

XXIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

PROPOSTA DE INSTRUMENTAÇÃO DE APARATO PARA AVALIAÇÃO DE ERODIBILIDADE DE AMOSTRAS DE SOLO COMPACTADO

*Débora Silva de Moraes¹; Bárbara Batista dos Santos²; Aloysio Portugal Maia Saliba³; Carlos
Barreira Martinez⁴*

Resumo: O Centro de Pesquisas Hidráulicas e Recursos hídricos (CPH) da UFMG desenvolve atualmente trabalhos de pesquisa envolvendo ruptura de barragens, com especial atenção a rupturas por galgamento de barragens homogêneas de solo compactado. Neste tipo de ruptura, o maciço da barragem sofre erosão pelo escoamento do fluido que provoca a abertura de uma brecha. Quando esse processo erosivo se desenvolve, o fluido reservado é liberado com intensidade diretamente relacionada ao tempo de formação da brecha, que por sua vez é função da resistência do maciço à erosão e às velocidades de escoamento previstas (SALIBA, 2009). Usualmente, por não se dispor de informações acerca dessa resistência, conhecida por erodibilidade, utilizam-se equacionamentos empíricos, que contribuem significativamente para aumentar as incertezas dos estudos de ruptura de barragens (FROEHLICH, 2016). Dessa forma, a partir dos trabalhos de Briaud et al. (2001), e com intuito de embasar melhor os estudos de ruptura em modelos reduzidos, o CPH desenvolveu um aparato de testes de erodibilidade. Assim, esse projeto tem como objetivo a automatização do processo de medida de nível da amostra nesse aparato, para diminuir as incertezas na medição da erodibilidade. Para isso, pretende-se dotar o aparato de células fotoelétricas e de laser para medir o nível da amostra utilizando um Arduino Uno.

Palavras-Chave – Ruptura de barragens. Erodibilidade. Ensaios.

Abstract: The Center for Hydraulic Research of UFMG (CPH) currently develops research work involving dam breaks, with special attention to ruptures by overtopping of compacted soil embankments. In this type of rupture, the embankment is eroded by the flow causing the opening of a breach. When this erosive process develops, the storage is released with intensity directly related to the breach formation time, which in turn is a function of the resistance of the compacted soil to flow erosion (SALIBA, 2009). Empirical equations are often used as no information regarding the soil erodibility is available, which contribute significantly to increase the uncertainties of dam rupture studies (FROEHLICH, 2016). Thus, inspired on the works of Briaud et al. (2001), and to better support rupture studies in reduced models, CPH developed an erodibility testing suite. This paper describes the automation of this device to reduce uncertainties in the measurement of erodibility, using photoelectric and laser cells to measure the level of the sample and an Arduino Uno board.

Keywords: Dam break. Erodibility. Testing.

1) Aluna do Curso de Engenharia Civil da UFMG. Av. Pres. Antônio Carlos, 6691, Belo Horizonte, MG. deborasdmoraes@gmail.com

2) Mestranda em Saneamento, Meio Ambiente e Rec. Hídricos da UFMG. Av. Pres. Antônio Carlos, 6691, Belo Horizonte, MG. barbarabatista91@yahoo.com.br

3) Professor, Dep. Eng. Hidráulica e Rec. Hídricos da UFMG. Av. Pres. Antônio Carlos, 6691. asaliba@chr.ufmg.br

4) Prof. Titular, Instituto de Engenharia Mecânica da UNIFEI. R. Cel. Francisco Braz, 112, Itajubá, MG. cmartinez@unifei.edu.br

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Nos últimos anos, o Brasil tem experimentado uma série de rupturas de barragens, o que tem despertado interesse da comunidade científico a respeito dos mecanismos de falha envolvidos. No Brasil as barragens mais utilizadas são aquelas que têm seus maciços compostos por solo homogêneo compactado (Saliba, 2009).

Um dos modos de falha mais comuns nas rupturas destes tipos de barragens é o galgamento, em que se desenvolvem processos erosivos associados ao escoamento de fluido sobre o talude a jusante provocando formação de uma brecha. Com o desenvolver do processo de erosão esse canal expande e se conecta ao reservatório a montante, liberando-o volume estocado e provocando cheias intensas a jusante. A amplitude da vazão na qual o fluido armazenado escoar está relacionada ao tempo em que a brecha leva para se formar, que por sua vez depende da resistência que o maciço apresenta à erosão e da velocidade de escoamento do fluido (Saliba, 2009).

Vários autores desenvolvem formulações empíricas com o intuito de determinar o processo de formação das brechas nas rupturas. Entretanto, o desenvolvimento destas é complexo e de difícil representação por modelo matemático (Campos et al., 2018a). De acordo com Froehlich (2016) os modelos não podem ser considerados precisos, visto que estes são uma abstração do mundo real. Assim, é necessário que os estudos para determinação da resistência dos maciços à erosão sejam realizados de forma direta (Andrade, 2017), a fim de que essas incertezas nos resultados sejam minimizadas.

O Centro de Pesquisas Hidráulicas e Recursos hídricos (CPH) da UFMG tem desenvolvido estudos acerca da erodibilidade de solos compactados e possíveis medidas para melhoria desta propriedade e possui um aparato para medir a erodibilidade dos solos, inspirado no Erosion Function Apparatus (EFA), conforme proposto por Briaud et al. (2001). Esse equipamento tem como finalidade obter a taxa de erosão do solo, seja ele coesivo ou não, associada a uma velocidade média de escoamento aplicada sobre uma amostra (Mantovanelli, 2016).

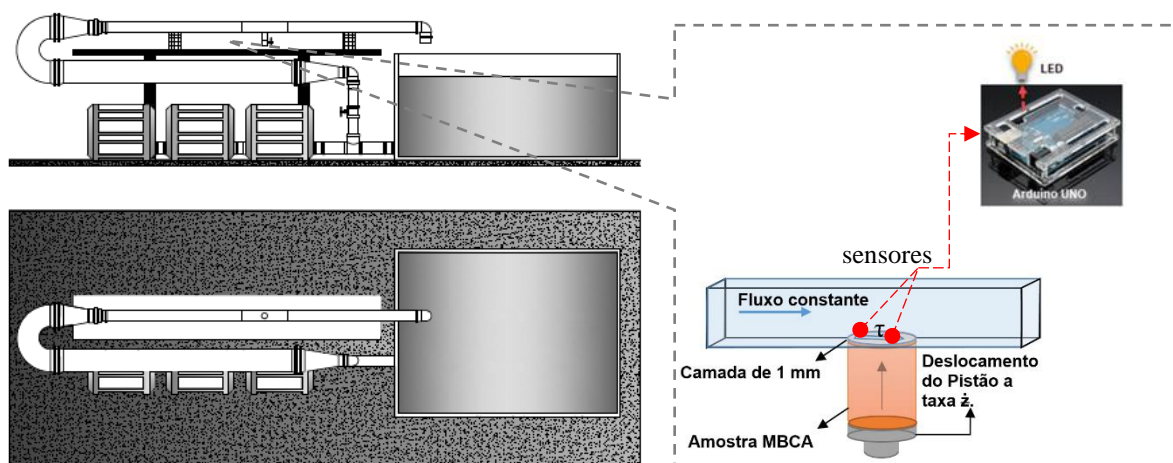
Uma dificuldade na utilização do EFA presente no CPH é que a erosão é medida por observação visual e, portanto, está sujeita a erros de observação. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um dispositivo de leitura automático, de baixo custo, a ser acoplado ao EFA existente para maior agilidade e precisão às leituras.

Pretende-se fazer o controle de nível de uma amostra a ser ensaiada no teste por meio de um sensor de luminosidade e de um emissor laser. Dessa forma, será possível aumentar a precisão do ensaio e aumentar o número de amostras ensaiadas no experimento. Essas limitações se dão devido a elevada turbidez da água no ensaio provocada pela retirada de material da amostra que atrapalha na visualização da altura da amostra exposta ao processo erosivo.

2 METODOLOGIA DE ENSAIO

O aparato de testes desenvolvido no CPH se assemelha ao chamado EFA (Erosion Function Apparatus) apresentado por Briaud et al. (2001). Trata-se de um aparato do tipo pistão, alimentado por um sistema motobomba, capaz de fornecer uma vazão máxima de 78 m³/h, conectado a um reservatório de 500 L, a partir do qual a água é captada. Em circuito fechado, o fluxo retorna ao reservatório após passar por uma caixa em que a amostra é erodida. Esse aparelho (Figura 1) apresenta uma seção transversal retangular e foi construído em aço, com uma caixa de inspeção revestida em acrílico, a fim de proporcionar a visualização da amostra de solo a ser ensaiada.

Figura 1 – Vista lateral e planta do aparato de testes, câmara e dispositivo de automação.



Fonte: Adaptado de Mantovanelli, 2016 e Campos *et al.*, 2018b.

A saída do mangote foi conectada a um tubo com 101,6 mm de diâmetro que foi ajustado de forma a efetuar a transição entre a seção tubular a uma seção retangular de 96 mm x 74 mm (base x altura). Ao longo desta tubulação, tem-se a caixa de inspeção com paredes em acrílico retangular. Na parte inferior dessa caixa, ao centro, foi aberto um orifício com 45 mm de diâmetro, por meio do qual um tubo pode ser inserido.

Vale ressaltar que a amostra é ascendida nesse orifício por meio de um sistema acionado por um parafuso sem fim acoplado a uma manivela, mantendo a amostra a 1 mm acima da placa de fundo da caixa (Mantovanelli, 2016; Campos *et al.*, 2018b – Figura 1).

De acordo com Briaud (2008), a função de erodibilidade é a relação entre a taxa de erosão e a tensão cisalhante que é imposta pela velocidade de escoamento do fluido sobre as partículas. Essa função é complexa, dependendo de diversos fatores tais como flutuações de tensões causadas pelo escoamento.

No entanto, a função de erodibilidade pode ser simplificada conforme indicado pela Equação 1

$$\frac{\dot{z}}{v} = \lambda_0 \left(\frac{\tau_0 - \tau_c}{\rho v^2} \right)^A \quad (1)$$

Na qual,

\dot{z} é a taxa de erosão (m /s);

v é a velocidade média de escoamento (m /s);

λ_0 é um coeficiente da função erodibilidade (adimensionais);

τ_0 é a tensão cisalhante imposta pelo escoamento (N /m²);

τ_c é a tensão cisalhante crítica, que é a tensão mínima para ocorrer o cisalhamento (N /m²);

ρ é a massa específica do fluido (kg /m³);

A é o expoente da função erodibilidade (adimensionais).

Conforme Mantovanelli (2016), a taxa de erosão (\dot{Z} , mm/h), para uma dada velocidade de escoamento, é obtida medindo-se o tempo (t , h) em que a amostra com certa altura (h , mm) leva para erodir quando é exposta ao fluxo de água (Equação 2):

$$\dot{Z} = \frac{h}{t} \quad (2)$$

A tensão de cisalhamento imposta pelo escoamento sobre a amostra, pode ser obtida a partir da velocidade de escoamento médio do fluido na seção transversal (Campos *et al.*, 2018b - Equação 3).

$$\tau_0 = \frac{1}{8} f \rho_m V^2 \quad (3)$$

Na qual:

τ_0 é a tensão de cisalhamento (N / m²);

f é o fator de atrito da equação de Darcy-Weisbach (adimensional);

V é a velocidade média de escoamento (m /s);

ρ_m é a densidade do fluido (kg/m³).

O fator f é determinado a partir do número de Reynolds do escoamento, para uma rugosidade relativa (e/D) estimada a partir da razão entre o diâmetro mediano dos grãos do solo (d₅₀) e o diâmetro hidráulico (D). O diâmetro mediano dos grãos é aquele equivalente à abertura da malha da peneira em que 50% do material peneirado não consegue atravessá-la.

Os testes nesse aparato são realizados baseados nas formulações matemáticas anteriormente citadas. O tempo em que a erosão ocorre é medido no ensaio com o auxílio de um cronômetro. Já a velocidade de escoamento do fluido é aferida por um leitor de vazão e em função da seção de escoamento. Dessa forma, tem-se ao final dos testes a relação entre a taxa de erosão e a tensão cisalhante. Um ponto crítico, que resulta em variabilidade significativa dos resultados, é o processo de acompanhamento visual do teste, em que o pistão é acionado pelo operador acompanhando a erosão de forma que a parcela de amostra se mantenha a 1 mm de altura exposta acima do fundo da caixa de teste.

3 SISTEMA PROPOSTO

Com intuito de controlar a altura da amostra ensaiada foi proposto um sistema de medição de nível composto por um sistema de amplificação de luz por emissão estimulada de radiação (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation), conhecido popularmente como LASER e um sensor de luminosidade (Figura 1). O LASER é um feixe luminoso que difere da luz comum por algumas propriedades. A primeira propriedade é a colimação do feixe, em que as ondas têm a mesma direção e se propagam paralelamente. A segunda é a possibilidade de fornecer altas densidades de potência, visto que este é uma fonte contínua de luz de potência elevada que pode ser focalizada em uma área muito pequena. Já a terceira é a monocromaticidade da radiação, ou seja, as ondas eletromagnéticas têm o mesmo comprimento de onda (Pinheiro et al., 2016).

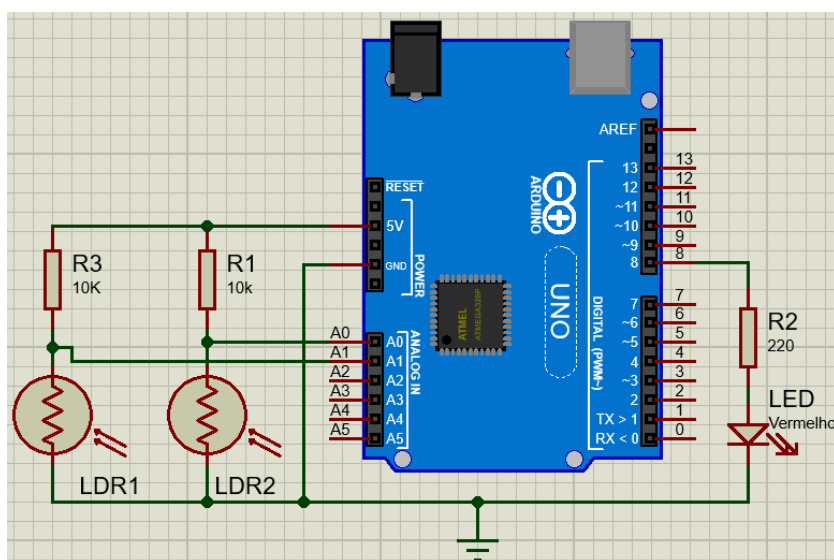
Já o sensor de luminosidade é um dispositivo com capacidade de responder a um estímulo, a intensidade luminosa, variando uma de suas propriedades (Helfrick e Cooper, 1994). Vale ressaltar que existem diversos tipos de elementos fotossensíveis no mercado que podem ser aplicados em múltiplas áreas da engenharia. Neste trabalho foi proposta a utilização de um foto-resistor, também conhecido por Light Dependent Resistor (LDR). O LDR é um dispositivo constituído de Sulfeto de Cádmio, substância que apresenta uma propriedade de variar sua resistência elétrica em função da radiação eletromagnética incidente em sua superfície (Helfrick e Cooper, 1994). O que ocorre nesse material é a liberação de elétrons em função dos fótons da onda de luz incidente, a qual proporciona uma diminuição da resistividade desse material. A relação entre resistência elétrica e intensidade luminosa é linear, possuindo alta sensibilidade à incidência luminosa, com frequência de aquisição de algumas dezenas de quilohertz (Wendling, 2010). A sensibilidade da célula fotocondutora varia em função do comprimento de onda da luz que incide em sua superfície.

Para implementar a aquisição do nível do solo no interior da caixa de testes, os dispositivos são dispostos nas laterais da caixa de inspeção construída em acrílico (detalhe na Figura 1). Dessa forma, fixam-se dois foto-resistores em uma das laterais, e um LASER na face oposta. Vale ressaltar que um dos LDRs fica na direção do LASER, na altura de 1 mm tendo assim uma incidência direta dessa fonte luminosa. Esse sensor é responsável por captar a altura da amostra, no qual terá uma redução

do estímulo físico, luminosidade, quando o corpo de prova interromper a passagem da luz advinda do laser. Já a outra célula fotocondutora é colocada a montante, ao lado do foto-resistor que mede a altura da amostra. A função dela é ser uma referência da luminosidade no fluido, visto que iluminação do ambiente e a turbidez interferem no processo de medição.

A fim de verificar a variação da resistência no LDR em função da incidência luminosa será utilizado o circuito esquematizado na Figura 2. Nessa montagem tem-se um divisor de tensão, no qual será aferida a variação de resistência do LDR em função da luz incidente.

Figura 2 –Diagrama esquemático do circuito aplicado.



Segundo O'Malley (1993) essa lei do divisor de tensões aplicada a resistores em série, fornece a tensão sobre o resistor de interesse em função da tensão da fonte de alimentação e dos resistores presentes no ramo (Equação 4):

$$V_x = \frac{R_x}{R_t} V_s \quad (4)$$

Na qual,

V_x é a tensão sobre o resistor R_x (V);

R_x é a resistência sobre a qual se mede a tensão (Ω);

R_t é a resistência total no ramo (Ω);

V_s é a tensão da fonte (V).

A aquisição dessas tensões nos LDRs e a comparação das leituras destes são realizadas utilizando um microcontrolador comercial, denominada Arduino Uno®. O Arduino é um microcontrolador que se tornou muito popular por seu baixo custo, grande funcionalidade e fácil acessibilidade. O Arduino UNO é um dos modelos mais populares, que é uma placa física composta por um microcontrolador da Atmel ou ATmega328, concebida para controlar por interface os sensores, utilizando uma linguagem baseada em C (Monk, 2015).

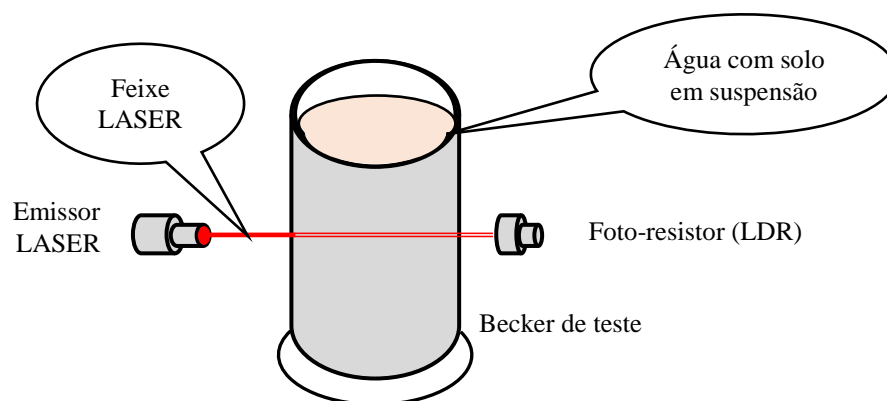
A interação Homem-Máquina nesse aparato é realizada por meio de um led sinalizador vermelho, o qual tem como função informar ao usuário do equipamento a posição da amostra em relação ao nível de interesse. Essa sinalização ocorre da seguinte forma: o led fica aceso enquanto a amostra estiver abaixo da altura de 1 mm, indicando assim, que é preciso subir o pistão com a amostra. Quando o solo ensaiado chega ao nível desejado, no qual o sinal do laser é interrompido pela presença

da amostra, o led apaga para sinalizar que não é mais necessário elevar o pistão. Pretende-se no futuro automatizar o acionamento do pistão.

Visando comparar a capacidade de leitura do dispositivo de medição, foram realizados testes em laboratório, utilizando um béquer ao qual eram acrescidas quantidades de solo, de forma a determinar o limite de leitura do equipamento levando-se em consideração a capacidade do laser utilizado. Quantidades de solo previamente seco em estufa a 105°C por 24 h foram adicionadas a uma certa quantidade de água em um béquer, testando-se a capacidade do equipamento concebido em permitir o monitoramento da posição da amostra em teste.

Cabe ressaltar que foi utilizado um laser pointer comum, com potência de 5 mW nos ensaios realizados. Entretanto existe no mercado, a preços acessíveis, emissores laser mais potentes, que poderão ampliar a faixa de visibilidade dos ensaios. Para se verificar a efetividade dessa estratégia fez-se uma bateria de testes utilizando-se um Becker contendo água que teve sua turbidez gradativamente elevada mediante a adição de amostras de sol. O esquema dos testes efetuados está apresentado na Figura 3.

Figura 3 –Diagrama esquemático do aparato de verificação da efetividade do sistema de indicação de posicionamento da amostra.



4 RESULTADOS

A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos nos testes de capacidade de leitura do equipamento desenvolvido.

Tabela 1 – Resultados dos testes de capacidade de leitura do equipamento desenvolvido.

Massa de água (g)	Massa dos grãos (g)	Teor de sólidos gravimétrico (%)
601,309	1,604	0,266
610,550	1,691	0,276
611,994	2,083	0,339

O teor de sólidos gravimétrico foi determinado por meio da Equação 5:

$$C_W = \frac{m_s}{m_t} \times 100\% \quad (5)$$

Na qual,

C_W é o teor de sólidos gravimétrico (%);

m_s é a massa de sólidos (g);

mt é a massa total (g).

A média do teor gravimétrico desse experimento foi de $0,29\% \pm 0,04$. Nestas situações, para o solo utilizado, não era possível identificar visualmente o feixe LASER. Para determinar o número de amostras possíveis de serem testadas no aparato utilizando o LASER para medida da erosão, considerou-se o volume de água utilizado no equipamento (500 L) e o valor médio de CW obtido no experimento, obtendo uma massa de solo que corresponde a 1.454g.

Sabendo que, para o solo em questão, cada amostra possuía cerca de 282 g, obteve-se cerca de 5 amostras para cada volume de 500 L do reservatório, sem que houvesse necessidade de limpeza ou esgotamento do aparato de teste. Isso indicou um ganho significativo na execução dos testes pois no aparato original somente são possíveis 3 testes acompanhados a olho nu, sendo que no último ensaio é necessário bastante esforço e acuidade visual sob pena de se ter uma grande imprecisão nas medidas. Com o sistema proposto espera-se obter medidas precisas em até cinco testes sem comprometimento das observações.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Esta investigação e desenvolvimento procurou avaliar a viabilidade de utilização de um sensor de baixo custo para medir a posição de uma amostra a ser inserida em um aparato de erosão do tipo EFA (Briaud et al., 2001). Os resultados indicaram ser possível a utilização, com ganho em termos de capacidade de realização de ensaios para o mesmo volume de água utilizado.

Nas próximas etapas, recomenda-se efetuar o processo de medição e realizar a calibração no ambiente de trabalho no aparato de erosão. Isso porque diversos são os fatores que interferem no processo de medição, como a iluminação local, visto que o sensor também tem sensibilidade à iluminação ambiente e a turbidez que limitam o processo de leitura. Outra possibilidade que se identificou neste trabalho foi o acionamento automático do pistão a partir do sinal emitido pelo LASER e coletado pelo foto-resistor (LDR) que acoplado ao registro dos avanços do pistão alcançar a automatização completa do aparato.

Finalmente, é importante mencionar que o equipamento desenvolvido tem baixo custo, e utiliza componentes de fácil acesso no mercado nacional.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, S. B. (2017). *Desenvolvimento de modelo reduzido para estudo de brechas formadas pela ruptura por galgamento de barragens em solo compactado homogêneas*. Trabalho de Conclusão de Curso: Engenharia Ambiental. Belo Horizonte: UFMG. 63 p.

BRIAUD, J-L.; TING, F. C. K.; CHEN, H. C.; CAO, Y.; HAN, S. W.; KWAK, K. W. (2001). *“Erosion function apparatus for scour rate predictions”*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 127(2). pp.105-113.

BRIAUD, J-L. (2008). *“Case Histories in Soil and Rock Erosion: Woodrow Wilson Bridge, Brazos River Meander, Normandy Cliffs, and New Orleans Levees”*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 134 (10). pp.1425-1447.

CAMPOS, R. G. B.; SALIBA, A. P. M.; BAPTISTA, M. B.; BISCARO, V. H. B.; CAMARGOS, R. S.; PASSOS, D. T. (2018a). *“Modelagem física para determinação de parâmetros de brechas em rupturas de barragens em cascata”* in Anais do XXVIII Congresso Latinoamericano de Hidráulica, Buenos Aires, Argentina, Nov. 2018, 5, pp. 2560-2571.

CAMPOS, R. G. D.; SALIBA, A. P. M.; BAPTISTA, M. B.; CAMARGOS, R. S.; BISCARO, V. H. B.; PASSOS, D. T. (2018b). *“Determinação de Taxas de Erosão para Mistura de Borracha e Cimento para Aplicação em Modelos Reduzidos”* in Anais do XXVIII Congresso Latinoamericano de Hidráulica, Buenos Aires, Argentina, Nov. 2018, 5, pp. 2917-2928.

FROEHLICH, D. C. (2016). “*Empirical Model of Embankment Dam Breaching*” in Anais da International Conference on Fluvial Hydraulics (River Flow 2016), 2016, 1, pp. 1821-1826.

HELFRICK, A. D.; COOPER, W. D. (1994). *Instrumentação eletrônica moderna e técnicas de medição*. Ed. Prentice Hall do Brasil Ltda. 324 p.

MONK, S. (2015). *Programação com Arduino II: Passos avançados com sketches*. 1. ed. Bookman. 247 p.

MANTOVANELLI, G. B. (2016). *Uma abordagem experimental para a obtenção da taxa de erosão de solos através de um aparato do tipo pistão*. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória: UFES. 112 p.

O'MALLEY, J. (1993). “*Divisores de tensão*”, in O'MALLEY, J. *Análise de circuitos*. 2. ed. rev. Makron Books do Brasil Editora Ltda, São Paulo – SP, p. 52-53.

PINHEIRO, A. L. B.; ALMEIDA, P. F.; SOARES, L. G. P. (2017) “*Princípios fundamentais dos lasers e suas aplicações*”, in *Biotecnologia Aplicada à Agro&Indústria*. 2017. v. 4, cap. 23. P. 815-894.

SALIBA, A. P. M. *Uma nova abordagem para a análise de ruptura por galgamento de barragens homogêneas de solo compactado*. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos), Escola de Engenharia, UFMG. Belo Horizonte: UFMG. 179 p.

WENDLING, M. (2010). *Sensores*. UNESP. 19 p. Disponível em: <https://www.feg.unesp.br/Home/PaginasPessoais/ProfMarceloWendling/4---sensores-v2.0.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2020.

AGRADECIMENTOS

Os autores manifestam seus agradecimentos à CAPES, CNPq (304370/2018-5), FAPEMIG, CEMIG, FURNAS, ELETROBRÁS, programa de P&D ANEEL, SEFAC-CA-072/2017 / CA-071/2017. e TEC3 Geotecnia e Recursos Hídricos Ltda. pelo apoio e suporte financeiro para a realização desse trabalho.