

Estudo de Erosão Interna em Barragem de Terra

Dayana Santos Silva

Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, eng.civil.dayana@gmail.com

Saulo Gutemberg Silva Ribeiro

GeoFast Treinamento e Consultoria Empresarial Ltda., Ouro Preto, Brasil, saulogft@hotmail.com

Riad Chammas

Chammas Engenharia Ltda, Belo Horizonte, Brasil, riad@chammasengenharia.com.br

Tadeu Henrique Oliveira de Castro

Chammas Engenharia Ltda, Belo Horizonte, Brasil, tadeuhenrique@live.com

RESUMO: Vários fatores podem colocar uma barragem em risco. A perda progressiva da estabilidade provocada por algum tipo de anomalia pode levar esta estrutura ao colapso. No projeto, construção e operação de uma barragem, o requisito fundamental deve ser a segurança, considerando que os acidentes envolvendo esse tipo de estrutura podem ter consequências catastróficas e imensuráveis. O processo de erosão interna é uma das principais causas de ruptura em barragens em todo o mundo. Um dos dispositivos mais eficientes para evitar e/ou conter esse tipo de processo é o sistema interno de drenagem. Para se avaliar a susceptibilidade ou vulnerabilidade do solo sofrer erosão é sugerido que de antemão se estude os processos de erodibilidade e instabilidade interna do solo, que se dão por meio de critérios definidos na literatura e mais ainda, por ensaios laboratoriais. Vários pesquisadores estudaram o comportamento do solo, quando submetido a altos valores de gradientes hidráulicos, a partir destes estudos, foi possível estabelecer uma gama de critérios relacionados, principalmente, às curvas de distribuição granulométrica dos materiais. Dentro desse contexto e com o objetivo de elucidar a aplicação dos critérios de dimensionamento de filtro e avaliar a sua eficiência frente aos processos erosivos, realizou-se ensaio de laboratório em amostra de filtro e solo base. Por meio do ensaio, foi possível avaliar a eficiência do filtro quando submetido, junto ao solo base, a altos valores de gradientes hidráulicos. A partir de análise qualitativa dos resultados do ensaio, pode-se concluir que é possível ter uma segurança maior quanto ao dimensionamento do filtro ao se aplicar os critérios da literatura e realizar ensaios de laboratório. Muitos profissionais de engenharia geotécnica acreditam que gradientes hidráulicos com valores pouco acima da unidade, são deterministas no desencadear de várias anomalias. Esse entendimento só é verdadeiro se o sistema de drenagem for mal dimensionado e construído.

PALAVRAS-CHAVE: Barragem, erosão, piping, filtro, gradiente hidráulico.

1 INTRODUÇÃO

As barragens de terra são o tipo de barragens mais usuais em todo o mundo, representando cerca de 63,0 % do total mundial (Souza, 2013). Massad (2010) comenta que no Brasil, as barragens de terra são mais utilizadas devido às

condições topográficas, com vales muito abertos, e à disponibilidade de material terroso.

Em relação às outras barragens, uma barragem de aterro implica, desde logo, uma preocupação acrescida com os estudos de percolação, uma vez que a passagem de água através do corpo da barragem é uma realidade.

Estes estudos, bem como os de estabilidade, devem ser acompanhados por um eficaz sistema de monitorização em fase de construção e em serviço, para averiguar a funcionalidade e segurança de todo o sistema (Souza, 2013).

Até 1986, no que se referem às grandes barragens, as estatísticas dos tipos de ruptura são as apresentadas na Figura 1. Foster et al. (2000) destaca que cerca de metade de todas as rupturas são relacionadas com o piping e, aproximadamente 42% delas ocorrem durante o primeiro enchimento. Cerca de 66% (englobando todos os tipos de rupturas) das rupturas ocorrem durante os primeiros 5 anos de operação das barragens (Souza, 2013).

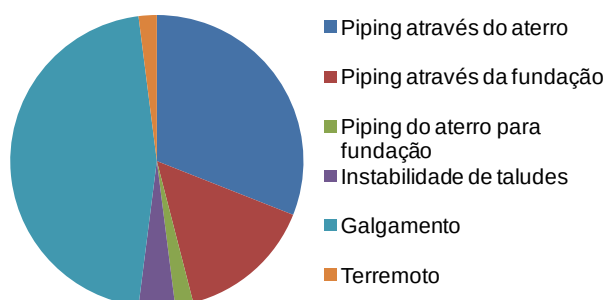


Figura 1. Tipos de rupturas em grandes barragens de aterro (Souza, 2013 apud Foster et al., 2000).

Segundo Cruz (2004), dentre os requisitos básicos de uma barragem, o de estanqueidade é fundamental. A conjugação do sistema de vedação e drenagem constitui a principal defesa das estruturas de terra a processos de erosão interna (piping). Nenhuma barragem pode ser considerada com comportamento satisfatório sem que seja suficientemente vedante. A vedação da barragem e de sua fundação deve, portanto, ser a primeira preocupação na elaboração do projeto. Este autor ressalta também que os sistemas de drenagem constituem a principal defesa contra fluxos concentrados e preferenciais.

2 EROSÃO INTERNA

A erosão interna é caracterizada essencialmente pelo movimento de partículas através do solo, como consequência da desestabilização do equilíbrio de forças na matriz do solo. Destacando que o gradiente hidráulico tem uma relação direta com a

intensidade dessa força de atrito. A erosão interna pode ocorrer por dois processos mais comuns: sufusão e piping.

2.1 Sufusão

O processo de sufusão é caracterizado pela migração das partículas finas, transportadas pelo fluxo de infiltração, através da matriz estrutural do solo composta pela fração grossa. Neste caso, ocorre a formação de vazios, pela migração das partículas finas, não interligados.

A velocidade de fluxo, através da matriz do solo, deve impor uma tensão suficientemente elevada para superar as tensões efetivas do solo e mover as partículas finas através dos vazios.

2.2 Piping

O termo piping foi definido por Terzaghi (1939) como um processo de erosão que se inicia num ponto de saída de vazamento (a jusante) e que continua por erosão retrógrada até que um canal interno se forme através da barragem. Kovacs (1981) definiu o piping, ou “efeito de fervura”, quando um movimento significativo de partículas, ao longo da linha de fluxo, cria um canal de alta permeabilidade dentro da camada e as partículas sólidas parecem “fervor” na saída deste canal (Barrera, 2010).

2.2 Instabilidade interna dos solos

Normalmente, um solo é constituído de partículas de diferentes tamanhos. As características do tamanho e distribuição das partículas estão intimamente ligadas ao processo de avaliação da susceptibilidade à instabilidade interna do material.

Barrera (2010) cita que basicamente, existem dois tipos de critérios básicos: os geométricos e hidráulicos. O critério geométrico caracteriza a potencialidade da erosão interna por meio da análise das curvas granulométricas. O critério hidráulico preconiza que se um solo é classificado como potencialmente instável, ele não é por si só instável, mas precisa de uma força “externa”, decorrente do fluxo de água, e gradientes hidráulicos suficientemente altos para ocasionar a sufusão ou *piping*.

2.2.1 Critério de Kenney e Lau

Este critério avalia a instabilidade interna de solos granulares. Kenney e Lau (1985) propuseram transformar a curva de distribuição granulométrica comum em um diagrama de F-H, denominado curva de forma, onde F é a percentagem de massa de grãos com diâmetros inferiores a um determinado diâmetro D e H é a percentagem de massa de grãos com diâmetros entre D e 4D. A partir daí, estabeleceram que solos mal graduados com o valor mínimo de $H/F \geq 1,0$, para $F \leq 30\%$, e solos bem graduados com o valor mínimo de $H/F \geq 1,0$, para $F \leq 20\%$, são assumidos como internamente estáveis (Ahlinhan et al., 2012).

As Figuras 2 e 3 apresentam graficamente os métodos para obtenção da curva de forma (Kenney e Lau, 1985) e para avaliação da estabilidade interna de solos – Kenney e Lau (1985, 1986), respectivamente.

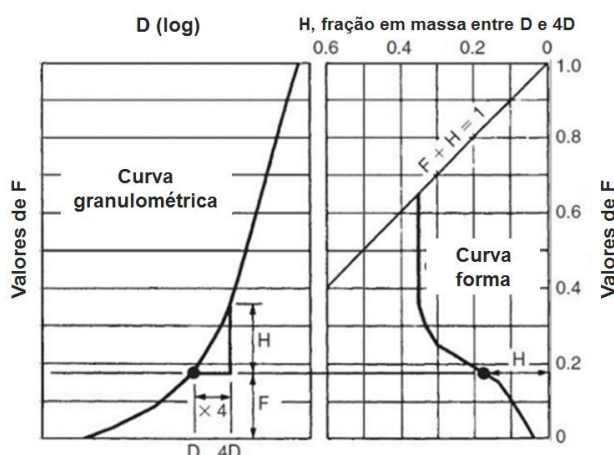


Figura 2. Representação gráfica da curva de forma (Filho, 2013, adaptado de Kenney e Lau, 1985).

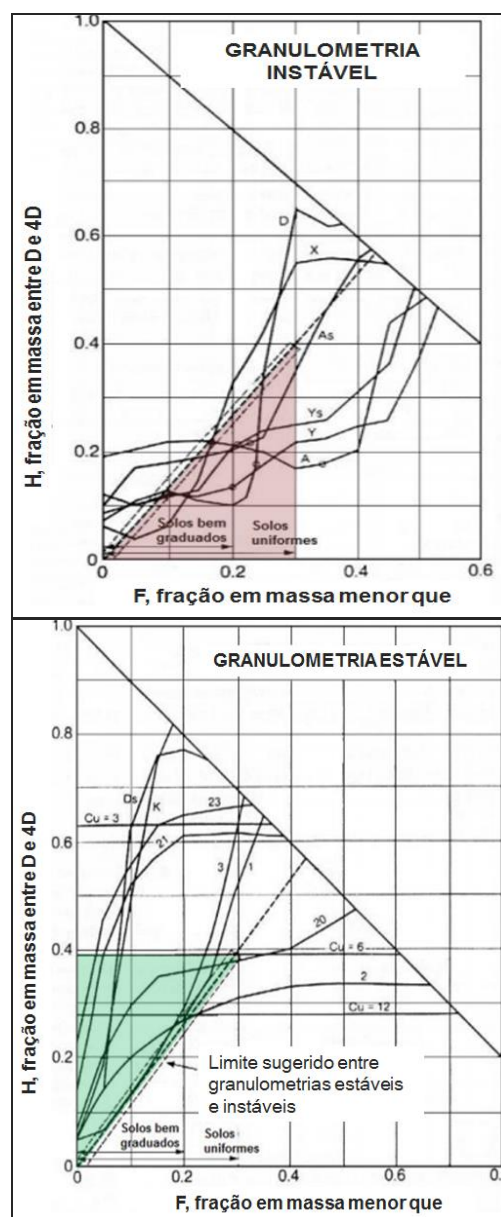


Figura 3. Representação gráfica do critério (adaptado Filho, 2013, adaptado de Kenney e Lau, 1985 e 1986).

2.2.2 Critério de De Mello (1975) / Sherard (1979)

Este critério foi proposto inicialmente por De Mello (1975) e posteriormente adaptado por Sherard (1979), para solos com graduação aberta.

Segundo De Mello (1975), para que um material seja estável internamente, o diâmetro D_{15g} de sua fração mais grossa deve ser, no máximo, quatro a cinco vezes maior que o d_{85f} da fração fina do mesmo solo.

Para tal verificação, faz-se necessária a divisão da curva granulométrica do material em

3 CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO DE FILTROS

3.1 Método de Sherard e Dunnigan (1985)

Grupo	% de finos passantes #200	Critérios	Observações
1 ⁽²⁾	≥ 85%	$D_{15F} \leq 9D_{85B}^{(3)}$	$D_{15F} \geq 0,2\text{mm}$
2 ⁽²⁾	40 a 85%	$D_{15F} \leq 0,7\text{mm}^{(3)}$	
3	< 15%	$D_{15F} \leq 4D_{85B}^{(4)}$	
4	15 a 40%	Interpolação linear entre Grupo 2 e 3 ⁽⁴⁾	

O USBR, assim como outros departamentos nos Estados Unidos, desenvolveu os seus próprios critérios de projeto para filtros de barragens sob sua jurisdição. O método proposto pelo USBR apresenta adicionalmente ênfase em solos dispersivos, que são solos susceptíveis à segregação de suas partículas e posterior erosão por meio de fissuras sob a infiltração de água. As etapas deste método estão sintetizadas na Figura 5 (Acosta et al., 2014 apud USBR, 2011).

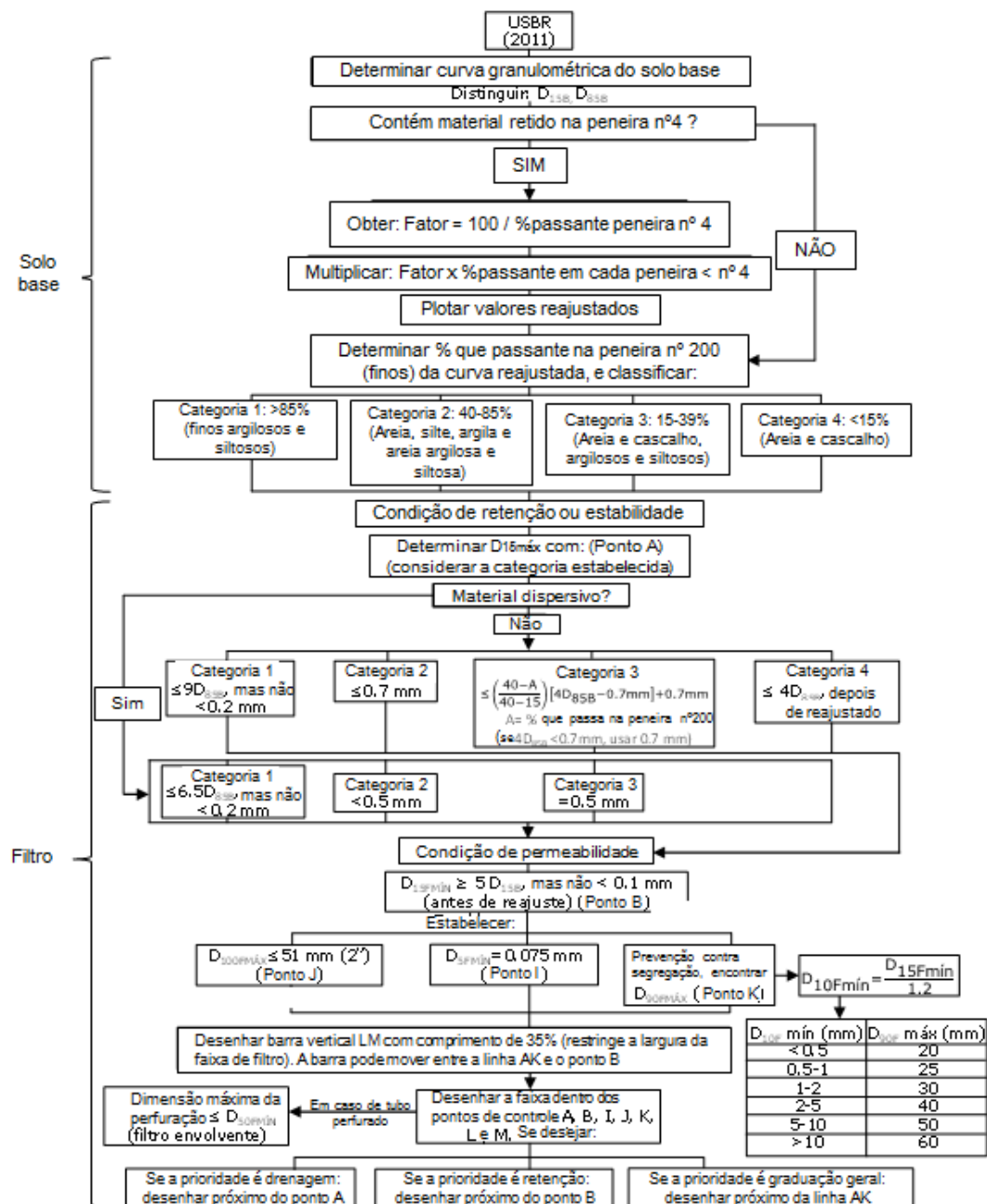


Figura 5. Esquema critério do USBR, 2011
(adaptado de Acosta et al., 2014).

4 ESTUDO LABORATORIAL

Dentro do contexto apresentado e com o objetivo de elucidar a aplicação dos critérios de dimensionamento de filtro e avaliar a sua eficiência frente aos processos erosivos, realizou-se ensaio de laboratório em amostra de filtro e solo base.

A amostra de solo base utilizada é advinda de aterro compactado de uma barragem. A partir da curva granulométrica deste material e dos critérios de dimensionamento de Sherard e Dunning (1985) e USBR (2011), foi possível traçar uma curva de distribuição granulométrica para o filtro, como ilustrado na Figura 6.

Em laboratório, procedeu-se o peneiramento de solo grosso, posterior lavagem, secagem e pesagem para a composição da amostra do filtro.

O procedimento de ensaio consistiu basicamente na aplicação de fluxo unidirecional vertical em amostra de solo base e filtro, compactados em equipamento do ensaio de adensamento edométrico do tipo HCT (*hydraulic consolidation test*), Figura 7. A configuração do ensaio teve como referência alguns ensaios descritos na literatura e a ABNT NBR 14114.

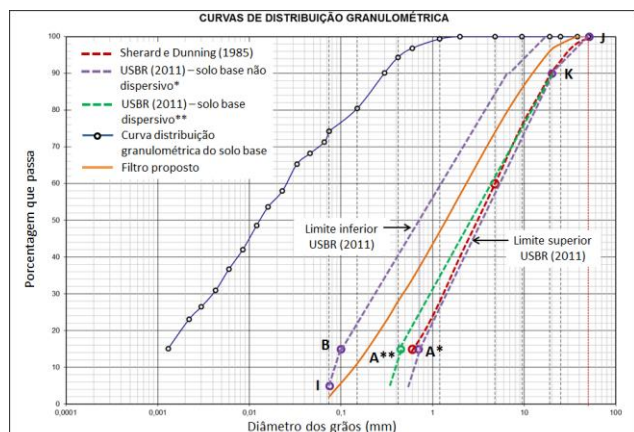


Figura 6. Critérios de dimensionamento de filtro.

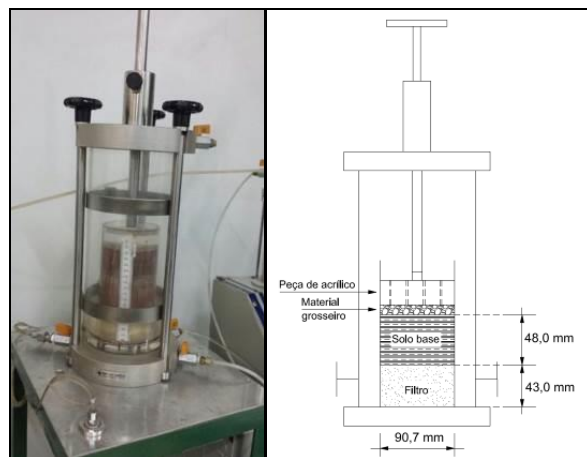


Figura 7. Corpo de prova em equipamento de HCT.

Foram utilizados bomba de fluxo, central de pressão e volume e transdutor diferencial de pressão positiva, a fim de submeter a amostra à um gradiente constante, cuja pressão aplicada no topo e na base da amostra foram previamente definidas.

4 RESULTADOS E CONCLUSÃO

O corpo de prova levou 30 dias para saturar totalmente e assim possibilitar o início do ensaio.

Foram realizados 10 ciclos em uma única amostra. A pressão no topo da amostra foi mantida constante durante todo o ensaio, e a pressão de base variando apenas de um ciclo para outro, sendo mantida constante por ciclo. Com a diferença de pressão resultante, medida pelo transdutor, foi possível obter o gradiente hidráulico por ciclo, como mostrado na Tabela 2.

Tabela 2. Valores de pressão e gradiente hidráulico.

Pressão de topo (kPa)	Pressão de base (kPa)	Gradiente hidráulico
100	98	4,75
	97	7,12
	96	9,50
	95	11,87
	90	23,74
	85	35,61
	80	47,48
	75	59,35
	70	71,21
	60	94,95

A partir dos critérios geométricos apresentados nos itens 2.2.1 e 2.2.2 é possível

avaliar se há susceptibilidade à instabilidade interna dos solos.

Segundo o critério de De Melo (1975) / Sherard (1979), os materiais do solo base e filtro apresentam-se internamente estáveis. O critério Kenney e Lau (1985), aplicado ao filtro como ilustrado na Figura 8, classifica novamente o material do filtro como internamente estável.

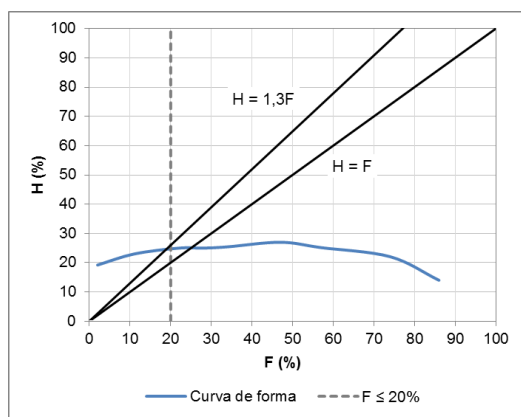


Figura 8. Curva de forma do material do filtro.

Com os dados geométricos, diferença de pressão e gradiente hidráulico, foi possível obter a permeabilidade e velocidade de percolação para cada estágio do ensaio, ou seja, os 10 ciclos, como apresentado na Figura 9.

Como esperado pela Lei de Darcy, a vazão observada no ensaio é diretamente proporcional ao gradiente hidráulico.

Observa-se que a condutividade hidráulica manteve-se basicamente constante para os 10 ciclos. Mesmo submetido a altos valores de gradiente hidráulico, o filtro conseguiu conter com sucesso as partículas finas do solo base na interface entre os materiais.

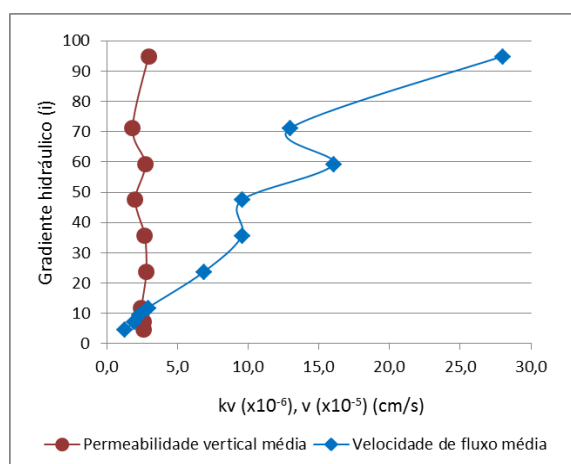


Figura 9. Evolução da vazão e coeficiente de permeabilidade com o gradiente hidráulico ensaiado.

A Figura 10 mostra a amostra ensaiada ao final do último estágio. É possível observar que alguma porção do material fino foi carreado para o filtro, porém essa porção foi contida logo na interface entre os dois materiais (solo base e filtro).

Esses resultados evidenciam e confirmam a importância de se projetar filtros capazes de controlar com excelência o fluxo através da interface com o solo base, mesmo com valores elevados de gradiente hidráulico.



Figura 10. Amostra ao final do último estágio.

Os filtros são fundamentais para o controle da erosão interna em barragens. Por isso, devem ser criteriosamente projetados e construídos.

Os materiais empregados como filtro e dreno de uma barragem devem ser intensamente estudados, para que desempenhem com excelência suas funções de filtragem, drenagem e proteção. Para isso, é recomendado que os estudos baseiem-se não somente nas referências literárias, mas principalmente na realização de ensaios de laboratório.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à agência financiadora deste projeto CAPES (bolsa de mestrado). Agradeço à Chammas Engenharia por ter cedido o laboratório de solos para a realização dos ensaios. Por fim, ao Prof. Saulo Gutemberg, pelos conhecimentos transmitidos.

REFERÊNCIAS

- Souza, D. J. S. C. Aterros Estruturais de Barragens. Uma Contribuição para o seu Dimensionamento Hidráulico. Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia, Porto, Portugal, 2013.
- Massad, F. Obras de Terra - Curso Básico de Geotecnia. 2 ed.,

- São Paulo, Oficinas de Textos, 2010.
- Foster, Mark, Fell, Robin, and Spannagle, Matt. A method for assessing the relative likelihood of failure of embankment dams by piping. *Can.Geotech*, 37, 1025-1061, 2000.
- Cruz, P. T. 100 Barragens Brasileiras – Casos históricos, materiais de construção, projeto. 2 ed., São Paulo, Oficinas de Texto, 2004.
- Kovacs, G. (1981) “Seepage hydraulics”. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 730p.
- Barrera, M. E. O. Correlaciones geométricas en suelos internamente inestables. Memoria para optar al título de ingeniero civil, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil, 2010.
- Fell, R., Macgregor, P., Stapledon, D., Bell, G., Foster, M. (2015). *Geotechnical Engineering of Dams*. 2nd Edition, 2015.
- Ahlinhan, M.F.; ACHMUS, M.; HOOG, S.; WOUYA, E. K. Stability of non-cohesive Soils with respect to Internal Erosion. ICSE6 Paris - August 27-31, 2012.
- Kenney, T.C. and Lau, D. (1985) “Internal stability of granular filters. *Canadian Geotechnical Journal*”, 22: 215-225.
- Filho, M. A. P. Análise da erosão interna de solos em barragens com base na distribuição de vazios. Dissertação de Mestrado em Geotecnia e Transportes, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Minas Gerais, MG, 2013.
- De Mello, F.B. “Some lessons learned from unsuspected, real and fictitious problems in earth dam engineering in Brazil”. 6th Regional Conference for Africa on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Durban, S. Africa, 285-304, 1975.
- Sherard, J.L. “Sinkholes in Dams of Coarse, Broadly Graded Soils”. In *Proceedings of the 13th ICOLD*, New Dehli, India. Vol.2, pp.25-34, 1979.
- ICOLD. Embankment dams gunular filters and duins, Review and recommendations. Commission Internationale des Grands Barrages - 151, bd Haussmann, 75008 Paris, 1994.
- Sherard, J. L. and DUNNIGAN, L. P. Filters and leakage control, in embakment dams in Seepage and Leakage from Dams and Impoundments. ASCE Geotechnical Engineering Division Conference, 1985.
- U.S. Deparment of the Interior, Bureau of Reclamation (USBR). Design Standards No. 13 – Embankment Dams, Chapter 5 – Protective Filters, November, 2011.
- Acosta, L. GUILLÉN, J. B. AUVINET, G. Criterios clásicos y actuales para el diseño de filtros en presas de materiales graduados. Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica, XXVII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, 19 a 21 de noviembre, Puerto Vallarta, 2014.
- ABNT NBR 14114 / 1998. Solo - Solos argilosos dispersivos - Identificação e classificação por meio do ensaio do furo de agulha (pinhole test).