

Adequação em Enrocamento da Bacia de Dissipação do Extravaso da Barragem Timbopeba: Modelagem Hidráulica 3D e Esgotamento Provisório

Tales Andrade¹, Nelson Castro², Vitor Albernaz³ & Viviane Magalhães⁴ Karine Liboreiro⁵

Resumo:

Este trabalho apresenta a concepção e o dimensionamento da nova bacia de dissipação do extravasor de emergência da Barragem Timbopeba, concebida em enrocamento e com operação condicionada ao nível freático local. O estudo integra a modelagem hidrológica-hidráulica que definiu a Cheia Máxima de Projeto, a modelagem tridimensional em CFD do extravasor e da bacia, o projeto de esgotamento provisório para escavações abaixo do lençol freático e o desenvolvimento da concepção de um sump operacional associado a esse sistema de esgotamento. A modelagem CFD, acoplada ao modelo hidrológico, forneceu campos de velocidade e níveis de água no trecho final do extravasor e no interior da nova bacia, utilizados como base para o dimensionamento do enrocamento e verificação da eficiência de dissipação de energia. O estudo de esgotamento, formulado a partir de equações de fluxo em aquíferos livres e das características hidrogeológicas locais, permitiu definir arranjo de poços de bombeamento, sump intermediário e canal de ligação a um sump principal existente a jusante. A concepção do sump operacional foi desenvolvida de modo integrado a esse arranjo, com ênfase na sua função durante a fase de implantação da bacia. Os resultados indicam que a solução em enrocamento é hidraulicamente eficiente, geotecnicamente estável e mais racional em termos construtivos e ambientais que a alternativa anteriormente prevista em concreto, atendendo à Resolução ANM nº 95/2022.

Abstract:

This work presents the design and sizing of the new stilling basin of the emergency spillway of the Timbopeba Dam, conceived as a buried rock-riprap structure with operation controlled by the local groundwater level. The study integrates hydrological-hydraulic modelling that defined the Design Flood, 3D CFD modelling of the spillway and the basin, the temporary dewatering design to enable excavations below the groundwater table, and the development of the concept of an operational sump associated with this dewatering system. The CFD modelling, coupled to the hydrological model, provided velocity fields and water levels at the downstream end of the spillway and inside the new basin, which were used as the basis for sizing the riprap and verifying the energy dissipation efficiency. The dewatering study, formulated from unconfined aquifer flow equations and local hydrogeological characteristics, allowed the definition of an arrangement of pumping wells, an intermediate sump and a channel connecting to an existing downstream sump. The operational sump concept was developed as an integral part of this arrangement, with emphasis on its role during the construction phase of the basin. The results indicate that the riprap solution is hydraulically efficient, geotechnically stable and more rational in constructive and environmental terms than the previously foreseen concrete alternative, complying with ANM Resolution nº 95/2022.

Palavras-Chave: bacia de dissipação; enrocamento; CFD; nível freático; sump operacional

Keywords: stilling basin; riprap; CFD; groundwater; operational sump

1) Tractebel Engineering, R. Paraíba 1122, 30130-918, Belo Horizonte, Brasil. tales.andrade@tractebel.engie.com

2) Tractebel Engineering, R. Paraíba 1122, 30130-918, Belo Horizonte, Brasil. nelson.castro@tractebel.engie.com

3) Tractebel Engineering, R. Paraíba 1122, 30130-918, Belo Horizonte, Brasil. vitor.albernaz@tractebel.engie.com

4) Tractebel Engineering, R. Paraíba 1122, 30130-918, Belo Horizonte, Brasil. viviane.magalhaes@tractebel.engie.com

5) VALE, Alameda Oscar Niemeyer, 132, 34006-049 Nova Lima, Brasil. karine.liboreiro.karine@vale.com

INTRODUÇÃO

A bacia de dissipação é elemento chave da segurança hidráulica de extravasores, pois reduz a energia do escoamento antes da restituição ao curso d'água e controla a erosão a jusante (USBR, 1987; Gandhi, 2014). Em barragens de mineração, sua relevância é ampliada pela Política Nacional de Segurança de Barragens (Lei 14.066/2020) e pela Resolução ANM nº 95/2022, que estabelecem critérios mais rigorosos de desempenho hidrológico-hidráulico e de segurança operacional.

Diante desse arcabouço regulatório e das exigências de desempenho para eventos extremos (PMP), foi desenvolvido um projeto de adequação do extravasor da Barragem Timbopeba, visando ampliar a capacidade de descarga e assegurar borda livre compatível. Na Barragem Timbopeba, o sistema extravasor é composto por canal de aproximação, vertedor tipo *Creager*, calha lisa, escada em degraus, bacia de dissipação e canal de restituição (Figura 1). Estudos em HEC-HMS e CFD indicaram que, sob Precipitação Máxima Provável (PMP), a vazão defluente atinge 206,49 m³/s, com velocidades superiores a 20 m/s no final da escada, exigindo solução robusta para dissipação de energia e proteção do vale a jusante.



Figura 1 – Vista em planta do sistema extravasor da Barragem Timbopeba.

Em 2024, desenvolveu-se a modelagem hidrodinâmica de todo o extravasor. A partir desse modelo, foi concebida uma bacia de dissipação em concreto armado, com escavações profundas e lajes engastadas, visando atender às solicitações hidráulicas previstas. Apesar do bom desempenho hidráulico, a solução implicou elevada complexidade executiva, custos elevados e grande consumo de concreto e aço. Em função dessas restrições e da disponibilidade local de blocos de rocha, investigou-se uma alternativa em enrocamento, com foco em racionalidade construtiva e adequação ambiental.

A adoção do enrocamento implica operação como estrutura granular, com nível d'água controlado pelo lençol freático. Como o leito da nova bacia (cota 747,5 m) se situa abaixo do nível freático (~751 m), tornou-se necessário um estudo específico de esgotamento provisório para rebaixamento local durante a obra. Nesse contexto, o assoreamento observado na bacia existente motivou um subestudo sedimentológico e a concepção de um sump operacional acoplado ao sistema de esgotamento, com funções de apoio construtivo e de gestão de sedimentos.

Este artigo apresenta a abordagem integrada adotada: modelagem hidrológica e hidráulica, concepção da bacia em enrocamento, estudo de esgotamento provisório e sump operacional, e avaliação conjunta do desempenho hidráulico, geotécnico e ambiental da solução proposta.

MÉTODOS

Síntese dos estudos hidrológicos e da modelagem do extravasor

A Cheia Máxima de Projeto (CMP) foi definida a partir de modelo hidrológico semi-distribuído em HEC-HMS 4.9, desenvolvido para bacia de contribuição de 13,73 km². A caracterização física utilizou levantamento MDT, ortofotos e cartas de solos, a partir dos quais foram definidos usos do solo, grupos hidrológicos, talvegues principais e tempo de concentração. O escoamento superficial foi representado pelo método NRCS-CN, adotando-se condição de Umidade Antecedente II (solo seco) e os tempos de concentração foram estimados pelos métodos cinemático e de GB Williams, em função da declividade e rugosidade de cada sub-bacia.

A curva cota-área-volume do reservatório resultou da integração entre topografia detalhada e batimetria recente. A curva de descarga do extravasor foi inicialmente calculada por fórmulas teóricas e ajustada em seguida com base nos resultados do modelo CFD. Com essa curva, realizou-se o trânsito de cheias para a PMP, definindo-se a combinação de vazão defluente e nível máximo do reservatório empregada como condição de contorno nos modelos hidráulicos.

Modelagem CFD da bacia de dissipação em enrocamento

A geometria da nova bacia foi desenvolvida em CAD (Civil 3D) a partir dos estudos de viabilidade e critérios mínimos de atendimento técnico e de segurança. O arranjo consiste em escavação da região central até a cota 743,5 m, leito na cota 747,5 m, taludes internos com inclinação 1V:1,5H e crista na cota 755,0 m, em continuidade ao canal de restituição. O leito e os taludes são protegidos por enrocamento dimensionado em função das velocidades simuladas, apoiado sobre camadas granulares de transição. Uma rampa com declividade de 12% conecta a bacia ao canal de restituição, permitindo acesso para inspeção e manutenção.

A modelagem tridimensional do extravasor foi realizada no FLOW-3D, com solução das equações de Navier-Stokes em malha estruturada, modelo de turbulência RNG-k-ε e esquema *Volume of Fluid* (VOF). Inicialmente, foi construído um modelo CFD do extravasor, discretizado em três domínios: (i) canal de aproximação, soleira e canal rápido; (ii) descida em degraus; e (iii) trecho final da escada, bacia de dissipação e canal de restituição. As condições de contorno desse modelo incluíram vazão prescrita na entrada e condição de pressão hidrostática na saída, com ativação dos módulos de entranhamento de ar e escoamento com densidade variável.

Em seguida, para o projeto da nova bacia em enrocamento, adotou-se um modelo CFD local dedicado exclusivamente a esse componente. Nesse modelo, as condições hidráulicas obtidas ao final do domínio 3 do modelo do extravasor foram utilizadas como condições de entrada,

garantindo consistência entre o escoamento gerado no extravasor e a avaliação do desempenho hidráulico da bacia em enrocamento. Apresenta-se na Figura 2 um esquema da Bacia de Dissipação.

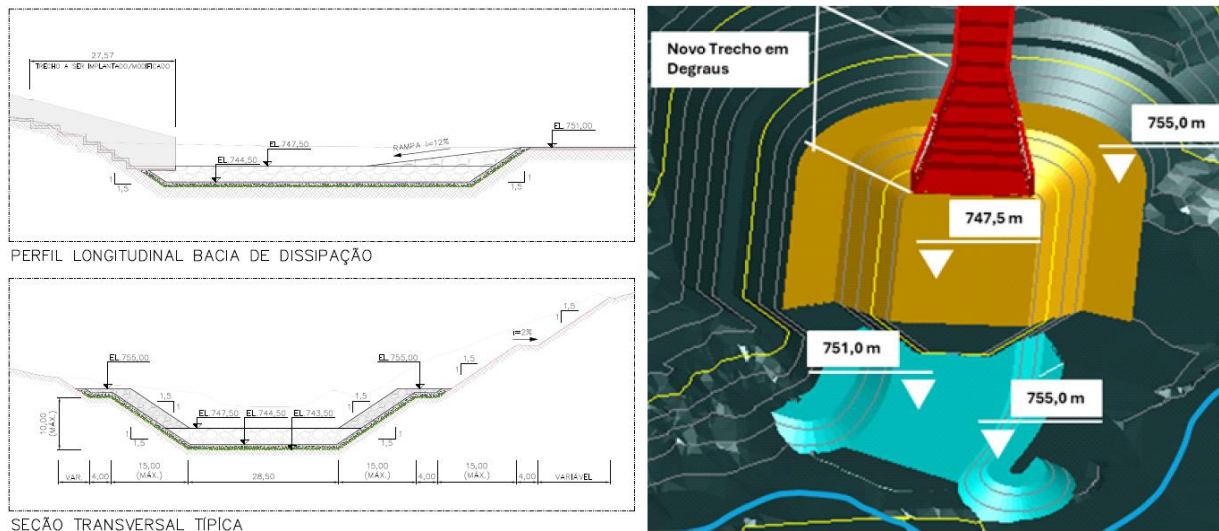


Figura 2 – Esquema em corte transversal e longitudinal da nova bacia de dissipação em enrocamento, indicando cotas de fundo (743,5 m), leito (747,5 m), crista (755,0 m), taludes 1V:1,5H, o trecho em degraus e conexão com o canal de restituição.

O modelo CFD da bacia foi configurado com três subdomínios: entrada (trecho final do extravasor), extravasor/bacia e restituição. A malha estruturada utilizou resolução uniforme de 0,25 m nos principais domínios, totalizando cerca de 58 milhões de células na região extravasor/bacia. Foram adotadas condições de contorno de vazão ($Q = 206,49 \text{ m}^3/\text{s}$) na entrada, pressão na seção de saída do canal e simetria nas interfaces internas.

A rugosidade aparente do concreto e do enrocamento foi representada por alturas equivalentes de Nikuradse, com $k_s = 0,001 \text{ m}$ para trechos em concreto e k_s da ordem de 0,10 m para o enrocamento, com ajustes baseados em Henderson (1966) e nos estudos anteriores do extravasor. No interior da bacia, adotou-se k_s proporcional a $1,5 \cdot d_{50}$, onde d_{50} é o diâmetro médio dos blocos de enrocamento obtido nas iterações de dimensionamento. A simulação foi conduzida até alcançar uma estabilidade da vazão para a condição de CMP.

Dimensionamento do enrocamento

O dimensionamento da proteção em enrocamento baseou-se no critério de Izbash, adequado a ambientes com altas velocidades e blocos de rocha de grandes dimensões. O critério relaciona a velocidade junto ao leito (v_c), a diferença de densidade relativa entre rocha e água ($\Delta = (\rho_s - \rho_w)/\rho_w$) e o diâmetro característico do bloco (d):

$$\frac{v_c}{\sqrt{\Delta g d}} = 1,7 \quad (1)$$

Admitindo-se: $\rho_s = 2.600 \text{ kg/m}^3$, $\rho_w = 1.000 \text{ kg/m}^3$ e $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

A velocidade junto ao leito foi levantada a partir dos resultados do modelo CFD da bacia, considerando células próximas à interface água-enrocamento. Para o leito e para os taludes internos foram construídos histogramas de velocidades por regiões representativas. Em vez de utilizar os valores máximos pontuais, adotou-se como velocidade de projeto o valor correspondente ao percentil de 99% da distribuição em cada região, garantindo nível de segurança adequado sem

superdimensionar a solução. Os diâmetros resultantes foram agrupados em faixas granulométricas compatíveis com a disponibilidade de blocos na região da mina e verificados frente a referências específicas para bacias de dissipação em enrocamento como Cruz (2004) e Pinheiro (2011).

As velocidades junto ao leito foram obtidas do CFD a partir das células adjacentes à interface água–enrocamento. Para o leito e os taludes internos, as velocidades foram amostradas em regiões representativas e sintetizadas por histogramas, de modo a caracterizar a distribuição espacial do escoamento. Como critério de projeto, adotou-se o percentil 99% (P99) de cada distribuição, evitando a influência de máximos pontuais localizados e assegurando conservadorismo sem superdimensionamento. Os diâmetros resultantes foram então agrupados em faixas granulométricas compatíveis com a disponibilidade local e verificados com base em Cruz (2004) e Pinheiro (2011).

Estudo de esgotamento do lençol freático

O estudo de controle do nível freático teve por objetivo viabilizar as escavações necessárias à implantação da bacia, cuja cota de fundo (743,5 m) se situa alguns metros abaixo do nível freático observado na área (~751 m). Foram utilizados como insumos principais: a área de escavação abaixo do NA, o desnível a ser rebaixado, informações de sondagens e investigações geológico geotécnicas existentes e resultados de ensaios de infiltração realizados no entorno. A partir dessas informações definiu-se um modelo conceitual de aquífero livre, com espessura saturada representativa e coeficiente de permeabilidade em faixa conservadora compatível com solos residuais e depósitos identificados (da ordem de 10^{-5} a 5×10^{-5} m/s).

A vazão de rebaixamento foi estimada com base em formulações clássicas de fluxo em aquíferos não confinados, análogas à equação de Darcy modificada para poços em aquífero livre, considerando uma faixa de raios de influência compatível com a escala da cava. Foram analisados diferentes cenários de k dentro da faixa obtida em campo, resultando em vazões totais que variaram entre cerca de 10 m³/h e 35 m³/h. Para fins de projeto adotou-se o cenário mais crítico (35 m³/h), de modo a garantir margem de segurança diante das incertezas hidrogeológicas. A partir dessa vazão foram definidas as linhas gerais do arranjo de bombeamento.

Caracterização sedimentológica e sump operacional

A avaliação sedimentológica foi integrada ao estudo de esgotamento, visando conceber um sump operacional capaz de apoiar a fase de obra e reduzir a carga de sedimentos a jusante. O sistema de drenagem provisório encaminha a água drenada da cava, por recalque, a um reservatório existente da mina, localizado a jusante, próximo ao acesso para a região da bacia e do rio Gualaxo do Norte. Inspeções de campo indicaram que esse reservatório se encontra praticamente assoreado, de modo que a solução prevê seu desassoreamento prévio para restabelecer profundidade da ordem de 1,2 m a 1,5 m, garantindo volume adequado para a vazão de bombeamento e a acomodação de sedimentos.

Além de amortecer vazões, o sump foi concebido como bacia de sedimentação primária, considerando o arraste de finos gerados nas escavações e movimentações de solo, em consonância com as Resoluções CONAMA nº 357/2005 e 430/2011. A granulometria típica dos solos da área e os padrões de geração de sólidos finos foram utilizados como insumo para a avaliação do sump, que empregou a metodologia de fluxo quiescente de Haan et al. (1994) e a equação de Soulsby (1997) para estimar, a eficiência de retenção das principais frações granulométricas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Resposta hidráulica da bacia em enrocamento

As simulações CFD para a CMP, com vazão de 206,49 m³/s e nível máximo do reservatório em 817,03 m, mostraram que o escoamento chega ao trecho final da escada em regime supercrítico, com velocidades superiores a 20 m/s. Na nova bacia em enrocamento observa-se formação de ressalto hidráulico afogado logo após o último patamar, com redução rápida das velocidades e aumento das profundidades no interior da estrutura.

No trecho em concreto imediatamente a jusante da escada, as velocidades médias permanecem elevadas (próximas a 9 m/s), mas são amortecidas pelo colchão d'água, resultando em velocidades representativas no leito da bacia de cerca de 4,50 m/s (percentil de 99% da distribuição). Nos taludes internos, as recirculações e a menor profundidade conduzem a velocidades representativas da ordem de 2,33 m/s, com valores médios ainda mais baixos. Os níveis d'água simulados indicam cota em torno de 754,0 m na bacia, para crista em 755,0 m, assegurando borda livre de aproximadamente 1,0 m na condição de CMP.

No canal de restituição, a transição da bacia para a seção trapezoidal provoca redistribuição adicional de energia, resultando em velocidades médias em torno de 5 m/s e lâmina com cota próxima de 753,0 m, garantindo borda livre superior a 2,0 m.

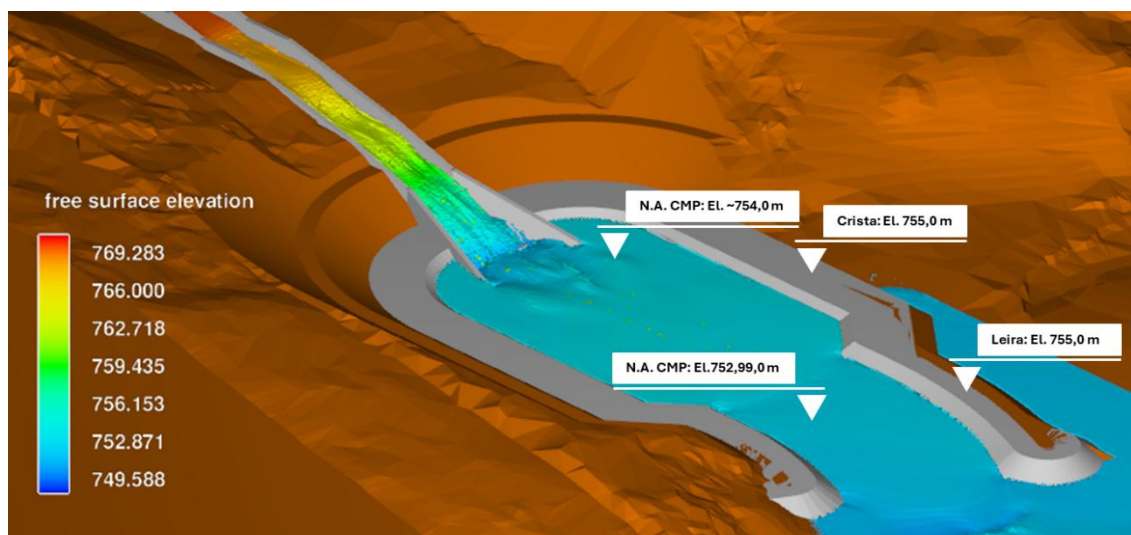


Figura 3 – Elevação do nível d'água ao longo do extravasor e da bacia de dissipação para PMP

Estabilidade do enrocamento e dimensionamento dos blocos

Com base nas velocidades representativas obtidas no CFD e no critério de Izbash, o enrocamento resultou em diâmetro médio $d_{50} \approx 0,50$ m para o leito e $d_{50} \approx 0,15$ m para os taludes internos. Esses valores se enquadram na faixa usual para bacias em enrocamento submetidas a vazões da ordem de 200 m³/s e velocidades de 4–5 m/s após a dissipação principal, reforçando a adequação da solução. Verificações adicionais na literatura confirmaram a compatibilidade desses diâmetros com as condições hidráulicas da bacia e com a disponibilidade de blocos em jazidas regionais.

No canal de restituição, a combinação entre a geometria existente e as velocidades simuladas levou à adoção de revestimento em pedra argamassada em vez de enrocamento solto, solução mais coerente devido a seção estreita e a execução em campo. O conjunto bacia em enrocamento + canal revestido em pedra argamassada apresentou regime estável de escoamento, sem concentrações relevantes de tensão nas interfaces. Sob a ótica ambiental, o uso predominante de enrocamento e pedra natural reduz a pegada de carbono e a geração de resíduos associados à produção e ao transporte de grandes volumes de concreto.

O sistema de esgotamento provisório se mostrou capaz de manter o nível freático abaixo da cota de escavação, ao mesmo tempo em que estrutura um arranjo de sumps com função de decantação, contribuindo para a retenção de finos e para a mitigação de impactos a jusante.

Sob a ótica de segurança de barragens e sustentabilidade, a alternativa em enrocamento apresenta vantagens em relação à solução maciça em concreto como menor consumo de concreto e aço, maior uso de materiais naturais locais, menor impacto ambiental e maior facilidade para intervenções pontuais de manutenção, ainda que demande inspeções periódicas, manutenção de rotina e ações de desassoreamento. Conclui-se que a solução proposta atende de forma equilibrada aos critérios hidráulicos, geotécnicos, operacionais e ambientais, contribuindo para a segurança do sistema extravasor da Barragem Timbopeba e para a conformidade com as exigências regulatórias vigentes.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Vale S.A. pela disponibilização dos dados, pelo apoio às atividades de campo e ao Adoniran Coelho pela oportunidade de desenvolvimento deste estudo no contexto do Projeto de Adequação do Sistema Extravasor da Barragem Timbopeba. Agradecem também às equipes técnicas da *Tractebel Engineering* envolvidas nos estudos hidrológicos, hidrodinâmicos, geotécnicos e de esgotamento, cuja integração foi fundamental para a concepção e o detalhamento da solução em enrocamento aqui apresentada.

REFERÊNCIAS

- ABNT. NBR 11.682: Estudo e controle da estabilidade de encostas. Rio de Janeiro, 2009.
- ABNT. NBR 13.028: Mineração – Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimento e reservação de água. Rio de Janeiro, 2017 e 2024.
- CANADIAN DAM ASSOCIATION (CDA). Dam Safety Guidelines. Ottawa, 2013.
- CHANSON, H. Air B. Entrainment in Free-Surface Turbulent Shear Flows. Academic Press, 1996.
- FLOW SCIENCE. FLOW-3D User's Manual. 2021.
- GANDHI, S. Characteristics of hydraulic jump. International Journal of Physical and Mathematical Sciences, 8(4), 692–697, 2014.
- HENDERSON, F. M. Open Channel Flow. Macmillan, 1966.
- IZBASH, S. V. Construction of dams by depositing rock in running water. Proceedings of the International Congress on Large Dams. Washington D.C., 1936.
- PINHEIRO, A. Diretrizes para Elaboração de Estudos Hidrológicos e Dimensionamentos Hidráulicos em Obras de Mineração. Belo Horizonte: Potamos, 2011.
- SALIBA, A. M. et al. Avaliação de recarga de aquíferos em balanços hídricos simplificados. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 15(1), 71–82, 2010.
- SIUTA, T. The impact of deepening the stilling basin on the characteristics of hydraulic jump. Technical Transactions, 115(3), 173–186, 2018.
- TOMASCHITZ, J. O. P. Estudo da estabilidade de enrocamentos em bacias de dissipação. Dissertação (Mestrado), UFPR, Curitiba, 2018.

TORKAMANZAD, Nafiseh et al. Hydraulic jump below abrupt asymmetric expanding stilling basin on rough bed. *Water*, v. 11, n. 9, p. 1756, 2019.

U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Reclamation - USBR. (1987). *Design of Small Dams*. Washington, DC: U.S. Government Printing Office.