

SERVIÇOS ANALÍTICOS E CONSULTIVOS EM SEGURANÇA DE BARRAGENS



PRODUTO 10

MANUAL DE SEGURANÇA DE PEQUENAS BARRAGENS BARRAGENS PARTE I - REVISÃO DAS BOAS PRÁTICAS DE SEGURANÇA DE BARRAGENS DE PEQUENA DIMENSÃO PARTE II - MANUAL

CONTRATO Nº 051 ANA/2012

Brasília - DF

Dezembro 2014



**COBA, S.A.
COBA, LTDA.**



**LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL**

© Banco Internacional para a Reconstrução e Desenvolvimento/Banco Mundial

SCN - Qd. 2, Lt. A, Ed. Corporate Financial Center, 7 andar
Brasília, DF - CEP: 70.712-900
Brasil
Tel: (55 61) 3329 1000
Fax: (55 61) 3329 1010
informacao@worldbank.org

The World Bank
1818 H Street, NW
Washington, DC 20433 USA
tel: (202) 473-1000
Internet: www.worldbank.org
Email: feedback@worldbank.org

Este relatório é um produto da equipe do Grupo Banco Mundial. As constatações, interpretações e conclusões expressas neste artigo não refletem necessariamente as opiniões dos Diretores Executivos do Banco Mundial nem tampouco dos governos que o representam.

O Banco Mundial não garante a exatidão dos dados incluídos neste trabalho. As fronteiras, cores, denominações e outras informações apresentadas em qualquer mapa deste trabalho não indicam qualquer juízo por parte do Banco Mundial a respeito da situação legal de qualquer território ou o endosso ou aceitação de tais fronteiras.

Conforme o Contrato nº 051 ANA/2012, os direitos de propriedade intelectual da ANA em quaisquer relatórios, estudos, análises ou outros documentos pré-existentes usados pelo BANCO em conexão com os Serviços de Assessoria devem permanecer com a ANA. Os direitos de propriedade intelectual em materiais novos preparados pelo BANCO em conexão com os Serviços de Assessoria devem pertencer a cada uma das partes, desde que, no entanto, ambas as partes tenham o direito universal, não exclusivo, perpétuo e livre de direitos autorais para usar, copiar, exibir, distribuir, publicar e criar trabalhos derivados do todo ou parte desses materiais e incorporar tais informações em suas respectivas pesquisas, documentos, publicações, web sites, e outras mídias sem o consentimento da outra parte, sujeito, porém, as limitações à divulgação de informações confidenciais e quaisquer direitos de terceiros.

Fica expressamente acordado que o uso pelo BANCO dos direitos de propriedade intelectual referidos no parágrafo anterior, dentro do território brasileiro, precisará de prévia autorização da ANA.

Foto da Capa: Barragem da Fazenda Alvorada no Município de Cristalina/GO.
Autor: LNEC

**SERVIÇOS ANALÍTICOS E CONSULTIVOS EM
SEGURANÇA DE BARRAGENS**

PRODUTO 10 – PARTE I

**REVISÃO DAS BOAS PRÁTICAS DE SEGURANÇA DE BARRAGENS DE PEQUENA
DIMENSÃO**

CONTRATO Nº 051 ANA/2012

DEZEMBRO DE 2014

SERVIÇOS ANALÍTICOS E CONSULTIVOS EM SEGURANÇA DE BARRAGENS

PRODUTO 10 – PARTE I REVISÃO DAS BOAS PRÁTICAS DE SEGURANÇA DE BARRAGENS DE PEQUENA DIMENSÃO

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	3
2	REPRESAMENTO DE PEQUENOS RESERVATÓRIOS	3
3	PRÁTICA INTERNACIONAL.....	4
3.1	MANUAL DE INSPEÇÃO DE PEQUENAS BARRAGENS DA NOVA ZELÂNDIA (NZSOLD, 1997).....	5
3.2	MANUAL SOBRE PEQUENAS BARRAGENS DE TERRA. GUIA PARA LOCALIZAÇÃO, PROJETO E CONSTRUÇÃO (FAO, 2001).....	6
3.3	BOLETIM 109. BARRAGENS COM ALTURA INFERIOR A 30 M (ICOLD, 1997).....	8
3.4	GUIA PARA O PROJETO E A CONSTRUÇÃO DE PEQUENAS BARRAGENS DE ATERRO (CDWR, 1993)	15
3.5	PEQUENAS BARRAGENS. PROJETO, MONITORAMENTO E REABILITAÇÃO (ICOLD, 2013).....	20
3.6	REGULAMENTO DE PEQUENAS BARRAGENS DE TERRA (MOP, 1968).....	27
4	LISTA DE REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	61

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANA – Agência Nacional de Águas

CDWR – California Department of Water Resources, USA

DSIET – Equipe de Especialistas Internacionais em Segurança de Barragens

FAO – Organização das nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura

FCLD - Comité Français des Grands Barrages.

ICOLD – International Committee on Large Dams

MOP – Ministério das Obras Públicas, Portugal.

NZSOLD – New Zealand Society on Large Dams

USBR – US Bureau of Reclamation

USACE – United States Army Corps of Engineers

WB - Banco Mundial

APRESENTAÇÃO

No âmbito do contrato entre o Banco Mundial e a Agência Nacional de Águas (ANA), foi elaborado pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil do Agrupamento COBA/LNEC, um manual de segurança de pequenas barragens para auxiliar a ANA, como entidade reguladora e fiscalizadora de segurança de barragens, e aos empreendedores de barragens, considerando as suas atribuições definidas na Lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010.

Este produto é composto por duas partes, na parte I encontra-se UMA revisão das boas práticas internacionais e nacionais de segurança de barragens de pequena dimensão, na parte II encontra-se um Manual de Segurança de Pequenas Barragens propriamente dito.

O **Manual de Segurança de Pequenas Barragens** pretende estabelecer orientações gerais quanto às metodologias e procedimentos a dotar pelos empreendedores visando assegurar adequadas condições de segurança para as pequenas barragens de que são responsáveis, ao longo das diversas fases da sua vida, designadamente, as fases de projeto, de construção, de primeiro enchimento e de operação.

O Manual aplica-se às pequenas barragens de terra, de altura inferior a 15 m e com um volume do reservatório até 3×10^6 m³, de perfil homogêneo ou zoneado, com vertedouro em lâmina livre e descarga de fundo, destinadas à acumulação de água para quaisquer usos.

Os procedimentos, os estudos e as medidas com vista à obtenção ou concessão de licenças ambientais, necessárias para a implantação dos empreendimentos não são considerados no presente manual, bem como os procedimentos para a gerência das obras ou das empreitadas que regem a construção.

A elaboração deste Manual contou com a participação e conhecimento de profissionais da Agência Nacional de Águas (ANA), sob a coordenação da Superintendência de Regulação (SRE) e participação das Superintendências de Fiscalização (SFI) e de Gestão da Informação (SGI). Como gerentes do contrato atuaram Lígia Maria Nascimento de Araujo, Carlos Motta Nunes e Alexandre Anderaós, todos da Gerência de Regulação de Serviços Públicos e Segurança de Barragens (GESER), vinculada à SRE.

Este relatório foi produzido pela equipe do Agrupamento COBA/LNEC: Laura Caldeira (LNEC), João Bilé Serra (LNEC) e João Marcelino (LNEC). O trabalho foi desenvolvido sob a direção de Erwin De Nys (Especialista Sênior em Recursos Hídricos), Paula Freitas (Especialista em Recursos Hídricos) e Maria Inês Muanis Persechini (Especialista em Recursos Hídricos).

Gostaríamos de agradecer também aos nossos colegas do Banco Mundial, Carolina Abreu dos Santos, Carla Zardo e Vinícius Cruvinel, cujo apoio nos ajudaram a finalizar a edição e divulgação do documento.

SERVIÇOS ANALÍTICOS E CONSULTIVOS EM SEGURANÇA DE BARRAGENS

PRODUTO 10 – PARTE I

REVISÃO DAS BOAS PRÁTICAS DE SEGURANÇA DE BARRAGENS DE PEQUENA DIMENSÃO

1 INTRODUÇÃO

1. O presente relatório do Produto 10 parte I inclui uma revisão das boas práticas internacionais e nacionais de segurança de barragens de pequena dimensão.
2. Estas barragens localizam-se usualmente em áreas rurais, não sendo, em geral, satisfatórias as suas condições de segurança devido a ausência ou inadequação do projeto face aos padrões atuais da engenharia de barragens, a deficientes técnicas construtivas com recurso a mão de obra intensiva, em detrimento de meios mecânicos, a falta de controle da construção e da segurança na fase de exploração e a procedimentos de operação ou de manutenção inadequados, muitas das vezes motivados pela escassez de recursos alocados à sua gestão corrente ou por atitudes desajustadas quanto à sua segurança.

2 REPRESENTAÇÃO DE PEQUENOS RESERVATÓRIOS

3. A criação de pequenos reservatórios está frequentemente associada a pequenas explorações agrícolas ou a abastecimento de pequenas comunidades, com **orçamentos limitados** para a caracterização do local de implantação, o projeto, a construção e a exploração.
4. Da menor dotação orçamental decorre que o número de pequenas barragens é muito elevado. A maioria dessas pequenas barragens são de **terra**, encontram-se **fundadas em maciços terrosos** e possuem **vertedoures sem comportas**.
5. Uma outra consequência manifesta-se no fato de, com elevada frequência, a **capacitação** dos intervenientes nas várias fases do empreendimento ser **reduzida**. Por este motivo, a maioria dos documentos consultados destina-se a **empreendedores sem equipas técnicas** e versam, por isso, os temas de uma **forma simplificada**.
6. Um grande número de pequenas barragens foi construído, na primeira metade do século XX, em especial nos países industrializados e, na segunda metade do mesmo século passado, em países em vias de desenvolvimento.

7. Atendendo aos registos históricos, estima-se em **2% a probabilidade** de uma pequena barragem **romper** (ICOLD, 1997), valor muito superior à associada às grandes barragens.
8. As publicações técnicas de engenharia e económicas sobre a construção de pequenas barragens abordam os aspectos relativos às **atividades dos empreendedores**. São tratados a preparação dos documentos para a outorga, o projeto, a construção e o início de exploração. Do ponto de vista da entidade outorgante, as referências à sua intervenção são praticamente inexistentes.
9. No que se refere aos **documentos para outorga**, são genericamente abordados os estudos da viabilidade hídrica do represamento, do local de implantação, do tipo de barragem, da solução estrutural, do sistema de drenagem, das estruturas extravasoras, das estruturas de adução, do sistema de observação, da viabilidade económica e financeira da exploração e da sua sustentabilidade ambiental.
10. Quanto ao **projeto**, são abordados os requisitos do projetista, a eficácia hidrológica da retenção, a implantação da obra, as condições de fundação, a escolha dos materiais de aterro e das suas áreas de empréstimo, o perfil transversal da barragem, os órgãos de drenagem, a proteção dos taludes, a localização e as características dos órgãos extravasores.
11. Relativamente à **construção**, são abordados a preparação da fundação, a preparação e as condições de colocação dos materiais de aterro, a seleção dos materiais dos filtros e dos drenos, os equipamentos de compactação e os requisitos para a supervisão da construção.
12. No que respeita à **gestão das barragens existentes**, as referências consultadas fornecem indicações sobre a atuação das entidades fiscalizadoras e dos empreendedores.
13. É conferida especial importância às **atividades de controle de segurança** que englobam as inspeções regular ou excepcional e a exploração do sistema de observação.
14. No que respeita à **responsabilidade** pela condução das atividades de controle de segurança, são referidos casos em que esta recai sobre o empreendedor ou sobre a entidade fiscalizadora. No primeiro caso, os documentos consultados apresentam, com extensão e pormenor diverso, indicações sobre a condução das mesmas.
15. Ao contrário do controle de segurança, a responsabilidade pela **manutenção e a reabilitação** das barragens é, sistematicamente, atribuída ao empreendedor.

3 PRÁTICA INTERNACIONAL

16. São seguidamente apresentados os aspectos mais relevantes de um conjunto de documentos analisados para ilustração das boas práticas a nível internacional. Estes documentos integram a lista de referências bibliográficas compiladas.
17. Foram considerados manuais de inspeção, de complexidade e pormenor diverso, e manuais de orientação de empreendedores relativamente aos aspectos técnicos de engenharia de barragens, aos

aspectos econômicos da sua construção e exploração, aos aspectos ambientais e de viabilidade técnica de exploração do reservatório.

18. Maioritariamente, as barragens versadas nestes manuais destinam-se à retenção de água para fins agrícolas ou para abastecimento humano.

3.1 MANUAL DE INSPEÇÃO DE PEQUENAS BARRAGENS DA NOVA ZELÂNDIA (NZSOLD, 1997)

19. O **âmbito** deste manual é o das **barragens** de altura inferior a 4 m (medida entre a fundação e o coroamento), com altura de água no reservatório inferior a 3 m e com um volume retido máximo $0,020 \times 10^6$ m³. A legislação neo-zelandeza isenta este tipo de barragens de quaisquer requisitos relativos ao seu licenciamento.

20. São apresentadas três tabelas com os **modos de ruptura** associados à erosão externa, à erosão regressiva e ao deslizamento de taludes e da sua fundação. Nelas são enumeradas as causas, os métodos de detecção precoce, as consequências e as medidas preventivas de mitigação do risco associado.

21. São dadas indicações sobre os procedimentos a adotar na realização das **inspeções visuais**, consideradas como essenciais para a identificação, em tempo útil, de qualquer **desempenho inadequado** quanto ao comportamento mecânico, à capacidade de retenção da água no reservatório e ao escoamento das afluições superiores à capacidade de armazenamento do reservatório.

22. É preconizada a **inspeção anual regular e a inspeção** após ocorrência de qualquer evento **excepcional**, como cheias com galgamento, descargas intensas através das estruturas extravasoras e descidas bruscas do nível de água no reservatório.

23. É fornecida uma **ficha de inspeção regular**, com a identificação da barragem, com as suas características geométricas, com a descrição do estado de conservação dos paramentos, das ombreiras e dos órgãos extravasores (de superfície e de fundo), e com a indicação das intervenções de reparação necessárias.

24. São listadas as situações cuja detecção justifica a **intervenção de um engenheiro de barragens**. Concretamente, são mencionadas a afluição excessiva de água no pé ou na área a jusante da barragem, a percolação na zona das ombreiras, os recalques sobre condutos existentes no interior do aterro, as trincas transversais no coroamento, as trincas longitudinais de desenvolvimento expressivo no coroamento ou nas zonas superiores dos taludes de montante e de jusante e o carreamento de partículas no escoamento surgente no paramento de jusante.

25. É, complementarmente, apresentada uma **lista de patologias** com as correspondentes recomendações de prevenção e de correção, cuja responsabilidade é atribuída ao empreendedor. Este deverá mobilizar os meios necessários para a implementação dessas medidas.

3.2 MANUAL SOBRE PEQUENAS BARRAGENS DE TERRA. GUIA PARA LOCALIZAÇÃO, PROJETO E CONSTRUÇÃO (FAO, 2001)

26. Este manual trata de **pequenas barragens de terra nas regiões mais áridas do Continente Africano**, destinadas ao fornecimento de água para regadios, ao abastecimento de água em zonas rurais e a outras formas de abastecimento de água (desde que devidamente tratada).

27. É **destinado** a engenheiros, técnicos, agrários, agricultores e construtores, desde que **com alguns conhecimentos de engenharia** e alguma **experiência em barragens** de rega ou de abastecimento de água.

28. O seu **objetivo** é o transmitir, de uma forma pragmática e abrangente, o entendimento prático dos princípios e procedimentos utilizados na construção de pequenas barragens de terra, para permitir a execução de pequenas barragens de forma competente e segura, sem necessidade de recurso a projetos caros e complexos e a técnicas de construção sofisticadas, correntemente associados a barragens de maiores dimensões.

29. São consideradas como **pequenas barragens de terra** as de altura não superior a 5 m desde o leito do rio até ao nível do coroamento.

30. Relativamente à **qualificação técnica dos intervenientes** é indicado que as barragens que envolvam situações incomuns quanto à topografia (i.e., declives acentuados a montante e riscos de deslizamento), à hidrologia (i.e., cheias torrenciais ou induzidas pelo degelo, e secas) ou à geotecnia (i.e., inadequação dos solos, solos sódicos e fundações com zonas permeáveis) deverão ser projetadas e construídas sob a supervisão de um engenheiro.

31. Para barragens com bacias hidrográficas que excedam 25 km² ou com reservatórios com volume de armazenamento superior a 0,050 × 10⁶ m³ é recomendada a realização de **estudos de engenharia** para o dimensionamento das estruturas extravasoras e para o cálculo da borda livre.

32. Como **principais vantagens** associadas a este tipo de pequenas barragens de terra são referidas as seguintes: a utilização de materiais naturais locais, a simplicidade de procedimentos de projeto, a menor exigência quanto às condições da fundação e a mobilização dos meios disponíveis dos empreendedores.

33. No que respeita às **desvantagens**, considera-se que estas barragens apresentam elevada suscetibilidade a roturas por galgamento e a deteriorações pela ação erosiva de ondas, alertando-se para necessidade absoluta de adoção de **vertedouros** e de **proteção adequada do talude de montante**. Chama-se, ainda, a atenção para o fato do projeto e a construção de vertedouros adequados ser normalmente a parte tecnicamente mais difícil de uma pequena barragem, devendo ser selecionados locais apropriados para a descarga das vazões.

34. No que respeita ao local de **implantação da barragem**, na fase de estudos deverão ser considerados alguns fatores exógenos à barragem, como sejam, as condições de acessibilidade, a disponibilidade de materiais, a posse da terra, as preocupações ambientais, as necessidades da

comunidade, a distância até ao fornecimento de energia elétrica e a possibilidade de inundação de estradas, pontes e edifícios.

35. É apresentada uma ajuda de memória relativa aos **aspectos hidrológicos e hidráulicos**, nomeadamente, com referência à área e às afluições à bacia hidrográfica, aos picos de cheia, ao cálculo da cheia máxima provável (*CMP*) segundo o método racional, às dimensões do vertedouro e à estimativa do volume de armazenamento necessário.

36. É dada especial relevância ao dimensionamento da **capacidade de armazenamento útil** do reservatório. É recomendado que essa capacidade seja superior à procura durante o ciclo de uma cultura.

37. O volume de **armazenamento** deverá ser inferior às afluições estimadas para a bacia hidrográfica num ano de seca ou baseado numa média aceitável de afluições ao longo de um período adequado, nas necessidades (que variam de acordo com a época do ano) e na eficiência de rega, nas taxas de evapotranspiração e em outros fatores climáticos. É chamada a atenção para o valor potencialmente elevado das perdas por evaporação, as quais dependem do clima, da área e da altura do reservatório.

38. Considera-se indispensável a **existência de vertedouro** nestas barragens. No entanto, em reservatórios dissociados de linhas de água (como os *dewponds* no Reino Unido), esta exigência pode ser dispensada.

39. Para **vazões afluentes não muito elevadas**, é sugerida a utilização de uma tubagem, de diâmetro adequado, instalada numa trincheira num dos lados da barragem e a uma cota adequada (0,5 a 1 m abaixo da cota máxima do represamento). Para maiores vazões, esta solução poderá ser complementada com a construção de um vertedouro de superfície numa das margens. É importante que a soleira deste vertedouro disponha de uma cobertura arrelvada e que a base do aterro e o pé de jusante da barragem sejam protegidos contra a erosão por enrocamento lançado (*rip-rap*), enrocamento de pedra arrumada ou gabiões.

40. No que respeita à **construção**, é abordada a utilização de **materiais de qualidade inferior** na construção de barragens de terra. Perante a escassez ou a ausência de solos argilosos adequados, é afirmado que um aterro pode ser construído, com um nível de segurança aceitável, com outro tipo de materiais. Para o núcleo deverá utilizado o material de menor permeabilidade disponível, sendo o material mais grosseiro aplicado a jusante do núcleo.

41. Poderão também ser usadas **argilas expansivas**, desde que misturadas com um solo grosseiro, e que, durante a fase de exploração, o aterro permaneça húmido, para o que será necessário que o nível de água no reservatório se mantenha próximo do nível normal de retenção. As inclinações dos paramentos devem ser bastante adoçadas, no máximo $1(V):2(H)$, na face de jusante, e $1(V):2,25(H)$ ou $1(V):2,5(H)$, na de montante.

42. A integridade estrutural da barragem deverá ser garantida mediante uma adequada **seleção e compactação dos materiais** utilizados, sob pena de ocorrerem pontos de infiltração preferenciais, que constituem focos potenciais de erosão do corpo da barragem.

43. A **construção de barragens** com *bulldozer* é apontada como uma forma econômica para o armazenamento de pequenas quantidades de água. São apresentados os requisitos para a otimização desta construção:

- (i) altura máxima de 4 m;
- (ii) largura mínima da base de 20 m (para 4 m de altura);
- (iii) e largura mínima do coroamento 3 m.

44. A **fundação** deverá ser limpa de todo o material orgânico e do solo superficial até a uma profundidade mínima de 0,15 m. A fundação deverá ser bem compactada e, se necessário, escavadas trincheiras de impermeabilização. O **material de aterro** deverá ser espalhado com *bulldozer* ao longo de todo o desenvolvimento da barragem, em camadas até 0,15 m de espessura (de preferência, inferior), compactadas com os melhores meios disponíveis (i.e. gado, trator com pneus cheios de água, manualmente usando maços, etc.). A inclinação dos taludes não deverá exceder $1(V):2(H)$.

45. É fortemente **desaconselhada a construção** destes aterros sobre blocos de pedra e sobre formigueiros, pois as térmitas (cupim, salalé, muchém) podem causar sérios danos.

46. De forma a evitar a erosão superficial, o crescimento de árvores, a sedimentação, a infiltração e os danos provocados por animais, designadamente, insetos, indica-se que as barragens de terra requerem uma **manutenção** contínua e muito frequente.

47. É ainda necessária a sua **inspeção visual** regular e, especialmente, após grandes chuvadas ou cheias.

48. Se o abastecimento de água durante o período seco for essencial, ou se as taxas de evaporação forem altas, é sugerida a criação de uma **reserva de água para o período de estiagem**, através da escavação, na área do reservatório, de uma zona mais profunda (que permita uma altura de água superior a 4 m), suficientemente afastada (é sugerida a distancia mínima de 10 m) do pé de montante da barragem e do vertedouro.

3.3 BOLETIM 109. BARRAGENS COM ALTURA INFERIOR A 30 M (ICOLD, 1997)

49. Grande parte das **barragens com menos de 30 m** de altura são de terra, fundadas essencialmente em maciços terrosos, com vertedouros sem comportas, **destinadas à rega** e construídas com orçamentos limitados, nomeadamente para os estudos de projeto (prospecção, caracterização dos materiais, etc.).

50. Em **países industrializados**, as barragens foram projetadas e construídas maioritariamente com **meios mecanizados**, tendo cerca de 0,25% registrado ruptura por erosão interna. A taxa anual de ruptura é, atualmente, de 1 em cada 30.000 barragens.

51. Na **China**, nos anos 60, construíam-se cerca de 1.000 barragens por ano, a maior parte **sem os adequados meios mecânicos**. Os vertedouros foram dimensionados para períodos de retorno de 100 a 200 anos. A respectiva taxa de ruptura era de cerca de 3%, sobretudo por galgamento.

52. A **diminuição do risco** associado às barragens existentes deve iniciar-se pela identificação, ainda que sumária, das barragens de maior risco, seguida da aplicação de processos conducentes ao **aumento da segurança**, ainda que de eficácia parcial, e pela instalação de **sistemas de aviso e de alerta**.

53. No que respeita à análise das **situações de ruptura**, as causas mais frequentes estão relacionadas com a **erosão regressiva** e com o **galgamento**.

54. Tem havido uma **redução da incidência da erosão regressiva** nas barragens mais recentes, em resultado da evolução ao nível do projeto e da construção.

55. Como causa para diversas rupturas de barragens construídas antes de 1930 é apontada a do **subdimensionamento do vertedouro**. A taxa correspondente tem sido progressivamente reduzida nas barragens construídas após aquela década.

56. A título de orientação, o documento indica o valor da **cheia correspondente a um período de retorno de 10.000 anos** em função da área da bacia hidrográfica e do clima no local da barragem, que se reproduz no Quadro 1.

Quadro 1 - Valor da cheia para um período de retorno de 10.000 anos (m^3/s)

Área da bacia hidrográfica (km^2)	2	10	50
Climas de pluviosidade moderada	10	30	100
Climas intermédios	30	100	300
Climas de pluviosidade extrema	100	300	1.000
Registo máximo mundial	200	700	2.000

57. Estima-se que cerca de 3% das rupturas por galgamento se devam ao efeito de **cascata**, isto é, em que a ruptura de uma barragem a montante provoca a ruptura de outra barragem a jusante.

58. A incidência do **galgamento durante a construção** de pequenas barragens é normalmente muito reduzida.

59. Não há referências a rupturas devidas a **ações sísmicas** em pequenas barragens. No entanto, para barragens constituídas por aterros hidráulicos, este deverá ser um aspecto a considerar. Este tipo de rupturas podem ocorrer imediatamente ou algumas horas, ou até dias, após o evento.

60. Em **barragens de concreto ou de alvenaria de gravidade**, as rupturas podem dar-se por erosão regressiva da fundação ou das ombreiras, ou por erosão externa causada pela passagem de grandes vazões.

61. Em **barragens em concreto**, a ruptura pode também ser devida ao escorregamento de blocos na fundação ou ao basculamento de blocos nas ombreiras. Nas **barragens em arco**, as rupturas normalmente estão associadas a problemas na fundação.

62. Em **barragens de alvenaria** também podem ocorrer rupturas na estrutura da barragem, que se manifestam por trincas inclinadas para jusante.

63. Nas **barragens de concreto ou de alvenaria**, uma grande parte das rupturas ocorre durante o primeiro enchimento ou até 10 anos após a construção. As rupturas são, normalmente, rápidas.

64. O **projeto de pequenas barragens** deve contemplar a análise dos dados históricos e seguir as seguintes orientações para mitigação das causas de insucesso:

a. **Corpo da barragem:**

- i. a suavização dos taludes representa uma pequena parcela do custo e aumenta muito a segurança da barragem;
- ii. o núcleo impermeável não deve ser limitado à cota do nível de retenção normal;
- iii. no dimensionamento da borda livre deve ter-se em atenção as especificações dos materiais de construção, atendendo, por exemplo, a que os solos argilosos apresentam maior resistência ao galgamento;
- iv. o controle de construção e o controle de qualidade são essenciais;
- v. a ocorrência de baixas temperaturas durante a fase construtiva de barragens de terra, capaz de induzir a congelação superficial, obriga à remoção das camadas afetadas;
- vi. a drenagem através de filtros e drenos é essencial para reduzir a possibilidade de erosão interna; no entanto, não havendo materiais disponíveis, o sobrecusto relativo à sua aquisição e transporte pode ser elevado, pelo que poderá ser equacionada a utilização alternativa de geossintéticos.

b. **Proteção do talude de montante:**

- i. se a manutenção da proteção for muito dispendiosa, deve ter-se em consideração que não há registro de acidentes devidos à ondulação;
- ii. no caso dos vertedouros sem comportas, a zona superior do talude (2 a 3 m a partir do coroamento) raramente está sob a ação da água;
- iii. a altura significativa das ondas varia com a velocidade do vento e a raiz quadrada do *fetch*, o qual, para as pequenas barragens, é normalmente inferior a 1 km;
- iv. dado que a direção do vento intenso não coincide em geral com a máxima dimensão do reservatório, a altura significativa das ondas é, em geral, inferior a 0,5 m;
- v. para alturas significativas de ondas superiores a 0,50 m é necessário proteger o talude, recorrendo a *rip-rap* lançado ou colocado à mão, a blocos de concreto ou a solo-cimento;
- vi. em certos casos, pode ser preferível adoçar os taludes ou aumentar a espessura do corpo da barragem para ter em conta os efeitos da erosão devida à ação das ondas no reservatório;
- vii. a proteção é indispensável em barragens construídas com solos finos siltosos.

c. **Proteção do talude de jusante:**

- i. destina-se essencialmente à proteção contra a erosão superficial causada por chuvas intensas e, em certos casos, poderá suportar o galgamento por um tempo e com uma lâmina de água limitados.

d. **Fundação:**

- i. a fundação de pequenas barragens de aterro pode efetuar-se sem contacto obrigatório com o firme rochoso, uma vez que são raros os problemas de rupturas de barragens de pequena dimensão com origem na fundação;
- ii. é necessário assegurar a ligação da zona impermeável ou impermeabilizada da fundação com o órgão impermeável do aterro (para materializar uma fronteira impermeável entre o reservatório e a área a jusante);
- iii. é necessário adotar filtros que impeçam a erosão regressiva e realizar o controle e o registro da percolação.

e. **Descarregadores de fundo e tomadas de água:**

- i. representam uma parcela significativa do custo global de uma pequena barragem (5 a 10%);
- ii. em certos casos pode não se justificar o descarregador de fundo, uma vez que o reservatório pode ficar quase vazio no fim da estação seca;
- iii. as tubulações ou galerias sob o aterro são frequentemente causa de acidentes devido à percolação ao longo do extradorso da tubulação.

f. **Vertedouros:**

- i. em pequenas bacias, a cheia extrema pode chegar a ser 1.000 vezes superior à vazão normal do rio e 100 vezes superior à vazão da cheia normal;
- ii. normalmente, nestas bacias, o tempo de concentração é baixo e é recomendada a utilização de vertedouros sem comportas, para anular o tempo de resposta necessário para a operação das comportas;
- iii. o dimensionamento hidráulico deverá basear-se na definição clara do nível de segurança exigido e na minimização do custo relativo a este nível de segurança;
- iv. as barragens podem ser agrupadas em 3 **categorias, de acordo com a probabilidade anual de ruptura:**
 1. **próxima de 10^{-3}** , correspondente a uma cheia com um período de retorno de 100 anos, com borda livre suficiente, aplicável a barragens com danos potenciais a jusante pouco significativos;
 2. **próxima de 10^{-4}** , aplicável a aterros constituídos por solos argilosos, se forem adotados sistemas de alerta para cheias com período de retorno superior a 100 anos;
 3. **probabilidade de rotura inferior a 10^{-5}** , normalmente associada à cheia máxima provável, opção muito comum nos países industrializados para barragens com danos potenciais a jusante significativos (nomeadamente

com um mínimo de 10 pessoas afetadas a jusante) e considerada bastante dispendiosa.

- v. é sugerido que a **vazão de dimensionamento** para o intervalo habitual da probabilidade de rotura (entre 10^{-5} e 10^{-3}) seja definida pela seguinte regra multiplicativa: ao extremo superior corresponderá um valor $Q_{10^{-3}}$ igual a 60 a 70 % de $Q_{10^{-4}}$ ($Q_{10^{-3}} = 0,60 - 0,70 \cdot Q_{10^{-4}}$) e ao extremo inferior, mais seguro, uma vazão $Q_{10^{-5}}$ igual a 30 a 40% superior a $Q_{10^{-4}}$ ($Q_{10^{-5}} = 1,30 - 1,40 \cdot Q_{10^{-4}}$).

65. É chamada a atenção relativamente à **segurança ao galgamento** quando o dimensionamento do vertedouro tenha sido baseado na cheia máxima provável, considerada muitas vezes suficiente, uma vez que outros fenómenos ou eventos podem ocorrer, como a existência de problemas nas comportas, obstruções em vertedouros de soleira livre, a ruptura de barragens em cascata, a onda induzida por um sismo, escorregamentos no reservatório, a mudança do regime hidrológico devido a alterações climáticas e o vandalismo.

66. No que respeita às **barragens existentes**, a sua reabilitação ou melhoramento visa, em geral, aumentar a sua segurança pelo controle do risco, o aumento da sua capacidade de armazenamento e a melhoria da qualidade da água.

67. A verificação de segurança terá de estar associada a uma **análise de risco** que considere os danos potenciais e o número de pessoas afetadas pela ruptura da barragem.

68. A **cheia causada pela ruptura da barragem** pode ser estimada através da equação: $Q = K h^{1,5} V^{0,5}$, onde h é a altura da água na zona de ruptura (m), V o volume (hm^3) e o coeficiente K assume os valores 10 ou 50, respectivamente, para argilas bem compactadas e para materiais granulares (areia e cascalho).

69. Como indicação geral relativa às **rupturas e às suas consequências**, é referido que, nas barragens constituídas com **materiais granulares**, aquelas são de desenvolvimento mais rápido e capazes de gerar ondas de cheia mais elevadas e com maiores velocidades de escoamento, causando, assim, **maiores danos a jusante**.

70. O **galgamento** é um dos problemas mais frequentes em acidentes de barragens e responsável pelo maior número de vítimas. A diminuição do risco deverá considerar a prevenção do acidente, mas também os sistemas de aviso, os quais podem ser simples e eficientes.

71. Em bacias com área inferior a 1 km^2 é relativamente simples estimar, através de fórmulas aproximadas, a **precipitação capaz de causar a ruptura da barragem**, que consideram a precipitação, a infiltração, a área da bacia e a área do reservatório. Mesmo na ausência de dados sobre a precipitação numa dada área, é possível ordenar, recorrendo a um índice de risco, as barragens aí existentes.

72. No que se refere à **viabilidade econômica das intervenções de reparação ou reabilitação** de barragens, é sugerido limitar os seus custos a um máximo compreendido entre 10 e 20 vezes o custo esperado da perda da funcionalidade da obra ao longo do tempo previsto de exploração.

73. Relativamente ao aumento da segurança relativamente ao **galgamento de barragens sem comportas**, podem ser consideradas medidas estruturais ou não estruturais.

74. De entre as **medidas estruturais**, é realçado o **aumento da cota do coroamento**, o que permite aumentar a capacidade de vazão do vertedouro devido ao aumento de carga. A cota do coroamento pode ser variável ao longo do desenvolvimento da barragem, de forma a posicionar uma eventual brecha num local mais favorável (com menor carga hidráulica). Outra hipótese consiste em **reduzir a cota da soleira do vertedouro** com, ou sem, diques fusíveis. Para além destes aspectos, a **manutenção**, nomeadamente garantindo a desobstrução do vertedouro, é fundamental.

75. No que respeita a **medidas não estruturais**, é referida a instalação de **sistemas de alerta**, embora estes sejam mais comuns em reservatórios de grande dimensão.

76. Em reservatórios de menor dimensão, o risco pode ser mitigado promovendo a **evacuação das populações** em situações específicas. Uma forma simples de promover a evacuação em zonas urbanas consiste na instalação, nas margens do rio, de marcas de alerta e de evacuação. Complementarmente, um pluviómetro poderá dar indicações sobre a ocorrência de grandes chuvas. Em situações em que haja previsão de cheias excepcionais, poderá ser promovida a **vigilância** da barragem, com meios de comunicação eficientes.

77. As **barragens com comportas** são, mais frequentemente, mais antigas e/ou com reservatórios de maior dimensão. Neste caso, a probabilidade de ruptura corresponde à soma das probabilidades associadas aos seguintes eventos: com as comportas abertas, com uma ou mais comportas fechadas e com todas as comportas fechadas.

78. De entre as **medidas de redução do risco** são indicadas o alteamento do coroamento, a proteção dos taludes para permitir o escoamento de caudal em situação excepcional, o aumento da fiabilidade dos equipamentos hidroelctromecânicos, com o fornecimento de energia de emergência e a automação, e a introdução de sistemas de alerta.

79. Em barragens de aterro, uma parte das situações de acidente é devida a fenómenos de **erosão interna**, que podem ocorrer bastante tempo após o primeiro enchimento, embora a maioria ocorra na década inicial de exploração. Refere-se ser a inspeção um aspecto fundamental para a detecção dos sinais iniciais desta patologia.

80. É recomendada especial atenção às **zonas de atravessamento de tubulações**, locais onde se pode concentrar a ocorrência de recalques anormais e se deve proceder à monitorização do carreamento de material sólido e do escoamento, constituindo os piezómetros e os medidores de vazão instrumentos importantes na detecção de problemas de erosão interna.

81. Após a **detecção de algum sintoma de erosão interna**, a par da redução da carga hidráulica por abaixamento do nível do reservatório, deve-se equacionar a colocação de material de filtro sobre as zonas com indícios de erosão.

82. As **rupturas devido a ação sísmica**, em pequenas barragens, estão normalmente associadas a barragens construídas sobre fundações arenosas ou siltosas. Como os problemas originados pelos

sismos podem desenvolver-se algum tempo depois do evento sísmico, é recomendada a manutenção de uma vigilância mais apertada num período de algumas horas a alguns dias após a ocorrência.

83. O **aumento de capacidade do reservatório** é uma intervenção comum em barragens. Na situação frequente em que a diferença de nível entre a soleira do vertedouro e o coroamento se situa entre 2 e 6 m, o volume armazenado das pequenas barragens entre estas cotas é comparável à capacidade efetiva do reservatório, sendo, por isso, compreensível a ideia de aumentar a capacidade do reservatório subindo a cota da soleira do vertedouro.

84. O **aumento de capacidade do reservatório** deve ser ponderado tendo em consideração os aspectos económicos e hidrológicos. Chama-se a atenção para os casos em que o reservatório armazena a maior parte das aflúncias hidrológicas à bacia, para os quais este aumento pode não fazer sentido. No entanto, para muitas das pequenas barragens existentes, a medida pode fazer sentido no que respeita à disponibilidade de água e ao controle de cheias. Por outro lado, o referido aumento representa um incremento do risco e do dano potencial associado, em particular, do risco de percolação e de erosão regressiva (em especial em barragens antigas e cuja compactação suscite dúvidas), para os quais se deve ter em conta a cota do núcleo (ou de outro órgão de impermeabilização) e a necessidade de aumento da capacidade de vazão do vertedouro.

85. O **aumento de capacidade do vertedouro** pode ser conseguido pelo aumento do perímetro da soleira, pela redução da cota da soleira ou pela instalação de diques fusíveis. Quando existam riscos a jusante, os órgãos deverão ser suficientemente robustos para funcionar em condições de deficiente manutenção. São exemplos de elementos a considerar neste caso:

- a. *sacos de areia ou outros obstáculos colocados manualmente*, por um lado vantajosos pelo custo reduzido da sua aplicação, mas causando dúvidas quanto à efetivação do abaixamento da soleira, face à possibilidade de não serem removidos em tempo útil;
- b. *diques fusíveis gravíticos*, os quais são dimensionados para permitir a passagem de cheias moderadas, sem ruptura, mas romperem para cheias superiores, aumentando a capacidade de vazão;
- c. *vertedouros insufláveis*, cuja instalação é rápida, envolvendo reduzido volume de trabalho de construção civil e sem necessidade de fornecimento de energia para a sua desativação.

86. Em **barragens de concreto e de alvenaria**, aplicam-se algumas das considerações relativas às intervenções de melhoramento anteriormente referidas, sendo, no entanto, necessário ter em consideração que a menor probabilidade de ruptura deste tipo de estruturas é acompanhada pela maior rapidez do seu desenvolvimento e, por conseguinte, o menor tempo disponível para alerta e para evacuação da área inundável.

87. Nas situações em que os **riscos a jusante sejam significativos** nas barragens de concreto e alvenaria é recomendado:

- a. o aumento da confiabilidade das comportas, caso existam;

- b. a diminuição da cota da soleira dos vertedouros sem comportas e a instalação de diques fusíveis;
- c. o reforço da ligação do corpo da barragem à fundação, no caso de haver problemas de estabilidade;
- d. a proteção com geomembrana a montante (em especial nas de alvenaria), se houver passagens de água.

88. No que respeita à **observação da barragem**, todas as barragens devem ser inspecionadas, com especial relevo na fase inicial, isto é, durante o primeiro enchimento e nos primeiros anos de exploração.

3.4 GUIA PARA O PROJETO E A CONSTRUÇÃO DE PEQUENAS BARRAGENS DE ATERRO (CDWR, 1993)

89. O guia apresenta o **enquadramento legal e técnico das pequenas barragens** no estado da Califórnia e aplica-se a pequenas barragens em zonas rurais onde o risco a jusante seja mínimo.

90. Em termos de exigências relativamente ao **projeto e ao projetista**, são distinguidos três tipos de barragens:

- (i) barragens de altura superior a 7,5 m ou com capacidade do reservatório superior a $0,062 \times 10^6$ m³, com exigências acrescidas relativas ao projeto e à sua pormenorização;
- (ii) barragens de altura inferior a 1,8 m ou com capacidade do reservatório inferior a $0,0185 \times 10^6$ m³, para as quais não é indicada qualquer exigência específica;
- (iii) e as restantes barragens.

91. O **pedido de autorização de construção** da barragem deve conter o projeto elaborado por um engenheiro civil registrado. Dependendo da complexidade da estrutura, poderá ser necessário complementar a informação com dados de prospeção geológica e hidrológicos e com elementos relativos ao dimensionamento estrutural e hidráulico.

92. O guia foca diversos aspectos relativos essencialmente ao **projeto e construção de pequenas barragens**, sendo seguidamente apresentada uma síntese dos aspectos mais relevantes.

93. A **caracterização geológico-geotécnica** dever incluir informações relativas à geologia, à sismicidade, às condições de fundação e aos materiais de construção. É recomendada a consideração da geologia regional e local, da sismicidade, do potencial de escorregamento na zona do reservatório e das condições de fundação para as estruturas e os órgãos hidráulicos.

94. Em **fundações rochosas** aflorantes poderá ser dispensada a realização de prospeção em profundidade.

95. Pelo contrário, se existir **solo com alguma espessura**, será necessário proceder a **prospeção subsuperficial**, designadamente, através de sondagens quando a espessura do solo de cobertura ultrapassar 3,5 m. Nos restantes casos bastará, em princípio, proceder à abertura de trincheiras e de

poços com retroescavadora, segundo alinhamentos que, no mínimo, deverão abarcar os alinhamentos da barragem e do vertedouro. Recomenda-se que se realize a recolha de amostras para a realização de ensaios laboratoriais.

96. Para a **fundação dos órgãos hidráulicos** devem ser realizadas, no mínimo, duas trincheiras para verificar a adequação do terreno de fundação. Se ocorrerem solos de cobertura, aplicam-se as recomendações anteriormente referidas para a fundação da barragem.

97. Na **fundação do vertedouro**, a prospeção a realizar deve ser orientada para a avaliação da erodibilidade da fundação. Devem ser executadas trincheiras na soleira e ao longo do canal do vertedouro.

98. Se os **materiais de fundação do vertedouro** não forem erodíveis, poderá dispensar-se a sua caracterização.

99. Recomenda-se que a **caracterização** seja efetuada com base nos **ensaios de laboratório** vocacionados para a verificação da adequação dos solos para a **construção da barragem** e como **material de fundação**. Assim devem ser realizados os seguintes ensaios de caracterização física: análise granulométrica e limites de consistência, necessários para a sua classificação unificada (ASTM D2487). Complementarmente, a compacidade dos solos de fundação deve ser controlada através de ensaios de determinação do peso volúmico *in situ* (ASTM D1556) e de ensaios de compactação (ASTM D698).

100. Se for necessário colocar um **revestimento em concreto no vertedouro**, deverão ser feitos ensaios de classificação dos solos ocorrentes e verificada a competência da fundação.

101. A **localização do vertedouro** deve acautelar a possibilidade de erosão do aterro. É considerada inaceitável a colocação do vertedouro sobre uma barragem de aterro.

102. Numa pequena barragem, com reduzido risco a jusante, o **período de retorno mínimo**, a considerar no dimensionamento do vertedouro de cheias, deverá ser de 1.000 anos.

103. A **borda livre**, referida ao nível normal de retenção do reservatório, a considerar deve ser de 1,2 m e a borda livre entre o nível máximo do reservatório e o coroamento deve ser superior a 0,45 m.

104. Todas as **paredes da zona de entrada do vertedouro** devem ter como borda livre mínima o valor adotado para a barragem. No canal do vertedouro e na zona de saída deverá ser evitado o galgamento das suas paredes pela cheia.

105. O **descarregador de fundo** tem como objetivos possibilitar o abaixamento do nível do reservatório, a eventual inspeção e manutenção do talude de montante e garantir a vazão sanitária.

106. É fortemente recomendado que o **conduto do descarregador de fundo** se localize junto a uma ombreira e que esteja fundado em material competente, de preferência em maciço rochoso. No caso de se tratar de solos ou rochas brandas, estes devem estar compactados com as exigências que se aplicam à fundação da barragem. Se tal não for possível, o conduto deve poder acomodar recalques diferenciais sem apresentar trincas.

107. O **descarregador de fundo deve estar localizado** de forma a permitir a descarga por gravidade da totalidade do volume útil do reservatório (excluindo-se o volume correspondente à sedimentação –

volume sólido). O descarregador de fundo deve ser capaz de escoar, pelo menos, dois terços do volume do reservatório.

108. A **capacidade de vazão do descarregador de fundo** deve permitir esvaziar metade do volume do reservatório em 7 dias, sendo recomendado o valor de 0,305 m como diâmetro mínimo da tubulação.

109. As **tubulações** devem ser de concreto, pré-fabricadas ou moldadas *in situ*, e colocadas em trincheira escavada para o efeito. A cota da base da trincheira do conduto não deve ser inferior à cota da trincheira corta-águas.

110. O **descarregador de fundo** deve ter um **controle a montante**, operacional para os níveis do reservatório. A sua entrada deve estar protegida com grade e deve existir um arejador a jusante da comporta.

111. O **dimensionamento do conduto** deve atender à carga máxima do reservatório e à pressão das terras sobrejacentes.

112. Para as **barragens de aterro**, o **reconhecimento dos solos** a utilizar na construção deve ser feito com recurso a trincheiras nos locais de empréstimo e a ensaios de laboratório que incluam ensaios de classificação e de compactação.

113. No que respeita ao teor em água, deve-se dar preferência ao **ajuste do teor em água** no local dos empréstimos, para que a colocação em obra ocorra com o material com o teor em água próximo do pretendido.

114. É recomendado que o **período ideal para a construção** coincida com o período em que a pluviosidade é mais reduzida e, simultaneamente, em que os solos ainda apresentam uma humidade natural suficiente para a sua adequada compactação.

115. No **projeto da barragem** deve assegurar-se a estabilidade dos taludes em todas as fases da vida da obra, em especial durante os esvaziamentos rápidos, considerar o controle da percolação, a existência de uma borda livre adequada, tendo em conta as afluições, a ondulação no reservatório e a ocorrência de ações sísmicas, e a proteção dos taludes contra a erosão causada pela chuva e pelas ondas.

116. São sugeridos **perfis tipo** em função das características dos solos. Em perfis zonados, desde que o contraste de permeabilidade seja suficiente pequeno, podem ser dispensados os filtros. Recomenda-se, no entanto, a adoção de sistemas de drenagem interna, ilustrados na Figura 1.

117. Relativamente à **distribuição dos materiais**, são dadas indicações de colocação dos mais resistentes e mais permeáveis nos taludes exteriores e dos menos permeáveis na zona central (núcleo). É adotado o critério de considerar um material como permeável quando a sua percentagem de finos não excede 5%.

118. Recomenda-se que a **largura do núcleo** não seja inferior a metade da altura da barragem, com um mínimo de 4 m. As inclinações “tipo” a considerar para os taludes são de $1(V):3(H)$, a montante, e de $1(V):2(H)$, a jusante, excepto em solos de elevada plasticidade ou de solos siltosos muito finos.

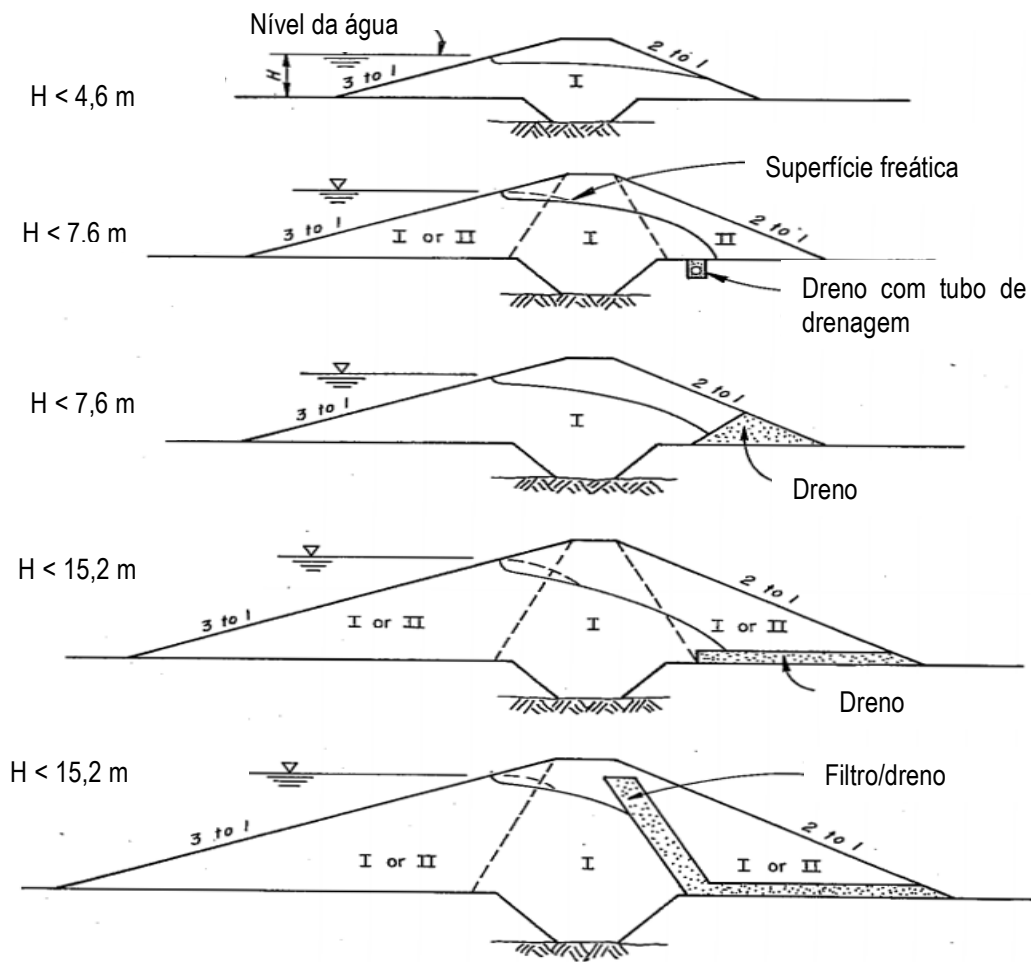


Figura 1 – Perfis tipo recomendados segundo critérios de eficácia de drenagem, na ótica da segurança estrutural (I – material de baixa permeabilidade; II – material semipermeável a permeável)

119. É indicado um valor mínimo de 3,6 m para a **largura do coroamento**, de 3% para a **inclinação do coroamento** para montante e de 0,30 m para a **contra flecha** na seção de maior altura.

120. A colocação de *rip-rap* de proteção poderá ser equacionada em função do material do **paramento de montante**. Em solos argilosos, os taludes, sem proteção, em geral, exibem um comportamento satisfatório.

121. As **fundações rochosas** não requerem, em geral, qualquer tipo de tratamento no que respeita à estabilidade. Os problemas de percolação são, em geral, relacionados com a funcionalidade e com a viabilidade econômica, mas não com a segurança.

122. Nas **restantes fundações**, sob a barragem deverá ser prevista uma trincheira corta-águas com largura de metade da altura da barragem, cumprindo uma largura mínima de 4 m.

123. Nas **fundações em maciços terrosos**, é necessário assegurar que a barragem é fundada em materiais de resistência igual ou superior à dos materiais de aterro. As especificações em termos de

compactação dos solos de fundação são as exigíveis para os materiais de aterro – 97% de compactação relativa, em zonas de baixa sismicidade, e 100%, nos restantes casos.

124. Para prevenir a percolação excessiva, deverá ser prevista uma **trincheira corta-águas**, que deverá ser prolongada até ao firme rochoso ou até um estrato de permeabilidade adequada. Em trincheiras até cerca de 3,5 m de profundidade, os taludes da trincheira poderão ser de $1(V):1(H)$ e, para profundidades superiores, $1(V):1,5(H)$. A largura mínima da trincheira, na base, deverá ser de 4 m.

125. A **construção das barragens** deverá ser feita sob a supervisão de um engenheiro civil registado.

126. Os **materiais (solos)** devem ser armazenados em condições próximas das ideais para a sua colocação no aterro. O espalhamento deve ser feito com *bulldozer*, em camadas com cerca de 0,20 m, e a compactação deve ser efetuada com rolos. A compactação (ASTM D 698- Proctor normal) a atingir deverá ser de 97%, em zonas de baixa sismicidade, ou de 100%, nas restantes zonas.

127. Para **solos correntes**, o grau de compactação pretendido poderá ser obtido com camadas de espessura próxima de 0,15 m, compactadas com o número de passagens simples do equipamento de compactação indicado no Quadro 2.

Quadro 2 - Número recomendado de passagens do rolo compactador

Carga nominal (psi)	Zonas de baixa sismicidade	Zonas de elevada sismicidade
2.500	12	14
3.000	10	12
3.500	9	11
4.000	8	10

128. Os **materiais para filtros e drenos** devem, em geral, ser materiais obtidos por britagem, devido aos materiais naturais se encontrarem, em regra, demasiado contaminados.

129. Os **materiais dos drenos** devem respeitar o fuso granulométrico indicado no Quadro 3.

Quadro 3 - Fuso granulométrico dos drenos

Número peneiro (ASTM)	% passados
1 ½"	90-100
¾ "	45-75
4	30-45
50	4-10
100	1-3
200	0-2

130. Os **critérios de filtro** a respeitar são: $D_{15}(dreno)/D_{15}(solo)$ entre 5 e 40, $D_{15}(dreno)/D_{85}(solo)$ não superior a 5 e, se adotar um tubo perfurado inserido em material granular como dreno, $D_{85}(dreno)/D_{furos}$ superior a 2.

131. As **tubulações** terão de ser resistentes à corrosão, podendo ser de *PVC*, concreto ou de outros materiais.

132. As **fundações rochosas** deverão ser limpas, removendo a vegetação e os solos de resistência insuficiente. A profundidade a atingir corresponde à escavação de materiais de resistência inferior à dos aterros.

133. As **fundação geral em solos** e a zona da trincheira corta-águas deverão ser limpas, retirando todos os materiais inadequados – blocos, detritos, solos orgânicos e vegetação. A fundação deverá exibir características de resistência e de deformabilidade, pelo menos, da ordem de grandeza do material de aterro.

134. Quando não existir risco de erosão devido à competência do maciço de fundação do **vertedouro**, conferida pela sua natureza rochosa, o **canal** pode ser escavado diretamente na rocha. Em solos ou rochas erodíveis é necessário proceder à proteção do canal com um revestimento de concreto, com uma espessura mínima de 0,10 m, e à drenagem da fundação para evitar a instalação de subpressões. O canal deverá também ter juntas de dilatação, a distâncias variáveis entre 3 e 15 m.

135. É requerida a realização de inspeções visuais à barragem e ao reservatório após o **final da construção** para a emissão da autorização indispensável para o seu enchimento.

136. Durante o **período de exploração**, recomenda-se o pagamento por parte do empreendedor de uma taxa anual em função da altura da barragem.

137. A **autoridade** responsável deverá realizar, no período de exploração, uma **inspeção visual**, normalmente anual, para a verificação do estado da barragem, onde deverão ser observados, entre outros, os seguintes aspectos: sinais de erosão externa, danos causados por roedores, sinais de percolação, obstruções no vertedouro ou outros sinais de deterioração. As anomalias encontradas terão de ser reparadas pelo empreendedor.

3.5 PEQUENAS BARRAGENS. PROJETO, MONITORAMENTO E REABILITAÇÃO (ICOLD, 2013)

138. O **âmbito** deste boletim são as barragens com altura compreendida entre 2,5 e 15 m e com $H^2 \cdot \sqrt{V} < 200$, onde H é a altura da barragem (m) acima do leito do rio e V o volume para o nível normal de retenção (m^3) (Figura 2). Estas barragens, segundo este boletim, representarão mais de 90% do total das barragens existentes.

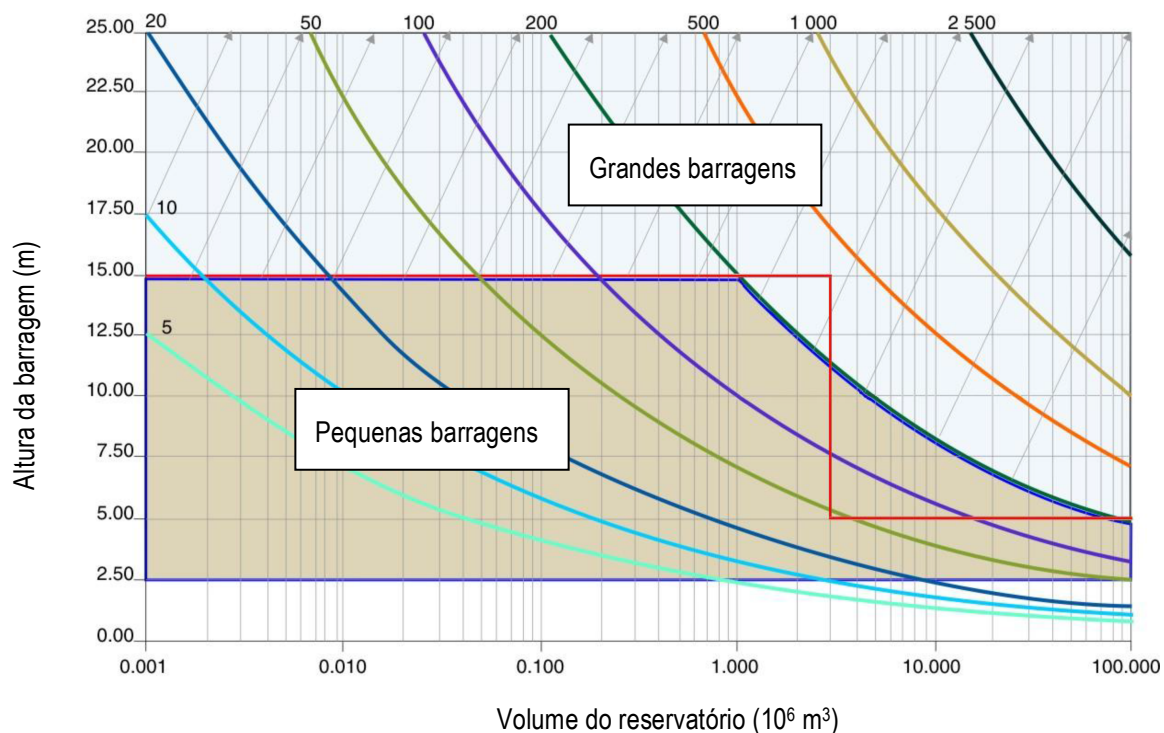


Figura 2 – Classificação das pequenas e grandes barragens

139. Complementarmente, as barragens são classificadas quanto ao **dano potencial**, mediante a avaliação dos danos econômicos e sociais e do potencial de perda de vidas (Quadro 4).

Quadro 4 – Classificação quanto ao dano potencial

Componente	Classificação do dano potencial		
	Baixo (i)	Médio (II)	Elevado (III)
$H^2 \cdot \sqrt{V}$	$H^2 \cdot \sqrt{V} < 20$	$20 < H^2 \cdot \sqrt{V} < 200$	$H^2 \cdot \sqrt{V} \geq 200$
Perdas de vidas	~0	< 10	≥ 10
Risco econômico	Baixo	Moderado	Elevado ou extremo
Risco ambiental	Baixo ou moderado	Elevado	Extremo
Disrupção social	Baixo (área rural)	Regional	Nacional

140. O documento pretende ser um **guia de pequenas barragens** para os empreendedores, os projetistas, as agências governamentais e os construtores.

141. É recomendado o **cadastro das barragens** com os seguintes elementos:

- a. nome e endereço do empreendedor;

- b. localização, tipo, dimensão e finalidade da barragem;
- c. capacidade de armazenamento;
- d. área da bacia hidrográfica;
- e. registros de precipitação e de escoamento;
- f. registros de vazão das cheias;
- g. e classificação da barragem de acordo com o nível de dano.

142. A **autoridade** de supervisão deverá assumir a responsabilidade pela **classificação das barragens**, de acordo com o seu risco, e pela identificação das **pequenas barragens de risco elevado**, de acordo com os critérios de ordenação de risco.

143. Correntemente, as restrições econômicas associadas aos pequenos projetos restringem o alcance da prospeção e a robustez dos estudos hidrológicos e estruturais, o que propicia a **níveis reduzidos de segurança**. Deste modo, é enfatizado o **maior dano potencial das pequenas barragens**, já que envolvem um número maior de acidentes, com maior número total de vítimas. O documento alerta ainda para a necessidade da consideração de **rupturas em cascata**.

144. No que se refere à **caracterização estatística das causas dos acidentes** em barragens, é citado um estudo recente no Brasil, segundo o qual estas se distribuem da seguinte forma: 65% por galgamento, 12% por erosão interna (em zonas de fluxo concentrado, no contato entre materiais de granulometria contrastante ou por sufusão), 12% devido a perdas de estabilidade de taludes e os restantes atribuídos a outras causas.

145. Por os critérios de projeto e as características típicas das pequenas barragens serem, em geral, diferentes dos adotados nas grandes barragens, essencialmente por limitações financeiras, verifica-se, com frequência, que os seus **riscos a jusante**, associados a grandes cheias, **são negligenciados**.

146. Recomenda-se, assim, que os **projetos de pequenas barragens** atendam aos seguintes aspectos:

- a. segurança ao galgamento;
- b. estabilidade de taludes;
- c. proteção contra a erosão interna no aterro e nas ombreiras;
- d. proteção relativamente ao galgamento por ação das ondas;
- e. e proteção dos taludes por erosão externa.

147. É referido que os **problemas mais frequentes nos projetos** de pequenas barragens estão relacionados com a falta de estudos da fundação, insuficiência ou inadequação dos estudos hidrológicos, ausência ou inadequação de sistema de drenagem interna e determinação incorreta ou inexistência de borda livre.

148. Relativamente às **deficiências devidas à construção**, a maioria relaciona-se com a deficiente compactação, a inadequação dos materiais (p.ex argilas dispersivas) e a interrupção da sequência construtiva (com consequências ao nível do controle de qualidade).

149. No que respeita à **operação/exploração**, os problemas estão normalmente relacionados com vertedouros com erosão, erosão regressiva a partir do vertedouro, falta de proteção de taludes do

reservatório, erosão e falta de proteção em torno da saída das tubulações, falta de inspeções de rotina durante a sua vida útil e falta de monitoramento.

150. Para o projeto, construção e operação de **futuras pequenas barragens**, são dadas recomendações orientadas para a minimização da probabilidade de ocorrência dos problemas mais habituais e graves.

151. Recomenda-se a **prospecção da fundação** (até uma profundidade mínima de 4 a 5 m ou até à altura da barragem) e o saneamento de solos inadequados, nomeadamente os orgânicos, na fundação da barragem.

152. Os **estudos hidrológicos** deverão, ser obrigatoriamente realizados, mesmo que por recurso a métodos empíricos.

153. No que respeita à **seleção dos materiais**, são formuladas as seguintes recomendações:

- a. preferência de utilização de materiais argilosos, face à sua maior resistência à erosão ao galgamento;
- b. adoção de materiais adequados e duráveis na proteção dos taludes;

154. Considera-se indispensável a colocação de um **sistema de drenagem interna**, com filtros e drenos, sendo os projetos padrão uma possibilidade prática para a sua definição.

155. É fortemente recomendada a realização de **controle de qualidade da compactação**, a par com uma escolha criteriosa do equipamento de compactação para os materiais empregues.

156. É **interdita a colocação de tubulações nos aterros**, por causa de erosão interna, e **sobre estes**, devido a erosão externa. Quando inseridas no aterro, recomenda-se a concretagem da envolvente dessas tubulações.

157. O **acesso aos órgãos de descarga** deve ser assegurado durante a ocorrência de cheias e para a sua manutenção.

158. Deverão ser realizadas **inspeções de rotina**, idealmente complementadas com a leitura de instrumentos de monitoramento.

159. Relativamente ao **perfil tipo**, são desaconselhadas as soluções sem drenagem interna, recomendando-se, no mínimo, a utilização de um dreno no pé do talude de jusante, para barragens com altura inferior a 5 m, de tapete drenante, para barragens de altura superior a 5 m e, adicionalmente, de um filtro vertical/subvertical para barragens de altura superior a 10 m.

160. A **borda livre** normal (diferença entre a cota do coroamento e o nível de normal de retenção) e a borda livre mínima (diferença entre a cota do coroamento e o nível de máxima cheia) devem ter em conta a ondulação devida ao vento, o espraçamento, os recalques devidos às ações sísmicas, os recalques pós construtivos, os problemas de funcionamento das comportas e as incertezas quanto à hidrologia. Nas pequenas barragens, os efeitos das ondas devidas ao vento e ao espraçamento cobrem as situações mais frequentes.

161. São recomendados diversas metodologias para o estabelecimento dos **valores mínimos da borda livre** em função do *fetch*, com base em referências bibliográficas, nomeadamente o *Earth Manual do USBR* e o *Manual Petits barrages, recommandations pour la conception, la realization et*

le suivi, conforme resumido, respectivamente, no **Error! Reference source not found.** e no **Error! Reference source not found.**. Adicionalmente, é recomendado que o valor mínimo da folga seja de 1 m.

Quadro 5 – Requisitos de borda livre em função do fetch para estudos preliminares (USBR, 1987, 1992)

Fetch (km)	Borda livre (m)	Borda livre mínima (m)
<1,6	1,2	0,9
1,6	1,5	1,2
4,0	1,8	1,5
8,0	2,4	1,8
16,0	3,0	2,1

Quadro 6 – Requisitos de borda livre em função do parâmetro $H^2\sqrt{V}$ (FCLD, 1997)

$H^2\sqrt{V}$ ($\sqrt{m}^{1/2}$)	5	30	100	200
Borda livre (m)	0,4	0,6	0,8	0,7

162. No que respeita à **construção**:

- a. é salientada a importância do **controle de construção**, face à suscetibilidade de colapso por insuficiência de compactação, facilitada pela menor experiência e dimensão dos construtores habitualmente envolvidos neste tipo de obra;
- b. os solos devem ser mantidos com um **desvio máximo do teor em água de 2%** relativamente ao ótimo. Nos casos em que seja necessário adicionar água, é, regra geral, mais vantajoso que esta adição seja realizada na área de empréstimo ou no depósito do material;
- c. o **núcleo** deve ser constituído por um material de baixa permeabilidade, elástico e argiloso, sendo nos maciços a resistência o aspecto mais importante;
- d. devem ser realizados **aterros experimentais** para o estudo da compactação e, na sua ausência, deve-se usar uma espessura máxima de camada (após compactação) de 0,20 m;
- e. o **controle de qualidade** é muito importante, devendo ser especificadas frequências de ensaio das camadas;
- f. deve se assegurada uma **adequada ligação entre camadas**, pelo que, se a superfície da camada secar, esta deve ser trabalhada antes da colocação de uma nova camada;
- g. o **filtro** (subvertical) não deve ser demasiado compactado;

- h. desaconselha-se a execução de **colares à volta de tubulações**, sendo recomendada, em sua substituição, a **colocação de filtros**, em especial no terço final da tubagem, para prevenir problemas de erosão interna;
- i. as **tubulações** devem ser **ensaiadas com ar comprimido** a uma pressão igual a 150% da pressão de serviço, não devendo ocorrer fugas durante um período de 2 h. Estes ensaios de receção permitem realizar correções com um custo mínimo.

163. Relativamente à **fundação**:

- a. devem-se considerar 3 hipóteses em termos de fundação (FCLD, 1997):
 - i. **fundação relativamente pouco permeável** – trincheira corta-águas com uma profundidade mínima de 2 m, para fazer face a zonas mais descomprimidas e fraturadas;
 - ii. **fundação pouco permeável a alguns metros de profundidade** – a trincheira corta-águas deverá atingir a camada de menor permeabilidade e poderá ser necessário colocar um filtro no talude de jusante da trincheira para evitar erosão interna da fundação;
 - iii. **fundação permeável** – normalmente requer injeções ou cortina, sendo considerada ser muito onerosa a impermeabilização do reservatório por camada argilosa ou por geomembrana.
- b. são apresentadas, no documento em apreciação, diversas soluções para o tratamento da fundação, seguindo os critérios usados no Japão, como trincheiras corta-águas, estacas-prancha, injeções, tapetes impermeabilizantes e a impermeabilização do reservatório.

164. Relativamente ao **sistema de drenagem**:

- a. devido à importância dos filtros, são definidas as regras que devem orientar o **dimensionamento dos filtros**, sendo necessário atender à erosão interna, à permeabilidade e a critérios de uniformidade e de estabilidade interna, entre outros;
- b. Não é recomendada a **utilização de geossintéticos** como elementos filtrantes em zonas críticas da barragem, dada que sua suscetibilidade a deformações que possam comprometer a sua integridade, à colmatação, à necessidade de proteção durante a fase construtiva relativamente à passagem de equipamentos e à ação de raios ultravioleta.

165. No que se refere à **segurança dos taludes**:

- a. no projeto devem ser realizadas **análises de estabilidade**, tendo em consideração as diversas fases da vida da obra, nomeadamente, a fase construtiva, considerando o aumento de pressão intersticial devido ao aumento do peso próprio, e a fase de exploração em pleno armazenamento, especialmente importante para o talude de jusante, e a ocorrência de esvaziamentos rápidos, durante os quais poderá ocorrer a perda de estabilidade do talude de montante;

- b. as análises de estabilidade poderão ser conduzidas pelos **métodos de equilíbrio limite**, nomeadamente, Bishop simplificado, Spencer, Janbu e Morgestern e Price, sendo os **coeficientes de segurança globais mínimos** a obter iguais a: 1,3, no final da construção, 1,2, no esvaziamento rápido, e 1,5, em exploração normal. Para a análise sísmica o referido coeficiente deverá ser, no mínimo, de 1,1.

166. Relativamente à **proteção do talude de jusante**:

- a. os elementos de **drenagem superficial** a colocar no talude de jusante destinam-se a proteger os taludes contra a erosão pluvial;
- b. em barragens com menos de 6 m de altura, para proteção do talude de jusante, será suficiente o recurso a uma boa **cobertura vegetal**;
- c. para barragens maiores, com cerca de 10 ou mais metros, deve-se prever a existência de banquetas, com 1,5 m a 3,0 m de largura com inclinação longitudinal de 1 a 2%, para limitar a velocidade de escoamento superficial;
- d. os taludes devem ser revestidos com **espécies vegetais adequadas**.

167. Relativamente à **proteção do talude de montante**:

- a. devem ser protegidos contra a **ação das ondas** e, eventualmente, contra os **buracos causados por animais**;
- b. quando a flutuação do nível do reservatório seja considerável e/ou os efeitos das ondas sejam importantes, é recomendada a **colocação de rip-rap**, de acordo com as disposições do *USACE* relativamente à granulometria do enrocamento e à espessura das camadas de proteção e de transição (Quadro 7 e Quadro 8).
- c. nos reservatórios de pequena dimensão, nas cotas inferiores, a **proteção com rip-rap** pode, muitas vezes, ser **dispensada**, pois as ondas que se podem gerar são pequenas e a exposição às ondas é de curta duração; nestes reservatórios, com **fetch de poucas centenas de metros**, a proteção pode ser realizada com uma **cobertura vegetal** e, caso ocorram deteriorações, a sua correção pode ser efetuada de forma simples.

Quadro 7 – Características do enrocamento e da camada de proteção a montante

Altura da onda (m)	D_{50} (m)	Espessura (m)
0 a 0,6	0,25	0,30
0,6 a 1,2	0,30	0,46
1,2 a 1,8	0,38	0,61
1,8 a 2,4	0,46	0,76
2,4 a 3,0	0,53	0,91

D_{50} - Diâmetro médio do *rip-rap*

Quadro 8 – Características da camada de transição entre o aterro e a proteção a montante

Máxima altura da onda (m)	Espessura da camada de transição (m)
0 a 1,20	0,15
1,20 a 2,40	0,25
2,40 a 3,00	0,30

3.6 REGULAMENTO DE PEQUENAS BARRAGENS DE TERRA (MOP, 1968)

168. O Regulamento de Pequenas Barragens de Terra aplica-se ao **projeto e construção de pequenas barragens de terra** com altura inferior a 15 m e volume do reservatório inferior a 10^6 m³. As barragens de altura inferior a 8 m e com menos de $0,2 \times 10^6$ m³ poderão estar dispensadas do cumprimento integral deste regulamento.

169. O regulamento define a obrigação dos técnicos projetistas (engenheiros civis ou agrónomos) estarem registados na **entidade governamental que tutela a segurança de barragens** (à data, a Direção-Geral dos Serviços Hidráulicos). Igual disposição se aplica à direção da construção. A mesma entidade governamental é ainda responsável pela aprovação do projeto.

170. Relativamente ao detalhe do projeto, o regulamento define o conteúdo mínimo dos **trabalhos de reconhecimento** do reservatório e dos terrenos de fundação.

171. O **projeto** deve conter indicações sobre:

- a. a fundação;
- b. a estabilidade dos taludes para as diversas fases da vida da obra, incluindo a construção e o esvaziamento rápido;
- c. o estabelecimento da largura do coroamento;
- d. o revestimento e a proteção dos paramentos;
- e. os filtros;
- f. o vertedouro;
- g. a borda livre;
- h. o descarregador de fundo e a tomada de água;
- i. e ainda as medidas de proteção da piscicultura.

172. Relativamente à **fundação**, é indicado que:

- a. o **reconhecimento do terreno de fundação** da barragem deve ser efetuado por trincheiras e por poços, levados a uma profundidade igual, pelo menos, à máxima altura da obra;

- b. em regra, o **número de poços ou trincheiras** não deve ser inferior a 3, nem o seu espaçamento maior do que 50 m, sem prejuízo da sua adaptação face ao conhecimento da geologia do local;
- c. a **resistência ao cisalhamento** da fundação deverá ser, no mínimo, 50% superior à que o material de aterro teria se colocado à mesma profundidade, situação essa cuja inobservância obriga à verificação de segurança relativamente a superfícies de deslizamento que envolvam simultaneamente o aterro e o terreno de fundação;
- d. se não estiver comprovada a reduzida permeabilidade da fundação deverá ser efetuado um **cálculo de percolação** através da fundação e indicadas medidas para o controle da vazão de infiltração;
- e. deverão ser dadas indicações sobre a **profundidade** definitiva a considerar para a **fundação**.

173. No que respeita aos **taludes**:

- a. é apontada a regra geral de que a sua inclinação deva ser justificada com base em **análises de estabilidade** apoiadas nos resultados dos ensaios de caracterização mecânica;
- b. para o talude de montante, deverá ser considerado o cenário de **esvaziamento brusco** do reservatório;
- c. para o talude de jusante, a verificação de estabilidade deverá ser efetuada considerando o reservatório no **nível normal de retenção**;
- d. deverá ser indicado o **sistema de drenagem interna** adequado para manter a linha de saturação totalmente no interior do maciço de jusante;
- e. é apresentado um anexo com a **inclinação dos taludes em pequenas barragens de perfil homogêneo**, cujas dimensões dispensam a verificação pormenorizada da estabilidade dos mesmos;
- f. a **proteção do paramento de montante** relativamente à ação das ondas deverá ser assegurada através de um revestimento em enrocamento arrumado ou a granel, de solo-cimento, betuminoso ou de outro tipo, desde que convenientemente justificado;
- g. o **paramento de jusante** deverá ser protegido da ação da chuva e das descargas dos vertedouros;
- h. quando a altura da barragem o justificar, deverão ser previstas **banquetas com valetas de escoamento**.

174. Relativamente aos **materiais de construção**:

- a. devem provir de **áreas de empréstimo** e ser classificados com base nos limites de consistência e em análises granulométricas, com um mínimo de uma amostra por cada 1.000 m³ de terreno.
- b. as suas **características hidráulicas e mecânicas** devem ser determinadas com base em ensaios de compactação leve, de consolidação, de permeabilidade e de cisalhamento em compressão triaxial de provetes saturados com medição de pressão intersticial;

- c. são dadas indicações sobre as **frações granulométricas a ensaiar**, consoante a granulometria dos materiais empregues.
- d. são indicadas as regras para o **dimensionamento granulométrico dos filtros**, em anexo.

175. Os **órgãos extravasores** deverão respeitar as seguintes recomendações ou disposições:

- a. a **vazão de dimensionamento** deverá ser calculada por equações do tipo cinemático, por métodos de hidrologia estatística e pelo método do hidrograma unitário, ou por experiência comparável em bacias hidrográficas morfológica e hidrologicamente semelhantes à bacia em estudo;
- b. salvo se for previsível que a ruptura da barragem faça perigar vidas humanas, será adotado a **vazão de dimensionamento** correspondente ao período de retorno de 100 anos;
- c. é **interdita** a colocação dos **órgãos extravasores no corpo das barragens de terra**;
- d. os **vertedouros** não deverão ser munidos de **comportas**;
- e. a fixação do valor da **borda livre** deverá basear-se na determinação do nível de cheia considerada no dimensionamento do vertedouro e na altura máxima e na velocidade das vagas;
- f. o valor da **borda livre** não pode ser inferior a 1 m;
- g. deverão ser previstos **um ou mais descarregadores de fundo** para esvaziamento do reservatório, munidos de comporta a montante, devidamente arejada.

176. No respeitante à **construção**:

- a. as operações de **compactação** deverão ser conduzidas por forma a obter um grau de compactação superior a 95% do máximo do ensaio Proctor normal e um desvio máximo do teor em água de 2% para o lado seco; a espessura das camadas de aterro variará entre 0,20 e 0,30 m;
- b. o **controle compactação** deverá ser feito com frequência aproximada de 1 ensaio por cada 1.000 m³ de aterro, consoante da determinação do grau de compactação e do desvio do teor em água; para além disso, deve-se também verificar os trabalhos de construção dos filtros e drenos;
- c. o técnico responsável pela construção deverá preparar um **registro de obra** (“a caderneta de registro dos resultados”) contendo os resultados dos ensaios de controle, a geometria e as incidências do saneamento, a colocação dos filtros e as diversas fases de compactação dos aterros;
- d. esta caderneta será facultada aos **agentes de fiscalização** e, após a conclusão da obra, será entregue, para arquivo, à **entidade responsável pela outorga**.

177. No respeitante à **fase de exploração**:

- a. após a construção, as obras devem ser acompanhadas, com especial incidência para a **fase de primeiro enchimento** e de **eventual esvaziamento**;
- b. os **aspectos a observar**, em qualquer circunstância, devem incluir: o aparecimento de trincas, de infiltrações ou de recalques;

- c. a **entrada em exploração** da obra carece de autorização por parte das entidades governamentais, que podem solicitar a execução de trabalhos complementares;
- d. o empreendedor assume o encargo e a responsabilidade de **observar a evolução da obra e comunicar à entidade outorgante** os acidentes e todas as ocorrências relevantes;
- e. num **grupo restrito de barragens** (ditas com “problemas especiais”, como estipulado na licença de outorga) deverá ser instalado um **sistema de observação**, incluindo referências para medição de deslocamentos de pontos dos maciços, aparelhos para medição de pressão intersticial e piezômetros para observação da linha de saturação.

3.7 GUIA DE SEGURANÇA PARA PEQUENAS BARRAGENS DE BAIXO DANO POTENCIAL (UTAH, 2003)

178. O Guia destina-se à elucidação dos potenciais empreendedores quanto aos **requisitos legais e de engenharia** para a construção e exploração de pequenas barragens. Aplica-se a barragens com altura inferior a 3 m (10 ft) e volume de reservatório até 2.700 m³ (20 acre ft) a construir em áreas com risco a jusante desprezável.

179. Todos os trabalhos de construção, alteamento, reparação, alteração, demolição ou abandono devem ser precedidos da **apresentação do plano de trabalhos** ao responsável estadual (*state engineer*), com uma antecedência mínima de 90 dias. São, porém, isentos da apresentação destes planos os empreendedores de barragens que não introduzam risco para a vida humana ou para a propriedade de outrem.

180. É expressamente referido que a **aprovação da construção** da barragem não é sinónimo de direito de retenção de água, pelo que, **previamente ao enchimento** deverá ser obtida a aprovação do responsável estadual.

181. Para auxiliar a **elaboração do plano de trabalhos** pelo empreendedor, o Guia contém planilhas de referência, incluídas em anexo.

182. No respeitante à **localização da barragem**, é apresentada uma lista de observações interpretativas das condições no local de implantação duma barragem, nomeadamente:

- a. **inclinação de taludes**;
- b. cicatrizes de **deslizamentos e surgências** nas ombreiras em contato com a barragem;
- c. **vegetação a jusante** da barragem, com especial atenção à vegetação com grande necessidade de água;
- d. **descontinuidades nos afloramentos rochosos** na bacia de retenção, tendo em vista as futuras condições de percolação após enchimento do reservatório;
- e. as **formas de relevo**, que devem merecer especial cuidado na sua avaliação, com particular relevância para as depressões e para as sobrelevações potencialmente integráveis no barramento;

- f. a **geologia dos afloramentos rochosos**, com especial atenção às rochas calcárias ou com gesso.

183. No que se refere à **prospecção**:

- a. É essencial proceder à prospecção do local para certificar que a **fundação** e os **materiais de aterro** possuem as características adequadas;
- b. tendo em consideração as características das obras a que se destinam, os trabalhos de prospecção podem resumir-se a **poços escavados com retroescavadora** até uma profundidade de 3 m;
- c. os **poços devem ser implantados** ao longo do desenvolvimento da barragem, dos alinhamentos do conduto do descarregador de fundo, do vertedouro de superfície e nas áreas de empréstimo;
- d. deve ser identificada a **presença de areias ou cascalhos e de solos brandos**, situação que exige a intervenção de um engenheiro competente no projeto e na construção da barragem de aterro;
- e. deverá ser identificada a presença de **água subterrânea**.

184. No respeitante ao **projeto da barragem**:

- a. os **terrenos de fundação** deverão ser suficiente firmes e de reduzida permeabilidade;
- b. tipicamente os **solos de empréstimo** deverão possuir, pelo menos, 15% de finos, para garantir uma adequada permeabilidade, e apresentar resistência suficiente após compactação;
- c. o **paramento de montante** deverá apresentar uma inclinação até $1(V):3(H)$ e o **paramento de jusante** até $1(V):2(H)$;
- d. a **borda livre** deverá ser pelo menos de 1 m;
- e. o **coroamento** deve ser inclinado para montante, ter largura superior a 4 m e ser protegido com um pavimento rodoviário;
- f. deve ser prevista uma **trincheira corta-águas** sob o eixo da barragem, com a profundidade indicada pelos poços de prospecção (com um mínimo de 0,60 m), com uma largura mínima de 2,5 m e com uma inclinação máxima dos taludes de 45°;
- g. apesar de, correntemente, os drenos de pé de jusante e outros elementos drenantes não estarem previstos em pequenas barragens, deverá ser projetado um **dreno de pé de jusante** por um engenheiro competente, na eventualidade de existirem dúvidas sobre o bom funcionamento hidráulico da barragem;
- h. em regiões de ventos intensos, o **paramento de montante** deverá ser protegido da ação das ondas pela colocação de *rip-rap* sobre uma camada de transição; sem prejuízo desta recomendação, são referidos casos em que aterros argilosos têm resistido à ondulação sem a proteção de *rip-rap*;
- i. deverá ser aplicada uma proteção vegetal nas zonas expostas do aterro (**paramento de jusante e zona emersa do paramento de montante**).

185. No respeitante ao **vertedouro de superfície**, é dito, especificamente, que não é permitida a sua localização sobre o corpo do aterro e recomenda-se que:

- a. seja **implantado em terreno natural**, a uma distância suficiente da barragem para prevenir a erosão do aterro, idealmente numa depressão natural ou numa escavação devidamente isolada da barragem;
- b. sejam abertas **trincheiras de prospeção** para avaliar a erodibilidade do material de fundação e das paredes do vertedouro;
- c. no caso de o terreno de implantação do vertedouro ser erodível, se adotem medidas para a sua mitigação, por exemplo, **revestimentos em concreto ou de enrocamento** e adoçamento do declive do canal;
- d. na eventualidade da separação entre o vertedouro e a barragem não ser possível, seja prevista uma **sobrelevação mínima das paredes do vertedouro** de 0,15 m relativamente à cota máxima da superfície de escoamento;
- e. sejam adotadas **medidas de dissipação de energia** na saída do vertedouro, para prevenir a ocorrência de erosão.

186. No respeitante ao **descarregador de fundo** é recomendado que:

- a. o projeto da **tubulação** seja entendido como um aspecto vital para a segurança da barragem, uma vez que a erosão associada à percolação ao longo do conduto proporciona um dos mais frequentes modos de ruptura em barragens de aterro;
- b. a **implantação** da tubulação seja decidida após o saneamento da fundação, a realização de duas trincheiras de prospeção e a construção da trincheira corta-águas, podendo ser necessário adotar geometrias em curva para garantir boas condições de fundação;
- c. a **cota de entrada** permita evacuar pelo menos 90% do volume máximo armazenado;
- d. o **diâmetro** permita a descarga de 90% do volume máximo armazenado num período até 30 dias, com um mínimo de 0,20 m (para permitir inspeções de vídeo);
- e. a trincheira de **fundação da tubulação** seja escavada desde a inserção a montante no reservatório, pelo menos, até ao pé de jusante, e que a soleira e os taludes da trincheira sejam deixadas em terreno firme;
- f. a trincheira tenha largura e altura suficientes para acomodar o espaço necessário para que a **tubulação** possa ficar **envolvida por concreto**, com uma espessura mínima de 0,20 m, e por um **filtro de areia**, devidamente compactado, com espessura mínima de 0,10 m;
- g. o **controle** seja efetuado **a montante**;
- h. a **pressão cálculo** da tubulação seja definida considerando a soma da carga hidráulica máxima com o efeito do peso do aterro;
- i. a tubulação possua **dispositivos de acesso** ao seu interior, no caso de estar diretamente conetada com uma rede de abastecimento.

187. No respeitante à **construção**:

- a. a **seqüência construtiva** inclui: a limpeza da superfície e a remoção das camadas superficiais de solos com matéria orgânica, a escavação e o preenchimento da trincheira corta-águas com solo compactado, a deposição e espalhamento do solo para compactação (em faixas longitudinais ligando as ombreiras, com espessura de colocação não superior a 0,15 m);
 - b. os **materiais grosseiros** (de dimensões superiores a 2” e, em nenhum caso, superiores a 4”) devem ser separados e tendencialmente colocados na proximidade dos paramentos;
 - c. é exigida a **homogeneização do teor em água** de cada camada, devendo a correção do teor em água do solo decorrer na área de empréstimo, seja por adição de água ou por evaporação através da escarificação e revolvimento do solo com grade de discos;
 - d. são dadas indicações sobre a forma de verificar expeditamente a **proximidade do teor em água** do material do valor no ótimo de Proctor (um rolo de material parte somente quando atinge uma espessura inferior a 1/8”);
 - e. é recomendada a utilização de **equipamentos** de rasto de pneus ou com rolos de compactação específicos para a realização da compactação de cada camada (com pelo menos oito passagens), com posterior escarificação antes da colocação da camada sobrejacente;
 - f. na **proximidade de elementos estruturais**, somente deverá ser colocado material selecionado com dimensão máxima de 2”, em camadas compactadas com equipamento manual e com espessura inferior a 4”;
 - g. o **dreno de pé de jusante** deve ser escavado numa trincheira paralela ao pé de jusante, com uma entrega mínima de 1,5 m, com uma profundidade mínima de 1 m e com uma espessura de camada de compactação inferior a 0,15 m;
 - h. a **tubulação drenante** para recolha da água no dreno deve ser perfurada e envolvida por uma camada de areia, com uma espessura mínima de 0,30 m.
188. Na fase de **exploração**, as obras devem ser acompanhadas, com especial incidência para a fase de primeiro enchimento e de eventual esvaziamento.

3.8 BARRAGENS DE TERRA PARA PEQUENAS RETENÇÕES. UMA COMPILAÇÃO DO PROJETO, ANÁLISE E CONSTRUÇÃO. TÉCNICAS ADEQUADAS PARA O MUNDO EM DESENVOLVIMENTO (STONE, 2003)

189. O documento aborda os diversos fatores a considerar na escolha do **local da barragem**, classificando-os, de acordo com a razão entre o volume do reservatório e o volume do aterro, como mau, quando esta razão é inferior a 2, moderado, quando este valor está compreendido entre 2 e 4, elevado, se está compreendido entre 4 e 6, e excelente para valores superiores.

190. Para a estimativa do **volume do reservatório** (V) propõe a seguinte expressão:

$$V = 0,22. K. L. F. H$$

onde L é o desenvolvimento da barragem, F é o *fetch*, H a altura da barragem e K um coeficiente que depende da forma do vale (indicado no documento).

191. Para a estimativa do **volume de aterro** (V_a) propõe a expressão:

$$V_a = 0,216.H.L.(2l_c + H.i)$$

onde l_c é a largura do coroamento e i a média das inclinações dos taludes de montante e de jusante. Em alternativa, poder-se-á usar a seguinte expressão:

$$V_a = 1,05.K.L.H(H + 1)$$

a qual pressupõe um inclinação média de $1(V):2,5(H)$.

192. Outros fatores a ter em consideração no respeitante à **localização da barragem** são:

- as **consequências** de uma ruptura da barragem;
- o tipo de **vertedouro** que pode ser adotado;
- o sistema de **adução/distribuição**;
- impactos ecológicos a montante e a jusante;
- a **distância** dos materiais de construção;
- a **disponibilidade dos materiais** de construção.

193. A solução de **barragem homogênea com dreno de pé jusante** requer uma fundação impermeável e material de aterro impermeável ou semi-impermeável. O pé de jusante é constituído por com material drenante e filtro, por forma a controlar a percolação. O paramento de montante deverá uma inclinação de $1(V):3(H)$ e o de jusante de $1(V):2(H)$.

194. A **borda livre** depende do *fetch*, sendo propostos os valores mínimos incluídos no Quadro 9.

Quadro 9 – Valores da borda livre em função do fetch (Stone, 2003)

Fetch (m)	Borda livre (m)
600	1
1.000	1,2
2.000	1,3
3.000	1,5
4.000	1,6
5.000	1,7

195. A **largura do coroamento** é função da altura da barragem, tendo um mínimo de 2,5 m, para 2 m de altura, e de 4,2 m, para 10 m de altura.

196. O **dreno do pé de jusante** será posicionado a uma distância de $D + 2 m$ do eixo da barragem, onde D representa a máxima altura de água. O dreno deverá ter uma altura de $D/3$.

197. A solução de **barragem com cortina impermeável a montante** é recomendada quando não há material impermeável em quantidade ou qualidade necessárias para a construção da barragem. Podem também ser aplicadas cortinas na impermeabilização do reservatório.

198. Para este tipo de barragens é proposta a aplicação das medidas prescritivas relativamente à geometria indicadas para as barragens homogêneas, sendo a sua altura limitada a 8,0 m.

Recomenda-se ainda a introdução de um **dreno**, de dimensão mais reduzida do que para as barragens homogêneas, para a recolha e o encaminhamento das vazões provenientes do aterro ou da fundação.

199. A espessura do **órgão de impermeabilização em solo** deverá ser no mínimo de 0,60 m, para alturas até 5,0 m, e de 1 m, para alturas até 8,0 m.

200. No caso de uma **fundação permeável**, a cortina deverá ser estendida para o reservatório, a montante, até cerca de 35 m, não sendo, no entanto, recomendado este tipo de solução, devido às dificuldades que acarreta a sua execução e pormenorização.

201. Para as geometrias das **barragens zoneadas** podem também ser adotadas as previstas para os perfis homogêneos, devendo a largura da base do **núcleo** ser igual à altura da barragem.

202. Em fundações permeáveis dever-se-á colocar uma **trincheira corta-águas**, com dimensão, na base, entre 1,5 e 2,5 m, e profundidade até ao substrato rochoso ou até cerca de $\frac{3}{4}$ da altura da barragem, se não existir um substrato rochoso a profundidade inferior. Se existir uma camada impermeável, a vala deve entrar, pelo menos, 0,60 m naquela camada.

203. Os **paramentos** devem ser protegidos, a montante, com *rip-rap*, e, a jusante, com vegetação adequada.

204. É apresentada uma série de **ensaios expeditos** que permitem, à falta de ensaios da Mecânica dos Solos, determinar a aptidão dos solos para cada zona da barragem, sendo detalhados os ensaios correspondentes aos materiais impermeabilizantes, aos filtros e aos drenos.

205. Para complementar ou substituir a função de impermeabilização dos solos finos, é sugerido o recurso a **membranas plásticas** sobre o maciço de montante, com uma sobreposição não inferior a 0,15 m, devidamente protegidas com solo compactado.

206. São recomendados **estudos mais detalhados** se não existirem materiais (solos) adequados, se as dimensões da barragem excederem os limites indicados ou se as consequências forem demasiado elevadas.

207. Estes estudos deverão considerar os seguintes aspectos:

- a. a **percolação** e a **ruptura por erosão tubular** – uma primeira estimativa do caudal percolado pelo corpo da barragem pode ser obtida por $q = k[\sqrt{L^2 + D^2} - L]$, onde k é o coeficiente de permeabilidade, L a distância horizontal entre o ponto de entrada do escoamento no aterro e o centro do filtro e D a profundidade do reservatório;
- b. a **estabilidade dos taludes** – são indicadas inclinações a considerar em função das características dos solos em termos de percentagens de argila, de areia e de cascalho, e apresentadas formulações para a estimativa de um coeficiente de segurança global para solos granulares e argilosos através do método das fatias.

208. Refere ser o canal numa das margens a melhor solução para o **vertedouro**, devidamente protegido, com cobertura vegetal ou *rip-rap*, contra a erosão causada pela passagem da água, devendo a restituição na linha de água acautelar a erosão da base do talude de jusante da barragem.

209. Nos órgãos de **descarregador de fundo**, de **tomada de água** ou de **vazão sanitária** recomenda-se a colocação de colares ao longo das tubulações e são referidas as vantagens e inconvenientes de colocar as comportas a montante ou a jusante da tubulação.

210. A **sequência construtiva** deve ser bem planeada para se evitarem escavações nos aterros e correspondentes recompactações.

211. Recomenda-se a construção com uma **altura** superior, em cerca de 10%, à prevista no projeto para fazer face a recalques ao longo da vida da obra.

212. A preparação para a **execução dos aterros** inclui a marcação dos limites da barragem e dos seus alinhamentos principais (nomeadamente, o eixo), a escolha das áreas de empréstimo (sendo conveniente assegurar uma distância mínima à barragem de cerca de 10 m), os acessos às áreas de empréstimo, o saneamento da fundação (com um mínimo de 1,0 m), a compactação de solo competente e limpo da fundação e a execução do desvio provisório.

213. A **compactação** terá de ser efetuada com uma espessura de camada adequada ao tipo de solo e ao equipamento de compactação. Para a compactação manual, ou com meios mecânicos ligeiros, como os equipamentos agrícolas, a espessura da camada, antes da compactação, não deve ultrapassar 0,075 a 0,10 m.

214. O **controle do teor em água** é essencial, sendo vantajoso proceder à sua aferição na área de empréstimo. Para solos granulares, o teor em água ótimo pode variar entre 6 e 10%, enquanto que, para os materiais finos com argila, o teor em água ótimo poderá rondar 13 a 21%, ou ser superior. São dadas indicações práticas para aferir o teor em água baseadas na facilidade com que se molda ou quando se comprime na mão uma pequena porção de solo.

215. Na **fase de exploração** é recomendada a colocação de vedações para impedir o acesso de animais ao corpo da barragem, os quais podem causar erosões preferenciais e destruir a vegetação. A presença de tocas de animais é também considerada nociva.

3.9 GUIA TÉCNICO PARA A CONSTRUÇÃO E A GESTÃO DE PEQUENAS BARRAGENS MELHORADAS (MIWR-GONU, 2009)

216. O documento consiste na **compilação de normas, de procedimentos e de regras de boa prática** para orientar as equipas de campo, com o objetivo permitir o desenvolvimento estratégico, a coordenação, o planeamento e o monitoramento das infraestruturas de abastecimento de água e de saneamento no Sudão. É dirigido para **pequenas barragens destinadas ao abastecimento de água**.

217. Na zona norte do Sudão, as **barragens são classificadas** de acordo com o volume armazenado:

- i. pequenas barragens – com reservatórios menores que 3 hm³;
- ii. barragens médias – com reservatórios entre 3 e 5 hm³;
- iii. grandes barragens – com reservatórios superiores a 5 hm³.

Na zona sul, a classificação considera também a altura. Para além dos volumes referidos, as pequenas barragens têm alturas inferiores a 15 m, enquanto que as médias estão compreendidas entre 15 e 25 m.

218. O guia refere-se a **barragens de aterro e de alvenaria**. São definidas as componentes da barragem, designadamente, o corpo da barragem, o vertedouro e o conduto de tomada de água.

219. O **estudo de viabilidade** deve considerar o tipo e fim da barragem, o impacto sócio-económico, os aspectos relativos à meteorologia, à hidrologia e à geologia, o impacto ambiental, nomeadamente o seu potencial de facilitar o desenvolvimento de espécies indesejadas (moscas, cobras, etc.), e as correspondentes medidas de mitigação.

220. Os **estudos hidrológicos** básicos necessários para a concepção e a construção de pequenas barragens incluem as condições hidrológicas e a estimativa das afluências no local da barragem.

221. Em zona áridas ou semi-áridas, a **precipitação** é de características **torrenciais**, de curta duração, de elevada intensidade e espacialmente limitada. A análise de dados de pluviosidade deve considerar um período relativamente alargado para ter em conta o carácter cíclico de períodos de seca ou de chuva intensa.

222. No que respeita aos estudos da barragem, os primeiros trabalhos envolvem o **reconhecimento aéreo e local** para averiguar as condições topográficas, as características hidrológicas da bacia, etc. Estes estudos devem ainda considerar as possíveis localizações da barragem e as fontes de materiais de construção, e averiguar a existência de escorregamentos antigos, falhas geológicas, orientações preferenciais de descontinuidades, etc.

223. Poderão ser necessários **trabalhos adicionais**, como sondagens (com uma profundidade igual à altura da barragem) e poços (com uma profundidade mínima de 3 m), no alinhamento previsto para a barragem.

224. As regras gerais para a **escolha do local** são:

- a. o **reservatório** deve ter capacidade adequada e maximizar a retenção;
- b. um **reservatório mais profundo** é preferível a um raso, dados os menores custos do terreno por unidade de capacidade, as menores perdas por evaporação e a menor probabilidade de crescimento de ervas daninhas.
- c. as **bacias hidrográficas** muito produtivas em sedimentos devem ser evitadas, se possível.
- d. as **ombreiras da barragem e os taludes do reservatório** devem ser estáveis, quer em termos de erosão superficial, quer em termos de deslizamentos.

225. Lista de aspectos a verificar no **reconhecimento do local**:

- a. topografia e suas variações bruscas;
- b. solo superficial: tipo, estado hídrico e matéria orgânica;
- c. afloramentos rochosos;
- d. configuração da rede de drenagem superficial;
- e. águas superficiais;
- f. águas subterrâneas;
- g. erosão (tipo e severidade);

- h. utilização dos solos;
- i. estruturas existentes.

226. No Sudão, tal como noutros países onde a evaporação é muito importante, qualquer **reservatório** deverá ter, no mínimo, 3 m **de profundidade**, de forma a garantir o abastecimento de cerca de um ano.

227. A principal componente das **barragens de terra** é o seu corpo. O galgamento não pode ser permitido. O vertedouro pode ser colocado fora do corpo da barragem ou integrar o corpo, sendo neste caso, em canal e devendo possuir estrutura de dissipação de energia à saída. Outra componente é o descarregador de fundo. Para prevenir a percolação ao longo do conduto do descarregador de fundo recomenda-se a colocação de “colares”, no início e no final do conduto, não se devendo colocar colares na zona mais interior (no núcleo) de barragens de terra.

228. Nos casos em que o vertedouro está incorporado no aterro devem-se tomar medidas de impermeabilização para evitar passagens de água através do contacto com o aterro. **Os vertedoutos em canal, sem comportas**, são os preferidos para as barragens no Sudão. Para permitir um bom funcionamento hidráulico devem ser evitadas as transições bruscas de forma ou de geometria do canal.

229. O **dimensionamento do vertedouro** de uma pequena barragem deve ser dimensionado para uma cheia com período de retorno de 100 anos. Esta cheia tem uma probabilidade de 1/100 em cada ano de ser excedida. No Sudão, pode ser considerada uma vazão de 200 m³/s para o projeto de pequenas barragens.

230. No que respeita aos restantes **órgãos de descarga**, o seu dimensionamento deve considerar as necessidades a jusante, aspectos relativos ao controlo de cheias, etc.

231. A **linha de percolação** ao longo do perfil da barragem deve ficar bem abaixo do coroamento a fim de evitar processos erosivos.

232. Recomenda-se, relativamente às **barragens de aterro**, que:

- a. a fundação seja competente para suportar o peso da barragem (sem recalques significativos);
- b. a barragem disponha um núcleo impermeável, que impeça ou limite a passagem de água;
- c. seja assegurada a estabilidade dos taludes em função do tipo de material. O talude de montante deve ter uma inclinação limite de $1(V):3(H)$, enquanto que o talude de jusante dever ter uma de $1(V):2(H)$;
- d. o talude de montante seja protegido por um *rip-rap* e um filtro, com uma espessura de 0,20 a 0,30 m;
- e. o coroamento tenha, pelo menos, 3 m de largura: a prática no Sudão é de 4 m para permitir a passagem de equipamentos;
- f. a borda livre mínima seja de 1 m.

233. As **fundações** são classificadas como rochosas, de materiais grosseiros ou de materiais finos.

234. Em geral, as **fundações rochosas** são adequadas para a construção de pequenas barragens. Os estudos devem incidir sobre a permeabilidade. No caso de se detectar um comportamento deficiente poder-se-á realizar tratamento da fundação por injeções.

235. As **fundações em materiais grosseiros**, em geral, são adequadas do ponto de vista de deformabilidade, mas podem ser problemáticas do ponto de vista de percolação excessiva e de subpressões elevadas a jusante. Nesses casos deverá ser estudada a necessidade de adoção de trincheiras corta-águas totais ou parciais, cortinas de estacas-prancha, cortinas de injeção, tapetes impermeabilizantes a montante, poços de alívio, etc.

236. Sempre que possível são aconselhadas as **trincheiras corta-águas totais**, isto é, até à fundação impermeável. As trincheiras corta-águas devem ser localizadas a montante do eixo da barragem, sob a zona impermeável. O seu preenchimento deve ser feito com material semelhante ao do núcleo ou da zona impermeável da barragem e compactado da mesma forma.

237. A **zona imediatamente a jusante do núcleo** deve ser drenada através de filtro chaminé e drenos.

238. As **fundações em material siltoso ou argiloso** devem ser analisadas em função do tipo de solo, da presença do nível freático e da sua compacidade. Devem ser verificadas duas situações: em condições drenadas e não drenadas.

239. A análise de estabilidade pode ser feita através de **métodos de equilíbrio limite** considerando superfícies circulares.

240. Deve-se sempre considerar um **vertedouro auxiliar**, a cota ligeiramente superior ao vertedouro principal como sistema de reserva de segurança.

241. O **sistema de adução** deve ser **exterior ao corpo da barragem**. Se existir utilização regular de água a jusante da barragem, deve existir um sistema de vazão sanitária que permita a manutenção de uma vazão para esse efeito.

242. As **barragens de alvenaria** são barragens de gravidade, em que a estabilidade depende do equilíbrio entre o peso próprio, as forças de impulsão da água, as subpressões e eventuais forças sísmicas. Em certos casos, pode ser ainda relevante a consideração do impulso devido à siltagem no reservatório.

243. A **largura do coroamento** deve ser igual ou superior a 3 m, devendo ter em conta as necessidades de tráfego sobre a barragem.

244. Em **fundações permeáveis** deve-se avaliar a necessidade de construir uma cortina de impermeabilização, a colocar do lado de montante, junto ao pé da barragem.

245. Se a adução for feita através de **tubulação instalada na barragem**, deve proceder-se à sua proteção relativamente à siltagem do reservatório.

246. Relativamente aos **métodos construtivos de barragens de aterro**, o documento refere:

- a. se a barragem for construída num curso de água pode ser necessário prever a construção de um **desvio provisório**, através de tubulação ou de trincheira de desvio;

- b. deve-se procurar **construir a barragem na época seca**, por forma a minimizar o volume de água a desviar e a facilitar a compactação;
- c. a **implantação da barragem** deve ser efetuada recorrendo a estacas e a cordas, usadas também para assinalar o nível máximo do reservatório; a vegetação abaixo deste nível deve ser removida, devendo existir cuidado especial na remoção de raízes e de detritos na zona de fundação do aterro, pois a sua presença pode facilitar a ocorrência de percolação e de erosão interna;
- d. a implantação da base da barragem e a determinação da largura ao longo da altura da barragem deve ser feita por forma a cumprir as **inclinações previstas**;
- e. a **preparação da fundação** consiste na sua escavação até se obter uma base sólida, mantendo as irregularidades que facilitem a ligação do aterro à fundação;
- f. os **solos mais finos** devem ser usados na zona central da barragem e os solos com fração arenosa nos maciços.
- g. os **materiais de qualidade questionável** devem ser usados apenas no maciço de jusante ou deverão ser sujeitos a uma avaliação mais cuidada por parte de um especialista, eventualmente com base em ensaios de laboratório;
- h. o **material de aterro** deve ser colocado em camadas horizontais em toda a extensão da barragem; cada camada deve ter uma espessura de 0,20 a 0,30 m e compactada com equipamentos adequados até, no mínimo, 90% da compactação relativa;
- i. os **solos mais secos** devem ser umedecidos, dado que a sua permeabilidade e resistência dependem do teor em água.
- j. se os aterros forem **construídos durante a estação úmida**, devem ser tidos cuidados para evitar a permanência de água na superfície das camadas; para o efeito, as camadas devem ter uma ligeira inclinação que permita o escoamento superficial;
- k. não devem haver **desníveis** superiores a 0,90 m;
- l. a compactação em **torno de condutos** deve ser especialmente cuidada e devem ser instalados colares anti-percolação;
- m. o **paramento de montante** deve ser protegido com enrocamento;
- n. o **paramento de jusante** também deve ser protegido, não sendo, no entanto, especificado o tipo de proteção;
- o. o **coroamento** deve ser protegido com material granular para evitar trincas e sulcos de rodeiras.

247. Os **vertedouros** no Sudão, normalmente, são de alvenaria (o corpo), revestidos na soleira com concreto. Devem ter dissipação de energia e a sua construção deve seguir as indicações de projeto. Nas barragens de alvenaria o descarregador pode, sem problemas, integrar o corpo da barragem.

248. Relativamente aos **métodos construtivos de barragens de alvenaria**, refere-se que:

- a. os **trabalhos preparatórios** são semelhantes aos referidos para as barragens de aterro, havendo diferenças ao nível da construção do corpo da barragem;

- b. a **base da barragem** deve ser indentada à fundação, quer no vale, quer nas ombreiras.
- c. a zona de montante da barragem deve ser executada em **alvenaria de pedra**, enquanto que o maciço de jusante pode ser constituído por **pedra solta**;
- d. a **alvenaria** deve ser constituída por blocos de rochas ígneas que possam ser transportados à mão; o comprimento dos blocos não deve exceder 3 vezes a sua altura e a sua espessura não deve ser inferior a 0,15 m;
- e. a alvenaria deve ser **umedecida** antes da sua utilização;
- f. a **absorção de água** não deve ser superior a 5%;
- g. a face de montante pode dispor de uma **membrana impermeável**, de concreto, de concreto armado ou de betuminoso (asfalto);
- h. A **argamassa** da alvenaria deve ser executada com cimento Portland, areia e água, com as seguintes proporções cimento/areia: $\frac{1}{4}$ no paramento de montante, $\frac{1}{6}$ no paramento de jusante e $\frac{1}{8}$ na zona interior.

249. Sobre a **operação e a manutenção** é indicado que:

- a. no caso de a adução ser feita através de **tubulação gravítica** deve ser prevista a limpeza periódica da entrada;
- b. as **rupturas das barragens** podem ser motivadas por questões hidráulicas, por percolação ou por questões estruturais;
- c. as **rupturas hidráulicas** incluem o galgamento, a erosão externa e a erosão da base.
- d. as **rupturas devidas a percolação** envolvem a ruptura tubular (*piping*) através da fundação ou do corpo do aterro;
- e. as **rupturas estruturais** implicam deslizamentos pela fundação ou pelo aterro;
- f. todas as barragens devem **ser inspecionadas periodicamente**, antes da estação das chuvas e após chuvas intensas, para averiguar da necessidade de reparações;
- g. a **inspeção** deve investigar a existência de indícios de percolação ou trincas; a existirem indícios, deve ser consultado um especialista, a fim de evitar o agravamento de potenciais fenómenos que levem à ruptura;
- h. os **trabalhos de manutenção** incluem a desmatação de vegetação excessiva ou inadequada, a remoção de árvores e o tratamento de buracos causados por animais.
- i. durante a **operação** e após cheias devem ser removidos os detritos flutuantes, nomeadamente árvores ou ramos de árvores que possam comprometer a capacidade de descarga;
- j. o desenvolvimento de animais indesejáveis (mosquitos e cobras) e de determinados tipos de vegetação é mais gravoso em **águas pouco profundas**; em certos casos, pode ser vantajoso criar um desnível de cerca de 1 m na zona onde o nível de água se encontra mais frequentemente;
- k. as **condições dos vertedouros** devem ser verificadas após cada época de cheias;

- l. para minimizar a siltagem do reservatório deve promover-se a plantação de vegetação, a regularização em terraços das encostas, a construção de diques de retenção, etc.
- m. deve-se promover a **formação de pessoal** para a sua capacitação em regras básicas de manutenção e ações preventivas nas barragens, o que permite uma alocação otimizada de recursos.

250. Em conclusão, o documento indica um **conjunto de regras**, algumas de validade facilmente questionável. Uma poderão eventualmente ser adequadas, tendo em consideração um contexto muito específico, nomeadamente de materiais, técnicas construtivas e de carência de meios mais adequados. Outras são totalmente inadequadas, por exemplo, a de permitir a construção de vertedouros sobre aterros e a recomendação da colocação de colares anti-percolação. A recomendação de 2 vertedouros, podendo ser mais onerosa, parece, contudo, interessante do ponto de vista de segurança.

3.10 CONSTRUÇÃO DE PEQUENAS BARRAGENS DE TERRA (MDNRC, 2004)

251. O documento é um **guia** para os aspectos mais importantes a considerar **no projeto e na construção** de pequenas barragens de terra.

252. As **barragens podem romper por diversas causas**, sendo as mais comuns o galgamento e a erosão interna. Outras causas como a percolação em buracos de roedores ou os problemas causados pelas árvores são menos frequentes, embora possíveis. A análise dos bens a jusante é essencial na percepção do dano associado à barragem.

253. A **escolha do local** deve ter em atenção:

- a. as questões geográficas, nomeadamente de satisfação da capacidade necessária, da existência de aflúncias, das condições de segurança dos terrenos existentes, etc.
- b. no que respeita à geologia, é necessário assegurar um local em que a fundação seja resistente e impermeável; para pequenas barragens os tratamentos de fundação são facilmente questionáveis;
- c. as considerações económicas, devendo procurar-se minimizar os custos de construção; por um lado a extração de materiais da área do reservatório é tentadora, mas por outro pode causar problemas de impermeabilização; a existência de danos potenciais a jusante pode também causar sobrecustos na construção, devido aos trabalhos necessários para garantir a segurança.

254. Os **estudos de prospeção** devem incidir sobre a fundação da barragem, a zona de eventuais condutos e sobre a zona do vertedouro e devem procurar averiguar a existência de uma fundação firme, a quantidade de solos orgânicos, a existência de níveis freáticos, o teor em água natural e a composição dos solos, entre outros.

255. A **preparação da fundação** consiste na remoção da vegetação e dos solos orgânicos. Esta operação deve-se estender até cerca de 10 a 15 m a jusante do pé da barragem.

256. Na **zona do reservatório** os solos orgânicos não devem ser removidos. Normalmente, são mais impermeáveis e, por isso, podem ser úteis.

257. As **fundações em solos** devem ser limpas de solos soltos e de vegetação e escarificados. Devem ser retirados os blocos de rocha de dimensão inadequada. Se necessário, o teor em água dos solos deve ser corrigido e a fundação deve ser regularizada. Em **fundações rochosas** devem ser removidos os materiais soltos (solos ou rochas e vegetação) e devem ser seladas eventuais descontinuidades.

258. Na exploração da **área de empréstimo** devem ser constituídos depósitos de solos para a construção. Esses depósitos devem ter o teor em água tão próximo quanto possível do que será usado na construção. Devem ser tidos cuidados especiais para evitar a sua contaminação com outros solos. As áreas de empréstimo devem ser desprovidas de material orgânico, drenadas, conter os solos pretendidos e não terem demasiados blocos de pedra.

259. Se necessário e possível deve-se criar uma **trincheira corta-águas** que impeça (se a sua profundidade atingir um estrato impermeável) ou diminua a percolação pela fundação. A trincheira deve ser estendida a todo o comprimento da barragem. Se a trincheira não atingir o substrato impermeável há uma boa probabilidade de o reservatório não ser capaz de reter água, dependendo das características da fundação.

260. O guia apresenta diversas formas de **classificar os solos de aterro**, nomeadamente quanto à sua granulometria ou quanto às suas características de permeabilidade e de plasticidade. São referidos ensaios expeditos para identificar os diversos tipos de solos, nomeadamente os siltes e os solos orgânicos.

261. Como regra adicional indica que se deve dar preferência a **solos bem graduados**, isto é, com uma gama alargada de dimensões granulométricas. Os solos que apresentem elevada quantidade de blocos de rocha podem causar alguns problemas, devendo ser retirados os blocos com dimensão superior a 75% da espessura da camada. Como as camadas têm dimensões até cerca de 0,25 m, isto implica que as dimensões das partículas não deverão ser superiores a 0,18 m.

262. No respeitante ao **rip-rap** deve dar-se preferência às partículas de forma angular, uma vez que apresentam melhor imbricamento.

263. Como **solos a evitar** na construção são referidos:

- a. os solos muito plásticos, pois podem apresentar elevada variação volumétrica por variação do teor em água;
- b. os solos orgânicos, que são geralmente pouco resistentes.

264. O guia dá indicações sobre a **geometria** a considerar numa pequena barragem: as inclinações dos taludes, a largura do coroamento e a borda livre. A contabilização do recalque corresponde a consideração de um adicional de 5% da altura da barragem.

265. As barragens podem ser **homogêneas ou zoneadas**. As primeiras são mais fáceis de construir, mas exigem materiais adequados em quantidade suficiente. As barragens zoneadas permitem otimizar a utilização de materiais dos diversos tipos e são mais eficientes no controle da percolação.

266. A **construção** deve começar com a trincheira corta-águas e ser executada em camadas horizontais. Os materiais devem ser espalhados sobre as camadas pré-existentes e não empurrados para o local.

267. A **espessura das camadas** a compactar depende do solo e do equipamento de compactação, mas deve ser da ordem dos 0,20 a 0,25 m após a compactação.

268. Os **materiais mais grosseiros** devem ser colocados no terço de montante ou de jusante da barragem. Os blocos rochosos com dimensão superior a 2/3 da espessura da camada devem ser removidos.

269. Os solos devem ser **compactados com meios mecânicos**, após o ajuste do seu teor em água.

270. A **construção do aterro** deve ser feita de forma regular, de forma a não haver desníveis excessivos. As camadas já compactadas devem ser escarificadas para assegurar uma boa ligação. Se a superfície ficar demasiado seca, molhada ou gelada, a camada superficial deve ser retirada.

271. **Uma boa compactação** é essencial para obter um solo resistente e com adequada permeabilidade. A compactação depende da energia e do teor em água do solo. As variáveis possíveis para alterar a compactação são, para além da humidade do solo, a espessura da camada, o peso do equipamento de compactação, o número de passagens e o tipo de equipamento.

272. No caso de **rolos de rasto liso**, a escarificação da camada é fundamental. Os **rolos de pés de carneiro** são os mais adequados para os solos finos argilosos.

273. Normalmente 8 a 10 **passagens do equipamento de compactação** são suficientes.

274. Os solos devem ser compactados com um **teor em água próximo do ótimo** ou ligeiramente acima do ótimo. Uma forma simples e aproximada de avaliar o teor em água de um solo fino consiste em moldar um pouco de solo na mão. Se sujar muito a mão, tem água em excesso. Se não for possível moldar, terá falta de água. Nos solos mais finos, o ajuste do teor em água deve ser feito preferencialmente na área de empréstimo.

275. Os solos com **demasiada água** na área de empréstimo são bastante problemáticos, porque é mais difícil secar os solos do que os umedecer.

276. É indicada no guia uma **série de observações** que podem ser feitas ao **equipamento de compactação** para ajuizar sobre a proximidade do teor em água do solo ao ótimo. Essas observações baseiam-se na penetração do equipamento de compactação na camada, no material que pode vir agarrado aos pneus ou aos pés de carneiro, etc.

277. Para **solos arenosos**, a compactação deve ser feita com bastante água.

278. As **tubulações**, no sentido montante-jusante, devem ser instaladas numa trincheira escavada na fundação, para permitir melhor confinamento lateral. A trincheira deve ter uma dimensão na base igual ao diâmetro da tubagem acrescido do espaço necessário para a compactação de cada um dos lados. Os blocos rochosos não devem estar em contacto com a tubulação. Os taludes da trincheira devem ser inclinados a $1(V):2(H)$ para facilitar a compactação.

279. Todas as barragens terão **escoamento através do seu corpo e fundação**. Em geral, o escoamento através da barragem não constitui problema, a não ser que o maciço de jusante fique

demasiado saturado, causando problemas de estabilidade, ou o escoamento se dê em zonas concentradas, causando erosão interna.

280. A **erosão tubular ou *piping***, que surge na sequência de uma percolação concentrada, é uma das causas mais importantes de ruptura de barragens. O controle deste fenómeno é feito com recurso a filtros.

281. Os **filtros** e os **drenos** são órgãos essenciais à segurança de barragens. Os filtros são dimensionados para impedir o arrastamento de solos. Os drenos são dimensionados para escoar a água, mantendo os materiais a jusante secos. A combinação de filtros e drenos constitui uma boa solução de drenagem das barragens, pois permite uma boa capacidade de escoamento, com retenção das partículas. O guia apresenta as dimensões granulométricas típicas dos solos correntes usados na construção de barragens.

282. Os **tipos de drenos** presentes em barragens homogêneas são os tapetes drenantes, os drenos de pé de jusante, colares de areia e drenos à volta de tubulações.

283. A **proteção dos paramentos** é essencial. A montante permite proteger o talude contra a ação erosiva do vento, das ondas, do material flutuante, etc. A jusante destina-se essencialmente à proteção contra a erosão das águas pluviais, dos animais e do vento.

284. A **proteção do paramento de montante** pode ser feita com *rip-rap*, enquanto que o **paramento de jusante** pode ser protegido com espécies vegetais nativas. Deve evitar-se o acesso de animais aos taludes da barragem.

285. A **zona das ombreiras** pode ser especialmente suscetível à erosão, uma vez que o escoamento superficial tende a acumular-se nessa zona.

286. Todas as barragens devem dispor de **órgãos extravasores de cheias**.

287. As **estruturas de entrada** poderão ter de dispor de um sistema que impeça a entrada de detritos ou peixes. Esse sistema, normalmente constituído por grades ou redes, tem de ter limpeza regular, sob pena de ter diminuída a capacidade de vazão e se tornar perigoso.

288. Para o controle do escoamento, em pequenas barragens, **as comportas são preferíveis às válvulas**, quer por questões de custo de instalação, quer por questões de manutenção.

289. Em barragens de aterro, o **sistema de controle de escoamento** dos condutos deve, preferencialmente, estar localizado a montante, para impedir que a carga do reservatório esteja em permanência na conduta, com riscos para o aterro.

290. Os **condutos** a instalar em pequenas barragens podem ser de metal corrugado, de plástico, de ferro fundido ou de concreto. Cada solução apresenta vantagens e inconvenientes próprios, mas a boa compactação é essencial e o uso de filtros/drenos em colares permite assegurar uma reserva de segurança em relação à erosão ao longo da conduta. Os condutos devem ser instalados em trincheiras, sendo as juntas essenciais no comportamento do conjunto.

291. A **localização do conduto** deve ser tal que permita o esvaziamento de, pelo menos, 2/3 do volume do reservatório. A tubulação deve ter uma inclinação que não exceda 2 a 5%, para evitar

velocidades demasiado elevadas, e deve-se estender para além do pé do talude de jusante para evitar a erosão da barragem.

292. Os **vertedouros** destinam-se a evitar o galgamento da barragem em situação de cheia. Em pequenas barragens consideram-se 2 tipos de vertedouros: o vertedouro principal e o vertedouro de emergência.

293. O **vertedouro principal** deve ser desprovido de comportas e não ser suscetível à erosão (é expectável que funcione todos os anos). Podem ser usadas tubulações verticais ou inclinadas, devendo ser estruturas protegidas contra obstruções devidas a materiais flutuantes.

294. O **vertedouro de emergência** é um órgão que funciona após cheias significativas (portanto, em princípio, não opera todos os anos). Devem ter uma capacidade muito superior à do vertedouro principal. Normalmente, é em canal e é expectável que, após uma cheia, tenha de ser reabilitado ou mantido. Os canais devem ser localizados fora da barragem, por forma a evitar a erosão. A cota de entrada tem de ser inferior à cota do coroamento, contabilizando os possíveis recalques.

295. Em certos casos o **vertedouro principal e de emergência é apenas um órgão**.

296. A dimensão do **vertedouro de emergência** está relacionada com a **borda livre**. Em certos casos pode aumentar-se um pouco a borda livre mínima (cerca de 1,0 m para pequenas barragens) para fazer face a cheias. Noutros casos, é preferível redimensionar o vertedouro.

297. O **dimensionamento do vertedouro de emergência** pode ser feito admitindo que este órgão terá de descarregar o pico de cheia, desprezando o amortecimento do reservatório.

298. Após a construção de uma barragem é necessário **recuperar o espaço** usado durante a construção, nomeadamente de forma a prevenir a erosão e a minimizar os impactos.

299. É necessário ter em consideração a **regularização de taludes**, por forma a garantir a sua estabilidade e segurança a longo prazo, em especial para as condições de saturação, caso esses taludes confinem com o reservatório.

300. Relativamente à **revegetação**, deve procurar-se usar solos orgânicos para a plantação de espécies nativas e, durante os primeiros 1 a 2 anos, deve manter-se atenção redobrada sobre a sementeira. Deve-se evitar a plantação de árvores em zonas adjacentes ao aterro.

301. O presente documento é de cariz prático e vocacionado para orientar o empreendedor nas diversas etapas referentes à construção de um barramento. A maioria das indicações dadas é correta e adequadamente conservativa.

3.11 INSPEÇÃO DE PEQUENAS BARRAGENS (ALBERTA, 1998)

302. Esta publicação insere-se no programa provincial de segurança barragens, tratando especificamente de **pequenas barragens** com altura superior a 2,5 m e capacidade de armazenamento superior a 30 dam³. Pretende transmitir informação básica sobre a realização de **inspeções visuais para a detecção de problemas potenciais**.

303. É destinada a empreendedores que não disponham de pessoal qualificado em engenharia. Deste modo, os empreendedores dispõem de um **guia orientador** para as atividades correntes de monitoramento da segurança do barramento. São dadas indicações sobre as situações que justificam o contato com os serviços do *Dam Safety and Water Projects Branch da Alberta Environmental Protection*, bem como as que requerem a presença de um engenheiro de barragens.
304. São apresentados **esquemas ilustrativos** da implantação do barramento, da seção longitudinal da barragem e de uma seção transversal tipo.
305. É recomendada a realização de uma **inspeção corrente** com periodicidade anual. De modo a facilitar a identificação das patologias com origem no barramento, é aconselhado que se realize no **início da época de menor pluviosidade** (no Canadá, a passagem da Primavera para o Verão), após, pelo menos, duas semanas de tempo seco.
306. O documento alerta para a necessidade de aproveitar os **períodos de menor volume armazenado** para proceder à inspeção da zona habitualmente submersa do **paramento de montante**, para despistar sinais de erosão ou de atividade de animais.
307. É chamada a atenção para a necessidade de proceder a **inspeções específicas** após eventos meteorológicos extremos, como sejam fortes chuvadas, cheias, vendavais, degelo rápido ou sismos.
308. É apresentado um resumo das **patologias mais comuns** em barragens de aterro organizadas por zona de ocorrência: os paramentos, o coroamento, o pé de jusante, o vertedouro e o descarregador de fundo. Adicionalmente, é referida a necessidade de inspecionar e testar todas as **comportas e válvulas dos órgãos hidráulicos**, com especial atenção às partes móveis dos mesmos.
309. É recomendada a inspeção do **estado de conservação** dos condutos e dos poços de acesso.
310. É transmitida uma **ideia fundamental para a sensibilização** dos empreendedores – as patologias em barragens não se desenvolvem abruptamente, são acompanhadas de pequenos sinais ou indícios, os quais são mais facilmente detectáveis através da consulta e da análise comparativa de arquivo fotográfico datado.
311. É recomendada especial atenção a **sinais de evolução** (sinais incrementais) relativamente à situação observada nas últimas inspeções, nomeadamente, erosões, recalques, trincas, surgências, zonas úmidas ou vegetação indiciadora de alteração de umidade.
312. São dadas indicações sobre o **equipamento essencial** para a realização das inspeções.
313. É referida a utilidade de se definir uma **metodologia de inspeção** que oriente a sua realização de ano para ano para salvaguardar a consistência dos resultados e de apresentar cada campanha de inspeção sob a forma de **relatório/ficha padronizado**. É apresentada em anexo a ficha de inspeção adotada pelo *Dam Safety and Water Projects Branch da Alberta Environmental Protection*.
314. Para apoiar a inspeção é recomendada a **consulta prévia** das anotações e das fichas de anteriores inspeções, bem como do projeto “como construído”.
315. O guia resume em tabelas, organizadas por área do barramento, **os modos de rotura, as respectivas causas e as medidas preventivas**. São consideradas as roturas por erosão externa, erosão interna e por perda de estabilidade de vertentes.

316. As formas pelas quais a **rotura por erosão externa** pode ocorrer, as causas e as medidas preventivas são apresentadas em tabela própria. O empreendedor é alertado para, uma vez iniciados, o carácter permanente dos problemas de erosão. É referido que a erosão é primordialmente diagnosticável através de perda ou movimento dos materiais da barragem. No caso da erosão severa indevidamente corrigida é referida a forte possibilidade de conduzir a barragem à ruptura, antecedida, ou não, de galgamento.

317. As formas pelas quais a rotura por **erosão interna** pode ocorrer, as causas e as medidas preventivas são apresentadas também em tabela própria. São dadas indicações sobre os indícios associados à percolação excessiva da barragem. As manifestações visíveis da percolação descontrolada podem consistir em áreas umedecidas, acumulação de água ou surgências. Estas manifestações podem ocorrer no paramento de jusante, no pé de jusante da barragem, nas ombreiras e nos taludes do vale imediatamente a jusante. Qualquer manifestação deve ser circunscrita com marcas e fotografada, para fino controle posterior. Uma surgência descontrolada pode conduzir a fenómenos de erosão tubular (*piping*).

318. As formas pelas quais a rotura por **deslizamento de terras** pode ocorrer, as causas e as medidas preventivas são apresentadas igualmente em tabela própria. As causas podem consistir em más condições de fundação, técnicas construtivas e materiais de construção inadequados, inclinação excessiva de taludes e percolação descontrolada. Os sintomas referidos incluem as trincas, os recalques excessivos e o desalinhamento do coroamento.

319. No que se refere à **coroamento** é afirmado que:

- a. é utilizada para circulação de pessoas, eventualmente veículos motorizados, e de gado;
- b. as marcas do tráfego sobre o coroamento e a vegetação excessiva podem mascarar processos de deformação na fase inicial;
- c. a inspeção deve incidir sobre os sinais de erosão (capazes de estreitar o coroamento), depressões devido a recalques (possibilidade de redução da borda livre), trincas, buracos de animais, vegetação excessiva e abatimentos, ou outras cavidades inexplicadas (que podem favorecer a erosão interna).

320. No que se refere à inspeção do **paramento de montante** é recomendado a observação da erosão devida à ondulação, da falta de proteção, das trincas (que podem ser sintomas de perda de estabilidade ou de recalque diferencial), dos abatimentos e dos buracos de animais.

321. No que se refere à inspeção do **paramento de jusante** é recomendado a observação das trincas (que podem ser sintomas de perda de estabilidade ou de recalque diferencial), dos sinais de percolação (com especial atenção ao regime e ao carreamento de material), dos empolamentos na zona inferior do talude, das depressões e dos abatimentos (relacionados com erosão tubular ou *piping*), da vegetação de porte elevado, da erosão por escorrência superficial de água, de acumulação de água na base e dos buracos de animais.

322. No que se refere à inspeção das **ombreiras** e das **vertentes do vale imediatamente a jusante** é chamada a atenção para os sinais de percolação, a erosão do contato aterro/ombreira, as trincas e os sinais de deslizamento.

323. Relativamente ao **pé de jusante e à área imediatamente a jusante** menciona-se que os fenómenos relevantes são de natureza hidráulica, relacionados com a percolação, pelo que deverão ser inspecionados para a detecção da presença de terreno úmido, de acumulação de água e de surgências com carreamento de material fino.

324. Relativamente ao **descarregador de fundo** é referido que a inspeção deve incidir sobre:

- a. o funcionamento das válvulas/comportas;
- b. a siltagem da tomada de água;
- c. a deterioração das estruturas de entrada e de restituição;
- d. a presença de percolação com carreamento de material fino;
- e. depressões ou abatimentos no alinhamento do conduto;
- f. corrosão ou perfurações no conduto;
- g. o estado interior do conduto, que, no caso de diâmetros internos superiores a 1 m, deverá incluir a sua inspeção.

325. Sobre os **vertedouros** são referidos os possíveis tipos (canal natural ou escavado, tulipa e conduto) e materiais (concreto, madeira, estacas-prancha, tubo corrugado, solo natural ou compactado e rocha).

326. Sobre o **vertedouro em canal** (natural ou escavado) é referido que a inspeção deve incidir sobre os sinais de erosão, o movimento dos materiais de proteção e sua obstrução por vegetação ou detritos.

327. Sobre o **vertedouro em tubo corrugado**, é recomendada a inspeção das juntas, de sinais de corrosão ou de perfuração e a erosão da zona de saída.

328. Sobre o **vertedouro em concreto**, é recomendada a detecção de trincas, de deslocamentos, de movimentos de juntas, da obstrução de drenos e da erosão da fundação.

329. O guia inclui um anexo intitulado “**Identificação de problemas e soluções: um guia de auto-ajuda**” com os problemas potenciais em barragens, agrupados segundo o local de ocorrência.

330. O guia inclui ainda uma **lista de contactos** com a Autoridade, um **glossário** de barragens e uma **ficha-tipo** para inspeção de barragens.

3.12 GUIA DE PLANEJAMENTO E DE PROJETO PARA PEQUENAS BARRAGENS (NBCBN, 2005)

331. Trata-se de um **documento de planeamento de trabalho** de um grupo no *Nile Basin Capacity Building Network For River Engineering* (<http://www.nbcbn.com/>) que é formado pelos países atravessados pelo rio Nilo (Burundi, Egito, Eritreia, Etiópia, Quênia, Ruanda, Sudão, Sudão do Sul, Tanzânia e Uganda). É desenvolvido pelo *Micro-Dam Research Group do River Structure Cluster*.

332. Parte do trabalho a desenvolver neste projeto prende-se com a facilitação do acesso público – ou seja, aos pequenos empreendedores – de **técnicas robustas e atuais de gestão e dimensionamento de barramentos de água**. Tal será conseguido através da elaboração de documentos-guia que tenham em consideração o tecido econômico e social a que se destinam, bem como o tipo, quantidade e qualidade de dados de base disponíveis.

333. Como curiosidade, apresenta-se no Quadro 10 o índice preliminar do manual de planeamento e projeto de pequenas barragens aí proposto.

Quadro 10 – Índice preliminar do manual de planeamento e projeto de pequenas barragens

Título	Descrição do conteúdo
Formulação do plano	Específico para a bacia do Nilo
Considerações ecológicas e ambientais	Específico para a bacia do Nilo
Condições de infraestruturas	
Disponibilidade de mão-de-obra	
Avaliação do potencial hídrico	Técnicas específicas com consideração da quantidade e qualidade dos dados disponíveis
Estudos de afluências hidráulicas	Técnicas específicas com consideração da quantidade e qualidade dos dados disponíveis
Acumulação de sedimentos no reservatório	Técnicas específicas com consideração da quantidade e qualidade dos dados disponíveis
Seleção do local e do tipo de barragem	Orientação com base em modelos digitais do terreno
Fundação e materiais de construção	Genérico
Dimensionamento de barragens de terra	Genérico
Dimensionamento de barragens de enrocamento	Genérico
Dimensionamento do vertedouro	Genérico
Desvio provisório	Genérico, mas considerando os métodos de estudos hidrológicos
Curva guia hídrica	Técnicas específicas com consideração da quantidade e qualidade dos dados disponíveis
Exploração e manutenção	Técnicas específicas com consideração da capacidade técnica local
Segurança da barragem	Técnicas específicas com consideração da capacidade técnica local

4 PRÁTICA NACIONAL

334. São seguidamente apresentados os aspectos mais relevantes de um conjunto de documentos analisados para ilustração das boas práticas a nível nacional. Estes documentos integram a lista de referências bibliográficas compiladas.

4.1 AVALIAÇÃO DA SEGURANÇA DE PEQUENAS BARRAGENS EM OPERAÇÃO (PIERRE, 2003)

335. Este documento ocupa-se das **pequenas barragens em operação**, discutindo, inicialmente, aspectos que podem interferir na integridade do empreendimento. Expõe, a seguir, procedimentos que visam avaliar a segurança dessas estruturas, nos seus diferentes aspectos, sugerindo ações que permitam melhorar a qualidade dessa avaliação, e conclui com a apresentação de medidas corretivas e organizacionais.

336. É mencionada a **informação de base preliminar**, necessária ao levantamento das **condições de exploração e de segurança** das pequenas barragens no Brasil:

- a. **dados de operação**: devem ser consultados os diários de operação e os relatórios de inspeções e conduzidas entrevistas com o pessoal envolvido na operação e na manutenção para relato de eventos passados capazes de indiciar mau funcionamento ou potenciais incidentes;
- b. **dados de instrumentação**;
- c. documentos de **projeto** e de registros de **construção**.

337. Relativamente às **inspeções**:

- a. são referidas as **obras civis** (discriminando as barragens de aterro e de concreto) e a detecção de sinais de percolação, de escorregamentos, de trincas, de erosões, de presença excessiva de vegetação, as condições das estruturas de extravasoras e da zona a jusante, as condições de manutenção, a instrumentação e as rotinas de procedimentos de leitura;
- b. são referidos os equipamentos, designadamente, indicada a observação das **condições de manutenção** de grades e comportas e de equipamentos de manobra;
- c. é lembrado que, apesar de as pequenas barragens quase sempre estarem associadas a reservatórios de pequeno volume, operando a fio de água, não deve ser retirada da lista de verificações a **estabilidade dos taludes do reservatório**;
- d. no que se refere às **questões ambientais**, as inspeções devem abranger as condições do vale a jusante e a qualidade da água no reservatório;
- e. devem ser avaliadas as **condições dos acessos**, face à sua natureza vital durante a ocorrência de situações meteorológicas extremas;
- f. deve ser avaliada a **capacitação da equipe** de operadores.

338. São ainda listados **serviços complementares** (topográficos, de ensaio das estruturas, de reavaliação hidrológica, de inspeção subaquática, de simulação de rompimento, de levantamento batimétrico e de medição de descarga sólida, entre outros) eventualmente necessários em resultado das inspeções.

339. No elenco de ações a propor constam a manutenção, a instalação de instrumentação, obras de reabilitação, a elaboração ou revisão de manuais de segurança e os procedimentos de emergência.

4.2 CURSO DE BARRAGENS DE TERRA. COM VISITAS AO NORDESTE BRASILEIRO - 1983 A 1996

340. O Curso, composto por 4 volumes, resulta de **apontamentos** que traduzem cerca de 3 décadas de trabalho associado à **construção de pequenas barragens de terra no Nordeste Brasileiro** e de duas décadas de atividade letiva na Cadeira de Barragens no Centro de Tecnologia da Universidade do Ceará. Pela profundidade e pela extensão das matérias, trata-se de uma obra de grande relevância e interesse no que respeita a pequenas barragens.

341. São referidos os **principais objetivos dos represamentos**, designadamente, o abastecimento de água – humano, animal e industrial, a irrigação, a produção de energia, a piscicultura e o controle de cheias, entre outros.

342. No que respeita à **classificação de barragens**, consideram-se, quanto ao comportamento mecânico, duas grandes categorias: deformáveis e não deformáveis. O documento considera ainda outros tipos de classificações, associados, por exemplo à submergência, além tipos especiais de barragens, nomeadamente quanto aos materiais.

343. No que respeita aos **estudos associados ao projeto** de uma barragem, são referidos os estudos sócio-econômicos, hidrológicos, climáticos, topográficos, geológicos, geotécnicos e agrológicos.

344. A **escolha do tipo de barragem** é condicionada por imposições técnico-econômicas, que têm em consideração o tipo de fundação, a forma do vale, as condições climáticas, os fatores hidráulicos, as acessibilidades, os equipamentos, os materiais de construção, o vertedouro, a finalidade e o custo.

345. São abordados os **diversos tipos de barragens de terra**, suas vantagens e desvantagens, sendo apresentados os **critérios gerais** para determinar algumas das dimensões e características da barragem.

346. Por se tratar de um documento virado para o ensino, inclui-se uma seção bastante extensa onde se analisa, de forma detalhada, os processos de cálculo do **escoamento em meios porosos** e as medidas de controle de segurança relativamente à percolação.

347. De igual forma os **aspectos relativos às fundações** são apresentados de forma detalhada. Distinguem-se diversos tipos de fundações, quanto à resistência mecânica e quanto à permeabilidade. São também apresentados os tratamentos aplicáveis a cada caso.

348. Finalmente o texto dedica-se aos **critérios de dimensionamento dos vertedouros** de barragens de aterro.

4.3 GUIA PRÁTICO PARA PROJETO DE PEQUENAS OBRAS HIDRÁULICAS

349. Neste documento reúnem-se **conceitos e orientações relativos à hidrologia e à hidráulica** de canalizações e travessias, tendo em vista a construção de pequenas obras hidráulicas, incluindo, naturalmente as barragens.

350. No respeitante às barragens e aos conceitos teóricos, são apresentados diversos **métodos para o estabelecimento da vazão de cheia** e para o **dimensionamento dos órgãos hidráulicos** das barragens.

351. Na prática, na preparação de um barramento de um curso de água, para além dos estudos hidrológicos, é necessário verificar da existência de outros **empreendimentos a montante ou a jusante** que possam interferir quer com o uso da água, quer com o nível de dano potencial associado à barragem.

352. Com base nas informações preliminares, deve seleccionar-se a **localização aproximada do eixo da barragem** e fazer os estudos relativos à área inundada e aos terrenos afetados.

353. A definição da cota máxima da água para a cheia de projeto (nível máximo maximorum) permite definir a **cota do coroamento da barragem**, conhecendo-se a borda livre. Esta última é determinada em função das características do reservatório e dos ventos, recomendando-se que seja sempre superior a 0,5 m.

354. A cota da soleira e as dimensões do **vertedouro** podem então ser estabelecidas tendo em consideração os estudos hidrológicos e o amortecimento da cheia.

355. Após o dimensionamento destes elementos, é feita a verificação para a **vazão catastrófica**, isto é, o período de recorrência que provocaria o galgamento da barragem.

356. No respeitante ao **corpo da barragem**, recomenda-se que, à falta de estudos específicos sobre as características dos solos e para barragens sem sistema de drenagem interna, as inclinações dos taludes sejam limitadas a $1(V):3(H)$, a montante, e $1(V):2,5(H)$, a jusante.

357. O perfil da barragem deve incluir um **tapete drenante horizontal**, constituído por areia média, com vista a permitir o controle de percolação através da barragem. Na fundação da barragem deve-se proceder à escavação de uma **trincheira corta-águas**. A preparação da fundação deve consistir na **remoção da camada superficial** do solo e de todos os restos vegetais.

358. Na implantação das estruturas hidráulicas deve ter-se em consideração as melhores **condições de fundação** quer para o vertedouro, quer para o descarregador de fundo.

359. Na **sequência construtiva**, o descarregador de fundo e as ensecadeiras de montante e de jusante devem ser as primeiras obras a serem executadas. Se possível, o descarregador de fundo e o vertedouro devem ser posicionados em margens distintas, de forma a minimizar as interferências.

360. No posicionamento das **saídas dos órgãos hidráulicos** é necessário ter em atenção as possíveis interferências com o pé do talude de jusante da barragem, com vista a evitar erosões nesta zona da barragem. No final do vertedouro terá de existir algum dispositivo para dissipação de energia, antes da sua restituição da vazão ao leito natural, por forma a minimizar o seu potencial erosivo.

361. O documento é um manual de interesse em termos de orientação para os projetistas de pequenas barragens, mas foca essencialmente os aspectos hidráulicos, relegando para segundo plano os demais aspectos, nomeadamente, o dimensionamento geotécnico da barragem e da respetiva fundação.

4.4 MANUAL DO PEQUENO AÇUDE

362. O Manual do pequeno açude abrange **açudes com volumes entre 10.000 m³ e 200.000 m³ e excepcionalmente até 1 milhão de m³**. Estima-se que, no Nordeste Brasileiro, existam 70.000 açudes com mais de 1.000 m² de espelho de água, 1.200 a 1.500 açudes com capacidade superior a 100.000 m³, e cerca de 450 barragens com mais de um milhão de m³.

363. O manual dedica-se, fundamentalmente, a barragens a **construir na “área cristalina”**, isto é, onde as **formações** geológicas são **rochosas** (fundamentalmente gnaisse e granito).

364. Trata-se de um documento técnico e prático elaborado para um público de técnicos agrícolas, agrônomos e engenheiros com atuação no campo, onde se apresentam as **informações indispensáveis à elaboração dos projetos**. No manual salienta-se a importância dos pequenos reservatórios, que permitem um uso de água mais intensivo do que os grandes reservatórios.

365. A parte A do documento trata o **dimensionamento do açude** e do **vertedouro especificamente para o Nordeste**, a sua **execução** com tratores de esteira e a **conservação** das obras.

366. A parte B do documento aborda os aspectos técnicos relacionados com os **usos possíveis da água**.

367. As barragens podem ter vários **fins**, como abastecimento humano, outros usos domésticos, abastecimento animal, plantação de sítio, cultivo de vazante, irrigação, pesca ou criação de peixes e de patos, entre outros.

368. Quando um reservatório tem **fins múltiplos** é importante verificar as iterações entre as diversas atividades. Por exemplo, o impacto da rega (e do conseqüente abaixamento do nível de água) com o abastecimento público ou animal ou com a piscicultura.

369. Quando a água é para **abastecimento humano** é necessário assegurar a sua qualidade, devendo, entre outros aspectos, limitar o acesso do gado à água, controlar o uso de produtos fitosanitários e limitar o uso de água, por exemplo, para lavagens.

370. No que respeita à **qualidade química da água**, a salinidade pode condicionar a sua adequação para diversos fins. De acordo com uma recomendação da *FAO*, uma água de boa qualidade deve ter uma salinidade inferior a 700 $\mu\Omega$. Para valores até 1.400 $\mu\Omega$, ainda se considera a água com qualidade aceitável, e acima de 2.800 $\mu\Omega$, a água é considerada não potável.

371. No Nordeste brasileiro há alguma **cultura histórica** da construção e do uso de pequenos açudes. No entanto, é também **significativo o número de acidentes ou incidentes** associados a estas estruturas.

372. O manual apresenta um método hidrológico aplicável a **bacias hidrográficas de 0,1 a 500 km²**.

373. Na **escolha do local** para o açude é necessário percorrer os locais possíveis, debatendo com as populações as eventuais vantagens e inconvenientes. Na escolha do local é necessário considerar o uso previsto do açude, as suas características (tipo de fundação e acessos), as características do reservatório (profundidade e volume), os recursos hídricos disponíveis (quantidade e qualidade) e a situação fundiária do local e da vizinhança.

374. De entre os aspectos a considerar para o **abastecimento de água** salienta-se a importância de garantir a qualidade da água. No caso da **irrigação**, um dos aspectos mais salientes relaciona-se com os custos da distribuição de água, sendo de privilegiar os sistemas gravíticos.

375. O **local de implantação da barragem** deve, na medida do possível, ser estreito, para minimizar o volume da barragem. Porém, devem ser evitados vales com encostas muito íngremes, devido a dificuldades construtivas e a problemas de implantação do vertedouro.

376. Perto do local da barragem devem existir **terras em quantidade e qualidade para a execução** da obra. Deve-se ter em atenção que os solos superficiais podem não ser representativos dos solos em profundidade (em qualidade e em quantidade), pelo que é aconselhável a execução de poços e de trincheiras.

377. Certos **afioramentos rochosos** devem ser evitados devido a dificuldades de ligação com o aterro a construir e à existência de fraturas capazes de pôr em causa a estanquidade do reservatório.

378. A **posição do vertedouro** pode ser determinante na localização de uma barragem. Idealmente, no caso de pequenos empreendimentos, um vertedouro “natural”, separado do aterro, será a melhor solução.

379. Em pequenas barragens, o ideal será que a **fundação** não seja demasiado profunda. Assim, convém estimar a profundidade a que se encontra o embasamento rochoso, através de trincheiras ou sondagens a trado manual, se viável.

380. No que respeita à **inclinação da linha de água**, os locais com maior inclinação correspondem a reservatórios menores.

381. Na determinação da **bacia hidrográfica**, deve-se recorrer a plantas topográficas e averiguar da existência de outros açudes a montante.

382. A **qualidade da água** é, em regra, mais difícil de determinar. O estudo das águas existentes em poços ou outros açudes poder-se-á revelar útil. É também necessário verificar o risco de salinização.

383. Embora não exista legislação sobre a autorização para a **construção de açudes em terras próprias** é necessário verificar, para montante, de forma adequada a extensão do espelho de água em pleno armazenamento e em máxima cheia. É conveniente obter uma autorização explícita por parte dos vizinhos, caso as suas propriedades se localizem próximo das margens da barragem.

384. A construção do açude também pode ter **consequências para jusante**, nomeadamente a redução significativa dos escoamentos, afetando outros açudes e poços.

385. É também necessário verificar se o **eventual rompimento da barragem** pode ter consequências ao nível de pessoas, habitações ou propriedades.

386. O **dimensionamento do reservatório** deve adequar a sua capacidade às afluências. Um reservatório subdimensionado perderá a maior parte do escoamento e necessitará de um grande e provavelmente caro vertedouro. Um reservatório sobredimensionado corresponde a um custo excessivo da barragem e a uma grande superfície inundada. Como as descargas serão pouco frequentes, há o risco de salinização do açude e de interrupção do escoamento do riacho a jusante.

387. O **vertedouro** é fundamental para a segurança da obra. Estudos sobre a segurança de barragens mostraram que uma percentagem muito elevada de barragens tinha o vertedouro subdimensionado. O vertedouro deve ter uma adequada margem de segurança, nomeadamente para considerar a probabilidade de arrombamento de açudes situados a montante ou a sua obstrução acidental.

388. A **dimensão do açude** deve ser estabelecida de forma ponderada, comparando o volume escoado pela bacia V_{esc} com o volume do açude V_x . Quanto maior for a razão V_x/V_{esc} :

- i. o açude sangra cada vez menos e pode salinizar-se, tornando-se num açude morto, se não for utilizado;
- ii. os açudes situados mais a jusante vão recebendo cada vez menos água;
- iii. o custo da obra aumenta e o investimento pode não ser rentável;
- iv. grandes áreas de terra, muitas vezes férteis, serão alagadas.

389. O tamanho ideal do açude depende muito do **uso previsto**.

390. Para açudes destinados ao **abastecimento de água** deve-se procurar que o reservatório seja, na medida do possível, **profundo**. A “resistência” do açude às estiagens é muito dependente da sua profundidade, sendo as perdas por evaporação mais pequenas em açudes profundos.

391. As **variáveis de maior importância na dimensão do açude** são a altura H_x e a razão V_x/V_{esc} . É necessário considerar também:

- i. as necessidades de água a jusante;
- ii. o risco de salinização de açudes; embora seja difícil prever a salinização, os fatores de risco são riachos com condutividade superior a $300 \mu\Omega$, açudes pouco profundos, com H_x entre 4 e 5 m, sobredimensionados ($V_x/V_{esc} > 0,8$ a 1) ou com $H_x > 8$ m e $V_x/V_{esc} > 1,5$;
- iii. a segurança do abastecimento é o critério de maior importância, sendo conveniente verificar a probabilidade de o açude secar.

392. Para açudes destinados à **irrigação**, é recomendado que o volume esteja compreendido entre 0,5 e $0,6 V_{esc}$. Se a altura for inferior a 2,5 m, deve aumentar-se a altura sem que V_x ultrapasse $0,8 V_{esc}$.

393. Se o açude for utilizado de **maneira intensiva** não haverá, em princípio, problemas de salinização. Por outro lado, a frequência de descarga do açude deverá ser da ordem de 55 a 60%, enquanto o volume descarregado ficará na faixa dos 55 a 65 % do volume recebido.

394. Quando o **uso do açude é misto**, a razão V_x/V_{esc} deverá alcançar a faixa 0,8 a 1,0, procurando-se que haja uma aumento significativo da profundidade.

395. Existem dois **sistemas para evacuar as vazões de cheia** de uma barragem – através do vertedouro e do descarregador de fundo.

396. O **vertedouro** é caracterizado pela sua vazão máxima admissível Q_a , a qual deve ser igual ou superior à vazão máxima Q_x .

397. No **dimensionamento do vertedouro** em pequenas barragens, a altura da lâmina máxima admissível, H_v , deve variar entre 0,50 m (ou menos se for possível) e 1,00 m, podendo, excepcionalmente, alcançar 1,50 m. Se a altura da lâmina for excessiva, pode-se:

- i. alargar o sangradouro;
- ii. aumentar um pouco a altura da barragem para elevar a cota da água no vertedouro até um nível em que a topografia permita uma maior largura do vertedouro;
- iii. prever um segundo vertedouro;
- iv. admitir um valor elevado de H_v , desde que haja condições naturais favoráveis para a dissipação de energia.

398. Para a realização de um pequeno açude são necessários os seguintes **estudos básicos**:

- i. caracterização hidrogeológica;
- ii. avaliação da geometria do açude e avaliação da sua capacidade;
- iii. estimativa das perdas no açude (evaporação e infiltração).

4.5 ROTEIRO BÁSICO PARA O DIMENSIONAMENTO DE PEQUENAS BARRAGENS DE TERRA NO ESTADO DE MG

399. O roteiro aplica-se a **pequenas barragens**, em que a altura do barramento, contada do nível do terreno ao coroamento, é menor ou igual a 10 metros.

400. As barragens têm **impactos positivos**, nomeadamente econômicos e sociais, mas também se devem avaliar os **impactos negativos**, nomeadamente os ambientais.

401. Nas pequenas barragens de terra, por serem de fácil construção, muitas vezes certas **regras básicas de dimensionamento e construção são negligenciadas**. Neste tipo de obras o subdimensionamento de vertedouros e o conseqüente galgamento é uma das causas mais frequentes de rompimento. Por outro lado, mesmo as pequenas barragens podem causar sérios problemas quando afetam outras barragens por efeito de cascata.

402. Nos projetos de barragens é fundamental a correta elaboração de **estudos hidrológicos e de estudos hidráulicos**.

403. O roteiro indica uma metodologia confiável direcionada ao **dimensionamento de pequenas barragens no estado de Minas Gerais (MG)**, com base em dados hidrológicos regionais, e os aspectos legais a serem considerados na construção das obras.

404. Pretende oferecer aos técnicos um exemplo do **desenvolvimento de um projeto** de uma pequena barragem de terra de nível básico.

405. As **componentes principais** de uma barragem são o maciço que retém a água, o canal extravasador e o dissipador de energia.

406. Relativamente ao **corpo da barragem** são dadas indicações sobre o núcleo, os taludes de montante e de jusante, o dreno de pé de jusante, o coroamento, a borda livre e a fundação.

407. Os **taludes** são as faces laterais e inclinadas do corpo da barragem, paralelas ao seu eixo, ficando a do lado de montante em contato com a água. Recomendam-se inclinações máximas de $1(V):2,5(H)$, a montante, e de $1(V):2(H)$, a jusante.

408. A **largura do coroamento** da barragem poderá ser obtida a partir de $C = \frac{H}{5} + 3$, onde C é a largura do coroamento e H a altura da barragem, ou ser superior, se houver condicionantes de tráfego.

409. A **altura da barragem** é a distância vertical entre a superfície do terreno que recebe a barragem e a superfície da água no reservatório, por ocasião da ocorrência da vazão máxima de projeto, acrescida da borda livre.

410. A **borda livre** deverá ser, no mínimo, de 1,0 m.

411. Se não existir em quantidade suficiente material para construção do aterro (material homogêneo com predominância de argila), ou se ocorrer uma camada arenosa permeável no leito do rio, é imprescindível a construção de um **núcleo central** com predominância de argila, prolongado através de uma trincheira corta-águas, que intersete a trajetória da água. Em certos casos, nomeadamente se a fundação for rochosa, pode-se utilizar um diafragma de concreto (simples ou armado).

412. Na **fundação**, ao longo do eixo da barragem poderá ser necessário construir uma trincheira, que será preenchida com terra de boa qualidade, devidamente compactada (terra semelhante à da barragem ou à do núcleo da barragem). Sempre que possível a trincheira deverá ser prolongada até à rocha ou ao estrato impermeável.

413. O **controle do escoamento** através do perfil da barragem pode ser feito através de um sistema de drenos, colocados, geralmente, no terço final do talude de jusante, ou mesmo construindo-se um enrocamento de pedras no final deste (dreno de pé de jusante). Os drenos devem ser construídos de modo que as águas de infiltração possam sair sem causar erosão no aterro, funcionando como filtros.

414. Os **órgãos extravasores**, para além do canal extravasador, podem ser monges, torres com comporta ou tulipas.

415. As duas variáveis hidrológicas mais relevantes para o dimensionamento de pequenas barragens de terra são a **vazão máxima de cheia** e o **volume de armazenamento** necessário para a regularização de uma determinada vazão, numa região hidrográfica. No roteiro no estado de MG apresentam-se os estudos da HIDROTEC (http://www.hidrotec.ufv.br/metodologia_resultados.html) e do “Atlas Digital das Águas de Minas” (http://www.atlasdasaguas.ufv.br/exemplos_aplicativos/exemplos_aplicativos_home.html).

416. A vazão máxima de cheia, caracterizada pela frequência, é utilizada no dimensionamento das estruturas extravasoras de barragens.

417. Os estudos desenvolvidos no programa HIDROTEC para predição da vazão máxima de cheia em pequenas bacias, apontaram para a adoção do **período de retorno de 500 anos**, para as regiões hidrográficas dos rios Paranaíba e Grande em território mineiro, e do **período de retorno de 100 anos**, para as demais regiões hidrográficas.

418. São consideradas quatro **soluções básicas para o sistema extravasor**:

- i. *Canal lateral com declividade e escada de dissipação de energia.* O canal tem de ser sempre exterior ao aterro. É válida a formulação de Manning para canais. Para além da verificação da vazão e da geometria do canal em função das características do material de fundação, deve-se ainda verificar o valor máximo da velocidade, por forma a não causar perdas de estabilidade por erosão.
- ii. *Canal lateral sem declividade e escada de dissipação de energia.* Se o desnível montante-jusante for elevado pode ser necessário construir uma escada de dissipação de energia.
- iii. *Canal lateral sem declividade e com rampa extravasora.* Neste caso a dissipação de energia pode ser obtida através de ressalto hidráulico, para o que se poderá ter de construir uma estrutura especial – bacia de dissipação - a qual possui o fundo revestido para resistir às forças de cisalhamento induzidas pelo escoamento.
- iv. *Vertedouro em tulipa.* A utilização deste tipo de solução requer a construção de uma obra de arte e normalmente pode estar associada ao desarenador (descarregador de fundo).

419. O **reservatório** tem de ser dimensionado por forma a atender à demanda de água tendo em atenção o (s) seu(s) fim(ns).

420. A **escolha do local da bacia** com capacidade para armazenar o volume pretendido é feita após se dispor do levantamento planialtimétrico das localizações possíveis.

421. Consoante a dimensão da bacia esse **levantamento** pode ter por base curvas de nível de 1,0 m, para bacias pequenas, até 5 m, para bacias de maiores dimensões.

422. O **desarenador ou descarregador de fundo** destina-se à eliminação dos depósitos do fundo e ao esvaziamento do reservatório. As estruturas mais utilizadas para o controle da vazão no desarenador são os monges e as torres. O desarenador pode ainda servir de desvio provisório do curso de água durante a construção.

423. O **monge** é constituído por uma estrutura de concreto, por onde se escoam os excedentes de água até à tubulação do descarregador de fundo. Esta estrutura pode servir ainda para o controle do nível de água na represa e da vazão de jusante, pela abertura ou fechamento das comportas instaladas no "monge".

424. A **construção da barragem** deve ser feita sobre solo estável, isto é, não sujeito a deslizamentos e a grandes acomodações provocadas pelo peso do aterro. Deve-se evitar o recalque sobre lajeiros de pedra, à vista ou a uma pequena profundidade, quer por questões relacionadas com o escoamento,

quer por questões de estabilidade mecânica. Recomenda-se uma rigorosa limpeza do local onde será construído o maciço e da área de empréstimo, bem como da área a ser inundada pelo reservatório.

425. Em pequenas barragens, a **caracterização dos solos em laboratório** pode ser feita por análise granulométrica, por ensaios de permeabilidade e pelo ensaio de Proctor (necessário na fase de construção do aterro).

426. A localização exata da barragem deve ainda ser suportada por **sondagens**, que poderão ser feitas por trado ou à percussão, pela abertura de **trincheiras** ou por meio de **ensaios de resistência mecânica** do solo. Outros aspectos a considerar são, por exemplo, a dimensão da garganta e a distância às áreas de empréstimo dos solos, por questões de custo.

427. Quando a sondagem acusar a presença de **camadas permeáveis** próximas à superfície e que poderiam permitir a passagem de água, torna-se necessário a construção de uma trincheira impermeável, ou diafragma, que interseja a trajetória da água. Após a abertura da trincheira, faz-se o seu enchimento com material de boa qualidade, semelhante ao do núcleo da barragem. Sempre que possível, a trincheira deverá ser construída ao longo de todo o desenvolvimento do aterro e abrangendo uma profundidade até ao estrato rochoso ou ao estrato impermeável.

428. Após o enchimento da trincheira inicia-se o **levantamento do maciço de terra**, lembrando que, caso o material do núcleo seja diferente do resto do corpo da barragem, o enchimento por camadas deve respeitar os limites para deposição de cada material. Antes do lançamento da primeira camada de solo, é necessário proceder ao revolvimento (areação) e umedecimento da camada-base antes de sua compactação, com objetivo de proporcionar maior ligação entre camadas. O aterro deverá ser feito colocando camadas finas, de 0,15 a 0,20 m, de solo e com aplicação de água até que seja alcançado o conteúdo de umidade adequado (nem muito seco, nem muito encharcado) para se atingir a compactação máxima do aterro. A densidade de solo recomendada para pequenas barragens é de 15 a 17 kN/m³. Caso ocorram nascentes, estas devem ser reencaminhadas para montante ou para jusante, consoante a posição em que ocorrem.

429. No que respeita ao **reservatório**, deve-se ter em atenção a presença de estratificações salinas no leito, o que acarretará, fatalmente, a ocorrência de água salobra, e o controle de vegetação aquática como as taboas, aguapé e salvinia, entre outras, pois podem ter uma rápida propagação, ser tóxicas e contribuir para a degradação da qualidade da água.

430. Os aspectos a considerar na **mitigação de impactos ambientais** são a recuperação das “áreas de empréstimo”, a proteção do reservatório com relação ao assoreamento, o monitoramento da barragem e alteração da qualidade da água.

431. O documento contém ainda uma **lista da legislação aplicável** (com *links* no documento original), referindo, nomeadamente, a Lei Estadual nº 13.199, de 29 de janeiro de 1999, a Lei Florestal Estadual nº 14.309, de 19 de junho de 2002, a Portaria IGAM N°49, de 01 de julho de 2010, a Deliberação Normativa COPAM nº 74, de 9 de setembro de 2004, a Deliberação Normativa CERH-MG n.º 09, de 16 de junho de 2004, a Resolução CNRH nº 37/04, de 26 de março de 2004 e a Resolução Conjunta SEMAD-IGAM nº 1548, de 29 de março de 2012.

432. Para pequenas barragens sugere-se, que o empreendedor rural faça, de forma simplificada, um **plano de segurança da barragem** sob sua responsabilidade, para ser utilizado durante toda vida útil da obra. Esse plano deverá conter basicamente dois procedimentos ou inspeções periódicas: o monitoramento do maciço da barragem e o monitoramento da bacia de contribuição do barramento. A periodicidade proposta é semestral, para o período seco, e semanal, para o período chuvoso, podendo ser aplicados diariamente, em caso de ocorrência de chuvas intensas ou quando observados comportamentos anormais em qualquer dos diversos setores da barragem que possam afetar a segurança da barragem.

433. Nas **inspeções**, os principais problemas a serem monitorados no maciço da barragem são os deslocamentos, as deformações, os indícios de percolação e os níveis piezométricos. Na bacia de contribuição, o principal problema é a identificação das áreas (ou focos) mais suscetíveis ao processo erosivo/perda de solos devido a falta de aplicação de técnicas de manejo integrado na bacia, podendo comprometer a vida útil do reservatório.

5 LISTA DE REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM D698 (2012) – Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)), Book of Standards, Vol. 04.08, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, www.astm.org.

ASTM D 1556 (2007) –Standard Test Method for Density and Unit Weight of Soil in Place by the Sand-Cone Method, Book of Standards, Vol. 04.08, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007, www.astm.org

ASTM D 2487 (2011) – Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System), Book of Standards, Vol. 04.08, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011, www.astm.org.

ALBERTA (1998) – Inspection of Small Dams, Publication No. T/434, Dam Safety and Water Projects Branch, Water Management Division, Alberta Environmental Protection, Edmonton, Alberta ISBN 0-7785-0633-9

Curso de Barragens de Terra com visitas ao Nordeste Brasileiro (1983 a 1986) –Departamento Nacional de Obras contra as secas, Ministério do Interior, Brasil.

CDWR (1993) – Guidelines for the design and construction of small embankment dams. California Department of Water Resources, USA.

FAO (2011) – Manual sobre pequenas barragens de terra. Guia para localização, projecto e construção, Publicação nº 64 sobre rega e drenagem, Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura, Roma, Itália.

FCLD (1997) – Petits barrages, recommandations pour la conception, la réalisation et le suivi. Cemagref Éditions et Engref (France) avec le Comité Français des Grands Barrages.

ICOLD (1997) – Dams less than thirty meters high. Cost savings and safety improvements. Bulletin 109. Commission Internationale des Grands Barrages, Paris, France.

MOP (1968) – Regulamento de pequenas barragens de terra, Ministério das Obras Públicas, Portugal.

MIWR-GONU (2009) - Technical Guidelines for the Construction and Management of Improved Small Dams. A Manual for Field Staff and Practitioners. Public Water Corporation.

MDNRC (2004) – Small earthen dam construction. A guidebook for planning and construction of small earthen dams. Water Resources Division. Department of Natural Resources and Conservation. Montana. EUA.

NBCBN (2005) – Establishing planning and design guideline for small dams. River Structures Research Cluster, Nile Basin Capacity Building Network For River Engineering, Nile Basin Capacity Building Network, Nile Basin.

NZSOLD (1997) – Guidelines for Inspecting Small Dams. New Zealand Society on Large Dams, 25 p, Wellington, New Zealand.

Pierre, L. (2003) – Avaliação da segurança de pequenas barragens em operação. XXV Seminário Nacional de Grandes Barragens. Comitê Brasileiro de Barragens. Salvador, Brasil.

Stone, L. (2003) – Earthen dams for small catchments. A compilation of design, analysis, and construction techniques suitable for the developing world. MSc thesis, Michigan Technological University, Master's International Program, Michigan, USA.

USBR (1987) – Design of small dams. US Bureau of Reclamation, USA Government printing office, Denver, Colorado, 3rd edition, 860 p, Denver, Colorado, USA.

UTAH (2003) – Dam Safety Guidelines for Small, Low Hazard Dams. Dam Safety Section, Division of Water Rights. Utah Department of Natural Resources. CDWR (1993) – Guidelines for the design and construction of small embankment dams. California Department of Water Resources, USA.