologia, etc. Existem em torno de 200 BEFCs com altura superior a 100 m e muitas com altura superior a 150 m (grande porte) construídas ou em construção (Tabela 2.1). Na Figura 2.2 é apresentada uma visão artística da barragem de Shuibuya, a mais alta BEFC já construída.

Tabela 2.1 – Barragens de enrocamento com altura superior a 150 metros (grande porte), construídas ou em construção.

<i>BEFC</i>	<i>Altura</i>	<i>País</i>
Shuibuya	233m	China
Jiangpinghe	221m	China
La Yesca	210m	México
Bakun	205m	Malásia
Campos Novos	202m	Brasil
Guxian	199m	China
Kárahnjúkar	196m	Islândia
El Cajon	189m	México
Aguamilpa	187m	México
Sanbanxi	186m	China
Barra Grande	185m	Brasil
Hongjiadu	179,5m	China
Tianshengqiao I	178m	China
Mazar	166m	Equador
Tankeng	162m	China
Foz do Areia	160 m	Brasil
Zipingpu	158m	China
Bashan	155m	China
Porce III	155m	Colômbia
Jilintai	152m	China



Figura 2.2 – Visão artística da barragem de Shuibuya (233 m) (Cruz, Materón & Freitas, 2009).

Qian (2008 apud Cruz, Materón & Freitas, 2009) apresenta sete BEFCs muito altas em estudo de pré-viabilidade na China: Cihaxia (253m de altura, 700m de comprimento), Maji (300m de altura, 800m de comprimento), Linghekou (305m de altura), Songta (307m de altura, 540m de comprimento), Shuangjiangkou (314m de altura) e Rumei (340m de altura, 800m de comprimento).

2.2.

Medida das deflexões do elemento de vedação a montante

Penman & Rocha Filho (2000) apresentam uma descrição de diversos tipos de instrumentos utilizados para medir a deflexão em elementos de vedação de barragens de enrocamento com vedação a montante. A seguir são apresentados os exemplos citados pelos autores.

A deflexão da face de concreto da barragem de Cethana (Tasmania), de 110m de altura foi medida por dois métodos, descritos por Fitzpatrick et al (1973). Uma das medições foi feita em bóias conectadas a 23 pontos da face por cordas de aço inoxidável. O repouso absoluto foi necessário para realização das leituras por levantamento topográfico.

O segundo método utilizou um inclinômetro de 1,525m de comprimento que foi passado através de tubos de acesso de 76mm de diâmetro acoplados à superfície da membrana por suportes de aço. O inclinômetro, desenvolvido na Universidade da Tasmania, possuía um acelerômetro automaticamente rotacionado de modo a posicionar seu eixo normal sempre de acordo com o plano vertical do inclinômetro.

A deflexão máxima medida, logo abaixo da altura média da membrana foi de 117mm, o que corresponde somente a 40% do valor previsto. Verificou-se que depois de feitas as correções para os efeitos de temperatura e tração dos fios verticais, os dois métodos apresentaram uma excelente concordância para medições de deflexão na membrana.

A barragem de enrocamento de Aguada Blanca (Peru), de 45m de altura, que foi finalizada em 1971, teve as deflexões na face de aço medidas por um deflectômetro que passava através dos tubos colocados no talude a montante logo abaixo da membrana de aço.

O deflectômetro consistia em uma estrutura de 0,5m de comprimento, direcionada nos tubos por dois conjuntos de três rolamentos, com braços flexíveis de 0,5m que se estendiam para frente para medir a flexão dos tubos. O movimento dos braços relativo ao corpo do instrumento foi medido por pares de cordas vibrantes. Uma deflexão máxima de 40cm foi medida perto da altura média da membrana. O recalque de crista medido por um levantamento preciso foi de apenas 4mm.

A barragem de Winscar, de 53m de altura foi uma das primeiras barragens britânicas a ter uma membrana à montante de concreto asfáltico. A barragem foi equipada com medidores de placa horizontais em três níveis na seção principal durante a construção. Esses instrumentos forneceram informação sobre movimentos dentro do corpo do enrocamento, transmitidas através do enrocamento para terminais especiais colocados logo abaixo, mas em contato com a membrana asfáltica. Além disso, permitiram a medição da deflexão da membrana em aproximadamente três alturas igualmente espaçadas.

Os recalques de crista foram medidos por um levantamento topográfico. A precisão das medidas dos movimentos horizontal e vertical das chapas e terminais desses instrumentos, em relação aos marcos superficiais a jusante da barragem, foi da ordem de ± 3 mm.

Deflexões máximas normais à membrana, medidas sobre a parte inferior, foram em torno de 20cm, isto é, 50% da previsão. Informações detalhadas dessas deformações locais adjacentes ao plinto não podem ser obtidas com esse arranjo de instrumentação.

Planejou-se a instalação de um inclinômetro de sistema similar ao utilizado na barragem de Cethana para a barragem de enrocamento Khao Laem, na Tailândia (131m de altura). Quatro linhas de tubos de alumínio de 56mm de diâmetro foram anexadas à membrana de concreto (1:1,4 de inclinação) com suportes para assegurar que as quatro ranhuras no tubo ficassem posicionadas nos planos paralelo e normal à membrana. O inclinômetro possuía um comprimento de 0,5m e percorreu os tubos em incrementos de 0,5m, realizando leituras a cada incremento. O tubo mais comprido requereu 430 leituras.

Na barragem de Marchlyn (72m de altura), na Inglaterra, o elemento impermeável consiste em uma cortina de injeção posicionada abaixo da galeria de concreto de inspeção no pé do talude a montante anexada a uma membrana asfáltica cobrindo o talude a montante.

Para medir os recalques diferenciais que poderiam ocorrer adjacentes à rígida estrutura de concreto e a deformada da membrana durante o enchimento do reservatório, foi montado um sistema de medição de deflexões da face baseado em um inclinômetro, além de um sistema preciso de levantamento topográfico realizado utilizando pilares de referência fundados na rocha, longe da influência do carregamento da barragem.

A primeira proposta foi posicionar o tubo do inclinômetro logo abaixo da membrana, da crista ao pé em uma distância de 138 m. Entretanto, experiências anteriores mostraram que a força gravitacional não seria suficiente para movimentar o inclinômetro pela inclinação do talude (1:2) e barras deveriam ser utilizadas para empurrar o inclinômetro

através do tubo. Além disso, os projetistas estavam insatisfeitos com uma trincheira na superfície acabada do enrocamento para posicionar o tubo abaixo da membrana, argumentando que deformações locais poderiam causar danos à membrana, mas afirmaram não haver dificuldades em instalar acima da superfície da membrana. Com liberdade de espaço acima da membrana, o sistema foi montado usando um inclinômetro sobre rodas que iriam percorrer trilhos anexados à membrana.

Um inclinômetro padrão de 0,5m de comprimento que fornecia leituras digitais foi escolhido. Um trole de quadro rodas foi projetado com estrutura espacial possuindo uma esteira de 0,75m e um comprimento entre as rodas traseira e dianteira de 2m (Figura 2.3). Um pequeno comprimento de tubo ranhurado de inclinômetro foi posicionado no trole na posição vertical quando este estava na inclinação do talude (1:2).

Foram realizadas leituras em 69 posições, sendo que a última, no contato da roda do trole com o trilho ancorado na galeria de concreto, foi tomada como referência para as medidas de deflexão. Na posição mais elevada, quando o trole se encontrava próximo à crista da barragem, a medição foi feita através de levantamento topográfico.

As leituras tomadas antes do enchimento do reservatório foram usadas como “zero” e subsequentes mudanças mediram a deflexão da membrana. Várias leituras foram tomadas com o enchimento do reservatório. Na Figura 2.4 são mostradas as deflexões da membrana quando o reservatório estava cheio.

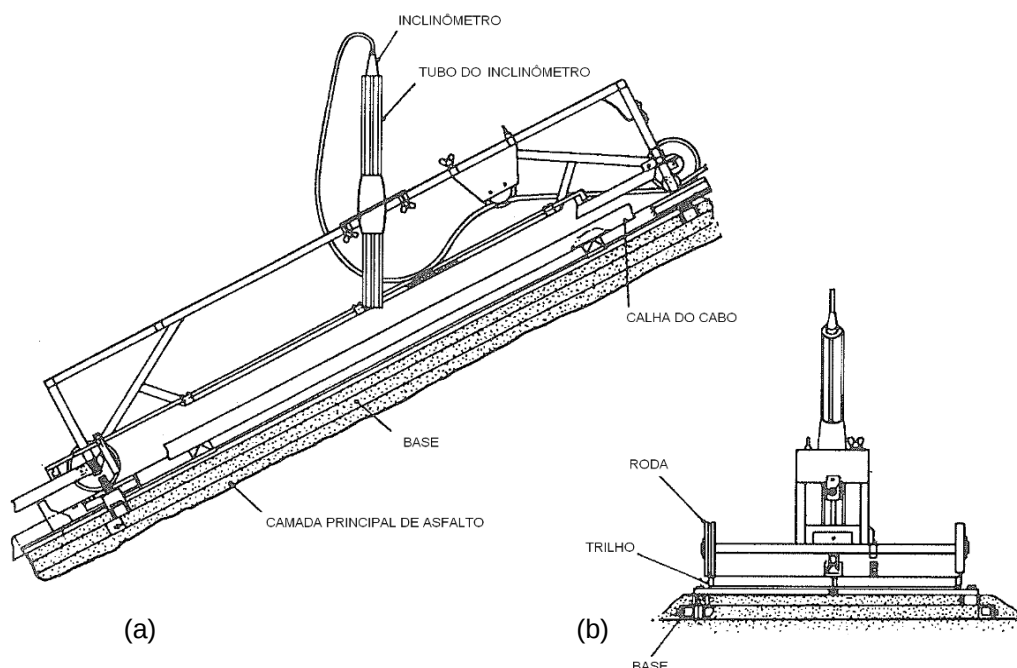


Figura 2.3 – Vista longitudinal (a) e em corte (b) do trole para movimento do tubo de inclinômetro na Barragem de Marchlyn. (Penman & Rocha Filho, 2000).

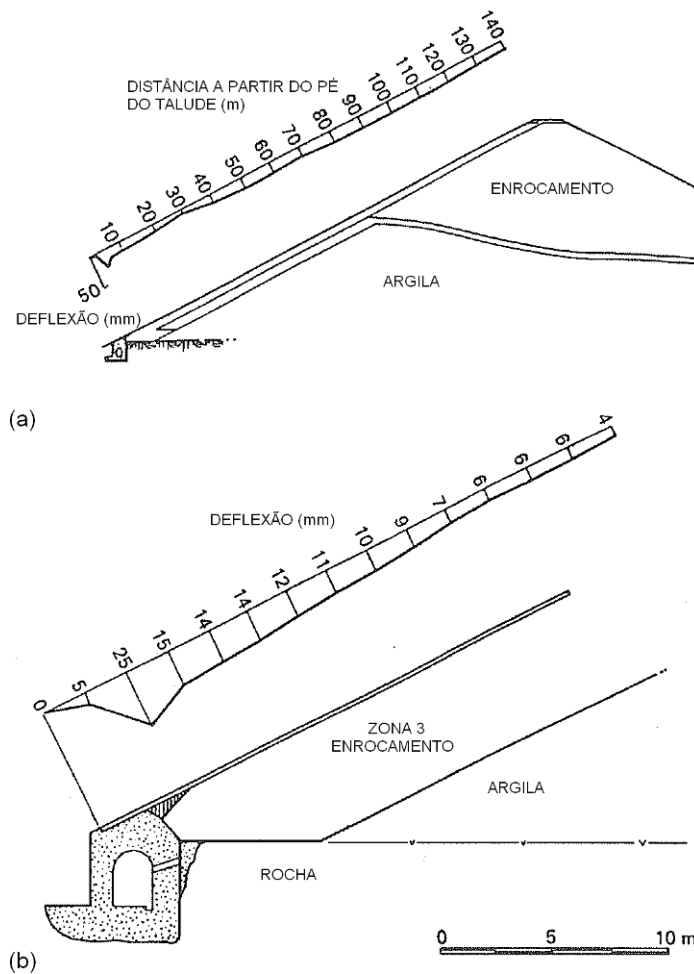


Figura 2.4 – Deflexões da membrana com o reservatório cheio da Barragem de Marchlyn. (a) Deflexões na seção principal; (b) Detalhe próximo ao pé do talude a montante. (Penman & Rocha Filho, 2000).

Em algumas BEFCs atualmente têm sido utilizados inclinômetros embutidos na face para o monitoramento das deflexões. Nas Figuras 2.5 e 2.6 podem ser vistos os tubos utilizados na barragem de El Cajón, México.

2.3. Deflexões da face de concreto de BEFCs indicadas por eletrônives

Os eletrônives são instrumentos que apresentam uma série de vantagens em relação a outros sistemas de medição de deflexões da face de concreto, dentre elas a simplicidade de instalação, confiabilidade, precisão, sensibilidade, possibilidade de monitoração a tempo real, etc. Conforme mencionado por Rocha Filho (2008), este engenhoso e versátil sistema de monitoramento veio preencher uma enorme lacuna técnica fornecendo informações importantes



Figura 2.5 – Tubo para instalação do inclinômetro em El Cajón. (Cruz, Materón & Freitas, 2009).



Figura 2.6– Tubo-guia do inclinômetro instalado na crista na barragem de El Cajón. (Cruz, Materón & Freitas, 2009).

sobre o comportamento da face de concreto em todos os estágios de execução, enchimento e operação da barragem.

Pioneiramente aplicado na barragem de Xingó, o sistema constou de 10 (dez) unidades instaladas ao longo de uma seção próxima a ombreira esquerda, permitiu não só a medição da deflexão da face de concreto durante o período de enchimento do reservatório, mas forneceu também informações valiosas para o programa de remediação e ação corretiva, que se fez necessário devido às deformações excessivas que ocorreram na face de concreto, que vieram a comprometer a condição de estanqueidade do elemento de vedação (face de concreto).

Este sistema foi continuamente aperfeiçoado e aplicado em outras barragens de enrocamento com face de concreto: Itá (30 unidades); TSQ1 – China (64 unidades) e Hongjiadu – China (54 unidades) e no presente trabalho, na barragem de Mazar – Equador (80 unidades).

2.3.1. Barragem de Xingó

A Barragem de Xingó está localizada no Rio São Francisco e possui 150m de altura. Rocha Filho (1995) menciona terem sido utilizados dez eletrônives para avaliar o comportamento da face de concreto. Cada variação dos ângulos de cada um dos dez eletrônives foi plotada com a distância (z) ao longo do comprimento da face.

Na Figura 2.7 são apresentadas as deflexões observadas na barragem de Xingó no momento que a água atingiu o nível máximo (Novembro de 1994) e as deflexões correspondentes a Maio do ano 2000.

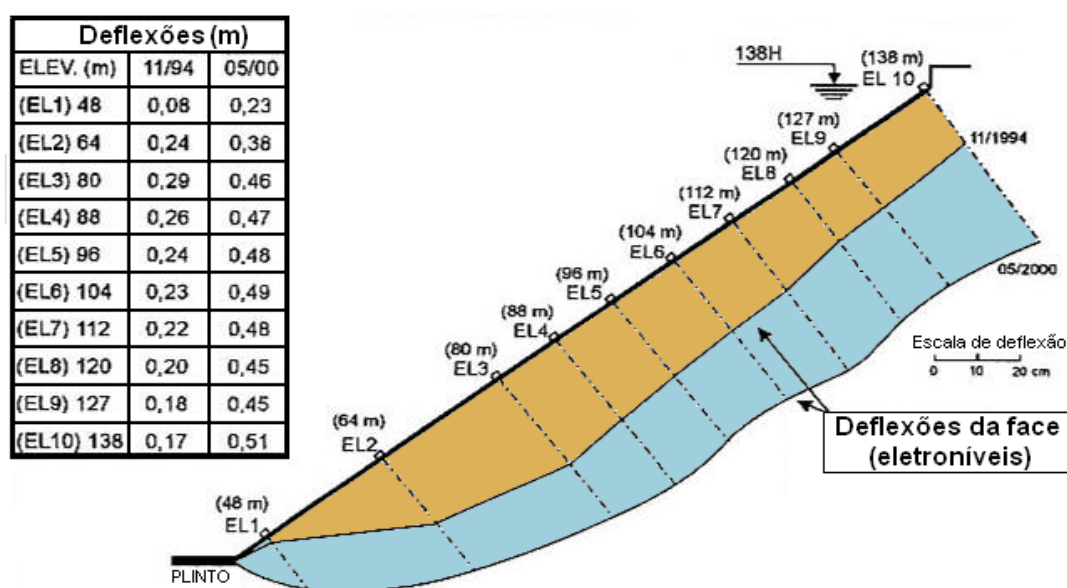


Figura 2.4 – Deflexões observadas na Barragem de Xingó (Penman & Rocha Filho, 2000).

Segundo Rocha Filho (1995), ainda no início da aquisição dos resultados, ficou evidente que os valores fornecidos pelas leituras do eletrônível EN07 mostraram mau comportamento mas, antes que se adotassem medidas reparadoras que envolvessem a substituição dessa unidade, um estudo detalhado foi efetuado e identificou que a região do concreto na qual o eletrônível foi montado estava se movendo independentemente (a ação de caminhar próximo à unidade de leitura fazia alterar o ângulo lido). Encontraram-se microfraturas na laje que, tendo sido reforçada continuamente, não causaram prejuízos à integridade do elemento impermeável, tornando desnecessários serviços de reparo.

2.3.2. Barragem de Tianshengqiao

A Barragem de Tianshengqiao está localizada no Rio Nanpan, na China e possui 178 m de altura. De acordo com Penman & Rocha Filho (2000), um total de 64 eletrôníveis foram instalados na face em três seções, como indicado na Tabela 2.2. Os eletrôníveis foram posicionados uma semana após a construção da face.

Tabela 2.2 – Sequência de instalação dos eletrôníveis na Barragem de Tianshengqiao (Penman & Rocha Filho, 2000).

Seção	n° de Eletrôníveis	Sequência de instalação	Estágio	Período
A	36	A1 a A12 A13 a A27 A28 a A36	Primeiro Segundo Terceiro	Maio/97 Maio/98 Maio/99
B	13	B1 a B7 B8 a B13	Segundo Terceiro	Maio/98 Maio/99
C	15	C1 a C9 C10 a C15	Segundo Terceiro	Maio/98 Maio/99

Na barragem de Tianshengqiao (TSQ1) a construção do enrocamento ocorreu em sete etapas, requerendo que a face de concreto fosse construída em três etapas. A construção da sétima etapa terminou em meados de agosto de 1998, sendo que dessa data até meados de dezembro do mesmo ano, zonas a jusante da parte central da barragem foram construídas rapidamente, a uma taxa próxima a 1m por dia (102 m em 120 dias). Essa rápida elevação do corpo da barragem causou uma deflexão do talude a montante no sentido de jusante, causando fissuras e produzindo uma protuberância na região superior da laje no segundo estágio. Na Figura 2.8 pode ser vista a deflexão da laje, medida pelos eletrôníveis de A1 a A12, instalados no primeiro estágio de construção da laje.

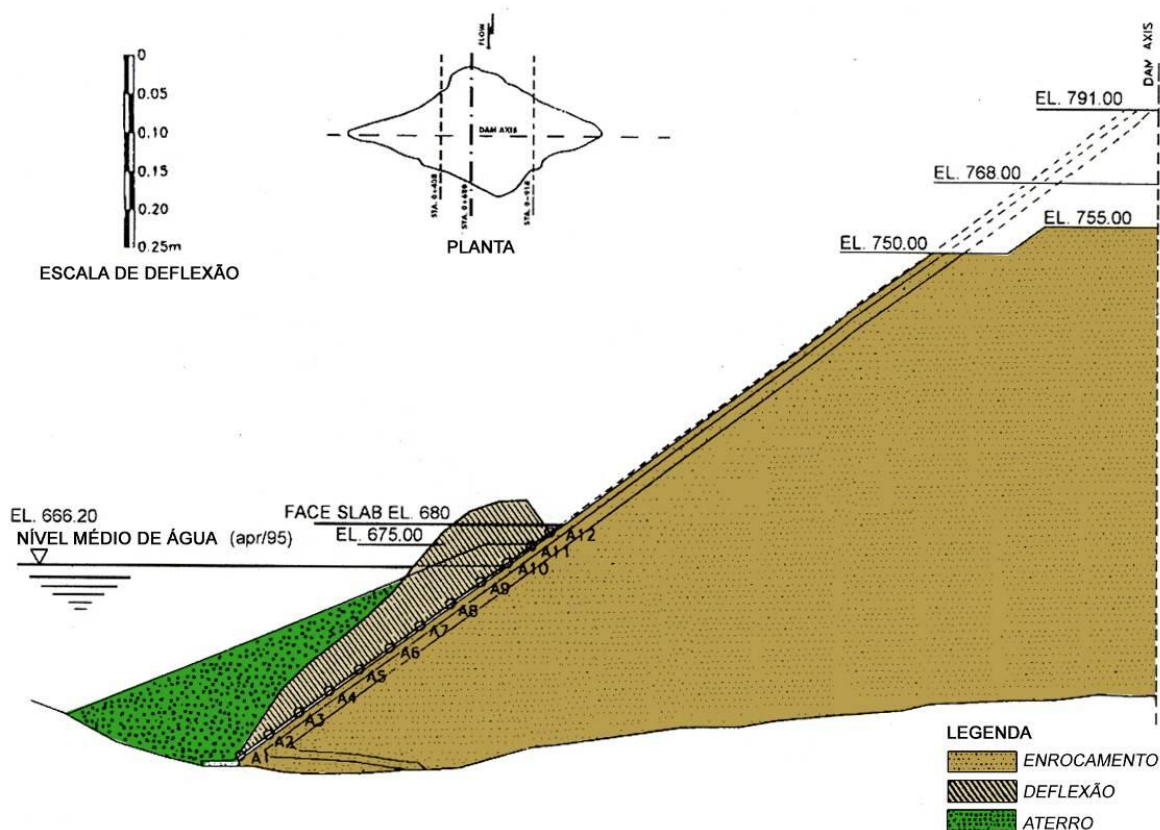


Figura 2.5 – Deflexão do primeiro estágio da laje na maior seção da Barragem de Tianshengqiao (Penman & Rocha Filho, 2000).

Apesar da colocação do aterro a montante até a cota 675m e um nível de reservatório de 666,20 m, a deflexão ocorreu no sentido para montante. Isso foi causado pela colocação do enrocamento na elevação próxima a 755 m, ou seja, aproximadamente 75 m acima do topo da laje no primeiro estágio. Na Figura 2.9 é mostrada para a mesma seção, a deflexão da laje medida pelos eletrônives de A1 a A27 nos primeiro (A1 a A12) e segundo (A13 a A27) estágios de construção da laje até a elevação de 746 m. Nesse momento, a deflexão da laje ocorreu para jusante devido ao efeito do enchimento do reservatório até a cota 733,20 m, apesar do aumento da altura do enrocamento da cota 755,00 m até 768,00 m.

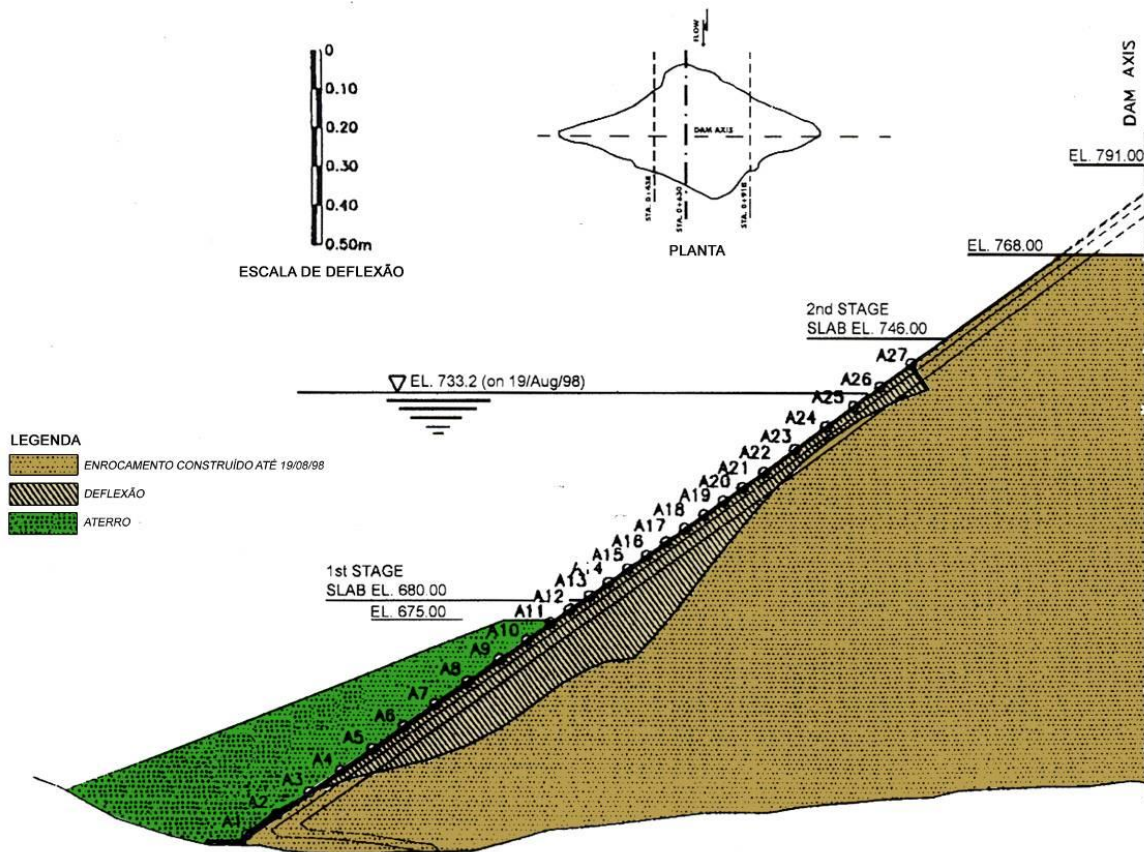


Figura 2.6 – Deflexão do segundo estágio de construção da face de concreto da Barragem de Tianshengqiao (Penman & Rocha Filho, 2000)

Nas Figuras 2.10 e 2.11 são apresentadas, para as mesmas condições, isto é, nível de água do reservatório na cota 733,20 m, as deflexões da laje nas outras duas seções (B e C). É interessante observar a influência da geometria da fundação nas deflexões da laje. Nas deflexões dadas pelos eletrônives B1 a B7, causadas pela construção do enrocamento da cota 746 m até a cota 768 m e pelo enchimento do reservatório até a cota 733,2 m, se observa uma pequena deflexão para montante entre os eletrônives B4 e B5. Isso pode ser causado pela irregularidade da topografia da rocha de fundação, que possui uma protuberância como pode ser observado na Figura 2.10.

Para a seção C, a fundação também apresenta topografia irregular (Figura 2.11), apresentando as deflexões indicadas pelos eletrônives de C1 a C9 mais pronunciadas quando comparadas às ocorridas na seção B.

Na Figura 2.12 são mostradas as deflexões da face nas três seções mencionadas (A, B e C) nos estágios de construção da face, onde mais uma vez se nota a influência das características topográficas da fundação.

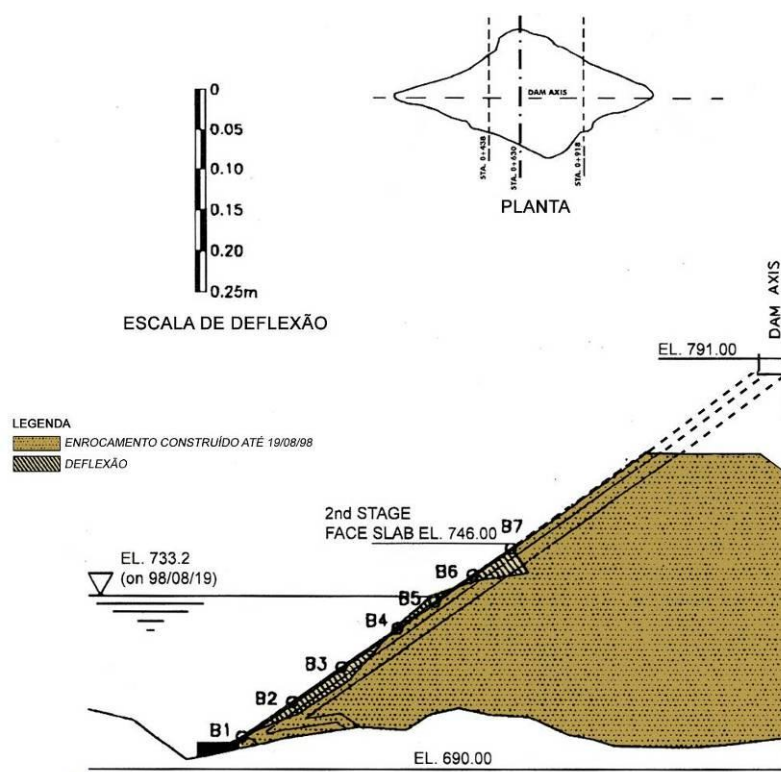


Figura 2.7 – Deflexões do segundo estágio da laje na seção B da Barragem de Tiashengqiao (Penman & Rocha Filho, 2000).

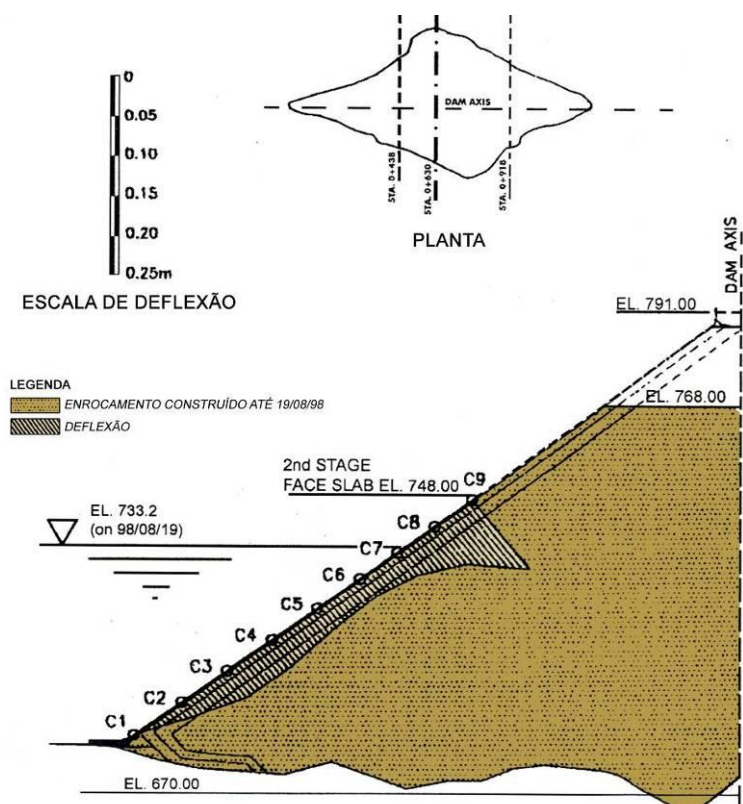


Figura 2.8 – Deflexões do segundo estágio da laje na seção C da Barragem de Tiashengqiao (Penman & Rocha Filho, 2000).

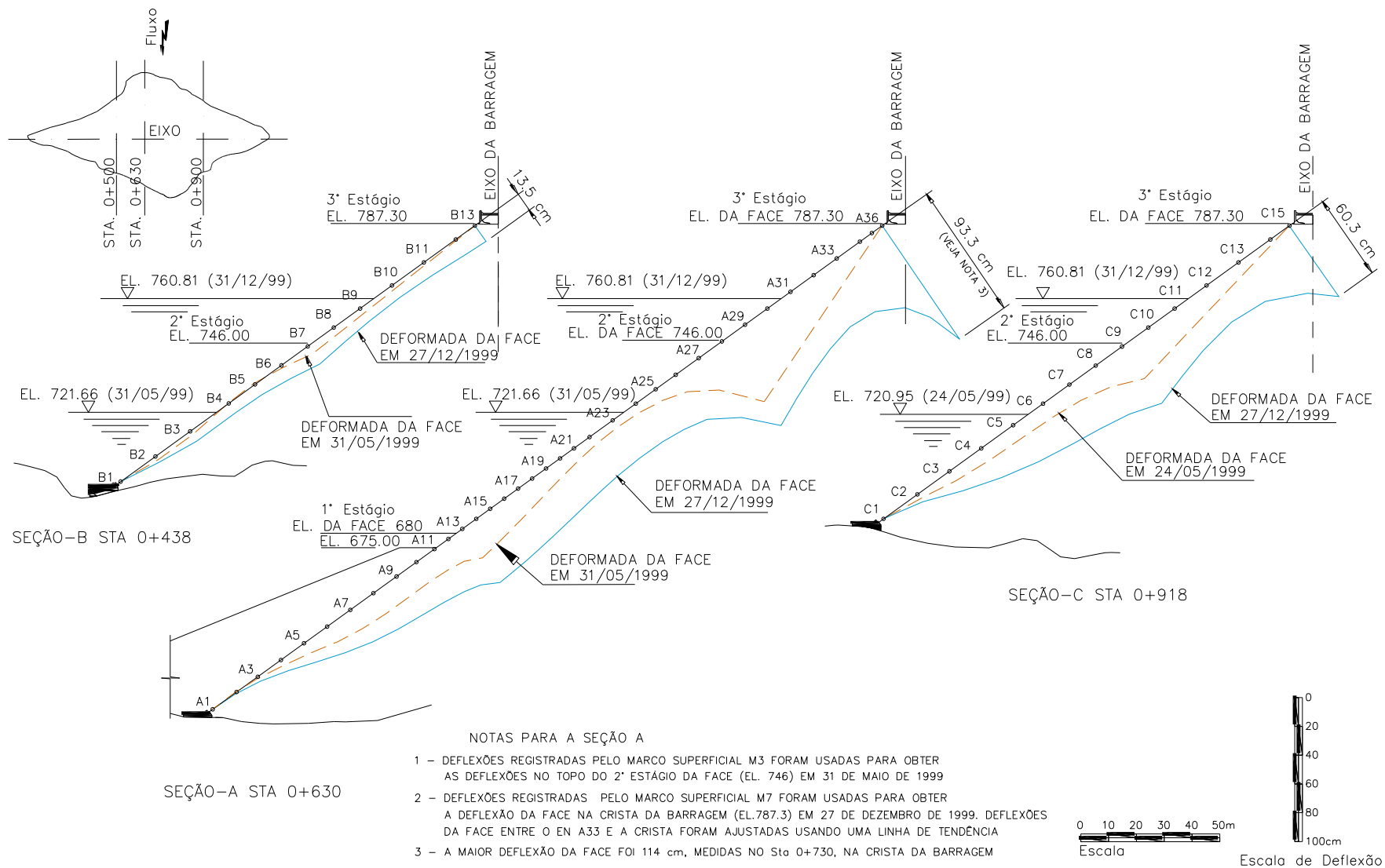


Figura 2.9 – Deflexões da face de concreto da Barragem de Tianshengqiao 1, em 1999, medida por eletrônives. (Penman & Rocha Filho, 2000)

Nota-se neste Capítulo que houve uma significativa evolução no que se refere ao refinamento das medidas das deflexões, em busca de medidas mais precisas através de instrumentos com maior acurácia e sofisticação. O Capítulo que se segue trata dos eletrônicos, abordando o seu princípio de funcionamento, montagem, calibração e interpretação das leituras.