

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Barragens de Enrocamento

2. REVISÃO SOBRE BARRAGENS DE ENROCAMENTO

2.1. Enrocamento

Ao longo dos anos, a definição de enrocamento sofreu alterações, devido ao acúmulo de experiência e de novas exigências construtivas. Como exemplo desta evolução, cita-se o fato de que, nas primeiras barragens construídas com esta técnica, o enrocamento era simplesmente lançado. Atualmente, os aterros de enrocamento são em geral compactados com rolos vibratórios, visando uma maior densidade e, em consequência, maiores valores de rigidez e resistência do maciço. A seguir, algumas definições clássicas são apresentadas em ordem cronológica.

Terzaghi e Peck (1967) classificaram o enrocamento como um material fragmentado, derivado de rocha sã com partículas pesando entre 13kg e 18t.

Enrocamentos são materiais que, quando submetidos a uma variação de tensões, sofrem transformações estruturais devidas a deslocamentos, rotação e quebra de partículas. Para ter em conta essas variações e sua influência nas características de deformação e resistência, é necessário estudar a distribuição das forças de contato e os fundamentos da quebra de partículas (Marsal, 1973).

Atualmente, a definição da granulometria de um enrocamento está ligada à espessura da camada lançada. O diâmetro máximo é função da espessura, variando de 75% até 100% da altura total da camada (Materon, 1983).

É importante ressaltar que a permeabilidade de uma camada de enrocamento compactado não deve ser inferior a 10^{-3} cm/s, de forma a garantir o não desenvolvimento de excessos de poropressões (Albuquerque Junior, 1993).

Barragens de Enrocamento

A deformabilidade dos enrocamentos varia com o nível de tensões aplicada, mas também com o tipo de rocha, distribuição granulométrica, forma dos blocos. Albuquerque Júnior (1993), com base em trabalho de Materon (1983) relaciona uma série de fatores que interferem direta ou indiretamente na compressibilidade de enrocamentos, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Fatores que influenciam características geomecânicas de enrocamentos
(Albuquerque Jr, 1993 – com modificações).

Fatores	Observações
Granulometria	Maior uniformidade aumenta a compressibilidade
Índice de Vazios	Maior densidade diminui a compressibilidade
Forma das partículas	Partículas angulares sofrem maior fraturamento
Molhagem	Água aumenta a compressibilidade
Resistência dos grãos	Menor fraturamento aumenta a resistência
Tamanho e textura	Tamanho maior causa mais fraturamento
Tipo de carregamento	Menor compressão sob deformação plana
Grau de alteração	Enrocamento alterado sofre mais fraturamento
Mineralogia	Afeta o coeficiente de atrito
Velocidade de carregamento	Não tem influência significativa.

Posteriormente, será abordada a relação da instrumentação com as medidas de deslocamento em barragens de enrocamento e sua influência na determinação do módulo de deformabilidade do material.

2.2. Barragens de Enrocamento

Construir barragens de enrocamento torna-se uma iniciativa atrativa em locais onde a quantidade de solos finos, apropriados para maciços impermeáveis, é insuficiente. A existência de grandes volumes de escavações obrigatórias em rocha e a necessidade de se garantir a conclusão da obra dentro de um cronograma que independa das condições de clima e precipitação também são motivos para a escolha deste tipo de barragem.

Barragens de Enrocamento

Segundo Davis e Sorensen (1974), um maciço de enrocamento foi utilizado pela primeira vez como elemento principal de uma barragem em Serra Nevada, Califórnia. Era o período de mineração do ouro, no século XIX. Naquela região havia rocha em abundância e os mineradores estavam habituados ao uso de explosivos. A associação destes e de outros fatores viabilizou a construção da primeira barragem de enrocamento.

Na primeira metade do século XX, várias barragens foram construídas com enrocamento, sendo que algumas apresentaram desempenho insatisfatório. Isto foi devido à ocorrência de vazões excessivas e de grandes deformações após o período de construção. Suspeitava-se que os problemas eram relacionados ao período de enchimento do reservatório, quando ocorria a lubrificação do contato entre blocos de rocha, e conseqüente redução de atrito. Terzaghi (1960) provou que a molhagem não influenciava a redução do ângulo de atrito, mas podia provocar perda de resistência dos blocos da rocha, ocasionando quebra dos grãos.

A partir desta descoberta, Terzaghi sugeriu a molhagem inicial dos maciços de enrocamento. Este procedimento acentuou o esmagamento dos grãos, devido ao enfraquecimento dos contatos dos blocos, diminuindo os recalques subseqüentes. O efeito da água depende sobretudo da mineralogia e do estado de alteração do material. Com estes estudos, ficou comprovado que a molhagem aumenta a compressão do maciço de enrocamento.

Com o advento de ensaios com amostras de grandes dimensões, já na década de 60, foi possível estudar mais profundamente o comportamento mecânico dos enrocamentos. Neste período, foi introduzida a técnica de compactação com vibração e molhagem, associada a melhoria do desempenho das barragens construídas com o material.

Como uma constatação do marcante avanço tecnológico, vale citar que, até o final do século XIX, havia apenas oito barragens de enrocamento construídas com mais de 30 metros de altura. Em 1940, já havia registros de barragens com altura variando entre 60 e 90 metros. Nos anos 50, foram construídas barragens com até 135 metros de altura.

Barragens de Enrocamento

Cooke (1984) propôs uma divisão histórica do desenvolvimento de barragens de enrocamento em três períodos.

O período inicial (1850-1940) é representado pela utilização de aterros constituídos de enrocamento lançado, sem densificação. Nesta fase, as barragens de enrocamento eram divididas em 3 partes estruturais fundamentais: corpo do enrocamento lançado, colchão de cascalho e face impermeável a montante, apoiada no colchão. A estrutura responsável pelo desempenho da barragem era o colchão de pedra arrumada manualmente, que possibilitava a distribuição de tensões na cortina. As fundações eram constituídas por uma parede diafragma a montante, conectada com a face impermeável. A junta de conexão possuía certa flexibilidade para suportar os recalques sofridos pela face sem causar fissuramento e infiltrações

As seções transversais dessas barragens eram bem diferentes das atuais. O colchão de pedras arrumadas, a parede diafragma e principalmente as inclinações dos paramentos de enrocamento lançado são mostrados na Figura 1. Pode-se estimar em 60° o ângulo de repouso do material lançado. As maiores mudanças ocorreram nos taludes de montante, de jusante e na espessura do muro de pedra arrumada.

O período de transição (1940-1965) é caracterizado por uma experimentação agressiva, através do emprego de técnicas inovadoras de projeto e construção. A eficiência do método de compactação do enrocamento ficou definitivamente comprovada neste período. O conceito de Barragem de Enrocamento mudou: até 1960 eram definidas como “Barragens compostas de blocos de rocha lançados ou compactados em camadas” (Cooke, 1960). Após 1965 a definição se transformou em: “Barragens compostas de blocos de rocha compactados em camadas de no máximo 2,0 metros de espessura” (Cooke, 1984).

No período recente, de 1965 até a presente data, vem crescendo o número de barragens de enrocamento de grandes alturas, situadas em locais de difícil acesso. Os projetos tornaram-se mais refinados, mesmo guardando certa padronização.

Barragens de Enrocamento

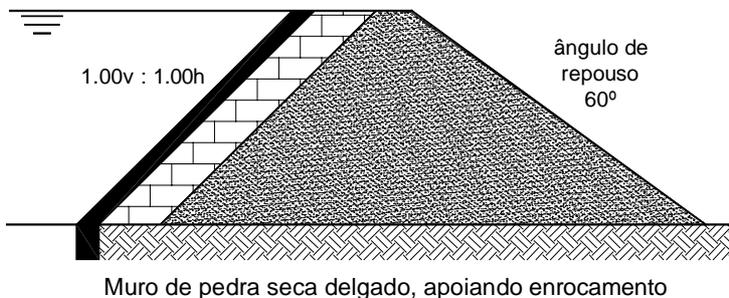
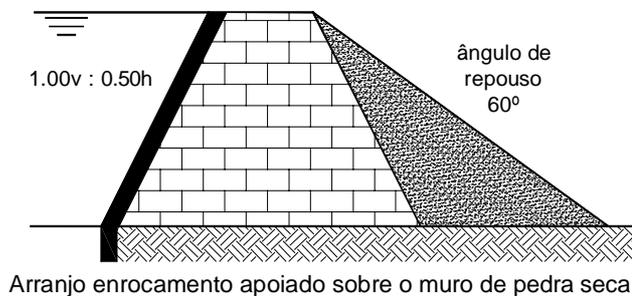
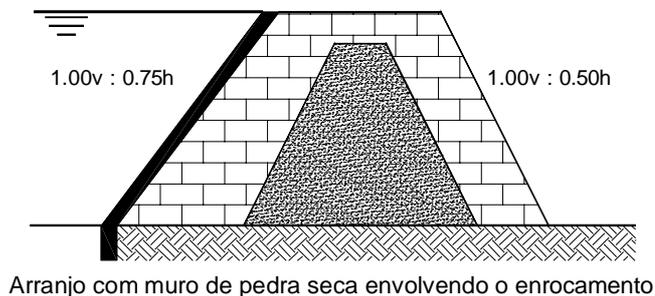


Figura 1 - Seções transversais das barragens de enrocamento no período inicial.

2.3. Seções Transversais Típicas

Barragens de enrocamento precisam sempre de um elemento de vedação, pois a permeabilidade do enrocamento é muito elevada. O elemento de vedação define o tipo de barragem, conforme a classificação a seguir:

Barragens de Enrocamento

2.3.1. Barragens de Enrocamento com vedação a montante (BEVM)

Caracterizada por um aterro constituído exclusivamente de enrocamento, onde o elemento impermeável situa-se na superfície do paramento de montante, conforme ilustrado na Figura 2. O elemento vedante pode ser constituído de concreto, aço, material sintético, madeira ou betume.

A principal preocupação no projeto de uma barragem com paramento a montante é tornar o enrocamento relativamente deformável, compatível com as lajes de concreto rígidas da face, para que as juntas sejam capazes de absorver as deformações do enrocamento sem provocar vazamentos (Pinto, 1991).

Dentre as BEVM, a seção típica mais conhecida que se enquadra nesta classificação é a barragem de enrocamento com face de concreto (BEFC). Segundo Cruz (1996), a solução mais promissora para as BEFC é a que apresenta enrocamento compactado com uma face “delgada” de placas de concreto armado, com juntas somente no sentido longitudinal (as juntas horizontais, quando existem, são apenas de caráter construtivo), apoiadas sobre uma face compactada de material granular “fino” (cascalho), por vezes tratado com emulsão asfáltica. Para as BEFC, em geral, o enrocamento é compactado em camadas de menor espessura no lado de montante do que no lado de jusante.

A conseqüência destas especificações construtivas é a de se construir um maciço de enrocamento, com permeabilidade crescente de montante para jusante. Dessa forma, sempre que houver vazamento nas lajes, o fluxo será facilmente absorvido pela seqüência de regiões de enrocamento com permeabilidade crescente.

As placas de concreto na base de uma barragem com face de concreto são interligadas ao plinto, por juntas especiais que permitem a rotação das placas. O plinto se apoia em rocha, que recebe tratamento igual ao usado para as fundações de estruturas de concreto. A rocha de fundação também precisa ser tratada para o controle de fluxo. O plinto se desenvolve em toda a borda inferior da face de concreto. A junta perimetral envolve uma seqüência de “linhas de defesa” contra a infiltração.

Barragens de Enrocamento

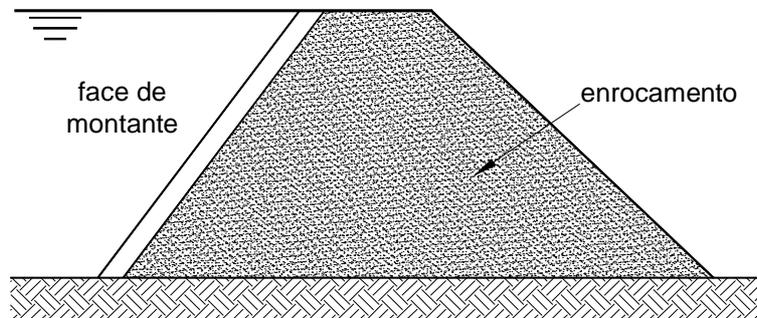


Figura 2 - Seção transversal esquemática de BEVM.

Em 1980 o Brasil alcançou o recorde mundial em altura de barragem com face de concreto (160 metros), após a conclusão da UHE Bento Munhoz da Rocha Netto, anteriormente denominada de Foz do Areia (COPEL), no Rio Iguaçu, estado do Paraná. A Figura 3 mostra detalhes da face de concreto desta barragem.

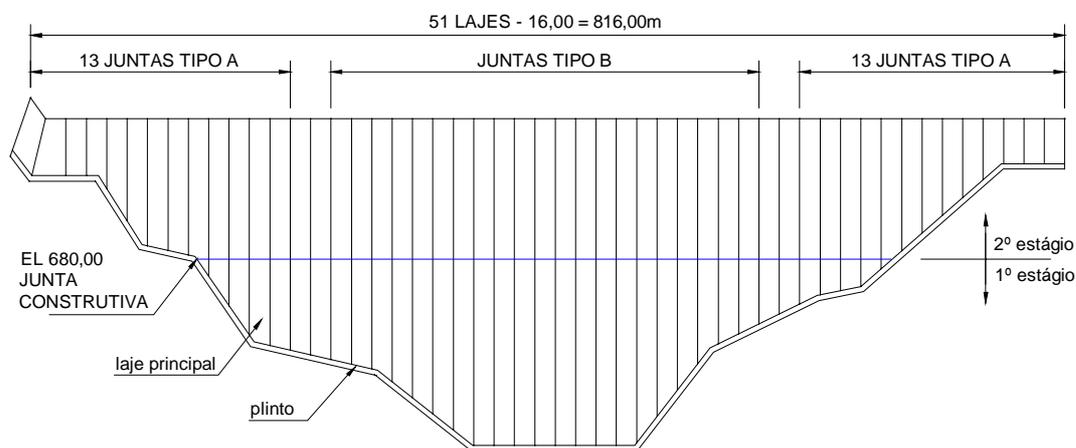


Figura 3 - Face de concreto da barragem de Foz do Areia (Cruz, 1996).

O emprego de rolos vibratórios pesados e a execução de camadas de lançamento mais delgadas são recomendados para a área de montante da barragem, com o objetivo de reduzir as deformações do enrocamento na fase construtiva e principalmente na fase de enchimento do reservatório.

Barragens de Enrocamento

Além disso, pode-se proceder a um zoneamento interno da barragem, procurando utilizar ao máximo as escavações de caráter obrigatório, sem prejuízo dos requisitos necessários ao controle das deformações e à garantia de uma elevada resistência ao cisalhamento.

Na área de jusante as camadas de lançamento podem ser ampliadas, mantendo-se o mesmo número de passadas do rolo vibratório. O emprego de água é recomendado para acelerar os recalques. Na Figura 4 estão indicados os procedimentos adotados na barragem de Foz do Areia. Na Tabela 2 descreve-se os materiais utilizados e o método executivo do enrocamento desta barragem.

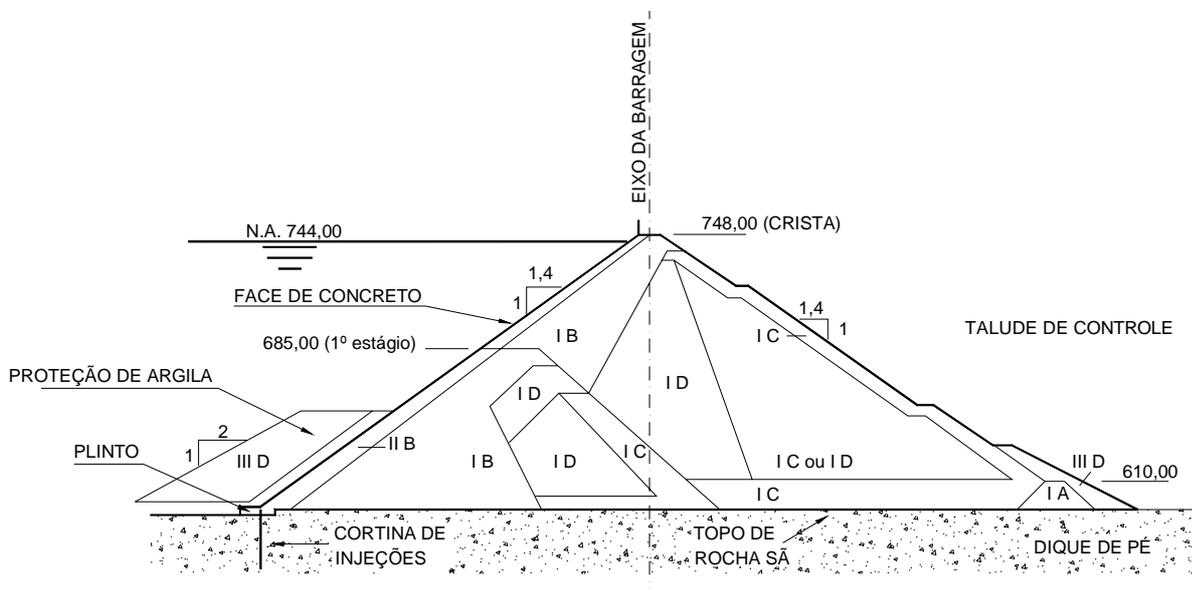


Figura 4 - Seção transversal típica da Barragem de Foz do Areia (Cruz, 1996).

Barragens de Enrocamento

Tabela 2 - Materiais da seção transversal da Barragem de Foz do Areia (Cruz, 1996).

MATERIAL	CLASSIFICAÇÃO	ZONA	MÉTODO EXECUTIVO	COMPACTAÇÃO
Enrocamento I	Basalto maciço	I A	Lançado	-
		I B	Compactado em camadas de 0,80m	4 passadas de rolo vibratório, w=25%
	Basalto maciço intercalado com brecha basáltica	I C	Compactado em camadas de 1,60m	4 passadas de rolo vibratório, w=25%
		I D	Compactado em camadas de 0,80m	4 passadas de rolo vibratório, w=25%
	Rocha selecionada	I E	Rocha lançada	-
Transição II	Brita de basalto são	II B	Bem graduada, compactada em camadas de 0,40m	Camadas: 4 passadas de rolo vibratório Face: 6 passadas de rolo vibratório
Aterro impermeável III	Solo impermeável	III D	Tamanho máximo $\frac{3}{4}$ ", compactado em camadas de 0,30m	Rolo pneumático ou equipamento de construção

2.3.2. Barragem de enrocamento com vedação central (BEVC)

O elemento de vedação é interno, geralmente de solo argiloso compactado. Este elemento também pode ser constituído de aço, concreto ou betume, conforme Figura 5.

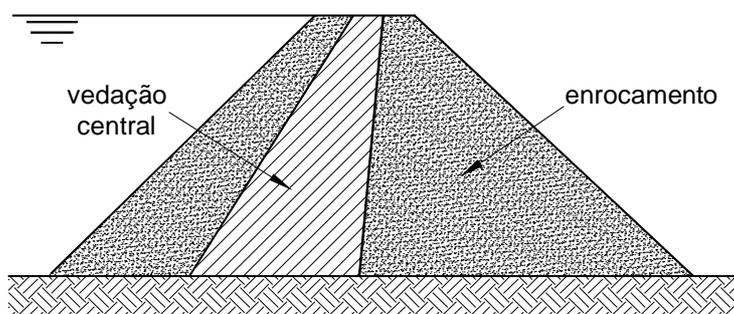


Figura 5 - Seção Transversal esquemática de BEVC.

Barragens de Enrocamento

A seção clássica que caracteriza esta técnica construtiva é a barragem de enrocamento com núcleo argiloso (BENA). Barragens deste tipo são construídas em locais onde as escavações fornecem grandes volumes de rocha e apresentam áreas de empréstimo de terra com volume suficiente para a construção de um núcleo impermeável, geralmente delgado.

Growdon (1960) cita que a primeira BEVC com núcleo inclinado construída no mundo foi a barragem de Nantahala, na Carolina do Norte, Estados Unidos, concluída em 1941. No Brasil a barragem Eng^o Francisco Saboya, de seção semelhante à Nantahala, foi concluída em 1958, sendo portanto a primeira barragem deste tipo construída no Brasil e uma das primeiras do mundo. A seção típica desta barragem é exibida na Figura 6. Outra peculiaridade desta barragem é a proximidade do núcleo central em relação à face de montante.

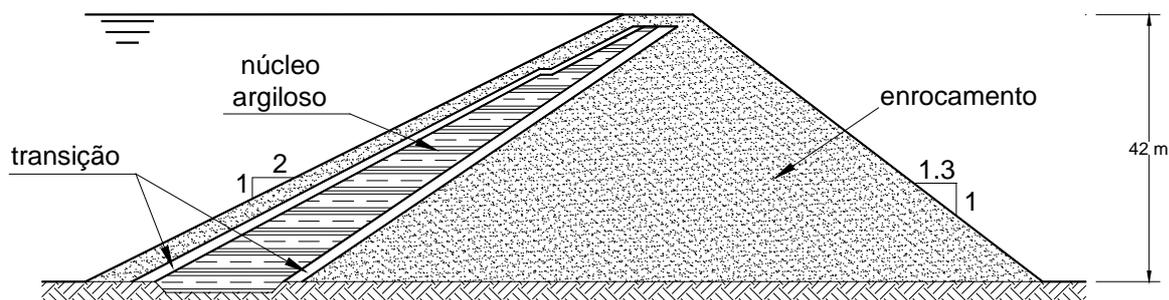
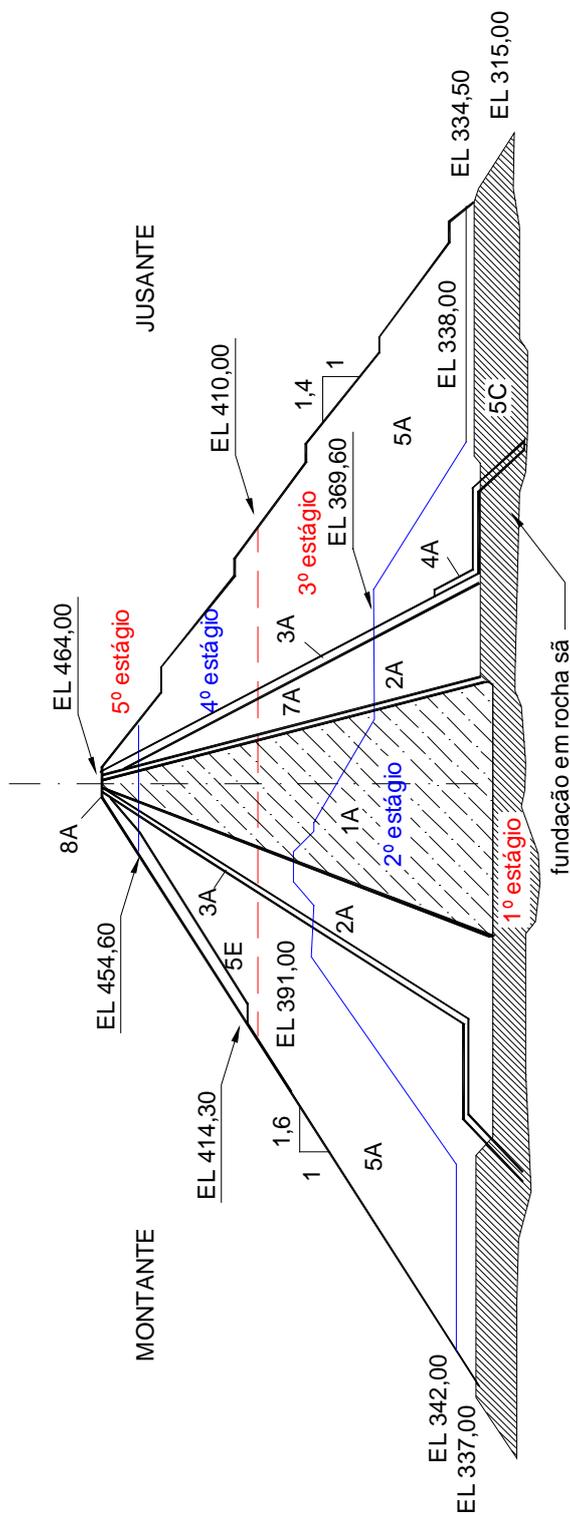


Figura 6 - Seção típica da Barragem Francisco Saboya, PE, Brasil.

Uma barragem com núcleo central impermeável, de grande importância no Brasil é a da UHE Serra da Mesa, parte integrante do aproveitamento Hidrelétrico de São Félix, no Rio Tocantins, Estado de Goiás, da qual se exhibe a seção típica na Figura 7.



Legenda

1A	Núcleo - material impermeável compactado
2A	transição fina compactada
3A	transição intermediária compactada
4A	transição graúda processada compactada
5A	enrocamento compactado
5C	enrocamento fino compactado
5E	enrocamento arrumado
7A	transição fina beneficiada
8A	acabamento da crista

Figura 7 - Seção transversal típica da Barragem de Serra da Mesa (Castro, 1996).

Barragens de Enrocamento

De acordo com Castro (1996), o núcleo impermeável de Serra da Mesa foi construído em cinco estágios. O primeiro com solo argiloso coluvionar, com grau de compactação de 99,0% e desvio de umidade de $-0,2\%$, ambos em termos médios e em relação ao proctor normal. A compactação neste período foi imposta através de 08 passadas de rolo pé-de-carneiro com pata tipo tamping e 17t de peso nos tambores. A espessura média da camada após a compactação foi de 12,0cm. Os demais estágios construídos utilizaram grau de compactação de 100% e desvio de umidade de 0,8% respectivamente. Para a compactação do núcleo foram utilizadas de 10 a 12 passadas do mesmo rolo compactador do primeiro estágio. A espessura média da camada compactada foi de 12,5cm.

Para os espaldares do enrocamento foram utilizados materiais das escavações obrigatórias, constituídos de rocha granito-gnáissica. A compactação do enrocamento foi realizada através de 6 passagens de rolo liso vibratório CA-35 Dynapac, com 8,3 t de peso estático sob o tambor. As camadas tiveram espessuras de 1,0m, tanto a jusante quanto a montante. Os parâmetros de resistência do enrocamento no projeto foram $c'=0$ e $\phi' \cong 48^\circ$ a 51° , em função da tensão confinante. O peso específico aparente adotado foi $21,6\text{kN/m}^3$.

2.4. Instrumentação de Barragens de Enrocamento

Cooke (1984) enfatiza que os projetos de barragens de enrocamento devem ser sempre fundamentados em experiências anteriores e na observação de obras já construídas e em operação. Isto significa que um dos tópicos mais importantes, no que se refere a barragens de enrocamento, diz respeito à instrumentação adequada da mesma.

A análise do comportamento de barragens de enrocamento em operação, com base na instrumentação, torna-se fundamental para um conhecimento mais abrangente deste material, uma vez que a simulação em laboratório das solicitações de campo em corpos de prova de grandes dimensões é extremamente difícil de ser realizada.

Um projeto de instrumentação em Barragens de Enrocamento com Face de Concreto (BEFC) objetiva em geral a medição dos deslocamentos verticais e

Barragens de Enrocamento

horizontais em pontos no interior e na periferia do maciço de enrocamento, conforme ilustra a Figura 8. Adicionalmente, são também considerados medidores de vazão e alguns instrumentos para medidas de temperatura. Não é necessário utilizar piezômetros, pois o maciço não gera excesso de poropressões (Oliveira e Sayão, 2004).

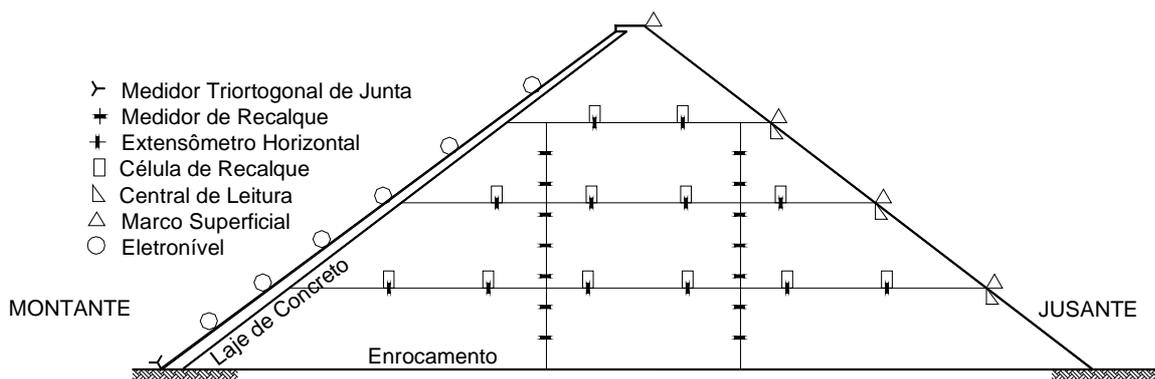


Figura 8 - Esquema de uma seção instrumentada de BEFC (Oliveira e Sayão, 2004).

Para este modelo de projeto, os deslocamentos observados na barragem dependem da sua altura e do valor do módulo de deformabilidade do enrocamento. A carga é o resultado do peso da barragem e da pressão hidráulica na face. O recalque resultante deve-se essencialmente à ruptura dos blocos de rocha nos seus pontos de contato e à acomodação de suas partículas. A intensidade do recalque é relativamente elevada imediatamente após a aplicação da carga, reduzindo-se gradualmente com o tempo. Recalques totais podem ser assumidos como proporcionais ao quadrado da altura da barragem e inversamente proporcionais ao módulo de deformabilidade. Quanto maior o módulo, melhor graduada e são a rocha, e menor o índice de vazios resultante do aterro compactado.

Nas Barragens de Enrocamento com Núcleo Argiloso (BENA) são também utilizados medidores de deslocamento, tanto no núcleo quanto nas abas de enrocamento, como indicado na Figura 9. Neste tipo de barragem, é altamente recomendável a instalação de medidores de poropressão (piezômetros) em pontos do núcleo e da fundação. Além destes, são ainda consideradas as células de tensão total e os medidores de vazão (Oliveira e Sayão, 2004).

Barragens de Enrocamento

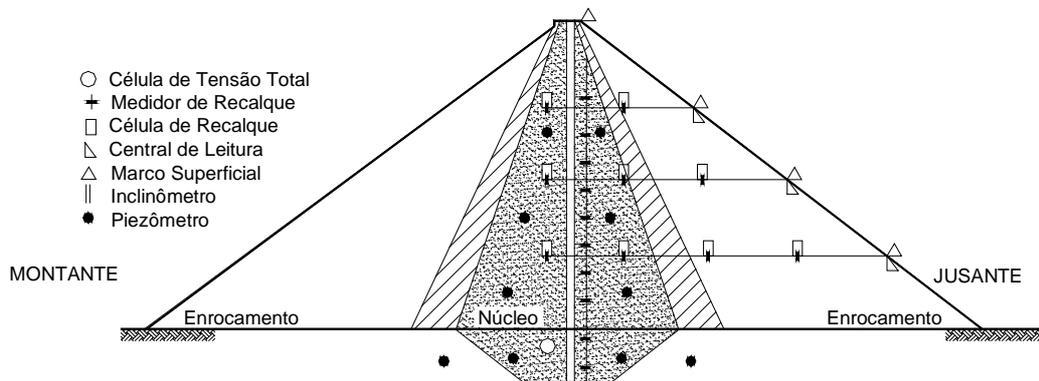


Figura 9 - Esquema de uma seção instrumentada de BENA (Oliveira e Sayão, 2004).

2.5. Compressibilidade de Enrocamentos

Dados obtidos de instrumentação de barragens, durante o período de alteamento, indicam valores do módulo de deformabilidade vertical variando de 27 a 128 MPa, em função de características tais como a natureza da matriz rochosa, a granulometria do enrocamento, a espessura das camadas, o grau de compactação (Cooke, 1990). Foram ainda observados valores em torno de 15 MPa para o enrocamento de Foz do Areia (Pinto et al., 1982).

Cooke (1984) cita que o módulo de deformabilidade de enrocamentos é usado como base para avaliação do comportamento de barragens constituídas por este material. Usando o valor de 22,3kN/m³ como correspondente à densidade média do enrocamento da barragem de Shiroro (Nigéria), Bodtman e Wyatt (1985) estimaram o módulo secante de deformabilidade, através da formulação empírica:

$$E(\text{MPa}) = \frac{22,26 \cdot (9,806) \cdot h}{1000 \cdot \left(\frac{S}{d}\right)} = 0,0218 \cdot \frac{hd}{S} \quad (1)$$

onde:

E é o módulo de deformabilidade, em kPa;

h é a altura de material disposto acima de um determinado nível do aterro, em metros;

d é a profundidade de material abaixo do nível considerado, em metros;

S é o valor do recalque medido, em metros.

Barragens de Enrocamento

Deve-se notar que o valor de S da equação (1) é obtido através da instrumentação de campo, comprovando a importância da instrumentação na definição dos parâmetros geotécnicos do enrocamento.

Os valores de E obtidos a partir das leituras logo após o início do enchimento do reservatório variaram de 55 a 103 MPa. Os menores valores foram, em geral, obtidos nos níveis mais baixos do aterro, contradizendo a expectativa natural de que o módulo de enrocamento compactado aumentaria com o confinamento. Entretanto convém notar que uma tendência de comportamento similar ao encontrado no material da barragem de Shiroro foi previsto por FUMAGALLI (1969), a partir de ensaios com o modelo reduzido de uma barragem de enrocamento, construída em um vale de forma trapezoidal.

Pinto et al. (1982) atribuem o valor baixo do módulo de deformabilidade da barragem de Foz do Areia à granulometria desfavorável, mais uniforme, do enrocamento, em comparação à do material das barragens de Cethana (Tasmania, 110 m de altura) e Alto Anchicaya (Colombia, 140 m de altura). Além disso, a barragem de Foz do Areia está assentada em um vale aberto. A forma do vale pode influenciar de maneira considerável o módulo de deformabilidade de um enrocamento compactado, devido à redistribuição de carga por arqueamento para as ombreiras, nas seções próximas a essas extremidades.

2.6. Instrumentação da Barragem de Foz do Areia

A deformação interna do enrocamento de Foz do Areia, estudada por Marques Filho et al. (1985), foi monitorada através de células hidrostáticas de recalque, denominadas como “Caixas Suecas”. Foram instrumentadas duas seções (13+20,00 e 14+20,00), que forneceram resultados semelhantes. A Figura 10 apresenta a configuração da instrumentação na seção 13+20,00 m.

A distribuição das células hidrostáticas foi planejada para atender aos dois estágios da construção do enrocamento. Outras células foram locadas sob a mesma vertical, para definir o módulo de compressibilidade das camadas entre as células. Em alguns pontos de medição foram instaladas duas células adjacentes para efetuar a conferência das leituras.

Barragens de Enrocamento

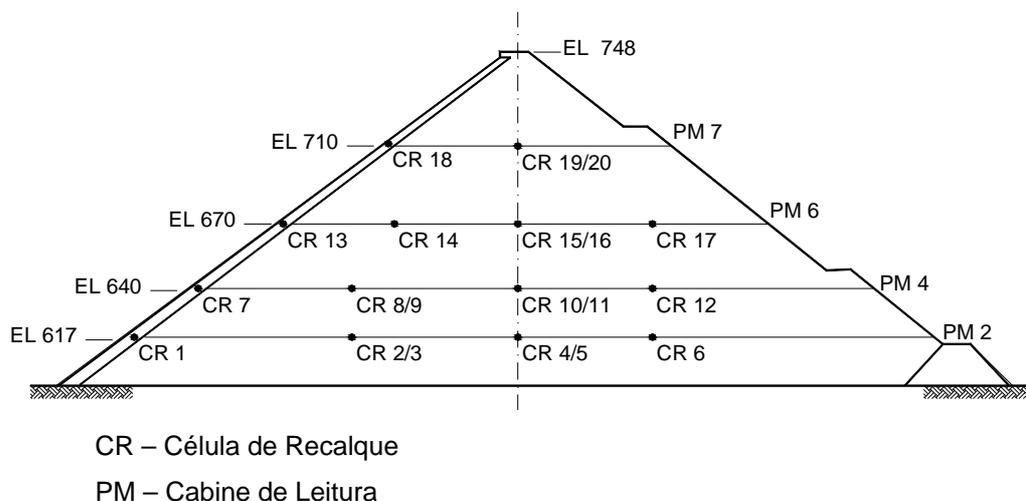


Figura 10 - Localização das células de recalque na seção 13+20,00 da Barragem de Foz do Areia (Marques Filho et al., 1985).

Recalques, curvas tensão-deformação, módulo de compressibilidade e outros parâmetros representativos foram analisados em diferentes estágios da evolução da barragem.

Nestes cálculos, o efeito da posição relativa de cada célula foi corrigido, possibilitando a determinação de tensões verticais utilizando-se dos coeficientes fornecidos por Poulos e Davis, (1973), admitindo-se comportamento homogêneo e elástico do enrocamento.

Tanto o recalque total (considerando a espessura total da camada de enrocamento) quanto o recalque das camadas entre as células (considerando deslocamentos verticais das camadas entre duas células superpostas) foram analisados.

Para o recalque das camadas entre células, os valores representativos foram computados considerando forças verticais aplicadas no ponto médio da espessura da camada, segundo recomendações de Mello (1979). O padrão de recalque observado no final da construção é mostrado na Figura 11.

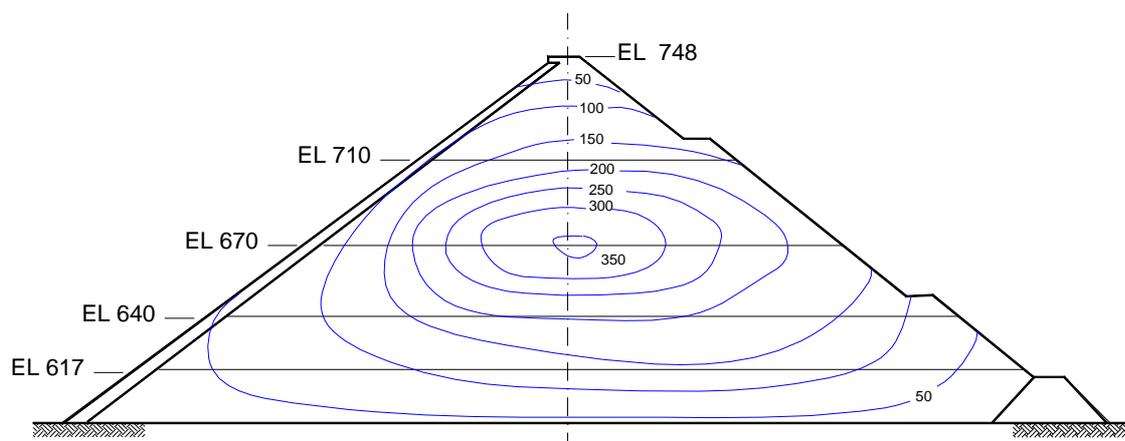


Figura 11 - Curvas de recalque equivalente (em centímetros), antes do enchimento
(Marques Filho et al., 1985).

O valor máximo de 358,0 cm, medido no centro do aterro, comparado aos 45,0 cm da barragem de Cethana e aos 63,0 cm da barragem de Alto Anchicaya, fornece uma boa referência da grande deformabilidade do enrocamento de Foz do Areia.

A Figura 12 mostra o módulo secante para o período final de construção. Os valores são uma média dos resultados nas duas seções instrumentadas. Tanto os módulos referentes aos recalques totais quanto os referentes ao recalque entre células estão representados. A tendência predominante é de um padrão irregular de valores maiores nas células centrais e inferiores, e valores menores nas células exteriores e superiores. Este comportamento refere-se à melhor compactação do enrocamento na metade superior da barragem.

Curvas tensão-deformação para um número limitado de células, considerado representativo dos vários tipos de enrocamento, são mostradas nas Figuras 13 e 14. As curvas foram traçadas por interpolação gráfica, pois os gráficos originais traçados por computador tornaram-se irregulares, devido ao complexo esquema de construção da barragem.

Barragens de Enrocamento

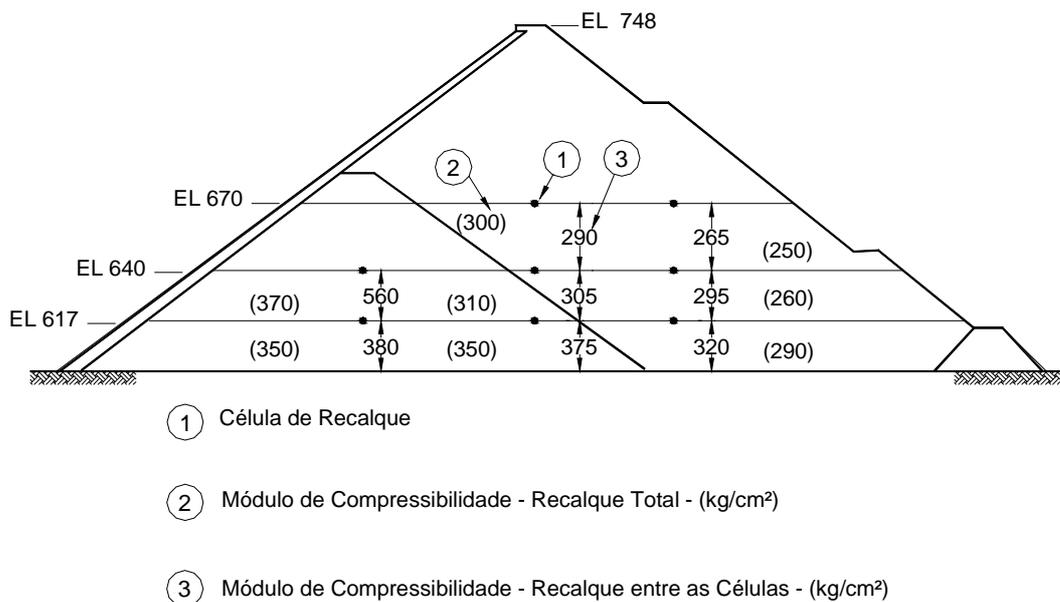


Figura 12 - Módulo de compressibilidade antes do enchimento do reservatório (Marques Filho et al., 1985).

Estes resultados confirmam as propriedades tensão-deformação não-lineares dos materiais de enrocamento, mais evidente para células externas e um pouco menor para células locadas no eixo da barragem. Para o módulo secante o comportamento é semelhante, com as células centrais e inferiores repetindo a tendência de valores maiores.

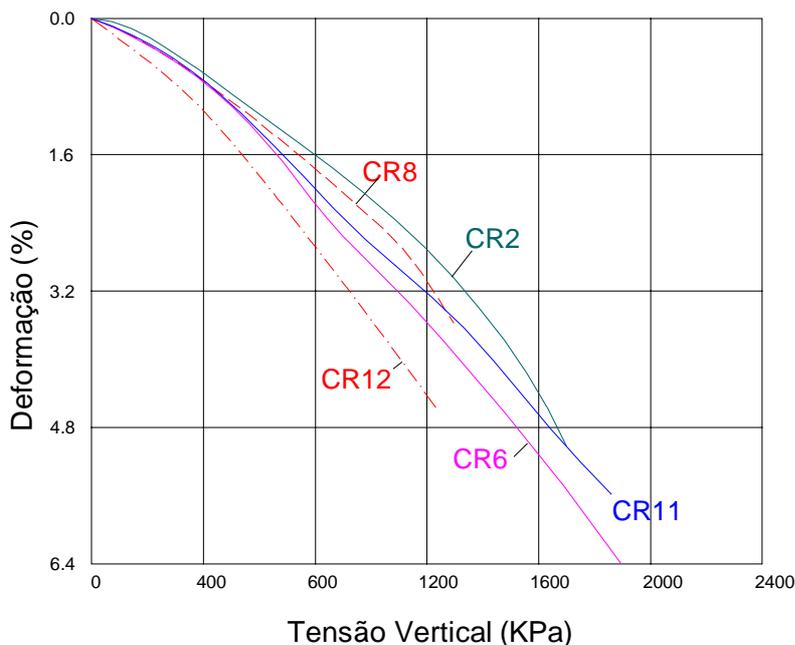


Figura 13 - Recalques totais - Curvas tensão x deformação para o período de construção (Marques Filho et al., 1985).

Barragens de Enrocamento

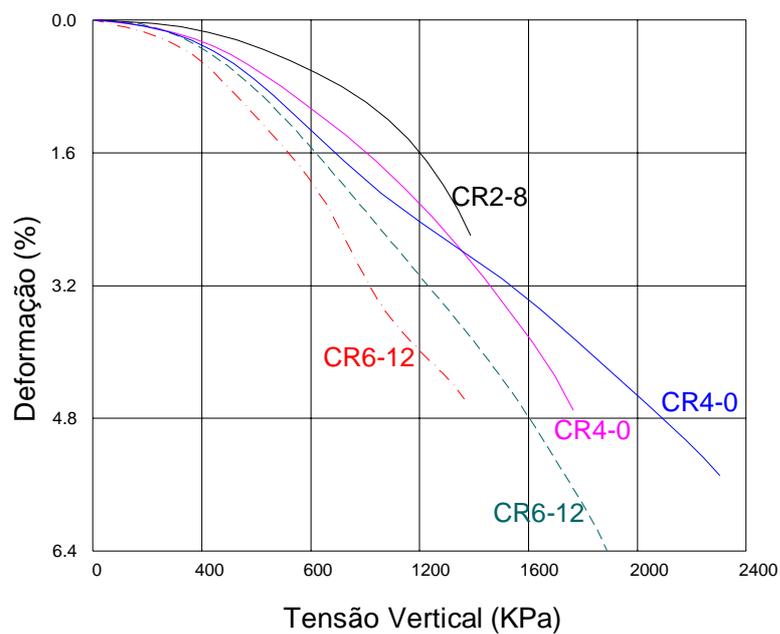


Figura 14 - Recalques entre células - Curvas tensão x deformação para o período de construção (Marques Filho et al., 1985).