

## ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA UMIDADE DE COMPACTAÇÃO E DO GRAU DE COMPACTAÇÃO NA PERMEABILIDADE DE UM SOLO DO MUNICÍPIO DE ALEGRETE-RS

### **Fabiano Garcia Oliveira**

Acadêmico do curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pampa – Campus Alegrete  
fabianogarciaoliveira93@gmail.com

### **Lauro Luiz Fontoura Filho**

Acadêmico do curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pampa – Campus Alegrete  
laurofontoura997@gmail.com

### **Paola Vogelei Ramos**

Acadêmica do curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pampa – Campus Alegrete  
p.v.ramos@live.com

### **Diego Arthur Hartmann**

Professor do curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pampa – Campus Alegrete  
diego.hartmann@gmail.com

### **Jaelson Budny**

Professor do curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pampa – Campus Alegrete  
jaelsonbudny@gmail.com

**Resumo.** *A segurança de barragens de terra tem se mostrado assunto de elevado interesse no cenário atual, devido aos graves acidentes ocorridos. Com base nessa preocupação, buscou-se estudar fatores que influenciem na permeabilidade de um solo em corpos de provas compactados. A metodologia adotada baseou-se na utilização de permeômetro de parede rígida e ensaios de carga variável. Foram realizados ensaios de permeabilidade em 16 amostras com diferentes teores de umidade e grau de compactação. Os resultados indicam que para solos compactados pode ser possível estender o comportamento da curva de permeabilidade por teor de umidade de solos coesivos para solos de granulometria não tão fina.*

**Palavras-chave:** *Permeabilidade. Compactação. Barragens de terra.*

## 1. INTRODUÇÃO

Segundo Caputo (1988), a permeabilidade é a característica dos solos de possibilitar a passagem de água por meio dos seus vazios, em que o grau de permeabilidade é expresso pelo coeficiente (k), que é apresentado comumente em cm/s.

Pinto (2006) relacionou alguns dos principais fatores que influenciam na permeabilidade dos solos como a temperatura, pois a mesma altera a viscosidade do fluido, o índice de vazios, que está diretamente relacionado ao grau de compactação do solo, que é o objeto deste estudo, a anisotropia do solo, pois além do índice de vazios a disposição dos mesmos é de grande influência, o grau de saturação, devido às bolhas de ar geradas pela tensão superficial da água que não satura o solo completamente. Das(2007) ainda cita a distribuição dos tamanhos de

poros e a rugosidade das partículas minerais como fatores influenciadores.

O estudo da permeabilidade dos solos é importante para diversos tipos de problemas da engenharia como, recalque de fundações, aterros, cálculo de vazões, e uma das principais aplicações é na análise de estabilidade à percolação da água em barragens de terra. FAO (2011) descreve que a percolação em barragens é sempre um potencial problema, que deve ser previsto no seu dimensionamento.

Na antiguidade, a necessidade de armazenamento de água em grandes volumes fez com que os povos desenvolvessem alternativas para este fim. O barramento de cursos d'água para a formação de lagos artificiais trata-se de uma das técnicas mais antigas para o atendimento da demanda por água das sociedades (ADAM, 2011). As barragens de terra servem a sociedade há mais de 5.000 anos, sendo evidenciados por restos dessas antigas estruturas nos berços da civilização, na Babilônia, Egito, Índia, Pérsia e no Extremo Oriente (JANSEN, 1983).

Dados do ano de 2000 indicam existir cerca de 50 mil grandes barragens em operação no mundo (ICOLD, 2008a). Estima-se que as barragens de aterro constituem 75% do total de barragens no mundo. (ICOLD, 2008b).

As aplicações de barragens são diversas, algumas delas são: armazenamento de água para uso doméstico, irrigação, controle de cheias, geração hidrelétrica, recreação, navegação, (ICOLD, 2008c).

Porém além de serem obras de grande importância, barragens são também obras de grande risco. Uma barragem localizada próxima a civilizações pode causar, além de danos ambientais e financeiros, vítimas fatais e isolamento de grandes regiões.

Como prova dos riscos, pode-se citar dois grandes acidentes que ocorreram recentemente no Brasil e ocasionaram em grande número de

vítimas fatais, a barragem de Mariana em Minas Gerais no ano de 2015 e a de Brumadinho também em Minas Gerais no ano de 2019.

Além da importância do estudo da permeabilidade em barragens, Wang e Shibata (2007) estudaram a influência da permeabilidade em deslizamentos e este fator mostrou grande força na inicialização do fenômeno.

Dada a importância da permeabilidade para a segurança de obras de engenharia, foi proposto o estudo do comportamento da permeabilidade de um solo da região de Alegrete-RS, avaliando a influência da umidade de compactação e do grau de compactação na permeabilidade. Como a cidade tem como força na economia a produção de arroz, a justificativa para o estudo se deu pelo fato da região possuir um grande número de barramentos de terra, construídos com a finalidade de retenção de água para uso principalmente agrícola como irrigação, e na prática se observa pouco controle tecnológico na construção destes projetos de engenharia.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Solo

**Origem do Material:** O solo utilizado no estudo foi retirado de jazida localizada na cidade de Alegrete-RS, no bairro Caverá, a Fig. 1 apresenta a vista superior georreferenciada da jazida, sendo suas coordenadas: 29°50'14" S, 55°46'27" W.

**Caracterização do material:** A caracterização do material foi realizada de acordo com as seguintes normas: NBR 7181/84, NBR 6459/17 e NBR 7180/16. A análise granulométrica está apresentada na Fig. 2 e na Tabela 1 e os limites de Atterberg na Tabela 2.

Na Tabela é apresentada a porcentagem de material retido em cada intervalo de peneiras.



Figura 1: Localização da jazida. Fonte: Google Earth, em 20/04/2019.

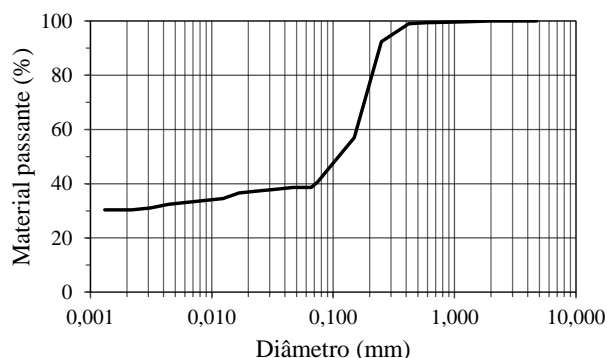


Figura 2: Granulometria. Fonte: autoria própria.

Tabela 1: Porcentagem de materiais com base ASTM. Fonte: autoria própria.

Areia grossa (4,8 - 2,0mm)	Areia média (2,0 - 0,42mm)	Areia fina (0,42- 0,075 mm)	Silte (0,075 - 0,005 mm)	Argila (<0,005mm)
0,00%	1,10%	58,40%	7,50%	33,00%

**Classificação do material:** Através da caracterização do material, foi possível classificar o solo como SM pela classificação SUCS e A-4 pela classificação TRB.

Tabela 2: Limites de Atterberg. Fonte: autoria própria.

Limite de Liquidez (LL)	16%
Limite de Plasticidade (LP)	15%
Índice de Plasticidade (IP)	1%

## 2.2 Metodologia

**Preparação de amostras:** A preparação de amostras para a compactação dos corpos de prova foi realizada segundo a NBR 6457/16.

**Compactação do material:** A compactação do material foi realizada de maneira adaptada a orientação da NBR7182/16, utilizando energia normal e cilindro pequeno. A adaptação realizada trata-se da substituição do cilindro metálico pelo cilindro de PVC de parede rígida, observando que o mesmo não apresentasse deformações durante o ensaio de compactação, o qual apresenta dimensões modificadas para posterior montagem dos permeômetros. Buscou-se compactar vários corpos de prova afim de garantir uma análise mais acurada dos resultados.

**Ensaio de permeabilidade:** Segundo Daniel (1994), diversas variações de células de condutividade hidráulica são válidas em estudos de solos, podendo as mesmas serem divididas em dois grandes grupos: células de parede rígida e célula de parede flexível. Ainda segundo Daniel (1994) as células de parede rígida podem ser subdivididas em quatro subgrupos: permeômetro molde de compactação, permeômetro célula de consolidação, permeômetro tubo de amostragem e permeômetro de maior escala.

Tendo em vista o interesse da utilização do molde na compactação e no ensaio de permeabilidade, a alternativa escolhida foi a célula de parede rígida: permeômetro molde de compactação.

O permeômetro molde de compactação é o tipo mais utilizado em testes de condutividade hidráulica, nele o solo a ser

estudado é compactado de maneira apropriada e então submetido ao ensaio de permeabilidade, não necessitando desmoldar a amostra (DANIEL, 1994a). Solos com granulometria variando desde argila até pedregulho podem ser ensaiados nesse tipo de célula (DANIEL, 1994b).

A célula de ensaio é composta por: duas placas metálicas, um tubo de parede rígida, material poroso, parafusos e tubos para a passagem da água. Utilizou-se como material poroso uma camada de 1,5 cm de areia grossa e média de forma solta em cada lado da célula. Devido ao fato da areia ser um material granular e aplicada de forma solta, observou-se a necessidade da utilização de um sistema que evitasse a passagem da areia pelo tubo de percolação da água. Para isto, foram utilizadas telas com orifícios suficientemente pequenos para impedir a perda de material. Além disso, foi utilizada borracha entre o tubo e as placas metálicas como elemento a auxiliar a vedação do permeâmetro.

A Figura 3 apresenta a forma final da célula, contendo todos os seus elementos. As dimensões das camadas de areia e do solo compactado variaram entre os corpos de prova, sendo importante observar essa variação na hora do cálculo da permeabilidade.

A sequência de execução da célula de ensaio está apresentada na Fig. 4, quando após completa a montagem é fixada a mangueira no tubo de entrada e posicionada em um local onde foi possível realizar as leituras, como mostrado na Fig. 5.

Após a montagem do conjunto respeitou-se um período de saturação de cerca de 2 meses em sala climatizada, onde periodicamente a água era completada de maneira a ter uma coluna de água para a saturação se dar por gravidade. A entrada de água se deu pela parte inferior da amostra, conforme a Fig. 3, e após observado fluxo

constante foram realizadas as leituras para o cálculo do coeficiente de permeabilidade  $k$ .

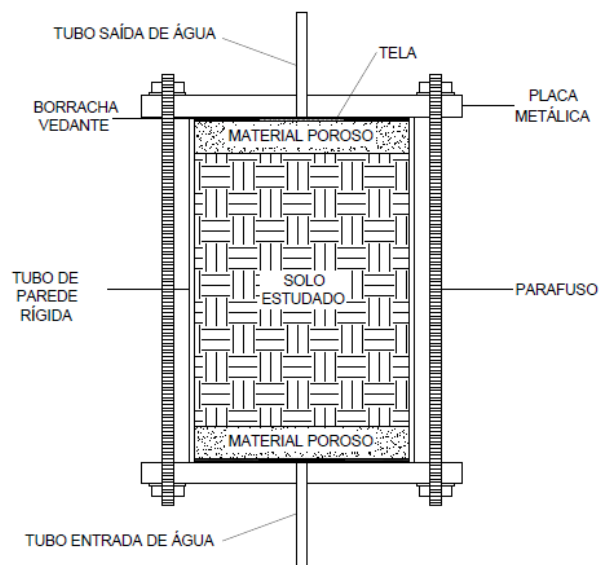


Figura 3: Célula de permeabilidade. Fonte: Adaptado de Daniel (1998).

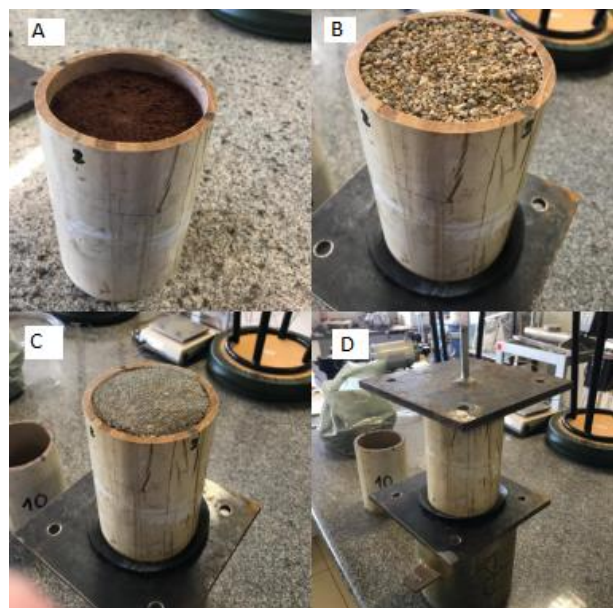


Figura 4: Sequência de montagem. Fonte: autoria própria.



Figura 5: Permeômetros após montagem.  
Fonte: autoria própria.

Sabendo que a célula de ensaio escolhida pode ser utilizada tanto para ensaios de carga constante como de carga variável, optou-se pela utilização do permeômetro de carga variável levando em conta as características do solo. Sendo assim o cálculo da permeabilidade é dada através da Lei de Darcy aplicada a esse tipo de permeômetro, e está apresentada na Eq (1).

$$k = 2,3 \frac{aL}{At} \log \frac{h_i}{h_f} \quad (1)$$

Onde:

- k = coeficiente de permeabilidade (cm/s);
- a = área da seção da mangueira (cm<sup>2</sup>);
- L = espessura da camada de solo (cm);
- A = área do CP (cm);
- t = diferença de tempo entra as leituras (s);
- h<sub>i</sub> = carga de água inicial (cm);
- h<sub>f</sub> = carga de água final (cm).

Na Figura 6 é esquematizado o sistema do permeômetro e as variáveis da equação.

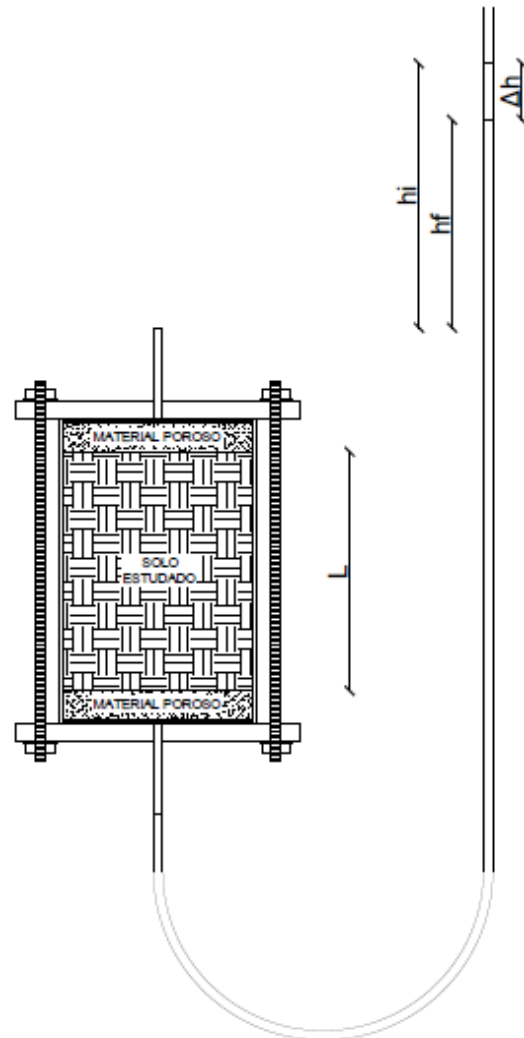


Figura 6: Variáveis da equação. Fonte: autoria própria

Pinto (2006) cita a necessidade de correção do coeficiente de permeabilidade em função da temperatura, tendo em vista que o peso específico e a viscosidade da água variam conforme haja mudança de temperatura. Essa correção é feita através da Eq. (2), relacionando a massa específica líquido na temperatura em que se encontra com a mesma a 20°C.

$$k_{20} = k \frac{\mu}{\mu_{20}} \quad (2)$$

Onde:

$k_{20}$  = coeficiente de permeabilidade a 20°C (cm/s);

$k$  = coeficiente de permeabilidade a temperatura ambiente (cm/s);

$\mu_{20}$  = densidade da água a 20°C;

$\mu$  = densidade na temperatura ambiente.

### 3. RESULTADOS

Fatores como índice de vazios e grau de saturação são de grande influência na permeabilidade do solo. Além disso, esses fatores estão diretamente relacionados a curva de compactação. Sendo assim, buscou-se relacionar a permeabilidade do material com a curva de compactação do mesmo.

A Figura 7 apresenta a curva de compactação na energia normal para o solo de estudo. Nela estão representadas as curvas de saturação compreendidas entre os graus de saturação de 50% e 100%, com intervalos de 10% entre elas. Através da curva de compactação, é possível observar que o peso específico seco máxima ( $\gamma_d$ ) para o solo de estudo encontra-se em torno de 1,81 kN/m<sup>3</sup> e o teor de umidade ótimo (W) em torno de 15%

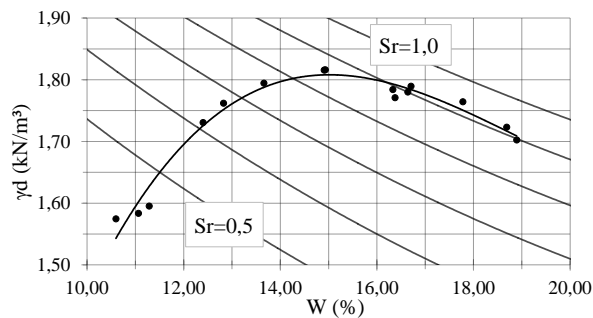


Figura 7: Curva de compactação. Fonte: autoria própria.

Foi realizado o estudo de permeabilidade para todos os pontos apresentados na curva de compactação (16 amostras), buscando entender o comportamento da permeabilidade ao longo da curva. Os resultados individuais

estão apresentados na Tabela 3 e a curva de permeabilidade em função da umidade está apresentada na Fig.8.

Tabela 3: Resultados individuais para a permeabilidade. Fonte: autoria própria.

w (%)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	k (cm/s)
10,60	1,57	2,19E-04
11,06	1,58	1,53E-04
11,29	1,60	1,34E-04
12,40	1,73	2,10E-05
12,83	1,76	1,21E-05
13,66	1,79	2,36E-06
14,91	1,82	6,71E-09
14,93	1,82	1,71E-08
16,33	1,78	2,58E-08
16,38	1,77	2,23E-08
16,64	1,78	1,97E-08
16,71	1,79	1,44E-08
17,78	1,76	1,33E-08
18,69	1,72	2,00E-08
18,89	1,70	2,89E-08

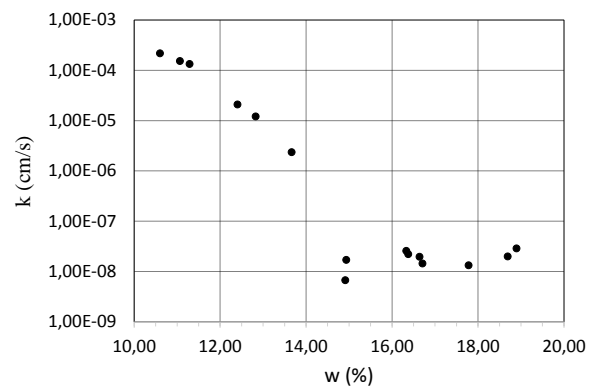


Figura 8: Coeficiente de permeabilidade. Fonte: autoria própria.

A curva resultante comporta-se de maneira semelhante a que Das (2007) apresenta como curva de permeabilidade para solos coesivos sob efeito de compactação. Pela curva de permeabilidade é possível

perceber comportamentos diferentes da permeabilidade em função do grau de compactação entre o ramo seco e o ramo úmido da curva de compactação.

No ramo seco, à medida que o grau de compactação aumenta a permeabilidade diminui, o que é justificado pela redução do índice de vazios. Porém nota-se que os menores valores de permeabilidade são encontrados no ponto onde ocorre a umidade ótima do solo. A partir da umidade ótima e ao longo do ramo úmido, a permeabilidade apresentou pouca variação com os diferentes graus de compactação.

Analisando os valores de permeabilidade individuais e comparando com a curva de compactação da Fig.8, é possível perceber que a permeabilidade apresentou maior variabilidade a medida que os pontos localizavam-se entre curvas de saturação diferentes. A “reta” do ramo seco passa pelas curvas de saturação de forma praticamente perpendicular e à medida que mudava o intervalo de curvas em que o ponto se encontrava a permeabilidade variava de forma considerável, enquanto a “reta” do ramo úmido é paralela a curva de saturação  $S_r = 0,9$  e os pontos apresentaram valores semelhantes de permeabilidade.

Pinto (2006) cita que em solos compactados a permeabilidade não depende apenas do índice de vazios, mas também da disposição dos grãos. Pinto (2006) diz também que o solo quando compactado mais seco apresenta estrutura de grãos floclada permitindo maior passagem de água do que quando compactado mais úmido, onde apresenta estrutura de grãos dispersa.

Observa-se então que, para solos compactados, dentre os fatores citados como influentes no resultado da permeabilidade, para uma mesma energia de compactação, o grau de saturação é o que apresenta maior influência, sendo assim, seria possível atingir resultados aceitáveis para permeabilidade de

um barramento de água, mesmo sem atingir a massa específica máxima, modificando o grau de saturação do mesmo durante a compactação

#### 4. CONCLUSÕES

Através do estudo realizado pode-se concluir a respeito dos fatores que influenciam na permeabilidade:

- No ramo seco da curva de compactação, a permeabilidade varia de maneira inversamente proporcional ao grau de compactação;
- No ramo úmido da curva de compactação, a permeabilidade mantém-se aproximadamente constante com a variação do grau de compactação;
- O grau de saturação apresenta grande influência na permeabilidade no solo de estudo quando comparado aos demais fatores citados;
- Conhecendo a perda de umidade ao longo do tempo para a situação de estudo, é possível verificar maneiras mais eficientes de compactação de barramentos de terra, podendo focar em maiores graus de saturação ao invés de buscar a massa específica máxima.

Como trabalhos futuros, pretende-se estudar:

- A permeabilidade nos pontos próximos a umidade ótima para otimizar os resultados encontrados;
- Estender o estudo para outros solos para verificar a repetitividade do comportamento apresentado;
- Estudar a permeabilidade após perda de umidade do solo compactado ao decorrer do tempo.

### *Agradecimentos*

Agradecemos aos técnicos do laboratório de solos e pavimentação da Unipampa, Jarbas Dalcin e Juliano Duarte pela ajuda ao longo da pesquisa.

### **5. REFERÊNCIAS**

ADAM. ATLAS DIGITAL DAS ÁGUAS DE MINAS. **Roteiro básico para o dimensionamento de pequenas barragens de terra no estado de MG.** Disponível em: <[http://www.atlasdasaguas.ufv.br/exemplos\\_aplicativos/roteiro\\_dimensionamento\\_barragens.html](http://www.atlasdasaguas.ufv.br/exemplos_aplicativos/roteiro_dimensionamento_barragens.html)>. Acesso em: 8 de abril 2019.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. NBR 6457: **Amostra de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.** Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. NBR 6459: **Solo – Determinação do Limite de Liquidez.** Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. NBR 7180: **Solo – Determinação do Limite de Plasticidade.** Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. NBR 7181: **Solo – Análise Granulométrica.** Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. NBR 7182: **Solo – Ensaio de Compactação.** Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e suas Aplicações.** 6 ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1988.

DANIEL, David E. State-of-the-art: Laboratory hydraulic conductivity tests for saturated soils. In: **Hydraulic conductivity and waste contaminant transport in soil.** ASTM International, 1994.

DAS, B.M. **Fundamentos de engenharia geotécnica.** 6 ed. Tradução: All Tasks. Revisão Técnica: Pérsio Leister de Almeida Barros. São Paulo: Thomson Learning, 2007.

ICOLD - CIGB. **As barragens e a água do mundo:** Um livro educativo que explica como as barragens ajudam a administrar a água do mundo. Tradução Texto Faz Comunicação S/S Ltda. Curitiba: Núcleo regional do Paraná, 2008.

JANSEN, Robert B. et al. Dams and public safety. In: **Water resources technical publication.** GPO, 1983.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas.** 3 ed. São Paulo: Oficina de Textos. 2006.

Wang, F., & Shibata, H. (2007). **Influence of soil permeability on rainfall-induced flowslides in laboratory flume tests.** Canadian Geotechnical Journal, 44(9), 1128–1136.