

Curso sobre Utilização do Guia de Revisão Periódica de Segurança de Barragem e de Diretrizes para Elaboração de Projetos de Barragens

Manual do Empreendedor sobre de Segurança de Barragens - Volumes III e V
04 a 06 de abril de 2017 – Rio de Janeiro (RJ)

MÓDULO 2

Barragens de Aterro - Terra e Enrocamento

Professor Ricardo Aguiar Magalhães

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

4.1 ASPECTOS GERAIS DO PROJETO

As barragens de aterro são estruturas essencialmente **constituídas por materiais naturais ou processados**, podendo ter diferentes tipos, de acordo com os fatores condicionantes locais, em seguida indicados.

Um fator importante são as características dos **materiais disponíveis**. Em princípio, todos os materiais disponíveis devem ser considerados como potencialmente utilizáveis na seção da barragem, prevendo-se no projeto um **adequado zoneamento**.

Os materiais **provenientes de escavações** com possibilidade de aplicação na barragem são, em geral, os **mais econômicos**, devendo, portanto, ser os primeiros a se considerar.

Na utilização de **materiais de empréstimo**, devem ter preferência os que estão localizados mais **próximos da barragem e na área do reservatório**, mas considerando também a posição das jazidas, a etapa de exploração e a cota em relação a da barragem.

Dada a influência, **preponderante no custo, da declividade dos taludes**, os materiais que possibilitam **taludes mais íngremes podem ser os mais indicados**, mesmo em confronto com outros situados em posição mais próxima da barragem ou extraídos de escavação obrigatória.

As **condições climáticas do local devem ser levadas em consideração na escolha das seções** das barragens, uma vez que, em regiões de chuvas intensas ou de chuvas muito prolongadas, a **produtividade** cai, e o número menor de dias trabalháveis pode exigir maior intensidade de **uso de equipamento**, tornando mais alto o **custo unitário de aterro compactado**. Nesses casos, os materiais que não exijam tempo seco para lançamento devem ser considerados, por serem mais competitivos em custo.

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

Materiais excessivamente úmidos ou secos podem exigir correção de umidade, o que poderá colocá-los em desvantagem econômica e de prazos de execução na comparação com outros materiais alternativos. Dificuldades maiores de escavação e transporte também devem ser levadas em consideração nesta comparação.

O tempo requerido para a construção deve ser levado em consideração, de acordo com os vários aspectos das etapas de construção, reaproveitamento de materiais e necessidade de estoques intermediários. Essa comparação deve ser feita mediante o desenvolvimento de um estudo completo de arranjo geral, sequência construtiva, prazo de construção, balanço de materiais, desembolso, vantagens financeiras de antecipações, de redução de prazos e/ou adiantamento de desembolsos. A comparação de custos globais deve indicar o cronograma e metodologia executiva mais vantajosa.

As características hidrológicas do local e o esquema de desvio do rio são fatores importantes na seleção do tipo da barragem, técnica e economicamente mais vantajosa, devendo ter-se presente que para certos tipos de barragens, (como, de um modo geral, as barragens em concreto) pode aceitar-se um maior risco e, portanto, esquemas de desvio mais econômicos.

A etapa de construção da barragem, associada ao problema da travessia do rio, pode tornar mais caro o reaproveitamento de materiais de escavação, pela necessidade de pilhas de estoque intermediárias. Assim, o esquema de desvio deve levar em consideração a possibilidade de aplicação direta dos materiais e, eventualmente, deve ser adaptado à obtenção de uma barragem mais econômica. Reciprocamente, a seleção da seção transversal da barragem deve levar em consideração as condicionantes de etapas de construção introduzidas pelo esquema de desvio.

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

As **características geológicas e topográficas da fundação** são, também, **importantes fatores da economia** das seções da barragem, principalmente porque as características de resistência da fundação podem condicionar a declividade dos taludes da barragem (a utilização de taludes mais íngremes, possibilitada pelos enrocamentos, exige melhores características de resistência dos materiais de fundação). A deformabilidade e permeabilidade da fundação podem igualmente influenciar a seleção do tipo de barragem (barragens de seção homogênea impõem menor grau de exigência).

Os aspectos topográficos podem apontar para tipos de barragens que se adaptam melhor à existência de grandes heterogeneidades de fundação.

O tipo de barragem a selecionar deve **integrar-se adequadamente no arranjo geral da obra, minimizando as interligações entre as diversas estruturas**, maximizando o aproveitamento das estruturas para as diversas finalidades da obra e **minimizando os volumes de escavações dos circuitos hidráulicos**.

Um aspecto que deve ter **particular atenção** nas barragens de aterro prende-se **à interligação dos aterros com as restantes estruturas de concreto e, em particular, com aquelas que atravessam os aterros**, tais como os condutos de tomadas de água.

Na verdade, muitas barragens construídas no Brasil dispõem de tomadas de água munidas de uma grelha a montante e comporta a jusante e, deste modo, o **conduto está sempre em carga**. Essa situação **deve ser evitada, por ser potencialmente geradora de problemas de erosão interna**.

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

4.2 TIPOS DE ESTRUTURAS

As barragens de aterro podem classificar-se nos seguintes **três tipos principais**:

- Terra, com seção **homogênea ou mista**;
- Terra-enrocamento, **com uma vedação (ou núcleo)** de solo e espaldares de enrocamento situados a montante e a jusante do núcleo;
- Enrocamento, com órgão de **vedação no talude de montante** (face de concreto).

BARRAGEM DE SEÇÃO HOMOGÊNEA OU MISTA

A utilização de barragens de **seção homogênea** é, em geral, menos frequente, face à indisponibilidade de solos com características relativamente homogêneas. Nas barragens de **seção mista**, aproveitam-se os materiais mais permeáveis para os espaldares, devidamente protegidos contra o efeito de erosões superficiais, e utilizam-se os menos permeáveis na zona central. O **zoneamento** dos materiais é definido de acordo com as suas características tecnológicas, a sua sequência e época de escavação e de aproveitamento.

Barragens de Aterro Terra e Enrocamento

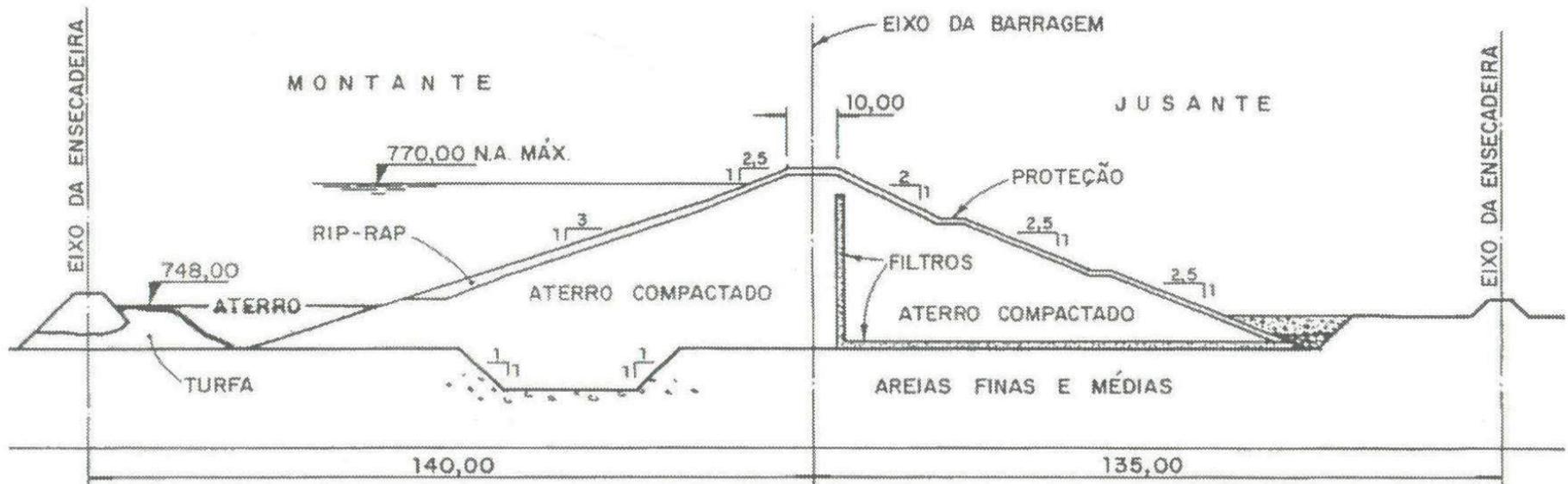


Figura 10. Seção típica de uma barragem de terra homogênea. Barragem de Ponte Nova, SP.

Fonte: Cruz, 2004

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

Deve sempre prever-se um sistema de drenagem interna, constituído por um filtro subvertical ou inclinado (ou dreno chaminé), tapete drenante junto à fundação e dreno de pé de jusante.

O filtro subvertical intercepta a percolação através da barragem, sendo a água a ele afluenta conduzida para jusante, através do tapete drenante. Assim, desde que ambos os dispositivos sejam **adequadamente dimensionados, respeitando condições de filtro entre materiais, e tenham capacidade de escoamento suficiente, o espaldar a jusante do filtro subvertical permanecerá não saturado, e a erosão interna do seu material fica controlada.**

O filtro subvertical é de construção fácil, mas como normalmente é mais rígido do que os materiais adjacentes, pode verificar-se transferência de tensões entre materiais de diferente deformabilidade, o que aconselha frequentemente a adoção de filtros inclinados. Essa adoção de filtros subverticais em vez de verticais constitui a tendência internacional dos últimos anos.

Quando for pertinente controlar gradientes hidráulicos de saída a jusante da barragem e de reduzir as subpressões, podem ser adotadas na fundação trincheiras drenantes ou poços de alívio espaçados regularmente.

Quando colocado **diretamente sobre a fundação, o tapete drenante intercepta também a água que circula através dela, controlando, deste modo, as poropressões na zona superficial da fundação e evitando a instalação de pressões no aterro.** A camada inferior do tapete deve funcionar como filtro do material de fundação, controlando também a erosão interna da zona superficial da fundação.

A adoção desta camada filtrante é **particularmente importante para barragens com espaldares de jusante construídos com solos permeáveis** (por exemplo, solos arenosos ou com pedregulhos), **fundações em rochas alteradas ou fissuradas de elevada permeabilidade com potencial de erosão elevado ou fundações em rochas brandas** (arenitos e siltitos).

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

Os drenos de pé de jusante asseguram a continuidade ao tapete drenante e constituem uma segurança adicional, face à eventual colmatação do filtro ou do tapete drenante, ou mesmo, a grandes e inesperados fluxos provenientes da fundação.

Em casos muito favoráveis do ponto de vista das ações e de menor responsabilidade, com exceção dos diques de selas, mesmo que de pequena altura, podem ser dispensados os filtros subverticais e/ou sub-horizontal contínuos, substituído(s) por um sistema de drenos de pé e de fundação, desde que não haja suspeita de erosão interna.

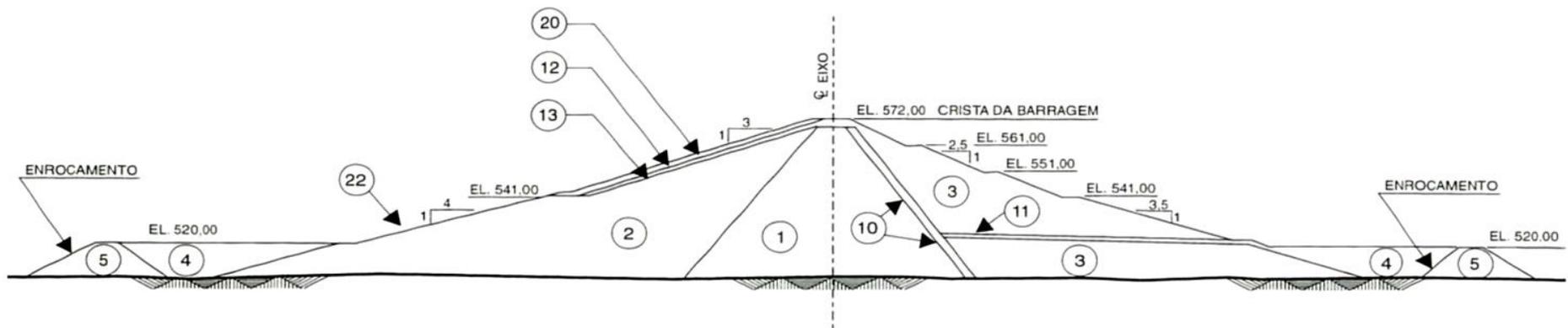
A necessidade de introdução de juntas de construção nos aterros deve ser determinada, em função do planejamento da obra, devendo adotar-se o menor número de juntas que permita distribuir os volumes lançados de modo a se obter um histograma mais homogêneo de produção, o que permitirá a mobilização de um menor número de equipamentos.

A largura da crista é definida em função de diversos aspectos, tais como, a altura e importância da obra, o risco sísmico do local, a natureza dos materiais a empregar, a configuração da linha de saturação com o reservatório cheio, o processo construtivo e, se a crista for utilizada como acesso, a largura mínima necessária para o tráfego de veículos (nos dois sentidos).

A inclinação dos taludes é definida de acordo com as principais ações e com as características tecnológicas dos materiais, quer dos aterros, quer das fundações.

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento



- | | |
|-------------------------|--------------------------------|
| 1 - Argila $h > h_{ot}$ | 10 - Dreno inclinado - 2,00 m |
| 2 - Argila $h < h_{ot}$ | 11 - Dreno horizontal - 1,5 m |
| 3 - Vários materiais | 12 - Transição grossa - 0,40 m |
| 4 - Berma | 13 - Transição fina - 0,30 m |
| 5 - Ensecadeira | 20 - Rip-rap |
| | 22 - Sobra de pedreira |

Figura 11. Seção típica de uma barragem de terra zonada. Barragem de Três Marias, MG – seção no leito do rio.

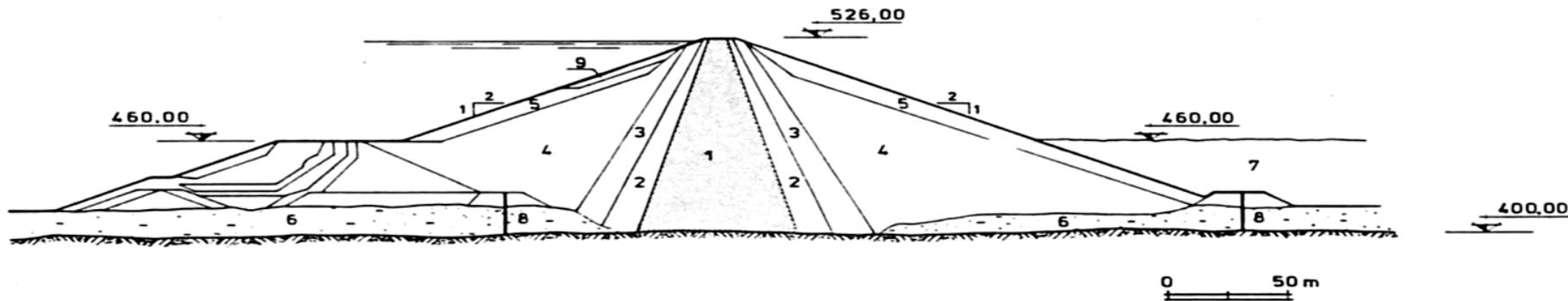
Fonte: Cruz, 2004

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

BARRAGEM DE TERRA-ENROCAMENTO

Nas barragens mistas de terra-enrocamento, os **taludes podem ser mais íngremes** do que nas barragens de terra, o que permite **reduzir consideravelmente o volume** da barragem, podendo essas soluções ser adotadas, sempre que exista disponibilidade de enrocamento, proveniente de escavações obrigatórias ou de jazidas próximas da obra, e as fundações sejam de boa resistência.



- | | | |
|----------------------------|---|--------------|
| ① - NÚCLEO ARGILOSO | ⑤ - ENROCAMENTO LANÇADO | ⑨ - "RIPRAP" |
| ② - FILTRO | ⑥ - ALUVIÃO | |
| ③ - TRANSIÇÃO | ⑦ - MATERIAL REJEITADO DOS DESMONTES A FOGO | |
| ④ - ENROCAMENTO (ALTERADO) | ⑧ - PAREDE CORTA-ÁGUAS | |

Figura 12. Seção típica de uma barragem de terra – enrocamento.

Fonte: Maranhã das Neves, 1991

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

A **disposição dos diversos materiais na seção** deve ser feita de modo a concorrer para uma melhor **compatibilização de deformações** entre a vedação (ou núcleo), as transições e enrocamento dos espaldares.

A **vedação central ou núcleo** nessas barragens, em geral semelhante à das barragens de seção homogênea ou mistas, **pode, portanto, ser constituída por materiais mais permeáveis, como areias siltosas ou rochas alteradas compactadas, desde que a permeabilidade e o consequente fluxo resultante seja aceitável.** A **rocha do enrocamento dos espaldares de montante e de jusante deve ser resistente e durável** (não deve alterar-se, devido às ações meteorológicas e químicas da água de percolação e agentes atmosféricos).

A **largura mínima do núcleo impermeável deve ser da ordem de 30% da carga hidráulica do reservatório, e maior ou igual a 3 m no topo da barragem, por razões construtivas.**

Para controlar a erosão interna, as barragens devem dispor de um sistema drenante, incluindo filtros, drenos e transições subverticais ou inclinadas.

Desde que o enrocamento seja suficientemente permeável, a água percola, através da vedação de solo, e atinge rapidamente a zona do espaldar de jusante, junto à fundação, mantendo-se a restante zona, por isso, praticamente seca. **As poropressões no núcleo são dependentes da razão entre a permeabilidade horizontal e vertical do seu material constituinte, mas como essa zona é suportada pelos espaldares de enrocamento, a estabilidade não é particularmente sensível a essas poropressões.**

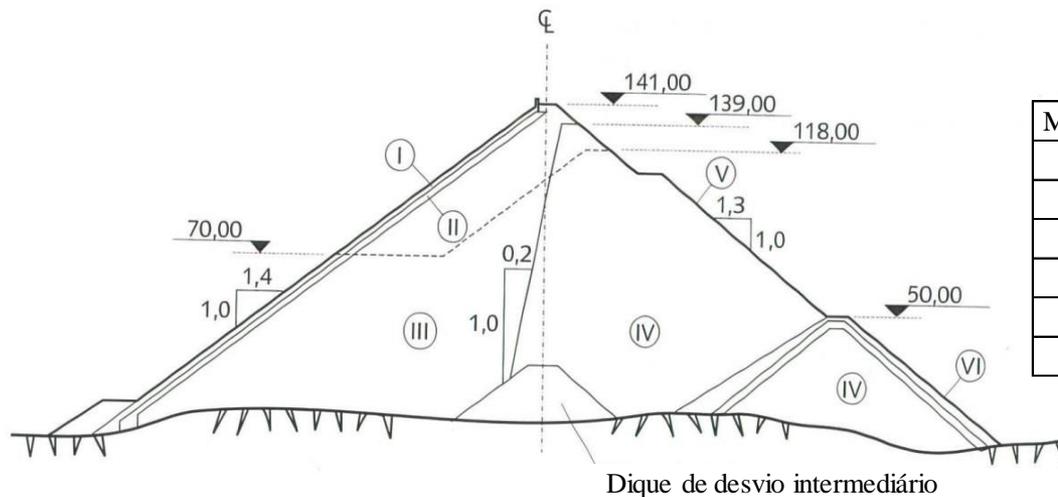
As barragens desse tipo **são particularmente adequadas para obras de grande altura** (para obras de altura inferior a 20 m, esta solução envolve dificuldades de construção, devido ao reduzido espaço disponível).

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

BARRAGENS DE ENROCAMENTO COM FACE DE CONCRETO A MONTANTE

Essas barragens apresentam **vantagens de custo para vales relativamente encaixados, com boas fundações, em regiões de grande pluviosidade e, principalmente, no caso das escavações requeridas para as estruturas de concreto produzirem o volume de enrocamento necessário** para a execução da barragem. Outras circunstâncias favoráveis a esse tipo de barragem são a **ausência, escassez ou localização muito distante da barragem, de solos argilosos** com características adequadas para execução de um núcleo.



Material	Descrição	Zona
I	Transição de rocha e saprolito com finos	2B
II	Transição grossa, enrocamento fino $D_{m\acute{a}x}$ 0,40 m	3A
III	Enrocamento são, $D_{m\acute{a}x}$ 1,00 m	3B
IV	Enrocamento de jusante	3C
V	Enrocamento de proteção do talude	4
VI	Proteção do CCR	-

Figura 13. Seção típica de uma barragem de enrocamento com face de concreto. Barragem de Xingo, SE/AL.

Fonte: Cruz et al., 2009

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

O plinto ou laje cut-off que, em conjunto com a laje do paramento de montante, são responsáveis pelo barramento da água, são elementos muito importantes dessas estruturas.

O plinto é normalmente fundado em rocha sã, não erodível, o que permite sua consolidação e seu tratamento à base de injeções. Todavia, a experiência tem mostrado que é possível fundar o plinto em maciço de qualidade inferior, quando se adotam medidas preventivas que protejam a fundação de erosões, revestindo as zonas potencialmente erodíveis com filtros, gunita ou concreto projetado (CRUZ et al., 2009).

O volume dos enrocamentos, a eventual redução das obras de desvio, os elementos de vedação e uma eventual redução do tempo de construção, são fatores a considerar na comparação entre barragens de enrocamento com núcleo e com face de concreto.

A qualidade do enrocamento depende de vários fatores, tais como, da qualidade da rocha, da granulometria do enrocamento e do método de compactação (**recomendando-se, portanto, a utilização de rochas sãs e resistentes e de processos de construção que forneçam enrocamentos bem graduados e compactados**). A definição da espessura das camadas de enrocamento a compactar deve considerar a dimensão máxima dos blocos a colocar na camada.

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

4.3 Estudos dos materiais

4.3.1 Considerações gerais

Sendo as barragens estruturas destinadas “à contenção ou acumulação de substâncias líquidas ou de misturas de líquidos e sólidos” (Lei Nº 12334/2010), os **projetos devem assegurar o controle de fluxo, a estabilidade e a compatibilidade das deformações** (CRUZ, 2004).

O **controle de fluxo deve ser realizado com a inclusão de sistemas de vedação na barragem e na fundação, no eixo e a montante do eixo, e de sistemas de drenagem na barragem e na fundação, a jusante**. As zonas externas ou espaldares da barragem devem ser **compatíveis com os maciços de fundação e ter características que garantam a estabilidade dos taludes para as várias condições de carregamento**. A compressibilidade dos materiais da barragem e da fundação deve ser compatibilizada **ou devem ser adicionadas zonas de transição, a fim de reduzir os recalques diferenciais e totais** que venham a prejudicar o desempenho dos sistemas de vedação e de drenagem, seja pela **ocorrência de trincas, causadas por recalques diferenciais, seja pela inversão dos gradientes de fluxo nos sistemas de drenagem, devido a recalques totais excessivos**.

Os materiais usados no corpo das barragens de aterro são, principalmente, solos, enrocamentos e misturas de solo e de enrocamento, mas são também utilizados, em alguns tipos de barragem outros materiais, tais como concreto, solo-cimento, aço, concreto betuminoso, geomembranas e geotêxteis.

Os **solos** caracterizam-se por granulometrias mais ou menos extensas, com larga predominância de elementos de pequenas dimensões, que **governarão, assim, o comportamento do maciço dos pontos de vista de compactabilidade, deformabilidade, resistência mecânica e permeabilidade**.

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

Os **enrocamentos** são materiais em que a percentagem de elementos de dimensão inferior a 0,075 mm não ultrapassa os 10%, podendo a dimensão máxima atingir 1 m, sendo normalmente a percentagem de elementos de dimensões maiores do que 50 mm superior a 60%. Os materiais, **com granulometrias que respeitam estes indicadores, exibem um comportamento drenado** (o mesmo sucedendo se a permeabilidade for superior a 10^{-5} m/s) e, **sendo os aterros construídos por camadas de enrocamento compactado, uma granulometria extensa favorecerá a obtenção de uma acentuada diminuição do índice de vazios, com o consequente aumento da resistência e redução da deformabilidade.**

Existem ainda materiais de transição entre os solos e enrocamentos, que se podem designar por misturas de solo e de enrocamento, nos quais a percentagem de elementos grosseiros é significativa, mas a percentagem de elementos finos é suficientemente elevada para se ter uma grande influência no comportamento mecânico do aterro.

Os **filtros, drenos e transições** a serem construídos com materiais granulares (em alguns casos particulares e, sobretudo como transição, poderão utilizar geotêxtis em substituição de materiais granulares) desempenham papel fundamental nas barragens de aterro, pois **controlam os escoamentos, através do corpo da barragem e da sua fundação, sendo essencial que conduzam os fluxos afluentes sem afogamento e que retenham os materiais adjacentes, evitando erosões internas.**

Os estudos dos materiais devem ser desenvolvidos, de modo a **maximizar a utilização, na própria obra, dos materiais provenientes das escavações necessárias, para construção do empreendimento.** Caso aqueles materiais não apresentem características tecnológicas adequadas e volume suficiente, devem ser utilizados solos e/ou rochas de jazidas previamente seleccionadas.

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

Nas fases preliminares dos estudos, os volumes requeridos de cada tipo de material são ainda pouco definidos, dadas as diferentes alternativas de projeto ainda possíveis, e mesmo o desconhecimento das disponibilidades existentes dos diversos materiais. No entanto, na fase final dos estudos de viabilidade e nos projetos básicos e executivos, as demandas já são definidas de forma mais precisa, **devendo-se concentrar os estudos na caracterização tecnológica e econômica dos materiais existentes, de modo a especificar os processos construtivos, assim como as características da obra.**

Desta forma, a pesquisa de materiais de construção nas fases iniciais do projeto, baseada em um estudo geológico preliminar deve, essencialmente, fornecer indicações de locais potenciais de obtenção de materiais impermeáveis, materiais granulares permeáveis, pedreiras, etc. Essa pesquisa, complementada por amostragens piloto, permite visualizar a origem, localização, distribuição e prováveis volumes dos diversos materiais disponíveis.

A **experiência existente com obras semelhantes fornece indicações** para definição dos principais aspectos dos programas de investigação e ensaios, bem como da intensidade com que os estudos devem ser realizados.

Por razões ambientais, as localizações dos materiais de construção deverão, sempre que possível, ser na área do reservatório.

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

4.3.2 Elementos do Projeto

O projeto deve incluir os estudos dos materiais e das suas condições de colocação na obra, a saber (NPB,1993):

- **Definição das jazidas dos materiais** com a respectiva localização, zoneamento, avaliação dos volumes disponíveis, informação sobre níveis freáticos, sazonais ou resultantes do enchimento parcial do reservatório, e condições de escavação dos solos e de desmonte dos materiais rochosos;
- **Balanço de materiais**, visando à sua utilização, de acordo com os locais de origem e aplicabilidade, compatível com as etapas de construção e o cronograma executivo;
- **Compartimentação do maciço das pedreiras**, de modo a adotar o processo de desmonte mais adequado à obtenção da granulometria desejada;
- **Características físicas, propriedades fundamentais e composição mineralógica dos materiais** (solos e enrocamentos), devendo ter-se presente que, em princípio, todos esses materiais são **adequados** para a construção de barragens de aterro, **com exceção dos solos com teor inconveniente em matéria orgânica, das argilas muito sobreconsolidadas e dos solos e rochas alteráveis ao contato com o ar ou com a água, em especial os que contenham minerais solúveis;**
- **Determinação sobre amostras, representativas** do solo das jazidas, das características de compactação (teor em umidade ótimo e peso específico aparente seco) para energias de compactação específicas previstas para a construção;
- **Ensaio de laboratório sobre amostras com compacidade e teor em umidade previsíveis nas várias fases da obra, para determinação de características de cisalhamento, deformabilidade e permeabilidade;**

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

- **Tipo e modalidade de realização dos ensaios**, referidos na alínea anterior, de modo a permitir uma caracterização em termos de tensões totais e efetivas e medição dos parâmetros de poropressão ou grandezas, que permitam obter informação equivalente;
- **Tensões e deformações a impor nos ensaios** de laboratório, de modo a **representarem**, na medida do possível, **as trajetórias de tensão e deformação na obra**;
- Previsões de **aterros experimentais** a executar com os materiais e os equipamentos que irão ser efetivamente usados na construção, **para aprovação das características mecânicas e hidráulicas determinadas em laboratório e para estudo da compactabilidade dos materiais, eficiência de equipamentos, umidificação e rendimentos**; esses aterros experimentais são em geral executados pela empreiteira no início das obras;
- **Sistemas de escavação, transporte, colocação, umidificação e compactação** dos materiais dos aterros;
- Investigação geotécnica de materiais para filtros, drenos e transições, caracterização da granulometria e permeabilidade e estudos sobre a alterabilidade granulométrica e mineralógica, durante o período de vida da barragem;
- **Materiais para filtros, drenos e transições, obtidos por lavagem de finos, peneiramento ou britagem**, quando tenha havido dificuldade em encontrar materiais naturais susceptíveis de utilização direta;
- **Especificações sobre geotêxteis**, que poderão ser utilizados em certos tipos de barragem em diversas funções;
- Estudos e especificações para **proteção dos paramentos e da crista**;
- **Estudos e especificações, relativos aos concretos, aços, caldas de injeção, materiais betuminosos, materiais a utilizar em paredes diafragmas e geomembranas.**

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

4.3.3 Materiais para zonas impermeáveis

Nos estudos de materiais para barragens de aterro deve ser dada especial **atenção aos materiais com função de vedação**. Em geral, os solos mais procurados para as zonas de vedação são os argilosos e os siltosos, embora possam conter alguns elementos com fração mais grossa ou mesmo serem solos de alteração com blocos ou fragmentos de rochas, desde que após compactação apresentem a permeabilidade desejada.

Apresentam-se, em seguida, alguns aspectos a considerar na amostragem e nos ensaios de materiais para as vedações das barragens de aterro (baseado no capítulo 9 do Manual da Eletrobras, ELETROBRAS, 2003).

Amostragem

Para cada fase do projeto, a **amostragem deve ser feita simultaneamente às investigações geológico-geotécnicas**, considerando a representatividade das amostras, perante a variabilidade dos materiais (jazidas homogêneas podem ser amostradas para a condição média das características dos materiais, mas jazidas de grande variabilidade devem ser amostradas também para as condições extremas).

A amostragem para a realização de ensaios deve **levar em consideração os processos de exploração previamente definidos e, para cada jazida, devem ser definidos o contorno geométrico e os volumes disponíveis dos diferentes tipos de materiais.**

Durante a construção do empreendimento devem ser coletadas amostras deformadas (e, eventualmente, indeformadas) nos aterros experimentais e definitivos, que devem ser submetidos a ensaios de laboratório.

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

Ensaaios

A **caracterização tecnológica** dos diversos tipos de material em cada jazida deve ser feita através de **ensaaios “in situ” (densidade e umidade naturais), ensaios de granulometria, limites de consistência e determinação da densidade real dos grãos, bem como de ensaios de caracterização e compactação em laboratório sobre amostras representativas**. Os resultados desses ensaios permitem definir as características dos solos presentes, sua variabilidade e distribuição ao longo das jazidas e, portanto, o zoneamento das jazidas em parcelas consideradas homogêneas.

Seguidamente são realizados ensaios geotécnicos de laboratório para caracterizar os aterros a construir com os solos de cada jazida, **relativamente à permeabilidade, resistência mecânica e deformabilidade**.

No Quadro 5 são indicados os ensaios mais frequentemente realizados, tanto de caracterização, como para a avaliação dos parâmetros de resistência, deformabilidade e permeabilidade, ou de outras características dos solos argilosos como a expansibilidade ou dispersividade.

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

Quadro 5. Ensaaios de caracterização de solos para zonas impermeáveis.

Tipo de ensaio	Objetivo (Norma de ensaio)
Ensaaios de caracterização	
Umidade Natural	Umidade é a diferença entre o peso úmido e o peso seco do solo "in situ", sendo o teor de umidade o quociente, expresso em porcentagem, da umidade do solo pelo seu peso seco (ABNT NBR 6457)
Densidade Natural	Peso total do solo (P) dividido pelo seu volume total (V). O ensaio mais comum para determinação do peso específico natural do solo "in situ" é o método do cilindro de cravação (ABNT NBR 09813)
Granulometria por peneiramento e sedimentação	Diâmetros das diversas partículas existentes no solo (ABNT NBR 7181)
Limites de consistência	Teores em umidade para os quais a consistência do solo muda de um estado para o outro
Limite de plasticidade	Teor em umidade a partir do qual um solo passa a exibir plasticidade (ABNT NBR 7180)
Limite de liquidez	Teor em umidade acima do qual o solo perde as características de plasticidade, passando a comportar-se como um fluido viscoso (ABNT NBR 6459)
Peso específico real dos grãos	Relação entre o peso e o volume de uma partícula individual de solo (ABNT NBR 6508)
Ensaaios de Compactação	Determinação da umidade ótima do solo, para uma dada energia de compactação, e do peso específico aparente seco máximo associada à umidade ótima (ABNT NBR 7182)
Ensaaios de Permeabilidade	Obtenção do coeficiente de permeabilidade de uma amostra de solo (podem ser realizados em permeâmetro de carga variável, em células de adensamento edométrico ou em câmaras triaxiais, sendo estes últimos os mais fiáveis)

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

Quadro 5. Ensaio de caracterização de solos para zonas impermeáveis.

Tipo de ensaio	Objetivo (Norma de ensaio)
Ensaio de resistência e deformabilidade	
Cisalhamento direto	Determinar os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo (coesão e ângulo de atrito)
Compressão triaxial	Determinar os parâmetros de resistência e de deformabilidade do solo. Dependendo das condições de drenagem, seja na fase de adensamento sob a tensão confinante, seja na fase de aplicação da tensão desviadora, o ensaio pode ser classificado como: <ul style="list-style-type: none"> • Adensado drenado (CD) • Adensado não drenado, com ou sem medição de poro-pressões, e saturados, ou não (CU ou CUsat) • Não adensado não drenado, com medição ou não de poropressões (UU)
Adensamento edométrico	Visa a determinar as características de compressibilidade dos solos sob a condição de confinamento lateral (ABNT NBR 12007)
Especiais	
Ensaio de expansibilidade	Caracterizar o solo quanto à sua expansibilidade (ensaio de expansibilidade com determinação da pressão de expansão nula em câmara edométrica, difração de raios-X, absorção de azul de metileno, análise térmico diferencial e espectrometria infravermelha)
Ensaio de colapsibilidade	Indicado no caso de solos não saturados que possam apresentar colapso com o aumento de umidade
Ensaio de dispersividade	Caracterizar solos que sofrem erosão interna por via coloidal, ou seja, devido a um processo de dispersão que ocorre quando as forças repulsivas entre as partículas de argila excedem as atrativas, de tal forma que quando a argila fica em contato com a água, as partículas de argila destacam-se e entram em suspensão e são arrastadas (ensaio de dupla sedimentação, SCS; sais solúveis, Crumb test, Pinhole test)

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

Uma vez feita a identificação das jazidas disponíveis, os **ensaios de permeabilidade, a serem realizados em permeâmetro de carga variável, células de adensamento edométrico ou nas câmaras triaxiais, permitem obter dados para os estudos de percolação**, devendo ser realizados em amostras compactadas em laboratório, de modo a representar as várias condições de moldagem.

Os **ensaios de cisalhamento direto permitem a determinação da resistência ao cisalhamento**; porém não permitem a determinação de parâmetros de deformabilidade, nem a obtenção dos valores da poropressão. Apesar das suas limitações é um ensaio interessante, quando se pretende conhecer a resistência residual de solos argilosos.

Os **ensaios de compressão triaxial permitem obter os parâmetros de poropressão, de resistência (em termos de tensões totais e efetivas) e de deformabilidade**, a serem adotados no dimensionamento das estruturas. Normalmente, para as análises de estabilidade e deformabilidade, nas diferentes fases de carregamento da barragem (final do período de construção, rebaixamento rápido do reservatório e percolação estável) é suficiente realizar ensaios adensados não drenados e saturados (Cu_{sat} ou R_{sat}) com medida de **poropressões**. Esses ensaios permitem obter os parâmetros de resistência ao cisalhamento, em termos de tensões totais e efetivas, parâmetros de poropressões e os módulos de deformabilidade.

Em casos especiais, em barragens de muito grande porte, poderá justificar-se ainda realizar outros tipos de ensaios triaxiais, como ensaios não adensados e não drenados (UU ou Q) com medida de poropressões, que poderão simular melhor o período final de construção, e ensaios adensados e drenados (CD ou S), para a fase de percolação estável.

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

Durante o período construtivo devem também ser realizados ensaios de permeabilidade “in situ” em aterros experimentais e definitivos, além de ensaios de laboratório em permeâmetro de carga variável ou em células de adensamento edométrico sobre amostras indeformadas, retiradas nos aterros mencionados. Os ensaios de laboratório devem ser realizados em corpos de prova talhados nas direções vertical e horizontal, com ou sem influência do nível de tensões. Pode também justificar-se a realização dos mesmos ensaios de compressão triaxial sobre corpos de prova ou amostras indeformadas, do maciço da própria barragem ou de aterros experimentais.

As características de compressibilidade ou expansibilidade dos vários tipos de materiais, em diferentes condições de moldagem, devem ser estudadas na fase de projeto por intermédio de ensaios em laboratório de adensamento edométrico (ou ensaio de adensamento unidimensional) que permitem obter parâmetros destinados à avaliação dos recalques, devidos à consolidação de solos compressíveis.

Podem ainda ser realizados ensaios especiais para determinação de características de expansibilidade, colapsibilidade, ou dispersividade dos solos.

O ensaio de expansibilidade mais comum é o que emprega o equipamento utilizado no ensaio de adensamento com determinação da pressão de expansão nula em câmara edométrica, mas existem muitos outros ensaios que podem fornecer informações sobre a expansibilidade do solo, tais como a difração de raios-X, absorção de azul de metileno análise térmico diferencial e espectrometria infravermelha.

O ensaio de colapsibilidade mais simples é o que é feito no mesmo equipamento utilizado no ensaio de adensamento, medindo-se a deformação vertical sofrida pela amostra, em uma determinada tensão, ao ser inundada.

Para avaliar a dispersividade de uma argila podem realizar-se, entre outros, os seguintes ensaios:

- **Crumb test** e análises granulométricas por peneiramento e sedimentação com e sem uso de agentes desfloculantes para uma primeira indicação (ensaio de dupla sedimentação, SCS);
- ensaios com o aparelho *Pinhole test*;
- ensaios químicos.

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

Seleção dos parâmetros de projeto

A seleção dos parâmetros de projeto deve ser estabelecida após adequada interpretação de todo o conjunto de ensaios. Para áreas em que as características dos solos possam ser consideradas homogêneas, devem ser adotados os valores médios dos parâmetros. Nas áreas heterogêneas, os resultados dos ensaios devem ser considerados, de forma compatível com a utilização desses materiais no zoneamento do maciço, estabelecendo parâmetros de projeto para cada zona da barragem, em função da respectiva origem do solo. De forma análoga, devem ser selecionados os parâmetros de permeabilidade nas direções vertical e horizontal, com ou sem a influência do nível de tensões.

Os parâmetros de deformabilidade para análises pelo método dos elementos finitos podem ser obtidos após a comparação dos valores obtidos de várias fontes, tais como:

- os ensaios de laboratório;
- os ensaios “*in situ*”, quando realizados na fase construtiva;
- os resultados da observação de obras construídas com materiais e condições semelhantes ou da própria obra durante a construção.

Os parâmetros de projeto, resultantes de ensaios sobre amostras moldadas em laboratório, devem ser confrontados, sempre que possível, com os obtidos de blocos indeformados retirados da própria barragem ou de aterros experimentais.

Os parâmetros de propressão de construção, obtidos dos ensaios de laboratório, devem também ser confrontados com resultados da observação de obras semelhantes ou da própria obra, quando devidamente instrumentada, logo no início da construção.

Os parâmetros de resistência, em termos de tensões efetivas, a adotar nas análises de estabilidade, são definidos com base na interpretação dos resultados dos ensaios de compressão triaxial. Em casos particulares, as envoltórias de resistência podem ser adotadas em termos de tensões totais, obtidas de ensaios não drenados.

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

4.3.4 Materiais para filtros, drenos e transições

Os materiais naturais são obtidos, através de escavações convencionais mecanizadas, dragagem ou mesmo escavações com o uso de explosivos e são aplicados na obra sem necessidade de qualquer tipo de beneficiamento. O beneficiamento dos materiais naturais, seja por lavagem, peneiramento ou britagem, origina os materiais processados.

Apresentam-se os procedimentos, a seguir, visando à caracterização dos materiais naturais e processados (ELETROBRAS, 2003).

Caracterização dos materiais naturais - areias e cascalhos

As investigações de campo, por intermédio de varejão, sondagens com amostragem e eventualmente dragagem, devem ser realizadas com espaçamentos estabelecidos em função do modelo geológico, da homogeneidade dos materiais presentes, da fase dos estudos e do volume dos depósitos.

Na caracterização dos volumes disponíveis em jazidas, situadas no leito do rio, devem ser consideradas as eventuais alterações, durante o período de cheias, quer dos volumes, quer das granulometrias presentes. O desvio do rio pode também provocar alterações nos volumes das jazidas em determinadas etapas da obra.

Em cada jazida deve ser definido o contorno geométrico dos volumes disponíveis. Nas fases iniciais de projeto, os volumes a serem pesquisados para zonas drenantes da barragem devem envolver, pelo menos, o dobro do volume necessário.

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

A caracterização geológica compreende a descrição dos tipos de materiais existentes, a mineralogia, origem, espessura dos depósitos, alternância textural, posição do lençol freático e características do capeamento estéril. A caracterização geotécnica compreende a descrição da homogeneidade granulométrica das areias, as necessidades de beneficiamento dos materiais por peneiramento e/ou lavagem, a forma dos grãos e a permeabilidade. Esses dados devem ser apresentados na forma de perfis, seções e plantas, complementados por um texto descritivo.

Na definição do tipo e quantidade de ensaios, será sempre considerada a experiência obtida com a utilização de materiais semelhantes em outras obras, bem como a possibilidade de definição dos parâmetros, através da análise tátil-visual. Os ensaios a serem executados nas areias e cascalhos incluem, designadamente: análise mineralógica, ensaios de granulometria, de permeabilidade, compacidade relativa (densidade mínima e máxima), teores de matéria orgânica e torrões de argila, peso específico real dos grãos e índice de forma.

Devem ser estimados parâmetros de resistência e de deformabilidade das areias e investigadas características específicas das areias que possam influir no desempenho dos filtros e transições dos maciços.

No Quadro 6 são indicados os ensaios mais frequentemente realizados para caracterizar materiais para filtros, drenos e transições.

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

Quadro 6. Ensaio de caracterização de materiais para filtros, drenos e transições.

Tipo de ensaio	Objetivo (Norma de ensaio)
Granulometria por peneiramento	Diâmetros das diversas partículas existentes no material (ABNT NBR 7181)
Ensaio de permeabilidade	Obtenção do coeficiente de permeabilidade (podem ser realizados em permeâmetro de carga constante)
Densidade mínima	Determinação da densidade mínima, de simples derramamento de material (ABNT NBR 12004)
Densidade máxima	Determinação da densidade máxima, através utilizando a compactação vibratória (ABNT NBR 12051)
Matéria orgânica e torrões de argila	Determinação do teor em matéria orgânica (ABNT NBR 13600) e de teor de argila em torrões (ABNT NBR 7218)
Peso específico real dos grãos	Relação entre o peso e o volume de uma partícula individual de solo (ABNT NBR 6508)
Índice de forma	Média da relação entre o comprimento e a espessura dos grãos do material, ponderada pela quantidade de grãos de cada fração granulométrica que o compõe (ABNT NBR 7809)
Análise mineralógica	Determinação dos minerais, por exemplo, por difração de raios X

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

Caracterização dos materiais processados

Os materiais processados são essencialmente utilizados, quando os materiais naturais existentes não atenderem às características requeridas ou não estão disponíveis em quantidades suficientes.

As principais fontes de materiais processados são os materiais de **escavação obrigatória** ou os obtidos de **pedreiras**. Esses materiais **podem contribuir como fonte de materiais para filtros e transições** na forma de areia artificial, britas, “bica corrida” separada por *grizzly* ou “bica corrida” do britador primário ou a distância adequada.

A disponibilidade de materiais processados **deve ser verificada, através de estudo de balanceamento dos materiais de escavação**. Na avaliação dos volumes correspondentes, devem ser considerados os fatores usuais de perdas e relação de volumes corte/aterro (para uma validação preliminar, o fator a considerar para rochas duras é de 1,5 vezes o volume no corte para obtenção do volume do material processado colocado no maciço).

A amostragem para ensaios de análise mineralógica, permeabilidade, densidade, absorção e ciclagem natural e acelerada deve ser feita por coleta em sondagens, das escavações ou das pilhas de estoque.

Para obtenção de dados sobre a proporção a ser obtida de cada graduação de britas, para o balanceamento, devem ser utilizadas curvas de britagem, obtidas de obras com materiais semelhantes e da própria obra.

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

Nos casos em que é importante caracterizar o material britado, em proporção e do ponto de vista tecnológico, podem ser utilizados ensaios de britagem, providenciando-se um desmonte de rocha no local e transportando-se o material para onde exista uma central de britagem em funcionamento. Essa providência pode ser adotada, quando o programa de estudos de tecnologia de concreto também necessita de um grande volume de amostras de rocha para britagem.

Os parâmetros de projeto, correspondentes aos materiais processados para filtros, drenos e transições, devem ser estabelecidos, com base na experiência com obras semelhantes e comprovados no decorrer da própria obra.

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

4.3.5 Materiais de enrocamento

Os enrocamentos devem ser obtidos, preferencialmente, das escavações em rocha para implantação das estruturas. A exploração de pedreiras será utilizada quando os volumes das escavações em rocha não forem suficientes e/ou não atenderem à qualidade exigida.

Os procedimentos a seguir na caracterização desses materiais são indicados.

As investigações para enrocamento, proveniente de pedreiras ou de escavações obrigatórias, embora programadas de forma semelhante, diferem no fato de que, nas pedreiras é possível escolher os materiais de características próximas das desejadas, ao passo que nas escavações são aproveitados os materiais disponíveis.

A sondagem rotativa é o principal tipo de investigação, mas podem também ser utilizados métodos geofísicos.

Na **estimativa de volumes, deve ser considerada a relação entre os volumes medido e inferido, a qual depende do nível de conhecimento do modelo geológico-geotécnico.**

O volume total disponível cubado deve ser superior ao volume necessário (da ordem de 50%) para atender às perdas, durante a exploração.

A caracterização geológica deve compreender a descrição detalhada dos tipos litológicos existentes, textura, cor, compartimentação do maciço rochoso (sistemas de juntas, espaçamento, características da superfície do contato), decomposição dos constituintes mineralógicos e caracterização do capeamento. Essa caracterização geológica será apresentada, principalmente, na forma de perfis, seções e plantas, e será complementada por um texto descritivo.

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

A caracterização geotécnica deve compreender a descrição detalhada dos diversos estágios de decomposição do maciço rochoso, os graus de resistência ou dureza e de fraturamento, a recuperação de sondagens e outros parâmetros de interesse. Essa caracterização geotécnica será apresentada em conjunto com a caracterização geológica, na forma de perfis, seções e plantas, e complementada pelo texto descritivo.

Os tipos e quantidades de ensaios a executar, de acordo com a literatura técnica nacional ou internacional, dependem do tipo de obra e do material rochoso e sua localização na seção da barragem. A experiência com obras e materiais semelhantes deve também ser considerada.

Os ensaios comumente executados em rocha são: análise petrográfica, massa específica, ciclagem natural, ciclagem água/estufa, abrasão Los Angeles, índice de forma, resistência à compressão puntiforme, e resistência à compressão uniaxial.

Quadro 7. Ensaios de caracterização de materiais de enrocamento.

Tipo de ensaio	Objetivo (Norma de ensaio)
Análise petrográfica	Análise macroscópica de amostras (ABNT NBR 12768)
Massa específica	Obtenção das massas específicas seca e saturada (ABNT NBR 12766)
Velocidade ultrassônica	Obtenção de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas (ASTM 2845/00)
Ciclagem natural, ciclagem água/estufa	Verificar a velocidade dos efeitos da alteração intempérica sobre amostras de rochas, função de sua mineralogia (norma da CESP: MCA-14- Sanidade do Agregado através da ciclagem natural; ABNT NBR 12696)
Abrasão Los Angeles	Determinar qual o desgaste que o material sofre quando submetido ao método de abrasão Los Angeles (ABNT NBR 6465)
Índice de forma	Média da relação entre o comprimento e a espessura dos grãos do material, ponderada pela quantidade de grãos de cada fração granulométrica que o compõe (ABNT NBR 7809)
Resistência à compressão puntiforme (Point Load Test)	Obter índice de resistência puntiforme, correlacionável à resistência à compressão uniaxial (proposta de padronização, ISRM, 1985)
Resistência à compressão uniaxial	Determinar a carga de ruptura e examinar a superfície de ruptura de uma amostra de rocha sujeita a compressão uniaxial (ABNT NBR 12767)

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

Na definição dos parâmetros de projeto dos enrocamentos, as experiências obtidas em obras semelhantes ou na construção da própria obra são do maior interesse, considerando:

- para a densidade, os resultados de obras similares, com o mesmo tipo de material e condições semelhantes de alteração, fraturamento e energia de compactação;
- para a deformabilidade, os resultados de instrumentação da própria obra, durante a construção ou de obras semelhantes, obtendo-se os módulos de deformação, levando em consideração o tipo de rocha, espessura de camada e energia de compactação;
- para a resistência ao cisalhamento dos enrocamentos compactados, os resultados obtidos em obras semelhantes, com as devidas adaptações às condições vigentes ou da própria obra, tendo em consideração estudos que permitem correlacionar a resistência do enrocamento com a resistência, obtida em laboratório, utilizando materiais mais finos, guardadas certas proporções de granulometria.

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

4.4 FUNDAÇÕES

As fundações das barragens de aterro podem ser constituídas por maciços rochosos ou por solos, sendo também frequentes fundações nos dois tipos de maciços ou mesmo terrenos de transição entre solos e rochas. Em quaisquer dos casos, essas fundações constituem uma unidade com a estrutura que suportam, **devendo, portanto, ser analisado o comportamento do conjunto barragem-fundação.**

Nas **fundações em maciços rochosos**, os principais aspectos a se considerar são (NPB, 1993):

- Estudo da **percolação**, para o que se torna necessário **caracterizar a permeabilidade dos maciços e as condições de fronteira;**
- Estudo da **resistência ao cisalhamento e da deformabilidade**, nos casos de terrenos de muito fraca qualidade, fundações de galerias ligadas a órgãos de vedação no paramento de montante e estudos de estabilidade dos encontros, durante a fase de construção;
- **Ações resultantes da percolação, tendo em conta as cortinas de injeção;**
- Consideração de **cortinas de drenagem**, dispositivos que só são normalmente utilizados, quando associados às fundações dos órgãos extravasores e de adução em maciços rochosos;
- Se o aterro se apoiar diretamente sobre a fundação rochosa, o **contato deve ser objeto de tratamento para evitar fenômenos de erosão interna provocados por percolações**, através das descontinuidades do maciço rochoso, devendo-se prever, **no caso de fundações de vedações (núcleos), a regularização da superfície da rocha e o preenchimento de descontinuidades, e, nas fundações de um espaldar, a necessidade de recorrer a filtros, drenos e transições;**
- se entre o aterro e o maciço rochoso ocorrer solo ou rocha branda muito alterada e fraturada, a fundação deve ser submetida apenas a tratamentos muito localizados e relacionados com eventuais **órgãos de vedação**, que atravessem a fundação de má qualidade, tais como, diafragmas e cortinas de injeções.

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

No caso de **fundações em solos**, os principais aspectos a **considerar** são (NPB, 1993):

- Um **adequado conhecimento da permeabilidade, importante para estimar as vazões, através do maciço de fundação e que pode revelar-se decisivo na escolha do sistema a adotar para dominar esses fluxos**, incluindo na fase de construção, por razões de eficiência e de economia;
- Nos **solos arenosos**, raramente a permeabilidade pode ser medida em laboratório, dada a extrema dificuldade em colher amostras indeformadas, devendo-se por isso **realizar ensaios “in situ”**, interessando volumes representativos do maciço;
- Nos **maciços com permeabilidade elevada, o domínio total ou parcial dos fluxos percolados e dos gradientes hidráulicos pode efetuar-se, recorrendo a tapetes impermeáveis, trincheiras de vedação, paredes diafragma, filtros e poços de alívio**;
- Os **maciços de solos drenantes podem ser susceptíveis de liquefação, devido a ações sísmicas ou sofrer colapso por alterações da sua estrutura**;
- Nos **maciços em solos relativamente impermeáveis, deve-se considerar os efeitos dos gradientes hidráulicos e das deformações e assegurar a estabilidade mecânica**;
- A caracterização dos maciços referidos na alínea anterior pode ser em laboratório ou “in situ”;
- Nas **fundações em solos, os efeitos prejudiciais dos gradientes hidráulicos são normalmente evitados por sistemas de filtros e drenos**;
- O **controle das deformações e a obtenção de adequada resistência mecânica podem ser conseguidos por conveniente definição geométrica da barragem e melhoria das propriedades mecânicas dos solos (vibro-flutuação, compactação dinâmica, saturação prévia, precarregamento e drenagem)**.

Os métodos de estudo utilizados na caracterização geológica e geotécnica dos maciços terrosos e rochosos de fundação devem corresponder à boa prática seguida no âmbito da Geologia de Engenharia, da Mecânica dos Solos e da Mecânica das Rochas.

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

4.5 DIMENSIONAMENTO E VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA

4.5.1 Aspectos gerais

No dimensionamento das barragens para justificativa das suas formas, dimensões e outras disposições do projeto, visando à verificação das condições de segurança e operacionalidade, em relação aos previsíveis cenários de acidente e incidente, podem-se considerar os seguintes passos (NPB, 1993):

- Identificação dos principais cenários e definição das correspondentes situações de dimensionamento;
- Caracterização das ações e suas combinações, bem como das características dos materiais e das estruturas, e análise do comportamento destas últimas para as situações de dimensionamento consideradas;
- Verificação das condições de funcionalidade e segurança, tendo em atenção as prescrições do projeto a satisfazer.

A experiência tem evidenciado a grande influência dos erros humanos na ocorrência de acidentes, devidos a falhas no projeto, na construção, na operação ou na manutenção. A ocorrência dessas falhas não deve ser minorada por intermédio do sobredimensionamento das estruturas, mas pela adoção de medidas adequadas de garantia de qualidade, tanto no projeto, como na construção, na operação e na manutenção e monitoramento.

Os cenários devem ser definidos, tendo em consideração as características específicas da obra, especificando no dimensionamento os parâmetros representativos das ações e suas combinações, dos materiais das estruturas e da fundação e das técnicas de construção e operação.

O corpo da barragem e suas fundações devem ser considerados em conjunto e, neste mesmo contexto, os órgãos extravasores e de operação e os taludes do reservatório, devendo-se considerar as interações entre as diversas estruturas e a barragem.

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

Na quantificação da segurança em relação à ruptura de barragens de aterro devem ser adotados os coeficientes de segurança globais que, de acordo com a prática habitual, estabelecem a relação entre as forças resistentes e instabilizadoras, ao longo de uma superfície de deslizamento potencial crítica. A verificação da segurança à ruptura, de acordo com a prática habitual, assegura também, em geral, a verificação da operacionalidade da obra em relação a deformações excessivas.

De forma análoga, a segurança relativamente à ruptura hidráulica, quer em análise do tipo pontual quer global, deve também ser quantificada por intermédio de um coeficiente de segurança.

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

4.5.2 Análises de percolação

Modelo hidrogeotécnico

Os estudos da percolação da água através do maciço da barragem e da fundação permitem prever a distribuição de pressões e o valor das vazões, fornecendo subsídios para os estudos de estabilidade, para o dimensionamento dos dispositivos de drenagem interna e para seleção e dimensionamento dos sistemas de vedação e drenagem da fundação. Esses estudos são realizados, com base no modelo hidrogeotécnico dos maciços, na definição do qual se podem considerar os seguintes passos (ELETROBRAS, 2003):

- identificação dos materiais com características hidrogeotécnicas individualizáveis;
- definição dos parâmetros hidrogeotécnicos de cada material, inclusive sua eventual anisotropia;
- distribuição espacial, em geral bidimensional, ou em casos excepcionais, como barragens de muito grande porte, tridimensional, dos vários materiais.

Para os maciços da barragem, o modelo resulta simplesmente das características hidrogeotécnicas especificadas para cada material, mas para as fundações, ombreiras e eventuais selas laterais, o modelo depende da maior ou menor complexidade das condições geológicas.

Os valores dos coeficientes de permeabilidade a serem adotados nas análises devem ser devidamente ajustados para o nível de tensões efetivas atuantes na fundação e no maciço, bem como consideradas as eventuais anisotropias no seu valor.

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

Os estudos de percolação devem ser realizados para as situações de reservatório em operação e de rebaixamento rápido. Para a situação de reservatório em operação, o nível da água de montante deve ser o máximo normal e para dimensionamento dos dispositivos de drenagem (maiores valores de vazão), o nível da água de jusante deve ter o valor mínimo. Para as análises de estabilidade, o nível de jusante deve ser o que fornece a combinação mais desfavorável de carregamento. Para a situação de rebaixamento rápido, devem ser considerados os níveis da água máximo e mínimo normal do reservatório.

Para os casos correntes é, em geral, suficiente considerar modelos planos de escoamento em regime permanente, analisados, por exemplo, por intermédio de soluções numéricas, que fazem uso dos métodos de diferenças finitas ou de elementos finitos (para a realização das quais, estão disponíveis no mercado diversos programas de cálculo automático, considerando a condutividade hidráulica, como função da pressão do escoamento e determinando iterativamente a posição da linha de saturação para escoamentos não confinados, como é o caso das barragens de aterro).

NR = 295.00

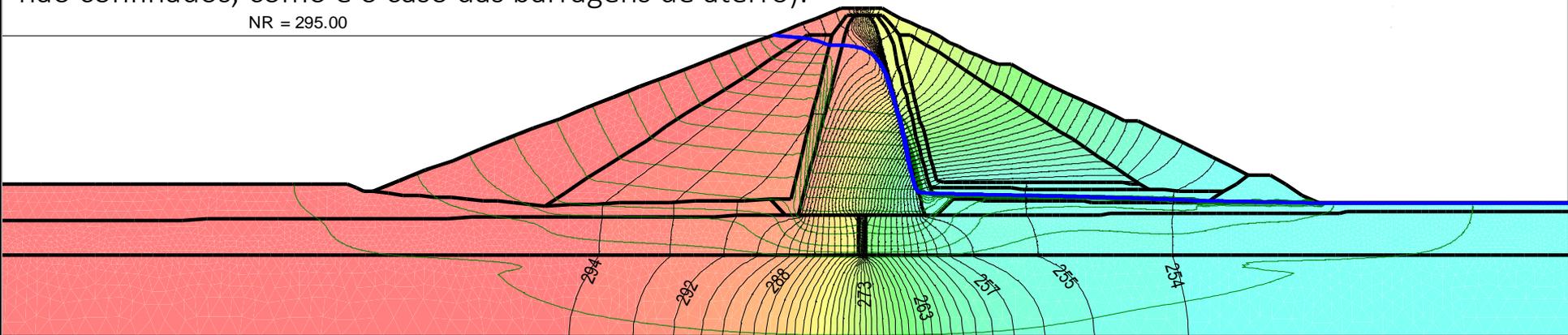


Figura 14. Análise de percolação em regime permanente pelo método dos elementos finitos (linhas equipotenciais) em barragem de terra zonada.

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

Dimensionamento de sistemas de filtros, drenos e transições

O controle dos fluxos de percolação nas barragens de terra de seção homogênea ou as barragens com núcleo vedante (sejam os espaldares em terra ou enrocamento) é feito pelo sistema de filtros, drenos e transições. **No seu dimensionamento, poderão ser utilizados, a princípio, os critérios convencionais de transição granulométrica dos materiais adjacentes, a apresentados no Quadro 8, onde “d” é o diâmetro das partículas dos materiais a serem protegidos (base) e “D” é o diâmetro das partículas dos materiais de filtro. Na definição de faixas, pode-se considerar para “d” o valor médio da faixa e “D” o limite superior da faixa.**

Filtro crítico (filtro a jusante do núcleo)

A aplicação das regras clássicas, granulométricas, de dimensionamento de filtros a materiais siltosos ou argilosos conduz, normalmente, a sistemas filtrantes onerosos, conservativos e de difícil execução.

Numa primeira fase, filtros e drenos surgiram, sobretudo, como órgãos das barragens susceptíveis de controlarem eventuais fenômenos de erosão interna e levantamento numa perspectiva de controle de escoamento em meios porosos.

A resistência intrínseca dos materiais argilosos à erosão interna, quando comparada com os solos incoerentes não ofereceu qualquer contestação durante muitos anos. Só a partir de 1950, Casagrande chamou a atenção para o aparecimento de fissuração nesses solos, alertando para possíveis consequências, sendo hoje reconhecido que a ocorrência de fendas é um fator determinante na deterioração das barragens de aterros, construídas com materiais coerentes. De fato, essas discontinuidades propiciam o aparecimento de caminhos preferenciais de escoamento, nos quais a velocidade da água cresce abruptamente, originando grande poder erosivo e consequente remoção para jusante das partículas de argila.

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

O controle dos fenômenos de escoamento concentrados, devido à fissuração do núcleo, faz-se dotando a barragem de um adequado filtro a jusante – o filtro crítico – que funciona adequadamente, não somente para as situações normais de um escoamento, que atravessa uma interface núcleo-filtro contínua, como também para o caso de fluxos concentrados, que atingem a face do filtro, através de descontinuidades no núcleo.

Dado que a ocorrência de fendas nos materiais argilosos, constituintes dos núcleos é um fenômeno de difícil previsão, o dimensionamento de filtros para esses materiais deve prever o problema da fissuração.

Com base nos estudos realizados por James Sherard e pelo US Soil Conservation Service nos anos 1980 (SHERARD et al., 1984a, 1984b, 1985, 1989), podem-se adotar, como critérios de dimensionamento, os apresentados no Quadro 8 e no Quadro 9 (ICOLD, 1994) e que são utilizados pelo US Soil Conservation Service, o US Bureau of Reclamation e o US Army Corps of Engineers (USDA SCS, 1986; USBR, 1987; USACE, 1994).

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

Quadro 8. Critérios para os filtros. (Fonte: ICOLD, 1994; USDA SCS, 1986; USBR, 1987; USACE, 1994)

Categoria do solo de base	Descrição do solo de base e % de material passado na Peneira Nº 200 (0,074mm) (nota 1)	Critério de filtro (nota 2)
1	Argilas e siltes finos; mais de 85%	$D_{15} \leq 9d_{85}$ (nota 3)
2	Areias, siltes, argilas e areias argilosas e siltosas; 40 a 85%	$D_{15} \leq 0,7 \text{ mm}$
3	Areias siltosas e argilosas; 15 a 39%	$D_{15} \leq +0,7 \text{ mm}$ (notas 4 e 5)
4	Areias e cascalhos; menos de 15%	$D_{15} \leq 4d_{85}$ (nota 6)

Notas:

1. A designação da categoria do solo refere-se à fração do material passada na Peneira Nº4, ou seja, a percentagem é determinada a partir da curva granulométrica do solo de base, ajustada a 100% passando na peneira Nº 4 (4,76mm).
2. A dimensão máxima das partículas dos filtros deve ser 75mm, e um máximo de 5% das partículas deve passar na peneira Nº 200 (0,074mm); os finos devem ter índice de plasticidade nulo. É conveniente utilizar a relação entre D_{90} e D_{10} do Quadro 9 para estabelecer a granulometria do filtro. Estes critérios conduzem à utilização de granulometrias uniformes para os filtros, o que previne segregação durante a construção. Para garantir permeabilidade adequada, os filtros devem apresentar dimensão D_{15} igual ou superior a $4d_{15}$, mas não inferior a 0,1mm.
3. Quando o valor de $9d_{85}$ é inferior a 0,2mm, é conveniente utilizar 0,2mm.
4. A percentagem de material passada na Peneira Nº 200 (0,074 mm), após o ajustamento da granulometria (ou seja, da fracção passada na Peneira Nº 4).
5. Quando o valor de $4d_{85}$ é inferior a 0,7mm, é conveniente utilizar 0,7mm.
6. Para a categoria 4, o valor de d_{85} deve ser determinado, a partir da curva granulométrica integral do solo de base, sem ajustamento para as partículas superiores a 4,76mm.

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

Quadro 9. Limites de D_{10f} e de D_{90f} para prevenir segregação.
(Fonte: ICOLD, 1994; USDA SCS, 1986; USBR, 1987)

D_{10} mínimo (mm)	D_{90} máximo (mm)
<0,5	20
0,5 a 1,0	25
1,0 a 2,0	30
2,0 a 5,0	40
5,0 a 10	50
10 a 50	60

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

Transições de montante

Relativamente ao filtro a montante do núcleo, tem-se verificado uma tendência gradual em tornar esses filtros (que eram construídos com as mesmas camadas e as mesmas características granulométricas das do filtro de jusante) mais econômicos (SHERARD e al, 1985). Tal resulta de se considerar que os filtros de montante **desempenham um papel menos importante do que os filtros de jusante**.

A principal função do filtro de montante é impedir que, após um rebaixamento do reservatório, o material do núcleo migre na direção de montante, entre os vazios do maciço de enrocamento. No entanto, devido à compressão das camadas superiores, o material do núcleo vai consolidando-se, pelo que deve encontrar-se num estado relativamente rígido e, por isso, não terá tendência para migrar. Além disso, atendendo à sua permeabilidade, a percolação da água no núcleo, após um rebaixamento, será muito lenta. O gradiente hidráulico será muito baixo e a velocidade e a energia de percolação serão muito pequenas para erodir as partículas do solo do núcleo e transportá-las para jusante. Deste modo, o filtro de montante não é crítico, porque não irá funcionar para controlar os escoamentos concentrados, devido a fendas que ocorram no núcleo da barragem (aspecto que é satisfeito pelo filtro de jusante).

No caso do filtro de montante, assim como em outras transições de menor responsabilidade e/ou em posições de baixos gradientes de percolação, como entre o enrocamento de proteção e o espaldar de montante, **poderá aceitar-se como critério:**

$$D_{15} \leq 9d_{85}$$

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

Drenos e transições funcionando como dreno

Como critério de dimensionamento devem verificar-se as relações propostas por Terzaghi para solos não coesivos, ou seja:

- $D_{15} \text{ (dreno)} \leq 5 d_{85} \text{ (filtro)}$, condição que assegura a capacidade de retenção pelo dreno das partículas do filtro;
- $D_{15} \text{ (dreno)} \geq 5 d_{15} \text{ (filtro)}$, condição que assegura um adequado contraste de permeabilidades entre os materiais do dreno e do filtro.

Como princípio e, procurando garantir elevada probabilidade de não haver segregação granulométrica significativa durante a construção, os materiais do filtro e em especial, o do dreno, devem apresentar um coeficiente de uniformidade $CNU = D_{60}/D_{10}$ inferior a 10.

Na hipótese de não ser técnica e/ou economicamente viável, a obtenção de materiais que satisfaçam os requisitos acima indicado, deve proceder-se a estudos e ensaios de laboratório, com o objetivo de modificar as condições exigidas.

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

Sistemas de drenagem na fundação

Os sistemas de drenagem na fundação devem incluir tapetes drenantes sub-horizontais do maciço, com o objetivo de controlar gradientes hidráulicos de saída a jusante da barragem e de reduzir as subpressões. A vazão a ser considerada incluirá a contribuição dos fluxos pelo maciço e pela fundação. As espessuras e distribuição das camadas drenantes devem ser verificadas para a vazão obtida nas análises de percolação, considerando um coeficiente de segurança igual ou superior a 10.

Em qualquer caso, a posição da linha de saturação do filtro sub-horizontal terá influência nas análises de estabilidade do talude de jusante.

Caso necessário poderão ser utilizados tapetes drenantes de camadas múltiplas, constituídas por camadas com diferentes granulometrias, devidamente dimensionados, com função de filtro envolvendo a camada interna do dreno.

No dimensionamento final, às espessuras requeridas pela capacidade drenante serão adicionadas espessuras, que serão consideradas contamináveis pelo material de base (material a ser protegido).

Os poços de alívio ou trincheiras a jusante da barragem serão adotados nos casos em que possam ocorrer subpressões elevadas na fundação.

Valores mínimos: Por razões construtivas, devem ser considerados os **valores mínimos ao lado para a espessura dos dispositivos de drenagem** (ELETROBRAS, 2003):

- Filtro vertical ou inclinado: 0,60m
- Filtro sub-horizontal: espessura de 0,25m
- Trincheira drenante de fundação: largura 0,60m
- Poços de alívio: diâmetro mínimo de 0,10m
- Transições a jusante de núcleo: largura de 0,60m
- Drenos de pé: largura de 0,40m

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

Dimensionamento de sistemas de impermeabilização

Os dispositivos de impermeabilização de fundação podem incluir trincheiras de vedação (cut-offs de solo compactado, paredes diafragma, trincheiras de lama, etc.), cortinas de injeção e tapetes impermeáveis, com o objetivo de reduzir vazões pela fundação e gradientes de saída a jusante, podendo estar combinados com sistemas de drenagem.

O dimensionamento será também efetuado, a partir de análises de percolação, considerando os diferentes tipos de materiais de fundação e aterro envolvidos, com as respectivas permeabilidades, e representando os eventuais sistemas de drenagem.

Em análises de estabilidade hidráulica, relacionadas com gradientes de saída, a razão entre as forças, devidas ao peso próprio, e as forças de percolação deve estar compreendida entre 3 e 5.

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

4.5.3 Análises de estabilidade

As análises de estabilidade devem ser feitas em tensões efetivas, exceto nos casos em que a análise envolva materiais cujo comportamento se assemelha ao das argilas plásticas saturadas ou a solos que tendem a se contrair durante o cisalhamento, devendo nesses casos fazer a análise em tensões totais.

Os parâmetros de propressão e de resistência ao cisalhamento dos diversos materiais envolvidos nas análises de estabilidade devem ser obtidos de ensaios de laboratório programados para representar, o mais aproximadamente possível, as condições de carregamento de campo.

No caso de enrocamento, quando não for possível a realização de ensaios, serão utilizados valores obtidos em outros locais, com materiais semelhantes, devidamente adaptados às condições vigentes no caso em análise.

Cenários de carregamento

Para garantia de estabilidade ao escorregamento, os taludes da barragem devem ser analisados para as condições de carregamento associadas: ao final de construção; a um rebaixamento rápido do nível do reservatório; a uma situação de percolação estável; e à ocorrência de um sismo.

Em casos específicos, pode ser necessário verificar outras situações de carregamento, tais como, nos casos de necessidade de bermas de equilíbrio, em estágios de construção em que estas não tenham sido ainda construídas, ou em casos de escavações no pé do talude do aterro já lançado da barragem.

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

Situação de final de construção

Neste cenário, considera-se que durante a construção de um aterro com materiais de baixa permeabilidade, simultaneamente com o desenvolvimento das pressões, devidas ao peso das camadas que vão sendo colocadas, desenvolvem-se poropressões, cuja dissipação se fará mais ou menos lentamente, conforme a velocidade de crescimento do aterro. A grandeza das poropressões iniciais depende, fundamentalmente, do teor em umidade do material e do grau de compactação, que determinam o seu grau de saturação e a sua compressibilidade.

A variação da poropressão (Δu) induzida pode ser expressa em função do acréscimo de tensão principal máxima ($\Delta\sigma_1$). O coeficiente $\bar{B} = \Delta u / \Delta\sigma_1$ pode ser considerado aproximadamente constante, ao longo das superfícies potenciais de deslizamento.

Em alternativa, podem se exprimir as poropressões de forma adimensional, através do coeficiente $R_u = u / (\gamma_t H_s)$, em que (u) é a poropressão, (γ_t) o peso específico total, e (H_s) a altura da coluna de material.

Os valores do \bar{B} ou R_u podem ser avaliados com base nos ensaios de compressão triaxial ou baseados na experiência comparável.

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

Situação de percolação estável

O caso de percolação em regime permanente é representativo da condição de operação, na qual o nível do reservatório, tendo atingido seu valor máximo, assim permanece por um período de tempo suficientemente longo para a saturação do maciço nas zonas submetidas à percolação. Neste caso, admite-se que o adensamento do maciço tenha ocorrido e que a percolação tenha se estabilizado.

Uma vez obtida a rede de percolação em regime estável, podem ser consideradas na análise de estabilidade as poropressões obtidas.

A envoltória de resistência, em termos de tensões efetivas, pode ser obtida dos ensaios de compressão triaxial adensados (saturados) não drenados (CU_{sat} ou R_{sat}) com medição de poropressões.

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

Situação de rebaixamento rápido do reservatório

O rebaixamento rápido do nível da água, por motivos de operação, ou devido à ocorrência de uma situação de emergência pode ser necessário durante a operação do reservatório, devendo esse cenário ser considerado no projeto.

Quando os materiais dos aterros têm permeabilidades baixas, um rebaixamento lento do reservatório poderá não conduzir a uma apreciável dissipação das poropressões instaladas, pelo que, para efeitos de cálculo, se pode considerar como se fosse um rebaixamento rápido.

Tal rebaixamento origina, em especial nos solos de baixa permeabilidade, uma complexa combinação de carregamento: redução das tensões principais com aumento da diferença entre elas, isto é, aumento da tensão desviatória, rotação da direção das tensões principais e o estabelecimento de condições transientes de fluxo gravitacional de água.

De um modo simplificado e do lado da segurança, pode ser considerado (BISHOP, 1954) que, antes do rebaixamento, a poropressão num dado ponto de uma superfície de escorregamento é:

$$u_0 = \gamma_w \left(h_w + \sum h_i - h' \right)$$

Nesta expressão, considera-se: (h'), a distância vertical ao nível no reservatório, antes do rebaixamento, da interseção de uma equipotencial com a linha de saturação; (h_w), a altura de água acima do ponto de referência; (h_i), a altura do material i , acima do ponto de referência.

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

Depois de um rebaixamento instantâneo que não dê lugar a qualquer dissipação de poropressão, esta tomará o valor: $u = u_0 + \Delta u$ em que $\Delta u = \bar{B} \Delta \sigma_1$

Considerando a tensão principal máxima igual ao peso do material acima do ponto em referência, será antes do rebaixamento: $(\sigma_1)_0 = h_w \gamma_w + \sum \gamma_i h_i$ em que os pesos específicos γ_i são saturados; e após o rebaixamento: $\sigma_1 = \sum \gamma_i h_i$. Assim, vem: $\Delta \sigma_1 = \sigma_1 - (\sigma_1)_0 = -\gamma_w h_w$

O valor de \bar{B} pode ser tomado igual à unidade, no caso de saturação completa, resultando então:
 $u = u_0 + \bar{B} \Delta \sigma_1 = \gamma_w (\sum h_i - h')$

Ainda do lado da segurança, pode-se desprezar h' , ficando $u = \gamma_w \sum h_i$.

Considerando pesos específicos submersos nos materiais abaixo do nível mínimo de rebaixamento, tem-se para excesso de poropressão sobre a pressão hidrostática a altura de aterro na fatia considerada, acima do nível mínimo do rebaixamento.

Para avaliar a estabilidade do talude de montante, após o rebaixamento total ou parcial do reservatório, admitem-se, normalmente, as seguintes simplificações:

- O rebaixamento é instantâneo;
- O parâmetro da poropressão $\bar{B} = 1$
- Pode ser considerado que não se processa nenhuma dissipação das poropressões, durante o rebaixamento ou pode admitir-se alguma dissipação dependente da permeabilidade e compressibilidade do material;

A envoltória de resistência em termos de tensões efetivas, a ser utilizada nas análises, deve ser determinada de ensaios tipo CU_{sat} ou, excepcionalmente, CD_{sat} .

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

Situação de ocorrência de sismo

A análise de estabilidade, durante a ocorrência de um sismo, é sistematicamente considerada em regiões sísmicas e tem sido recomendada, mesmo em regiões historicamente com pequena atividade sísmica, como é o caso do Brasil, especialmente em se tratando de barragens de porte e reservatórios importantes, devido à possibilidade de sismos induzidos pelo enchimento do reservatório.

Recomenda-se, portanto, a avaliação do comportamento da barragem face à ocorrência de sismos naturais ou induzidos, em particular por intermédio de análises pseudoestáticas. Na ausência de estudos de sismicidade, recomenda-se a adoção de cargas sísmicas correspondentes a acelerações de 0,05g na direção horizontal e 0,03g na direção vertical.

Métodos de análise

Na análise dos modelos é corrente a utilização de métodos de equilíbrio limite, dispondo-se presentemente de numerosos programas comerciais de cálculo automático, com pequenas diferenças na forma de verificação das condições de equilíbrio.

A escolha do método a aplicar deve ser função da forma da superfície de ruptura a analisar (o método de Bishop Modificado para superfícies circulares, o método de Janbu Modificado para superfícies poligonais, bem como os métodos de Spencer, Morgenstern-Price, GLE, Corps of Engineers #1, Corps of Engineers #2 e Lorne-Karafath, que permitem uma análise de sensibilidade da gama de valores em que poderá variar o coeficiente de segurança para uma dada superfície).

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

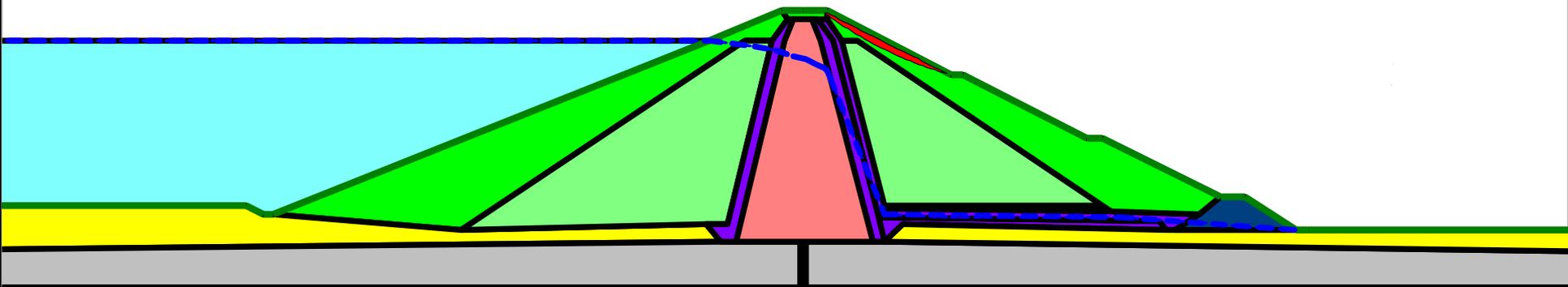
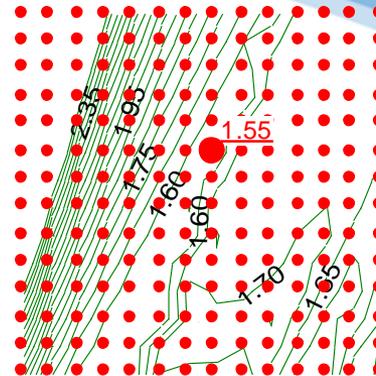


Figura 15. Análise de estabilidade pelo método de Bishop Modificado. Situação de percolação estável em barragem de terra zonada.

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

Verificação de segurança

Os coeficientes de segurança devem ser avaliados para as diferentes situações de dimensionamento, definidas para os maciços de terra e de enrocamento, associadas a condições normais de operação (percolação estável), bem como a situações pouco frequentes e a ocorrências excepcionais.

Os coeficientes de segurança associados a análises de estabilidade ao escorregamento, empregando métodos de equilíbrio limite, devem ser pelo menos iguais a 1,5 para condições normais de exploração, a 1,4 para a fase final de construção, e a 1,3 para situações de rebaixamento rápido do reservatório. Para ocorrências excepcionais (cheias superiores à cheia de projeto ou rebaixamentos rápidos em certas circunstâncias, sismos), os coeficientes de segurança devem ser, pelo menos, iguais a 1,1.

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

4.5.4 Análise de tensões e deformações

As análises de recalques, bem como as análises de tensões e deformações, a desenvolver para barragens de médio a grande porte (altura da barragem superior a 30 m), ou em situações especiais, como por exemplo, fundações em solos moles, que não foi possível remover, têm as seguintes finalidades principais (ELETROBRAS, 2003):

- verificar a compatibilidade de deformações entre os diversos materiais constituintes da barragem, de suas fundações e estruturas adjacentes;
- avaliar o potencial de ocorrência de ruptura progressiva do maciço e da fundação;
- otimizar a posição do núcleo, no caso da barragem de seção mista;
- analisar os riscos de fissuramento do núcleo, ocasionado por zonas de tração ou por fraturamento hidráulico;
- subsidiar o projeto de instrumentação, identificando os pontos críticos a serem instrumentados;
- otimizar o projeto de escavações, de modo a manter os recalques diferenciais, dentro de níveis admissíveis;
- determinar a sobre-elevação da crista para compensação de recalques pós-construtivos.

Para atingir esses objetivos, as análises de tensão-deformação serão realizadas, quando necessário para as condições de período construtivo, enchimento do reservatório com estabelecimento de fluxo transiente e regime permanente de operação com percolação estabelecida.

Os estudos de tensões e deformações podem ser efetuados pelo método dos elementos finitos, mediante a utilização de programas de cálculo automático disponíveis no mercado. De um modo geral, esses programas permitem adotar diversos tipos de elementos estruturais com diferentes comportamentos reológicos para os materiais, designadamente não lineares e variáveis no tempo, bem como considerar, individualmente, as interfaces solo-estrutura, e realizar análises de comportamento estáticas e dinâmicas.

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

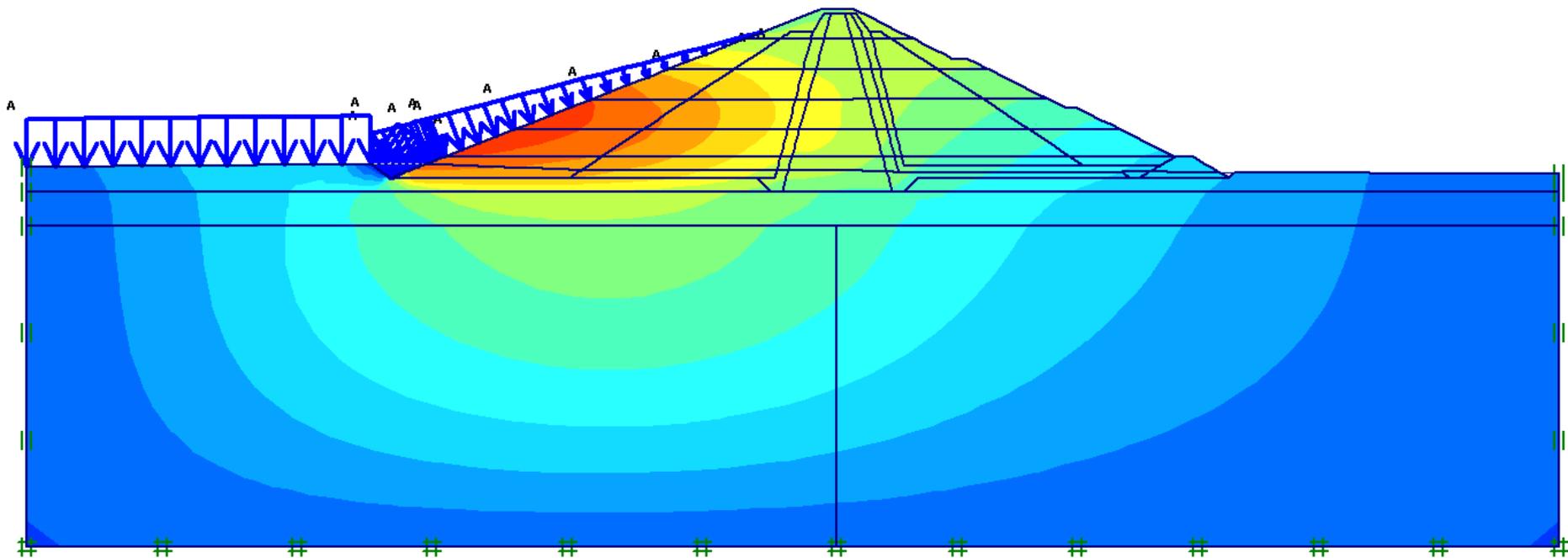


Figura 16. Análise de tensões deformações, em barragem de terra zonada e respectiva fundação. Modelação do primeiro enchimento do reservatório. Deslocamentos horizontais.

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

Para estudos simplificados de recalques da fundação, podem também ser utilizadas soluções analíticas da Teoria da Elasticidade (ELETROBRAS, 2003).

Os parâmetros de compressibilidade e deformabilidade dos materiais do maciço da barragem e da fundação devem ser determinados, a partir dos resultados das investigações geológico-geotécnicas de campo e de laboratório, devidamente ajustados por experiência com materiais e condições de carregamento semelhantes.

Deve ser dada especial atenção na identificação de materiais colapsíveis ou expansivos na fundação. Caso possam ocorrer solos colapsíveis, devem ser previstos os recalques pelo método edométrico duplo com inundação ao nível de tensões atuantes, após o carregamento da barragem, e avaliação da necessidade de sua remoção prévia.

Para cálculo de recalques pós-construtivos do maciço e da fundação, pode, em princípio, ser utilizada a condição unidimensional de deformações, utilizando-se os parâmetros de compressibilidade m_v (coeficiente de compressibilidade edométrica) e C_c (índice de compressão), ou C_r (índice de recompressão). Esses parâmetros devem ser determinados para cada material para o intervalo de tensões efetivas, correspondente às condições de operação do maciço e da fundação. A distribuição de tensões verticais totais podem ser calculadas, a partir de soluções analíticas da Teoria da Elasticidade e as poropressões definidas, considerando os seus valores ao final da construção e após o estabelecimento do regime estacionário de fluxo.

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

Para compensação dos recalques pós-construtivos, deve ser prevista sobre-elevação da crista da barragem com valor igual ao dos recalques estimados.

Os recalques diferenciais admissíveis na crista da barragem serão de 1 %.

Para evitar a formação de trincas, com conseqüente **maior segurança contra possibilidade de erosão interna regressiva no núcleo da barragem de terra-enrocamento**, os seguintes critérios devem ser atendidos:

- as discontinuidades topográficas da fundação da barragem, em particular sob o núcleo, devem ter inclinações ajustadas para evitar recalques diferenciais excessivos, que provoquem trinca no maciço, e zonas com baixos níveis de tensões, que possam ser susceptíveis a fraturamento hidráulico;
- o potencial para fraturamento hidráulico deve ser evitado, considerando que, em qualquer ponto do maciço, o valor da tensão principal menor efetiva seja positivo;
- devem ser introduzidos nas especificações técnicas construtivas, critérios para redução ou eliminação das irregularidades topográficas.

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

4.5.5 Aspectos relativos à crista da barragem e aos taludes de montante e de jusante

Crista da barragem

A borda livre entre o nível do reservatório (nível de máxima cheia ou maximum maximum e nível máximo normal ou normal de retenção) e a cota da crista da barragem deve ser estabelecida, de acordo com o indicado no item 4.1, e de acordo, também, com o regime de ventos, o fetch e o grau de conhecimento das condições hidrológicas, bem como a sismicidade da região (pouco condicionante no caso do Brasil).

Além disso, a crista da barragem deve ser adequadamente sobrelevada na fase construtiva para compensar os recalques que os aterros sofrerão, durante a vida útil da barragem, como referido no item anterior.

A largura da crista, em geral, não inferior a 3 m, deve ser justificada, em função da altura e importância da obra, do risco sísmico do local, da natureza dos materiais a empregar, da configuração da linha de saturação com o reservatório cheio, das condições de construção e das exigências de circulação viária prevista. De um modo geral (com exceção de barragens de pequeno porte) situa-se entre 6 e 10m.

Podem também utilizar-se fórmulas empíricas, como a de Preece, no dimensionamento da largura da crista:

$$L = 1,1\sqrt{H} + 1$$

onde H é a altura máxima da barragem, em metros.

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

Talude de montante

O talude de montante deve ser protegido da ação das ondas, levando-se em consideração o regime de vento e o fetch do reservatório. Essa proteção consiste, em regra geral, no recobrimento do talude de montante com blocos de enrocamento (*rip-rap*).

Para determinação do peso dos blocos de enrocamento e sua distribuição, podem ser adotados os critérios apresentados nas recomendações da ICOLD (1993), assim como, em outras publicações como CERA (1966) e Taylor (1973).

O objetivo principal do enrocamento colocado sobre o aterro é impedir a erosão e os danos, resultantes da ação das ondas no reservatório, sendo demonstrado pela experiência que o enrocamento lançado é um tipo de proteção de talude muito eficaz, desde que a sua colocação em obra assegure uma superfície regular.

O *rip-rap* deve conter uma proporção grande de elementos superiores à dimensão mínima necessária para resistir à ação das ondas. Na operação de colocação do enrocamento, deve evitar-se toda a segregação e permitir a construção de uma camada o mais densa e imbricada possível. Deve ser constituída por elementos de rocha sã e inalterável, com um coeficiente de forma aceitável. Com raras exceções, o enrocamento deve ser colocado sobre uma camada de transição em materiais mais finos, que serve de filtro para impedir o arraste do material do aterro, através dos vazios do enrocamento. Essa camada de transição serve também para dissipar os efeitos hidrodinâmicos das ondas.

Todos os métodos de dimensionamento do enrocamento de proteção contra ondas têm como premissa que o dimensionamento dos blocos, para que sejam estáveis, considere a ação das ondas sobre a barragem, bem como, o peso específico dos blocos. As principais forças, a que o enrocamento vai ficar sujeito, são as resultantes das ondas geradas pelo vento. Existem, por vezes, forças de arrastamento importantes que devem ser consideradas no projeto.

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

Devem, portanto, serem **considerados**:

- o estudo relativo ao regime dos ventos;
- a determinação das alturas e das características das ondas, a partir do estudo dos ventos;
- a determinação das características do enrocamento para resistir à ação das ondas.

Formulas empíricas de projeto têm sido estabelecidas, com base em estudos e ensaios em modelo. Esses estudos, inicialmente desenvolvidos para projetos de obras costeiras marítimas, conduziram, para proteção de taludes de reservatórios em barragens, à fórmula de Irribarren-Hudson (ICOLD, 1993):

$$W_r = \frac{\gamma_r h^a}{K_D (G_s - 1)^3 (\cotg \varphi)^b}$$

Nesta expressão empírica (em unidades inglesas): a e b são coeficientes determinados experimentalmente; W_r representa o peso característico dos blocos de enrocamento necessário para resistir à ação das ondas (libras); γ_r o peso específico total de um elemento de rocha (libras por pé cúbico); G_s a densidade seca dos blocos de enrocamento; φ o ângulo do talude (medido a partir da horizontal); h a altura da onda de projeto (pés); K_D o coeficiente de arrastamento, determinado experimentalmente.

A expressão anterior pode ser utilizada, considerando para peso característico do enrocamento o peso mediano W_{50} e, como altura da onda, a altura significativa (H_s), de acordo com Taylor(1973) $a = 2,6$, $b=1$ e $K_D=3,2$.

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

Segundo ICOLD (1993), o US Army Corps of Engineers utilizava até 1978 (norma EM 1110-2-2300) os coeficientes $a=2$, $b=1$, $K_D=1,36$. A partir dessa data passou a distinguir as situações, em que se pode tolerar a ocorrência de alguns danos (coeficientes $a=3$, $b=1$ e $K_D=4,37$) e aquela em que se não aceita a ocorrência de danos (coeficientes $a=3$, $b=2/3$ e $K_D=3,62$).

Os coeficientes para danos toleráveis ou admissíveis foram definidos, a partir de resultados de ensaios em modelo, em que se admitiam alguns deslocamentos do enrocamento de proteção, mas sem ruptura deste. Os coeficientes para não ocorrência de danos foram determinados, a partir de resultados, onde não se verificava qualquer deslocamento do enrocamento.

Os coeficientes relativos à não ocorrência de danos nulos são, em regra geral, adotados para situações de operação normal. Os coeficientes, relativos a danos toleráveis, devem ser utilizados para situações menos habituais. Em qualquer das situações, devem sempre ser consideradas as condições mais severas de ondulação, dado que existem outros fatores que podem influenciar a ação das ondas, tais como, o tipo de rebentação, o ângulo de atuação, a duração, o espectro de alturas e a distribuição das alturas.

As ondas que, normalmente, se geram num reservatório, podem ser do tipo mergulhante, progressivo ou reflexivo. As ondas do tipo reflexivo são as que podem levar a maior instabilidade do enrocamento e, por isso, são as normalmente consideradas para o cálculo dos coeficientes acima referidos.

Em obras situadas em locais, onde não seja possível ou econômica a obtenção de rocha para enrocamento de proteção, deve ser analisada a utilização de outros materiais para esta finalidade, conforme as recomendações do Boletim 91 da ICOLD (1993).

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

Talude de jusante

A superfície do talude de jusante deve ser protegida da ação erosiva da chuva e do vento, assim como de danos causados por animais, por intermédio de grama ou outro revestimento vegetal, por material granular natural grosseiro (seixos e cascalhos), ou por enrocamento, convenientemente transicionado. As partes submersas do talude de jusante devem ser preferencialmente protegidas por enrocamento.

Para cálculo das vazões da drenagem superficial, deve usar-se o “Método Racional”, considerando, pelo menos, períodos de recorrência das chuvas de 50 anos.

Devem ser escolhidos os materiais mais indicados, em função das disponibilidades próximas da obra, das condições climáticas e das possibilidades de manutenção, especialmente importantes, quando o revestimento é vegetal.

É ainda recomendável que, se a superfície do talude de jusante for extensa em altura, seja dotada de banquetas e bermas com canaletas de drenagem.

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

4.5.6 Análises relativas a barragens de enrocamento com face de concreto

Características dos enrocamentos

Os maciços construídos com enrocamentos têm seu comportamento intrinsecamente ligado às características geomecânicas das rochas disponíveis. Para caracterizar o comportamento dos enrocamentos é comum especificar-se, pelo menos, a realização de ensaios de compressão simples, compressão puntiforme, absorção de água, abrasão Los Angeles, ciclagem acelerada e ao tempo. Ensaios em corpos de prova de grandes dimensões (até 1m de diâmetro) para obtenção de parâmetros de deformabilidade e resistência ao cisalhamento são também utilizados.

Grande parte das barragens desse tipo no Brasil foi construída em regiões de rochas basálticas e/ou gnáissicas. Os enrocamentos, oriundos dessas rochas, apresentam, em geral, ângulos de atrito interno elevados e, portanto, admitem angulações dos paramentos, tanto de jusante, quanto de montante, de 1V:1,3 H a 1V:1,5 H, qualquer que seja a altura da barragem (ELETROBRAS, 2003).

Enrocamentos de rochas mais brandas, do tipo sedimentares, exigirão taludes mais abatidos entre 1V:1,4H e 1V:2,0H.

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

Zoneamento da seção transversal

Os princípios básicos, que devem orientar a concepção de barragens de enrocamento com face de concreto a montante, são: obter-se um maciço pouco deformável e uma face de concreto que suporte determinadas deformações sem exibir fissurações. Deve, pois, conceber-se um zoneamento do maciço e utilizar materiais que permitam reduzir, ao mínimo, as deformações junto à face. Para apoio a esse estudo, dispõem-se de ferramentas (ensaios laboratoriais e métodos de cálculo, como o método dos elementos finitos), que permitem realizar análises de previsão das deformações das barragens. Esses métodos de cálculo permitem simular a interação entre a face de concreto e o maciço de enrocamento, mas o dimensionamento dessa face tem-se apoiado, essencialmente, na experiência (incluindo alguns acidentes), obtida com obras semelhantes. É essencial que a compactação das camadas de enrocamento reduza, ao máximo, a capacidade de recalque, quando se inicia a construção das lajes de concreto.

No zoneamento do maciço distinguem-se, normalmente, três zonas:

Zona 1	A construir com o material que cobre o plinto e a junta perimetral entre este e as lajes de concreto;
Zona 2	Correspondente à zona de assentamento da face de concreto e do plinto de fundação, normalmente constituída por materiais granulares, desde areias e cascalhos;
Zona 3	Constituída pelo maciço de enrocamento do corpo da barragem.

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

Zona 1

O material a se utilizar na cobertura do plinto e da junta perimetral entre este e as lajes da cortina deve ser um material fino, de preferência uma areia fina não lavada ou areia siltosa, sem coesão, com a função de colmatar qualquer fissura ou abertura da junta perimetral. Esse material deve ser coberto por um aterro de enchimento, constituído por um material silto-argiloso pouco compactado.

É frequente se utilizar dois tipos de materiais (Material 1A e 1B):

- O Material 1A deve ser relativamente impermeável e não coesivo, de modo a poder colmatar qualquer fissura ou abertura daquela junta. É frequente se especificar um material com 5 e 10% de finos (dimensão silte e argila), sem partículas com dimensão superior a 2 mm. Poderá ser material natural ou proveniente do processamento da pedra para a obtenção dos materiais de enrocamento do corpo da barragem. O material deve ser colocado em camadas de 20 a 30cm ligeiramente compactadas.
- O Material 1B deve ser um solo silto-argiloso, que permita a construção de um aterro de enchimento pouco compactado. Não existe necessidade de estabelecer para estes solos características bem definidas. É frequente considerar solos com uma dimensão máxima das partículas de 6 cm e uma percentagem de finos (percentagem do material que passa na Peneira nº 200 da série ASTM) superior a 20%. Os materiais devem ser colocados em camadas de 20 a 30 cm compactadas.

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

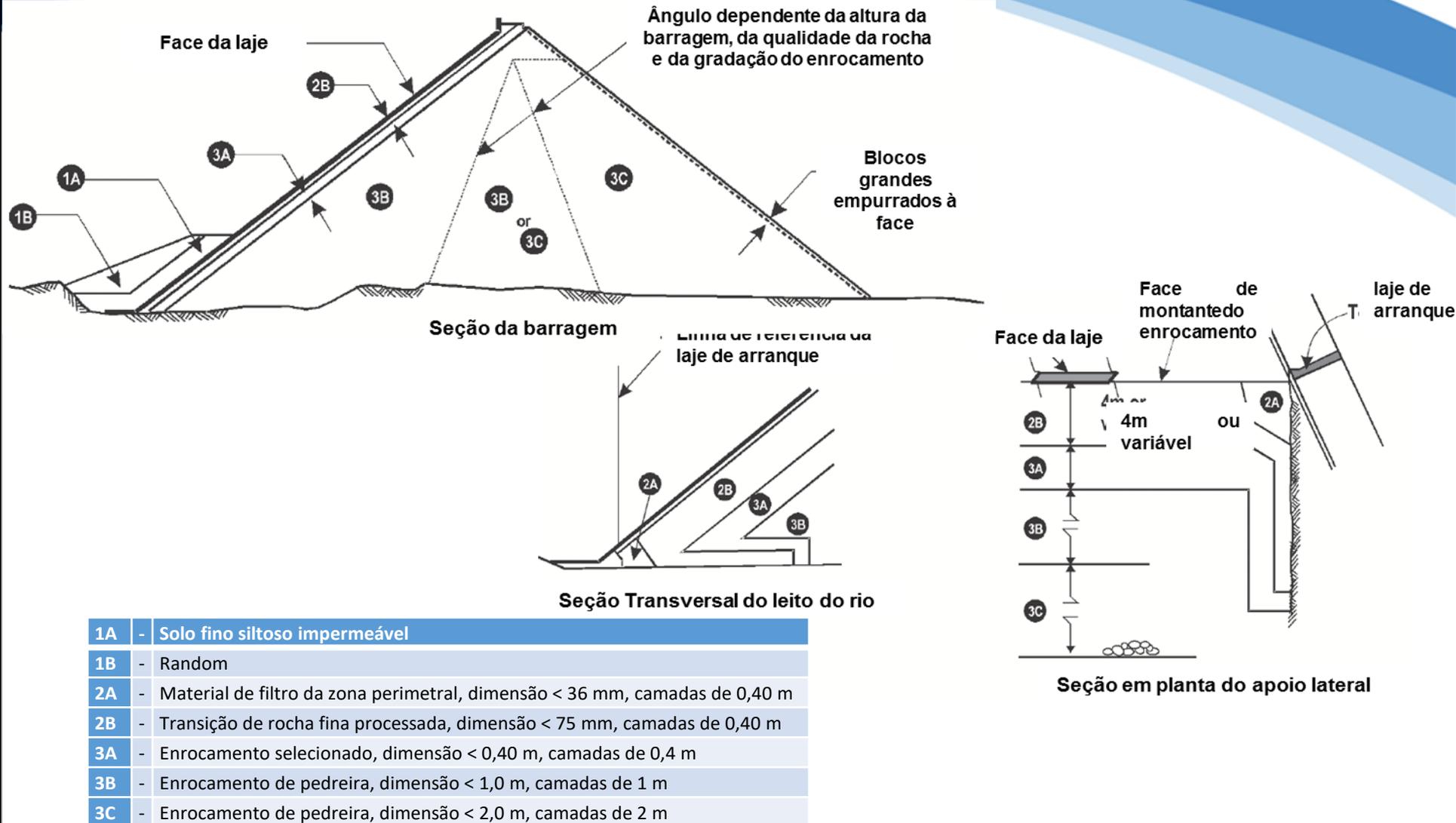


Figura 17. Designação das zonas de uma barragem de enrocamento com face de concreto. (Fonte: ICOLD, 2010)

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

Zona 2

A zona 2, de assentamento da face de concreto e adjacente ao plinto, é constituída por dois materiais, 2 A e 2B.

A zona de filtro 2A deve ser constituída por um filtro de areia e cascalho numa extensão de 2 a 3 metros da junta perimetral. Em caso de ruptura das lâminas de estanqueidade da junta perimetral, o material 2A impede a migração, através da junta das partículas de dimensão de silte da zona 1A e, por consequência, serve de elemento de estanqueidade auxiliar contra fugas.

Essa zona deve ser constituída por material de qualidade equivalente à dos agregados dos concretos. O material deve ser processado de modo a se obter limites granulométricos específicos. Em ICOLD (2010) é proposto um material com os limites granulométricos indicados no Quadro 10.

Quadro 10. Limites granulométricos da zona 2A.

(Fonte: ICOLD, 2010)

Peneira (ASTM)		Porcentagem passando em peso
	(mm)	
1 1/2"	38,1	100
3 / 4"	19,1	85 a 100
Nº 4	4,76	50 a 75
Nº 16	1,19	25 a 50
Nº 50	0,297	10 a 25
Nº 200	0,074	0 a 5

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

A camada de assentamento da laje de concreto tem como funções:

- ser camada de base para face de concreto que, após compactação ao longo do talude, permita obter uniformidade de apoio das lajes e regularização adequada, evitando sobre-espessuras de concreto;
- ser camada semipermeável, com possibilidade de controle de infiltrações, através de eventuais fendas nas lajes ou pelas juntas;
- possa obturar fendas e assim reduzir infiltrações, através das juntas, dada a sua granulometria, próxima de um filtro.

A granulometria do material 2A tem sofrido alterações, como resultado da experiência adquirida com barragens desse tipo em diversos países. Tem-se reduzido a dimensão máxima das partículas e utilizado mais partículas finas, isto é, percentagens mais elevadas que antigamente em partículas inferiores a 4,76 mm e 0,074 mm. Por outro lado, as granulometrias com dimensões máximas de 250 a 330 mm e dimensões mínimas de 50 a 75mm não se têm revelado satisfatórias, devido aos elevados níveis de segregação.

É prática corrente utilizar nessa camada materiais granulares de pequena dimensão e com alguns finos, ou seja, com partículas de dimensão inferior a 4,76 mm (Peneira N^o 4) e 0,074 mm (Peneira N^o200), de modo que possa desempenhar as seguintes funções:

- ser camada de base para a face de concreto que, após compactação ao longo do talude, permita obter uma uniformidade de apoio das lajes e uma regularização adequada, evitando, assim, sobre-espessuras de concreto;
- ser camada semipermeável com possibilidade de controle de infiltrações, através de eventuais fendas nas lajes ou pelas juntas;
- dada a sua granulometria, próxima da de um filtro, possa obturar fendas e, assim, reduzir infiltrações através das juntas, em especial na base da barragem, como a junta perimetral, se sobre o plinto e base da cortina for colocada uma camada de Material 1A (esse material irá preencher a fenda, sem ser arrastado, devido à capacidade filtrante da camada de base da cortina).

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

Segundo as recomendações da ICOLD (2010), o material a ser aplicado, na camada de base da face de concreto, deve ter as seguintes características granulométricas:

- dimensão máxima das partículas menor do que 76 mm (100% passando na Peneira de 3");
- 35 a 60% em peso das partículas passando na Peneira Nº 4 (4,76 mm), de modo a conter, em média, pelo menos, 40% de areia;
- 0 a 8% em peso das partículas passando na Peneira Nº200 (0,074 mm).

Caso exista, o melhor material a se utilizar na construção da camada de base da face de concreto é o cascalho e seixos naturais. Na ausência desse tipo de material poderá ser utilizado material britado, proveniente de pedreira.

No final, a face do aterro terá de ser cortada e compactada, utilizando-se um rolo de menor dimensão, que deverá ser suspenso, a partir da crista e puxado para cima, ao longo do talude, fazendo-se 4 ou mais passagens sem vibração.

Como os rolos vibradores não podem circular junto ao bordo do talude é necessário compactar o material da zona 2, segundo a superfície inclinada do paramento.

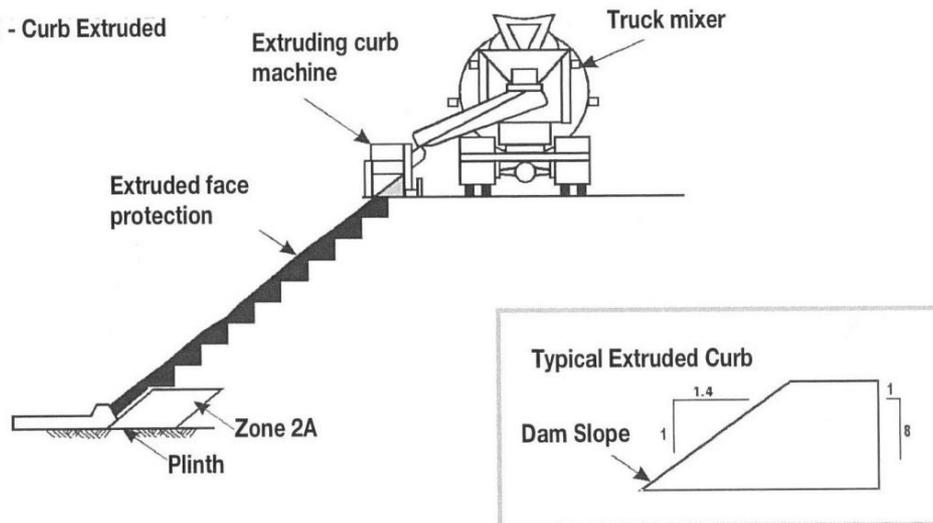
Em substituição da operação trabalhosa de compactação, ao longo do talude da zona 2, pode-se utilizar de técnica mais recente, usando concreto dental extrudado, construindo uma mureta de concreto extrudado para apoio da laje. Uma máquina extrusora é empregada, usando concreto dental com baixo teor de cimento (55 a 75 kg/m³) (CRUZ et al., 2009).

Este procedimento facilita a construção, diminui as perdas de material da transição, aumenta a velocidade de alteamento da barragem, ao mesmo tempo que confere um acabamento mais adequado para a construção da face de concreto. A construção da borda do talude de montante com material 2 A é ilustrada na Figura 18.

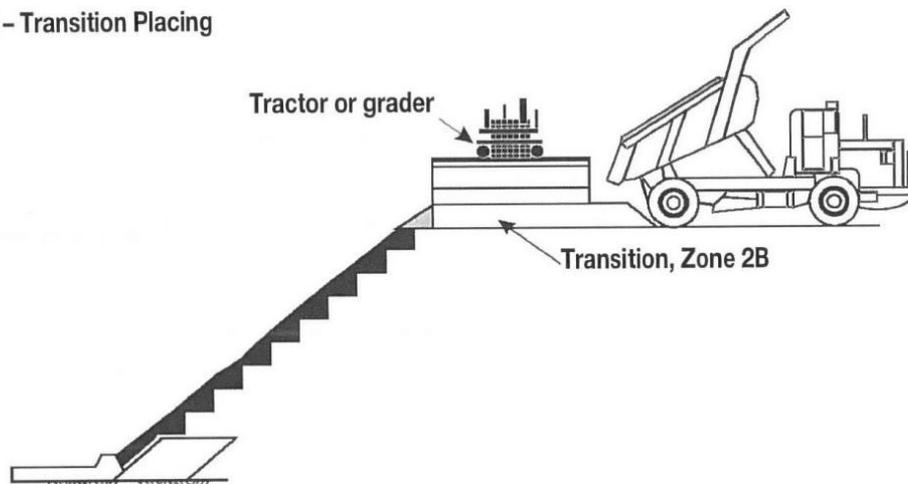
Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

Stade 1 - Curb Extruded



Stade II - Transition Placing



Stade III - Compaction

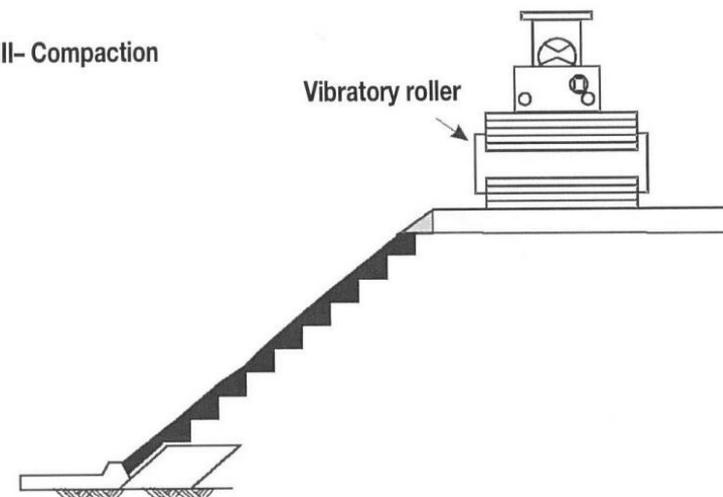


Figura 18. Construção da borda do talude de montante com material 2 A. (Fonte: ICOLD, 2010)

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

Zona 3

A Zona 3, constituída pelo maciço do corpo da barragem, é geralmente dividida em quatro subzonas, 3A e 3B, 3C e T.

A Zona 3A, em enrocamento miúdo, é a zona de transição, quer do ponto de vista de deformabilidade, quer de condições de filtro, para o enrocamento do maciço de montante – (Zona 3B). Com essa transição pretende-se assegurar que o material 2A, da zona 2, não seja arrastado para os grandes vazios do enrocamento principal de montante. No contato com o maciço de fundação e imediatamente adjacente ao plinto, deve igualmente ser colocada zona de transição com Material 3A, sobrejacente à camada de 2A.

Como a maior parte da carga, devida à água do reservatório, é transmitida à parte de montante do aterro, é conveniente que a deformabilidade da Zona 3B seja a mais baixa possível, de modo a minimizar as deformações das lajes. É da experiência (VEIGA PINTO, 1983) que a deformabilidade dos enrocamentos aumente com a dimensão dos blocos, pelo que a tendência é a de se utilizar elementos rochosos de menor dimensão. Também, para reduzir ao máximo o índice de vazios pela compactação, interessa que a altura das camadas não seja muito grande.

Assim, para a zona de montante, correspondente ao suporte principal à carga hidrostática, a executar com o Material 3B, a espessura de camada poderá ser da ordem de 0,6-0,8 m.

A Zona 3C, por receber uma carga relativamente menor que a Zona 3B, é normalmente constituída com material mais compressível e de maiores dimensões, podendo ser construída em camadas mais espessas. Normalmente, esse material é compactado em camadas de 0,6-1 m.

Entre as zonas 3B e 3C, a zona T, localizada na parte central da barragem, pode ser utilizada para dispor materiais de qualidade inferior ou misturas de seixos e enrocamentos, como soluções práticas e econômicas.

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

Na fixação da separação entre os materiais 3B e 3C, deve ser observado, por um lado, a previsão em qualidade e volume dos materiais de enrocamento a se obter na pedreira e, por outro, nos resultados das análises tensões - deformações que forem efetuadas, corroboradas pela experiência na construção e observação do comportamento de barragens deste tipo.

O acabamento do paramento de jusante do corpo do aterro é normalmente feito, empurrando os blocos de maiores dimensões, arrumados com meios mecânicos, de modo a criarem uma superfície esteticamente satisfatória e estável para o talude.

Em termos práticos, pode ser considerado que um enrocamento de elevada rigidez é obtido, compactando-o com pesados rolos vibradores e camadas relativamente pouco espessas, ou seja, para estados de densidade relativa próximos dos 100%.

Os resultados laboratoriais mostraram, ainda, que a água tem um efeito de enfraquecimento dos elementos rochosos, conduzindo a maiores assentamentos. Desse modo, para que o maciço de enrocamento seja menos deformável, após a construção e colocação da cortina, é recomendável regar abundantemente o material de enrocamento.

Não há necessidade ou intenção de usar a água adicionada para lavar ou empurrar os finos para o interior dos grandes vazios do enrocamento. Portanto, não é necessário que a água seja aplicada com alta pressão. É satisfatório que ela seja adicionada por qualquer meio que molhe completamente o material, preferencialmente antes de compactá-lo, embora o benefício continue, pois o enrocamento é submetido, durante a construção, à umidade e à água que percola por ele.

A adição de água ao enrocamento tornou-se uma prática comum em barragens altas numa razão mínima de 200 litros por metro cúbico (CRUZ et al., 2009). Normalmente para essa operação é suficiente uma quantidade de água de cerca de 1/4 do volume do enrocamento.

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

Os enrocamentos devem ser depositados no aterro pelo equipamento de transporte, em montículos. Após esta fase, o material é espalhado com “buldozgers”, de modo a regularizar a altura das camadas, antes da compactação. Essa operação, denominada de “precompactação”, conduz a uma distribuição de blocos mais homogênea e sem segregação, de tal modo que os fragmentos menores vão preenchendo os vazios intragranulares.

A compactação deve ser levada a cabo por rolos vibradores com um peso estático mínimo de 10 tf. O número de passagens do rolo deve ser somente especificado, a partir de estudo experimental, quando da compactação das primeiras camadas. Normalmente, com quatro ou seis passagens de rolo vibrador já se conseguem estados de densidade relativa próximos dos 100%.

As especificações construtivas, relativas à colocação e compactação, só poderão ser definitivamente estabelecidas com os resultados obtidos nos aterros experimentais, a serem realizados no início das obras.

Durante a fase de construção do aterro é necessário efetuar um controle contínuo das características dos materiais de enrocamento, tais como, do estado de compacidade e granulometria, por meio de ensaios de campo, conduzidos sobre amostras de grande dimensão.

Os aterros experimentais são muito utilizados para comprovação da eficácia dos equipamentos de compactação, com relação ao número de passadas e espessura das camadas. Recomenda-se que sejam realizados, logo após o início dos trabalhos na própria praça do corpo da barragem ou em áreas de estoques de rocha.

O estado de compacidade pode ser obtido da determinação do peso e volume do material numa escavação aberta no aterro após compactação (os chamados ensaios “macro”).

Caso haja uma elevada produção de finos à superfície das camadas pelo efeito da compactação, será necessário efetuar uma escarificação ou lavagem com jateamento de água de elevada potência.

Como as zonas de tração na laje se manifestam, em geral, junto às ombreiras, devido aos deslocamentos serem descendentes, na direção do centro da barragem e para jusante, dever-se-á ter um cuidado especial na compactação dos enrocamentos dessa zona, eventualmente pela redução da altura das camadas.

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

Largura da crista

A largura da crista de barragens de enrocamento com face de concreto pode variar entre sete e dez metros. É comum acomodar-se os trabalhos de concretagem da face (acesso, transporte de materiais, deslocamento dos guinchos das fôrmas deslizantes, estocagem de armaduras, etc.), em praças situadas em elevações inferiores a da crista, antes da colocação dos últimos metros de enrocamento.

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

Plinto

Fundação

O plinto é constituído por uma laje ancorada diretamente sobre a rocha de fundação. Essa laje deve servir, por um lado, de apoio à face de concreto e, por outro, permitir o prolongamento para a fundação do plano de vedação da barragem que é, na maioria das vezes, feito através de uma cortina de injeções, realizada a partir da superfície do plinto.

No dimensionamento do plinto devem ser considerados os gradientes hidráulicos, as características geológicas e a geometria (topobatimetria) da fundação (CRUZ et al., 2009, ICOLD, 2010).

A escavação para a localização do plinto deve ser executada cuidadosamente para evitar fraturamento do maciço rochoso e sobre-escavações.

O plinto deve ser apoiado em rocha dura, sã, não erodível, o que permite sua consolidação e seu tratamento de base com injeção de caldas. Todavia, a experiência tem mostrado que é possível fundar o plinto em rochas de qualidade inferior, quando se adotam medidas preventivas que protejam a fundação de erosões, reduzindo os gradientes hidráulicos e revestindo as zonas potencialmente erodíveis com filtros, gunita ou concreto projetado.

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

Como critério básico, a estrutura do plinto e das zonas 2 e 3A devem ser assentadas em rocha são competente e injetável. O tratamento de fundação para controle dos gradientes consiste na execução de cortina de injeção de caldas de cimento. Suas características permitem o controle e a redução da permeabilidade e da vazão, e o controle de erosões (piping). Não se exclui, no entanto, a possibilidade de assentá-lo em rocha alterada, porém não susceptível à erosão, ou em camadas de cascalho e areia.

O projeto da geometria e o alinhamento do plinto na região das ombreiras deve ser dirigido para reduzir as escavações e o volume de concreto de regularização.

De modo a otimizar as escavações a montante do plinto, tornando-as mais econômicas e atendendo os gradientes requeridos, coloca-se parte do plinto dentro da barragem. Esse conceito tem sido adotado em muitas barragens atuais.

No caso de fundações rochosas extremamente decompostas, podem ser indispensáveis escavações adicionais e a construção de blocos de concreto sob o plinto ou muros de contenção, elevando significativamente o consumo de concreto. Em situações como essas, as condições de estabilidade dessas estruturas devem ser cuidadosamente analisadas.

Barras de ancoragem ou tirantes podem ser necessários, não só para fixar o plinto na fundação, mas também para resistir parcialmente ao empuxo da água de montante.

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

Espessura

A espessura do plinto geralmente é considerada igual à da laje da face. As sobre-escavações e a topografia irregular usualmente ocasionam maiores espessuras e, então, uma espessura mínima de projeto de 0,3 a 0,4 m é geralmente razoável para a maioria dos plintos.

A fim de se reduzir as fendas no plinto, devido a variações de temperatura e retração, poder-se-ão construir juntas de construção, devendo-se regar durante 14 dias as superfícies expostas.

Ligação laje-plinto

Uma recomendação empírica de projeto, visando à adequada ligação da laje com o plinto, consiste em estabelecer a face de jusante do plinto perpendicular com a superfície de contato da laje (ângulo de 90°), de modo a atenuar o aparecimento de trincas na laje nessa área de contato.

Uma altura mínima de 0,80m é, usualmente, especificada, abaixo do veda-junta de cobre (fundo). Essa dimensão pode ser reduzida para 0,50m para barragens menores do que 40 m de altura.

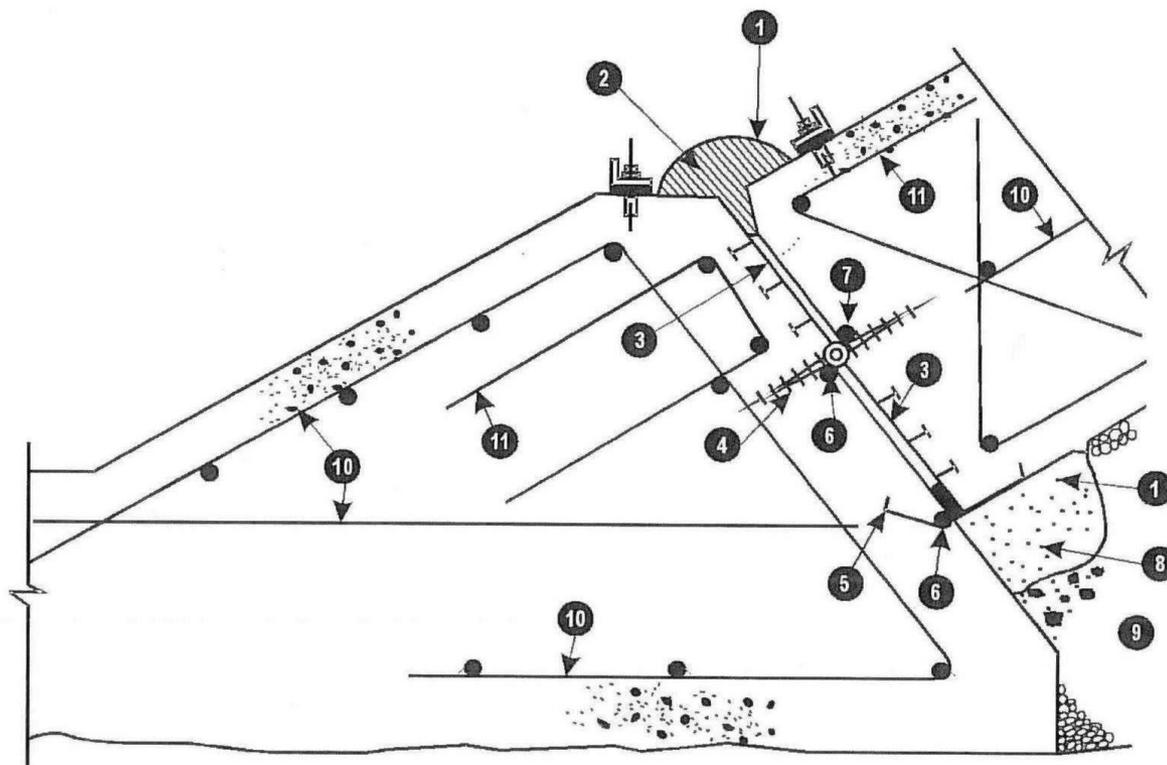
Juntas transversais

Nas atuais barragens não são projetadas juntas de contração transversais, ao longo do plinto. Somente são previstas junta de construção durante as várias etapas construtivas.

Nas Figuras 20 e 21 apresentam-se seções de juntas perimetrais com múltiplas proteções, fundamentais para a sua vedação.

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento



- | | | | |
|---|------------------------------------|----|---|
| 1 | Membrana de Hypalon | 7 | Enchimento em poliestireno expandido (esferovite) |
| 2 | Mastique de vedação | 8 | Mistura areia asfalto |
| 3 | Enchimento em madeira compressível | 9 | Zona de filtro |
| 4 | Veda-junta de PVC | 10 | Armadura de aço |
| 5 | Veda-junta de cobre | 11 | Reforço de armadura (antilasqueamento) |
| 6 | Cilindro de neoprene | | |

Figura 20. Junta perimetral. Conceito de múltipla proteção. Barragem de Salvajina, Colômbia.
(Fonte: ICOLD, 1989a, 2010).

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

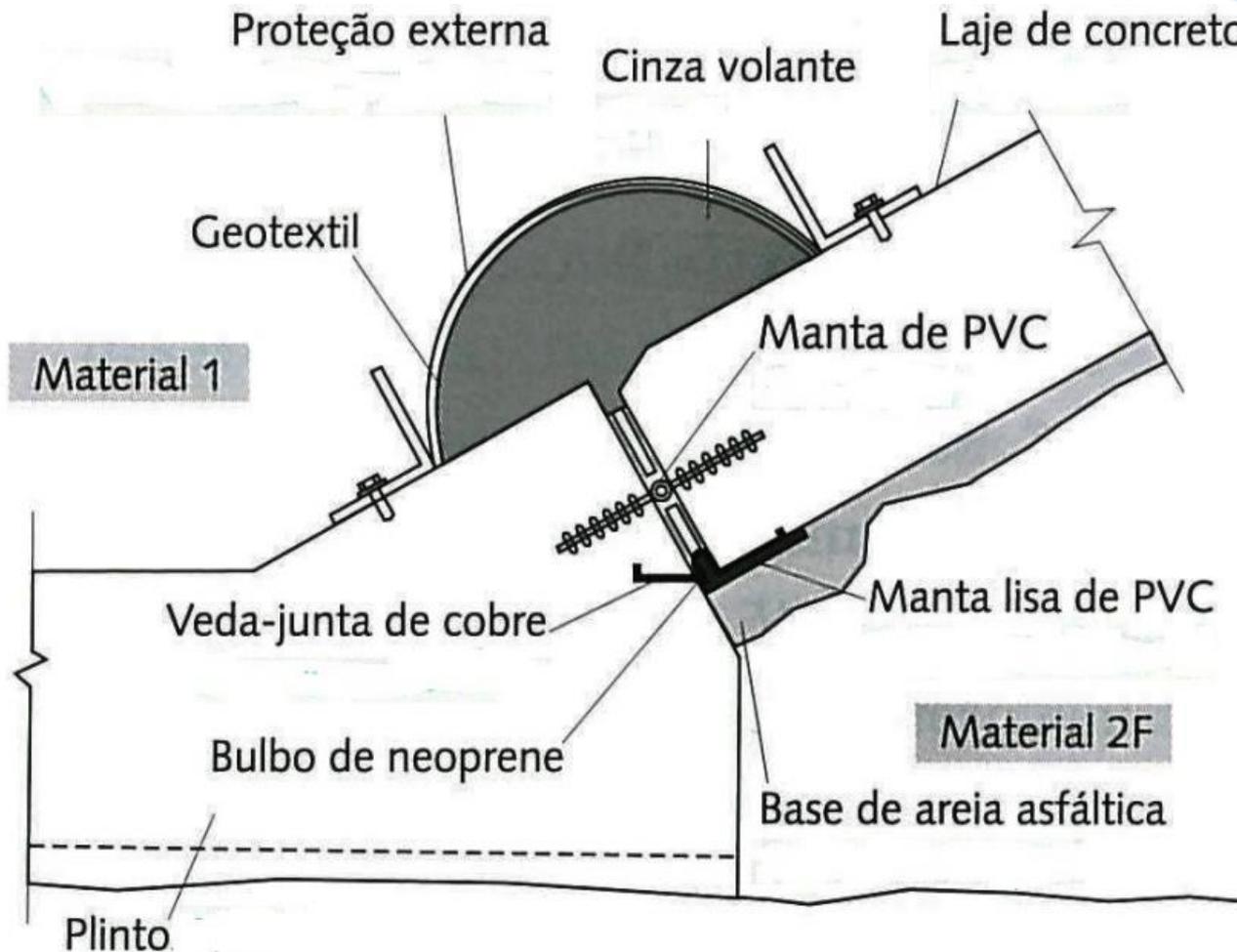


Figura 21. Junta perimetral. Utilização de cinza volante em alternativa ao mastique. Barragem de Aguamilpa, México. (Fonte: CRUZ; MATERÓN; FREITAS, 2009)

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

Laje

As premissas básicas de um projeto da laje de uma barragem deste tipo são:

- Todo o maciço de enrocamento compactado está a jusante do reservatório, protegido por uma superfície (face de concreto) impermeabilizante;
- O fluxo pela fundação, seja rochosa ou aluvionar, é controlado a montante pela execução de cortinas de injeção ou paredes diafragma, respectivamente;
- A laje de concreto, o plinto, a junta perimetral e o projeto das juntas verticais (entre lajes), suas integridades e durabilidade são importantes fatores para o bom desempenho da barragem a longo prazo.

A laje da face de concreto deve, portanto, assegurar adequada estanqueidade e resistência, associada à capacidade de deformação (comportamento elástico), bem como adequada durabilidade.

O dimensionamento e as especificações construtivas da laje têm sido estabelecidos empiricamente. A estanqueidade da laje, como “barreira impermeável”, tem sido posta em causa pela ocorrência de trincas e rupturas durante o enchimento. E o conseqüente aumento acentuado das vazões de percolação.

O projeto e as técnicas de execução da laje devem garantir seu bom comportamento, diante de deformações e sua estanqueidade. Para isso, nos critérios de projeto, é necessário estipular uma vazão máxima admissível de percolação, investigando-se as causas de eventuais valores excedentes e tratando-se as trincas, de modo a reduzir as vazões aos valores admissíveis.

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

O conceito de estanqueidade deve sempre estar associado às outras propriedades do concreto, como resistência e elasticidade, em vista das deformações diferenciadas das várias zonas do maciço durante a construção, bem como ao longo e após o enchimento do reservatório e sua operação.

Espessura

Segundo a ICOLD (1989), os resultados das observações dessas obras têm evidenciado que as pressões da água instalam na maior parte da cortina estados de compressão biaxial e que as tensões de tração que, por vezes, se verificam, ocorrem em zonas bem definidas, como sejam, nas proximidades do plinto, junto à base, e nas ombreiras. Tem-se verificado, ainda, que mesmo essas trações tendem a desaparecer com o tempo, devido a um processo de relaxação de tensões. Esses comportamentos devem-se à reduzida deformabilidade dos aterros de enrocamento compactado e à existência de uma zona especial de apoio da cortina, constituída por material relativamente fino e bem compactado (o material da zona 2).

A deformação da cortina, sob a ação das pressões da água, é essencialmente condicionada pela deformação do enrocamento e não pela sua rigidez. Dessa forma, a espessura da laje é principalmente condicionada pela necessidade de ser impermeável e durável a longo prazo. Em consequência, é recomendável (ICOLD, 2010) a utilização de lajes com espessura constante de 0,25 ou 0,30 m, para barragens de baixa a média altura (até 100 m) e um acréscimo de espessura de 0,002 H para barragens de grande altura (MATERÓN, 2007) propõe para barragens com altura H inferior a 120 m, com enrocamentos bem graduados, que a espessura da laje (e) seja:

$$e = 0,30 + \alpha H$$

Sendo $\alpha=0,002$ para enrocamentos com módulo de elasticidade superior a 100 MPa, e $\alpha=0,003$ para módulos de elasticidade inferiores.

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

Veda-juntas

Distinguem-se diversos tipos de juntas, tais como, junta perimetral, juntas horizontais de construção, juntas de conexão laje-plinto, juntas verticais, e juntas de expansão.

A junta perimetral, externa, entre a cabeça do plinto e a laje, é a junta de maior importância, devendo aplicar-se o conceito de “múltipla proteção”. Têm sido utilizados vários tipos de materiais combinados, tais como, mastique, neoprene, PVC e juntas de cobre (ICOLD, 1989b e CRUZ et al., 2009).

Um material compressível (madeira ou outro) com espessura entre 12,5 e 20 mm é usualmente colocado na interface do plinto com a laje da face. O objetivo é evitar concentrações de tensões de compressão nas bordas da junta durante a construção e o enchimento do reservatório, períodos nos quais a laje da face se movimenta contra a estrutura do plinto, por causa das deformações do enrocamento.

As juntas horizontais de construção são definidas, de acordo com os vários estágios de construção das lajes (2 a 3 estágios para barragens acima de 140 m). São tratadas pela remoção de alguns centímetros da concretagem anterior, limpeza (ar, água) e a realização das conexões entre as armaduras. A armadura serve como transpasse para a concretagem da etapa seguinte. Não se deve conceituar essa junta de construção como de contração, com a colocação de veda-juntas, alternativa desnecessária e custosa.

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

A uma distância L (10 a 20 m) do plinto, nas juntas de conexão laje-plinto, um veda-juntas adicional (além do veda-juntas de cobre, na base da laje) tem sido colocado em alguns projetos, de modo a aumentar a proteção e melhorar a estanqueidade (no caso de trincas) em toda essa área, junto ao plinto.

Nas juntas verticais entre lajes, não há transpasse de armaduras entre duas lajes vizinhas. As juntas de contração devem ser colocadas:

- nas ombreiras, zona de tração (uma das práticas consiste em colocar um veda-juntas de cobre no fundo da laje e um veda-juntas, tipo Jeene, PVC no topo, entre as duas lajes);
- na zona central, onde ocorrem as zonas de compressão, não são colocadas juntas na parte superior, somente o veda-juntas de cobre (fundo); entre as duas lajes é aplicada uma pintura asfáltica em uma das faces, antes da concretagem da laje adjacente. Recentemente (após a ocorrência de trincas e rupturas nas lajes centrais das barragens de Barra Brande e Campos Novos (2005) e de Mohale (2006), durante o enchimento dos respectivos reservatórios), tornou-se aconselhável a inclusão de material compressível, madeira ou material equivalente, de modo a absorver os esforços de compressão.

A Figura 22 ilustram-se as duas situações para as juntas verticais, em zona de compressão e em zona de tensão.

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

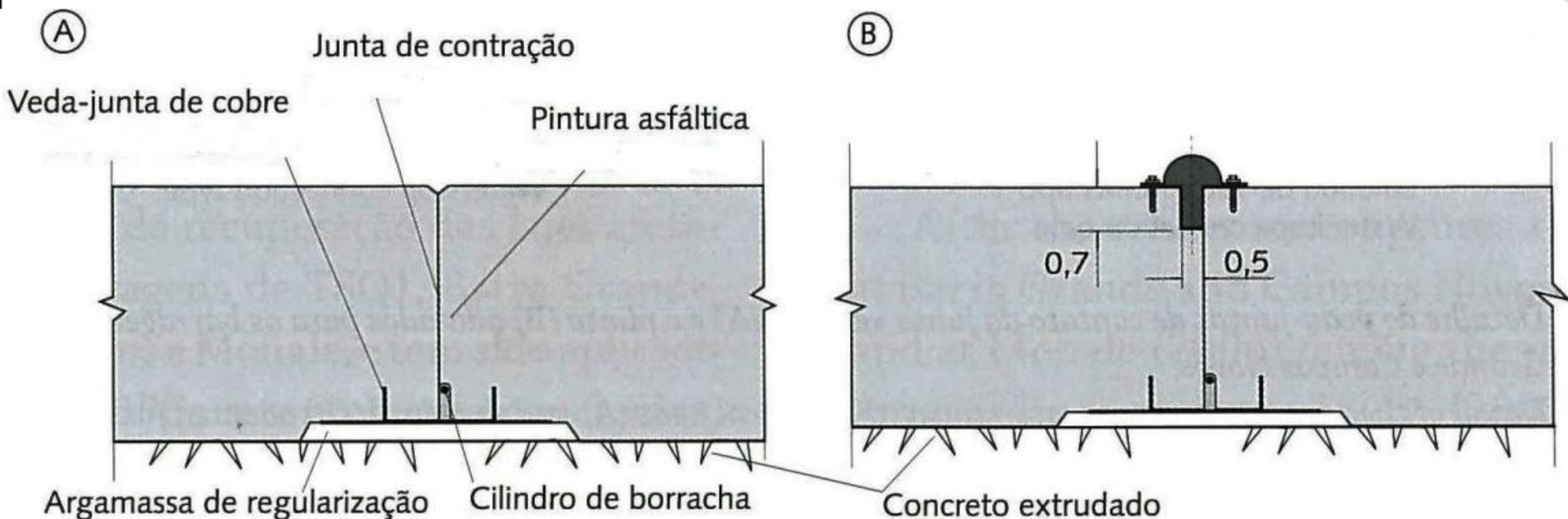


Figura 22. Juntas verticais: A) Campos Novos, área central (zona de compressão); B) Barra Grande RS/SC, ombreiras (zona de tensão). (Fonte: CRUZ; MATERÓN; FREITAS, 2009)

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

As juntas de expansão são de conexão entre a extremidade superior da laje e o muro da crista. Embora normalmente localizada a alguns metros acima do nível da água normal do reservatório, a junta de expansão fica entre a superfície superior da laje e a base do muro-parapeito. O cobre tem sido normalmente utilizado nessas juntas.

Projeto da armadura

A porcentagem de ferragem adotada nos projetos tem sido, de modo geral, fixada empiricamente. A principal preocupação tem sido garantir a estanqueidade pela minimização de trincas e manter a integridade da laje, quando submetida a esforços de compressão e flexão, em consequência das deformações do enrocamento.

Alguns dos critérios empiricamente adotados são os seguintes:

- aplicação de 0,4 a 0,5% (vertical) e de 0,3 a 0,35% (horizontal) de aço em cada direção, em forma de malhas, com exceção da região próxima do plinto e ombreiras, onde geralmente se especifica 0,4%;
- eliminação do transpasse de uma laje para a outra por meio das juntas verticais;
- colocação de armadura dupla antilasqueamento;
- colocação de armadura dupla (0,4% em ambas as direções) em uma faixa de 10 a 15 m, ao longo do plinto (TSQ1, Barra Grande, Campos Novos).

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

Muro de crista

Como dimensão básica para a etapa inicial de projeto pode ser tomada a altura de 3 a 5m de muro.

O projeto e os progressos construtivos com a utilização de pré-moldados têm contribuído para a redução de prazos construtivos e custos do muro-parapeito. **O dimensionamento desse muro deve considerar os seguintes aspectos:**

- promover a dissipação das ondas que sobem pelo talude;
- calcular a borda-livre, a partir do topo do muro -parapeito;
- prolongar as extremidades dos muros até as ombreiras;
- estimar a sobre-elevação nominal, devido aos recalques da barragem (pós-construtivos, pós -enchimento e os da fase de operação, considerando o efeito da fluência);
- concretagem do muro no local ou com elementos pré-moldados.

Após a concretagem dos muros, a área entre as duas estruturas é preenchida com enrocamento fino ($D_{\max} \leq 0,30\text{m}$) em camadas compactadas, até atingir a cota de crista da barragem.

Na Figura 23 apresenta-se um exemplo de muro da crista e pormenor de junta de expansão no contato laje-fundação do muro.

Barragens de Aterro

Terra e Enrocamento

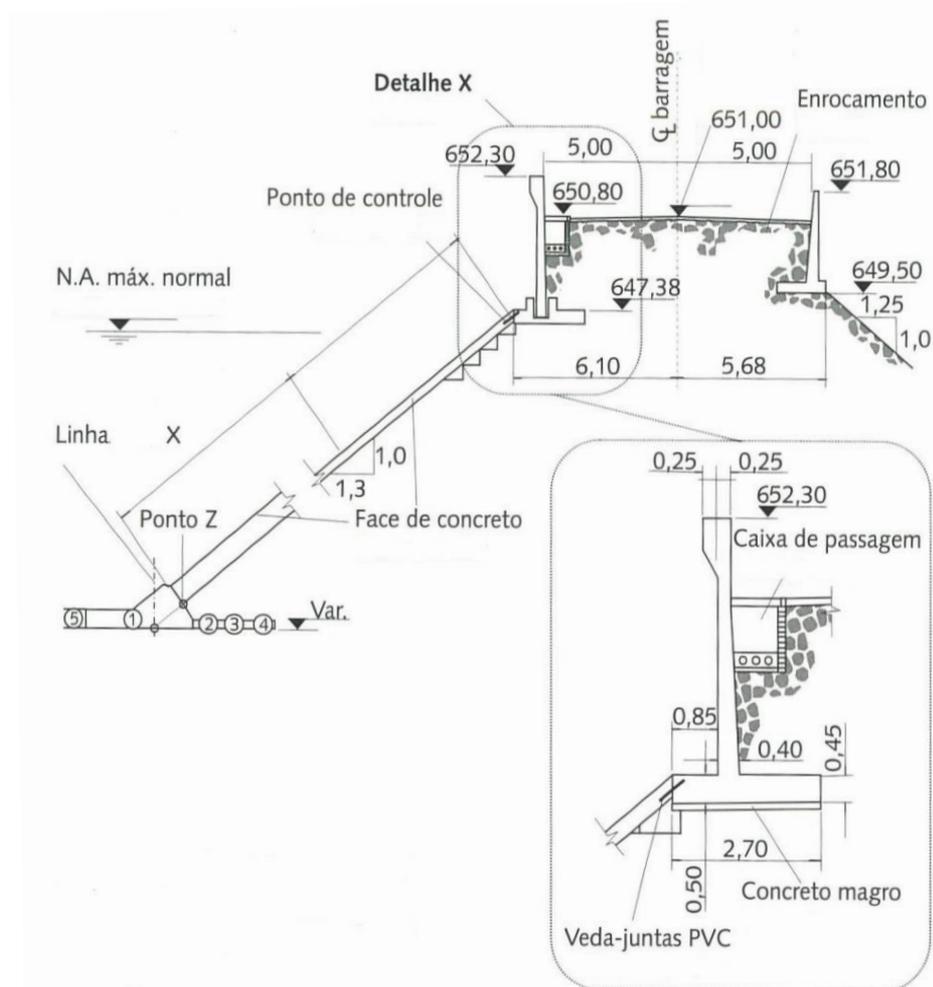


Figura 23. Detalhe do muro da crista e da junta de expansão no contato laje-fundação do muro da barragem de Barra Grande, RS/SC. (Fonte: CRUZ; MATERÓN; FREITAS, 2009)