

Modelo de Barragem de Aterro Assistida por Arduino para Demonstração da

Pressão Hidrostática



Fernando Henrique Martins^{1#} , Mailson Piedade¹, Helen Santos¹

¹Departamento de Ciência, Tecnologia e Inovação, Universidade Federal da Bahia, Camaçari, BA, Brasil.

Palavras-chave

barragem de aterro
Arduino
hidrostática
ensino de física

Resumo

Os rompimentos das barragens de Mariana, em 2015, e de Brumadinho, em 2021, despertaram preocupações sobre a segurança e os protocolos para alertar populações sobre riscos iminentes. O presente estudo propõe um modelo de barragem de aterro assistida por Arduino para ensinar conceitos de hidrostática no Ensino Médio e em disciplinas de física de cursos de graduação. Um sistema de alerta utilizando Arduino é programado para detectar infiltração de água e emitir alertas visuais e sonoros de risco iminente de ruptura. Durante a execução do experimento, verificou-se que a pressão hidrostática é maior na base da barragem, levando o sistema à ruptura quando o nível de água atinge aproximadamente 17 cm. O modelo demonstra que a força máxima depende do ângulo da superfície em contato com a água. Além disso, o modelo de barragem de aterro com sistema de alerta de ruptura iminente é eficaz para identificar falhas estruturais, indicar risco de ruptura e oferece uma ferramenta prática e acessível para ensino interdisciplinar, destacando a importância da segurança em barragens e a aplicação de conceitos de hidrostática na prática.

Autor de correspondência. E-mail: fernandohenrique@ufba.br.

Este é um artigo de acesso livre sob licença Creative Commons



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>

Copyright © 2025, Copyright by Sociedade Brasileira de Física. Printed in Brazil.

1. Introdução

Os acidentes ambientais decorrentes do rompimento das barragens de aterros nos municípios mineiros de Mariana e Brumadinho desencadearam um alerta quanto à necessidade de revisão e aprimoramento dos protocolos de segurança, os quais devem ser rigorosamente observados para garantir a efetiva comunicação de riscos iminentes à população. Esses acidentes cau-

saram consequências para o meio ambiente que são percebidas ainda hoje. O estado de Minas Gerais possui a maior concentração de barragens para atividades de mineração do país. Das 121 estruturas de represamento, três apresentam situação crítica [1]. O debate acerca desse tema deve estar inserido em sala

Um sistema de alerta de ruptura iminente da barragem utilizando Arduino é uma forma de introduzir o estudo de hidrostática no Ensino Médio

de aula.

O mais recente incidente, que ocorreu na barragem da mina do Córrego do Feijão, da mineradora Vale em Brumadinho/MG, foi o

mais catastrófico [2]. No total, mais de 270 pessoas tiveram suas vidas interrompidas e graves consequências ambientais ainda afetam os moradores da região. Os rejeitos de mineração que causaram a ruptura da barragem propagaram-se pelos rios da região e ainda hoje há reflexos de deposição de sedimentos no leito do rio Doce.

Os acidentes em barragens ocorrem devido a diversos fatores, entre eles problemas de estrutura, de materiais, de características e de falha em elaborar protocolos de segurança. Segundo Jónatas [3], as barragens de aterro que trabalhamos neste experimento têm roturas graduais que podem levar de minutos a horas.

Nesse sentido, apresentaremos uma proposta de modelo de barragem de aterro assistida por Arduino para introdução de conceitos fundamentais de hidrostática que pode ser utilizado tanto no Ensino Médio quanto em cursos de licenciatura em física. Essa é uma proposta interdisciplinar que envolve conceitos de física, computação, programação, tecnologia e geologia, além de debate sobre os impactos ambientais de acidentes com barragens.

À luz das teorias de Piaget e Vygotsky, a proposta experimental de simulação de monitoramento de barragens visa integrar os conceitos teóricos à realidade cotidiana. Sob a ótica de Vygotsky [4], enfatiza-se a interação social com o meio, enquanto Piaget [5] destaca o papel da representação conceitual no desenvolvimento do pensamento e da linguagem. O projeto proposto favorece a aprendizagem significativa e a externalização do pensamento por meio de atividades simbólicas, alinhando-se aos princípios das interações qualitativas no processo cognitivo.

Dessa forma, essa pesquisa é pautada na prática experimental, mediante a simulação de uma barragem de aterro, tal como a implementação de sistemas de monitoramento, visando à aplicação teórico-prática de conceitos pertencentes ao campo da física. Vale ressaltar que os materiais propostos para construção desse aparato experimental são de baixo custo, justamente objetivando viabilizar sua aplicação em escolas da rede pública e privada nas aulas de física e em disciplinas de física em nível de graduação, possibilitando o aprendizado interdisciplinar. Vale mencionar que as estratégias de ensino empregadas durante a prática experimental têm forte impacto na recepção pelos alunos.

Nessa perspectiva, este trabalho foi dividido da seguinte maneira: a primeira seção será dedicada à elaboração de um resgate teórico sobre os conceitos de hidrostática que podem ser estudados a partir do modelo de barragem de aterro aqui proposto; em seguida, os detalhes e características de barragens de aterro serão apresentados, e na seção subsequente, será apresentado o sistema de notificação de ruptura iminente

da barragem. Esse sistema consiste em uma plataforma Arduino Uno R3 acoplada a um sensor de umidade do solo e a componentes eletrônicos de alerta como *buzzer* e LED. Por fim, será apresentada a construção do modelo de barragem de aterro proposto neste trabalho, junto com o sistema de alerta em funcionamento.

2. Barragens de aterro

As barragens são construções cujo objetivo é o represamento de fluidos, seja para mudança de percurso ou como fonte geradora de eletricidade, como em hidrelétricas. A *International Commission on Large Dams (ICOLD)* subdivide as tipologias de barragem em barragens de aterro, que são constituídas de terra ou de rochas, e barragens de betão, que utilizam a ação da gravidade em estruturas em forma de arco, de contrafortes ou multiarco [3].

Neste trabalho, investigaremos a barragem de aterro, ou barragem de terra do tipo homogênea, pois demanda estruturas simples e tem como características fundamentais a uniformidade do material do qual são compostas e a impermeabilidade do próprio material (*idem*). Esse tipo de barragem não é composto por núcleo, pois se confere uma impermeabilização. As barragens de aterro têm uma estrutura simples quando comparadas com as demais construções pelo fato de serem constituídas basicamente por solo compactado e enrocamento com proporções variáveis.

A barragem de aterro (Fig. 1) contém algumas características bastante relevantes para seu estudo. Segundo Carvalho [6], a barragem do tipo homogênea contém algumas especificidades: rip-rap, tapete impermeável, crista, dreno de pé, filtros vertical e horizontal. Porém, no estudo de caso, para abordar conceitos físicos, concentramo-nos apenas no talude de montante, região onde o fluido (água) tem contato direto com a superfície da barragem, exercendo pressão sobre a pa-



Figura 1 - Esquema da barragem de aterro (homogênea).¹

rede. Já o talude de jusante é o lado oposto da barragem, onde não há contato com o fluido, a menos que ocorra deslizamento da barragem.

Por serem edificações que geram impacto ambiental e estão por vezes próximas a regiões com população, faz-se necessária a implementação de medidas que prezam pela segurança. Nesse sentido, o Governo Federal instituiu a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), por meio da lei 12.334/2010, onde são tratadas diretrizes reguladoras para ações de segurança e gestão de risco a serem adotadas pelos responsáveis pelo empreendimento - empresários, defesa civil e população [7]. Portanto, ao estruturar uma adequada gestão de risco, deve-se pautar estudos referentes às áreas inundáveis, a jusante, em decorrência de desgastes ou fissuras estruturais, bem como a concretização de sistemas de alarme e sinalização de perigo em caso de ruptura e acidentes.

Desse modo, propomo-nos a elaborar um modelo simples de barragem de aterro composta de material homogêneo construída com material de baixo custo e acessível, bem como assistido por um mecanismo de monitoramento situacional da barragem, conforme será apresentado no próximo tópico. Na seção a seguir, apresentaremos a montagem do sistema de alerta assistido por Arduino.

3. Lei fundamental da hidrostática: teorema de Stevin

Simon Stevin (Fig. 2) foi um grande físico-matemático que viveu na Holanda e foi o primeiro cientista em quase 18 séculos após Arquimedes que contribuiu com avanços significativos para a hidrostática, ao demonstrar que a pressão de um líquido sobre uma superfície depende da altura da superfície e da área de contato [8]. Além disso, Stevin [9] foi autor do livro intitulado *La Disme*, onde explica de maneira clara como utilizar em matemática as frações decimais, que não eram conhecidas naquela época pelos europeus, apesar de números decimais terem sido trabalhados anteriormente pelos árabes e chineses.

Os conceitos de física que podem ser trabalhados em sala de aula utilizando um modelo de barragem de aterro são aqueles pertinentes ao escopo da hidrostática do Ensino Médio, abordado na segunda série, e da graduação em cursos de física do ciclo básico. Assim, podem ser introduzidos os conceitos de massa específica, pressão, pressão hidrostática e princípio de Stevin [10]. Quando esses conceitos são introduzidos, geralmente são citados inúmeros exemplos do comportamento da água, que de fato é o fluido mais comum, devido ao fato de ser essencial à vida e existir em abundância no planeta Terra [11].

Nos líquidos, as moléculas formam ligações temporárias de curto alcance que são rompidas e refeitas à medida que as moléculas se encontram [12]. A intensidade dessas ligações depende do tipo de líquido e,

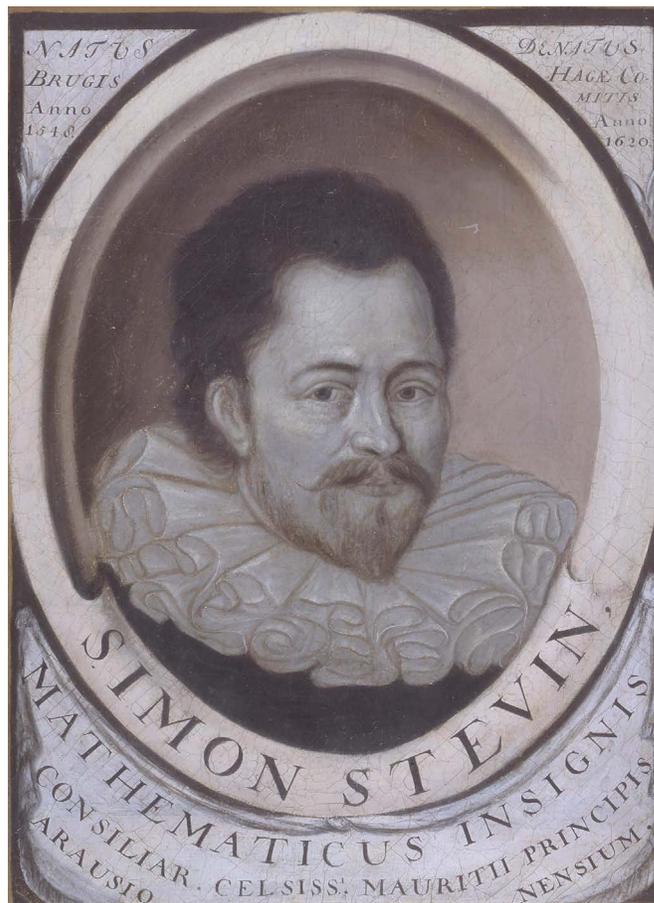


Figura 2 - Simon Stevin (1548-1620), físico-matemático belga.²

desse modo, as moléculas podem se manter mais unidas ou mais espaçadas, formando líquidos mais densos e menos densos, respectivamente. Nesse sentido, convém definir a massa específica ρ como a razão entre a massa de um corpo e o volume ocupado

$$\rho = \frac{dm}{dV}, \quad (1)$$

onde ρ é utilizada para indicar a massa específica e dm e dV são os elementos de massa e volume infinitesimal, respectivamente. No Sistema Internacional de Unidades (SI), a massa é medida em kg, o volume é medido em m^3 e a massa específica, em kg/m^3 .

Quando um fluido está em contato com a superfície do recipiente que o contém, exerce uma força perpendicular em cada ponto da superfície e podemos definir a pressão como sendo a força por unidade de área, dada pela relação

$$p = \frac{F}{A}, \quad (2)$$

onde p denota a pressão, F é a força perpendicular à superfície de contato (medida em N) e A é a área de contato com o fluido (medida em m^2). No SI, a pressão é medida em Pascal (Pa), que é N/m^2 .

Quando mergulhamos em um líquido, percebemos uma pressão em nossos ouvidos. Essa pressão é uma pressão hidrostática devido ao peso específico de água acima do nível de sua cabeça e, quanto mais fundo se mergulha, maior será a intensidade dessa pressão [11]. De modo muito similar, a pressão atmosférica diminui com a altitude. Portanto, a pressão hidrostática será dada pela relação [13]

$$p = \rho gh, \quad (3)$$

onde g é o módulo da aceleração da gravidade local (medida em m/s^2) e h é a profundidade (medida em m). Note que o produto ρg é definido como o peso específico. Essa relação entre a pressão hidrostática e a profundidade é conhecida como lei fundamental da hidrostática ou teorema de Stevin [14].

Em uma represa ou barragem, a superfície superior do fluido fica exposta e submetida à pressão atmosférica, que contribui com um termo adicional à pressão hidrostática total exercida pelo fluido em determinado nível da represa e será dada pela relação [15]

$$p = p_0 + \rho gh, \quad (4)$$

onde p_0 é a pressão atmosférica, definida como sendo a pressão que a atmosfera exerce ao nível do mar, que vale aproximadamente 101,325 kPa.

Ao nível do mar, a aceleração da gravidade tem um valor aproximado de $9,8 \text{ m/s}^2$. Contudo, para que a teoria aplicada seja o mais fiel possível à realidade, pode-se determinar o valor da aceleração da gravidade local utilizando a relação [15]

$$g_{\text{local}} = \frac{GM_T}{(R_T + y)^2}, \quad (5)$$

onde $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N} \times \text{m}^2/\text{kg}^2$ é a constante universal da gravitação, $M_T = 5,98 \times 10^{24} \text{ kg}$ e $R_T = 6,37 \times 10^6 \text{ m}$ são a massa e o raio da Terra, respectivamente, e y é a altitude local. Desse modo, como é conhecido que o valor da aceleração da gravidade não é uma constante, faz-se necessário realizar correções e cálculos mais precisos em equações que envolvam essa grandeza física.

Suponha que uma barragem de aterro possa ser modelada de acordo com a Fig. 3; então, podemos determinar a força total que o volume de água exerce sobre as paredes da barragem.

Uma vez que a pressão varia com a profundidade, devemos realizar uma integração a fim de determinar a força total. Tomamos o eixo vertical com sendo o eixo y , com y_0 sendo o fundo da barragem [16]. A estratégia adotada é fatiar a área de contato da barragem em elementos infinitesimais de altura dy . Suponha que a fatia em vermelho esteja a uma profundidade h da superfície livre da água contida na barragem. Assim, usando a Eq. (3), temos

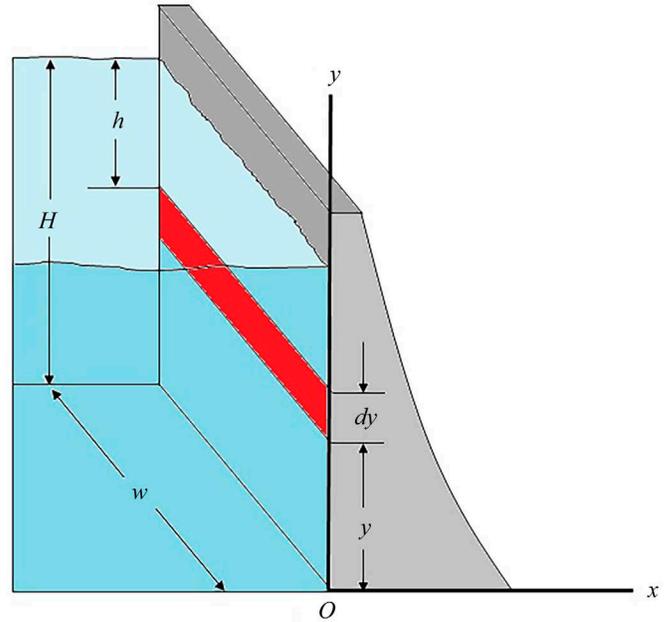


Figura 3 - Ilustração de uma barragem de aterro.

$$p = \rho gh = \rho g(H - y). \quad (6)$$

Substituindo a Eq. (6) na Eq. (2), para determinarmos o elemento infinitesimal de força dF que atua sobre a área marcada em vermelho $dA = w dy$, temos

$$dF = p dA = \rho g(H - y) w dy. \quad (7)$$

Integrando para obter o valor da força total a que a barragem fica submetida, temos

$$F = \int p dA = \int_0^H \rho g(H - y) w dy = \frac{1}{2} \rho g w H^2. \quad (8)$$

Note que a Eq. (8) pode ser obtida sem se usar cálculo diferencial e integral, já que a pressão varia linearmente com a profundidade, o que nos permite determinar a pressão média devida à água contida na barragem entre o topo e o fundo com

$$p_{\text{média}} = \frac{p_{\text{topo}} + p_{\text{fundo}}}{2} = \frac{0 + \rho g H}{2} = \frac{\rho g H}{2}. \quad (9)$$

Substituindo-se a Eq. (9) na Eq. (2), obtém-se

$$F = p_{\text{média}} A = \left(\frac{1}{2} \rho g H \right) (H w) = \frac{1}{2} \rho g w H^2, \quad (10)$$

que é idêntico ao resultado apresentado na Eq. (8).

Considerando a contribuição da pressão atmosférica p_0 , a Eq. (8) se reduz a [12]

$$F = \frac{1}{2}\rho g w H^2 + p_0 w H. \quad (11)$$

A seguir, apresentaremos as barragens de aterro que foram utilizadas para elaborar um modelo de barragem para utilização em aulas práticas de ensino de física, com o intuito de trabalhar conceitos pertinentes à hidrostática.

4. Sistema de alerta utilizando o Arduino e linguagem de programação

Utilizaremos o Arduino Uno R3 como dispositivo para identificar a infiltração de água no solo e para emitir um alerta de possível deslizamento da barragem. O Arduino (Fig. 4A) é uma plataforma de prototipagem eletrônica de código aberto baseada em *hardware* e *software* fáceis de usar. Ele é composto por uma placa de microcontrolador e um ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) para escrever e carregar códigos na placa [17]. Com o Arduino, pode-se manipular suas entradas e saídas nos formatos analógicos e digitais com diversos componentes, tais como sensores de temperatura, luz, motores, LEDs e *displays* [18]. Desse modo, esse dispositivo é um excelente recurso para a criação de projetos eletrônicos envolvidos com robótica, automação e computação.

A placa é baseada no microcontrolador Atmel AVR e conta com seu ambiente de programação Arduino IDE, onde o *framework* Wiring é utilizado com linguagem de programação C/C++ [19]. Além disso, a placa em geral é composta por seis partes, sendo elas: entradas digitais e analógicas contendo plug USB e conversor serial/USB, fonte de alimentação, pinos de alimentação e CPU [20].

Para realizar as conexões dos dispositivos com o Arduino, utilizamos uma *proto-board* (Fig. 4B) que serve como ponte para transmitir informações entre a placa

Um sistema de alerta emite sinais luminosos e sonoros, alertando sobre os riscos de ruptura iminentes de barragens

e os componentes no projeto. Os dispositivos utilizados no projeto do sistema de alerta são o LED (*light emitting diode*), o *buzzer*, o resistor e o sensor de umidade do solo (Fig. 4C a 4E).

O LED deverá ser acionado caso haja risco iminente de ruptura da barragem. Escolhemos um LED de intenso brilho na cor branca com 5 mm e valores nominais de 3 V e 0,02 A. Assim que o sensor de umidade do solo detectar a infiltração, o LED acenderá e apagará no intervalo de tempo definido (*delay*), pelo código de programação, conforme o anexo. O tempo em *delay* utilizado no código é de 500 ms [21].

O *buzzer* será utilizado para emitir um sinal sonoro de alerta de risco iminente de ruptura da barragem. Para reproduzir o efeito sonoro, utilizamos uma frequência de 900 Hz, com um *delay* de 500 ms. O mesmo alternará entre o estado ligado e o desligado no intervalo de 0,5 segundo [22].

Segundo Braga [23], os resistores têm a finalidade de gerar uma resistência elétrica, ou seja, criando uma barreira à passagem da corrente pelo circuito, desse modo diminuindo-a antes de chegar a um determinado componente, possibilitando seu manuseio sem danificá-lo. Utilizamos um resistor de 150 Ω (tolerância de 5%) conectado ao LED.

Finalmente, o sensor de umidade do solo é um componente eletrônico que detecta a resistividade da terra a partir da capacidade de identificar variações de umidade da terra. Segundo Jesus [24], o sensor baseia-se em um oscilador de frequência para gerar um campo de corrente alternada (AC), o qual serve como meio de detecção das propriedades dielétricas do solo naquele momento. Nesse processo, ao serem fincadas no solo, as sondas metálicas permitem a leitura da umidade relativa em função da resistência do solo e, portanto, a magnitude da constante dielétrica do solo varia sensivelmente com a quantidade de água presente. Desse modo, o sensor de umidade do solo permite acompanhar alterações no estado do solo e pode ser conectado com outros componentes como o LED e o *buzzer*.

O sensor opera entre dois estados na porta digital (0 e 1). Quando identificado um ambiente úmido, o sensor mostra o estado como 0 (estado baixo). Em contrapartida, quando se reconhece um solo seco, o sensor indica como 1 e a saída do sensor fica em estado alto. Já a porta analógica mostra-se de 0 a 1023. No estado seco, a porta acusa o valor de 1023 enquanto no estado úmido a porta acusa o valor 0.

Com os dispositivos descritos acima, utilizamos a plataforma de modelagem Tinkercad³ para elaborar um esboço do circuito eletrônico para aferição de umidade do solo e emissão de alerta de risco iminente (Fig. 5).

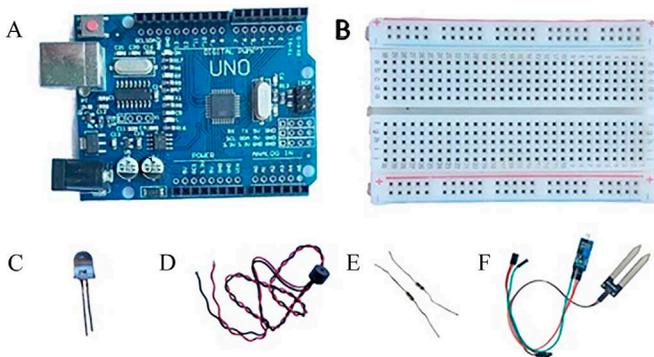


Figura 4 - Dispositivos eletrônicos utilizados no sistema de alerta de ruptura iminente da barragem. A) Arduino Uno R3. B) Proto-board de 400 pinos. C) LED branco 5 V e 5 mm. D) *Buzzer* passivo 5 V. E) Resistor de 150 Ω (tolerância 5%). F) Sensor de umidade do solo e comparador.

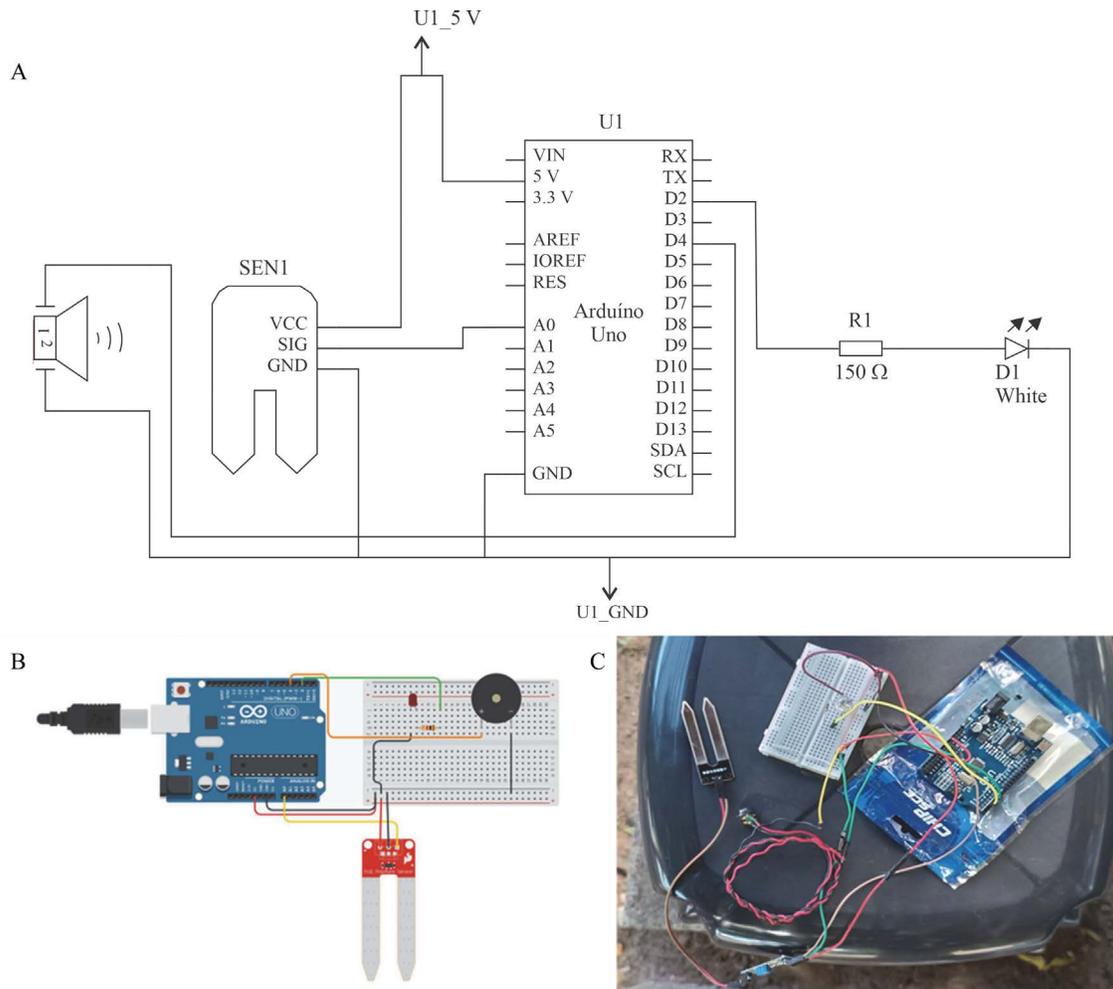


Figura 5 - Circuito do sistema de alerta de risco iminente de ruptura de barragem. A) Diagrama esquemático obtido no Tinkercad. B) Esquema de conexões dos dispositivos eletrônicos obtido no Tinkercad. C) Sistema de alerta de ruptura de barragem montado.

Portanto, o sensor de umidade do solo é inserido na barragem para monitorar a infiltração de água. Esse sensor mede a resistência do solo, que varia conforme a quantidade de água presente. O sensor de umidade está conectado ao Arduino via portas analógicas. Quando o sensor detecta um aumento na umidade (indicando possível infiltração), ele envia um sinal ao Arduino. Assim, o sistema de alerta entra em funcionamento. O Arduino aciona o LED branco de 5 mm. O LED piscará com um intervalo de 500 ms para indicar visualmente o risco iminente e, simultaneamente, o Arduino aciona o *buzzer* passivo para emitir um sinal sonoro intermitente com uma frequência de 900 Hz, também alternando em intervalos de 500 ms.

5. Construção do modelo de barragem de aterro

5.1. Materiais

Para a construção do modelo de barragem de aterro com sistema de alerta de ruptura iminente foram utilizados os seguintes materiais:

- 14 L de solo arenoso.
- 1 caixa organizadora ou aquário de acrílico/vidro de 29,0 L com 48,7 cm de largura; 27,6 cm de altura e 33,1 cm de profundidade.
- 1 placa Arduino Uno R3.
- 1 *protoboard*.
- 1 sensor de umidade de solo com comparador LM393.
- 1 resistor 150 Ω .
- 1 *LED* de alto brilho 5 mm e 3 V.
- 1 *buzzer* Speaker passivo 5 V.
- 1 trena.
- 1 pincel.
- 8 L de água.

Vale mencionar que os materiais supracitados são de baixo custo e acessíveis, objetivando tornar a montagem do experimento mais possível para aplicação em escolas da rede pública-privada nas aulas de física, possibilitando um aprendizado interdisciplinar e diversificado.

5.2. Procedimentos de montagem

A estrutura da barragem de aterro tem um formato que se assemelha a uma pirâmide. Desse modo, com o objetivo de definir suas dimensões, dividimos essa pirâmide em duas, chamando-as de talude de montante e talude de jusante. Desse modo, moldamos uma barragem com solo arenoso com o formato apresentado na Fig. 6. Para obtermos essa configuração, foram utilizados aproximadamente 14 L de solo arenoso drenado, ou seja, totalmente seco.

Determinando as áreas das porções a montante e a jusante com as dimensões apresentadas na Fig. 6, temos que a área a montante será de 220 cm^2 e a área a jusante será de 110 cm^2 . Deixamos 5 cm dispostos do lado da porção jusante, para que pudesse ser visualizado qualquer tipo de infiltração e possível deslizamento da barragem.

A fim de controlar o nível de infiltração da barragem e emissão de alerta, o sensor de umidade acoplado à placa de Arduino foi inserido na parte superior do modelo de barragem, conforme mostra a Fig. 7.

5.3. Resultados e discussão

Com a estrutura da barragem estabelecida e o sistema de alerta acoplado, introduzimos a água no reci-

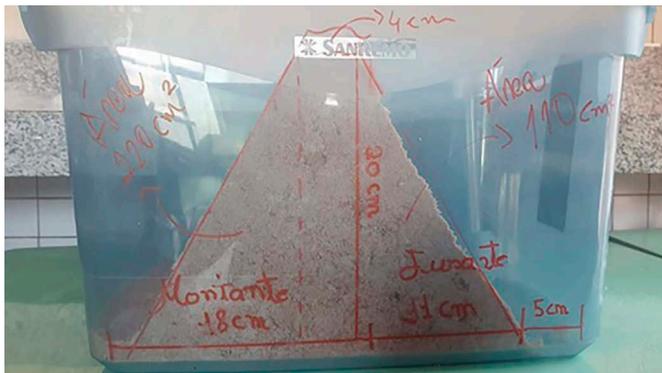


Figura 6 - Montagem da barragem de aterro e suas organizações.



Figura 7 - Sistema de alerta de ruptura de barragem acoplado na parte superior do modelo de barragem de aterro.

piente pelo lado montante de forma gradual e controlada, deixando-a o máximo em repouso possível para não afetar a estrutura da barragem. Para tal, utilizamos um recipiente de 500 ml. Essa opção foi escolhida para minimizar os efeitos da vazão d'água que se imprime quando se utiliza uma mangueira acoplada a uma torneira, por exemplo. Após preencher a porção jusante da barragem com aproximadamente 4 L d'água, o sistema de alerta de ruptura iminente de barragem começou a emitir os alertas sonoro e luminoso. Nesse ponto, a altura do nível d'água era de aproximadamente 12 cm. Assim, como foi definido na programação do Arduino, quando o sensor de umidade do solo identifica uma infiltração no talude de montante, a estrutura começa a rachar e indica possível rotura. Com efeito, os dispositivos eletrônicos *buzzer* e o LED sinalizaram a situação de alerta, demonstrando a calibração do sistema de alerta de risco iminente de ruptura de barragem. Continuamos preenchendo a represa com água e observamos a ruptura total da barragem quando o volume de água atinge seu ápice, com aproximadamente 7,5 L, quando presenciamos que a ruptura da barragem ocorreu na base, demonstrando que a pressão hidrostática exercida nas porções inferiores da barragem é elevada em comparação com a exercida na parte superior. Nesse momento, o nível da água presente na barragem era de aproximadamente 17 cm.

Inicialmente, pode-se determinar a força total a que o modelo de barragem ficará submetido quando preenchido totalmente por água. Contudo, cabe determinarmos o valor da aceleração da gravidade local antes de procedermos com os cálculos hidrostáticos. O modelo de barragem foi utilizado no município de Camaçari/BA, situado a $12^{\circ}41'51'' \text{ S}$, $38^{\circ}19'27'' \text{ O}$ e 36 m de altitude.⁴ Substituindo-se na Eq. (5) os valores para a constante universal da gravitação de $6,67 \times 10^{-11} \text{ N} \times \text{m}^2/\text{kg}^2$, massa da Terra igual a $5,98 \times 10^{24} \text{ kg}$, raio terrestre igual a 6370 km, obtemos $g_{\text{local}} = (9,8139 \pm 0,0003) \text{ m/s}^2$. A incerteza no valor da aceleração da gravidade local foi determinada a partir da Eq. (5) e da fórmula de propagação de erros dada por [25],

$$\sigma_w^2 = \left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2 \sigma_y^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)^2 \sigma_z^2, \quad (12)$$

onde $w = w(x, y, z, \dots)$ é uma grandeza genérica calculada como função de outras grandezas x, y, z, \dots que admitem incertezas padrão correspondentes $x \rightarrow \sigma_x, y \rightarrow \sigma_y, z \rightarrow \sigma_z$ e assim sucessivamente.

Podemos determinar a força total à qual a barragem fica submetida. Para isso, a massa específica da água considerada foi de 998 kg/m^3 , pressão atmosférica de 101,3 kPa, altura máxima da barragem de 20 cm, largura da barragem de 33,1 cm. Contudo, pela Fig. 5 nota-se que, pela configuração da barragem, a água que entrará em contato com a porção jusante exercerá uma força que incide sobre a superfície da barragem

com um ângulo θ de aproximadamente 48° , de modo que a Eq. (11) fica reescrita da seguinte maneira:

$$F = \frac{1}{2} \rho g_{local} w H^2 \sin \theta + p_0 w H. \quad (13)$$

Substituindo-se os valores mencionados, obtém-se uma força de $F = (6,7 \pm 0,2)$ kN. Essa é a força máxima que o volume de água exercerá sobre a parede da barragem de aterro. No momento em que o sistema de alerta de ruptura iminente foi acionado, a altura do nível da água era de 12 cm e a força exercida na barragem de aterro era de $F = (4,0 \pm 0,2)$ kN. À medida que a água foi gradativamente se infiltrando no solo arenoso, algumas porções de terra foram aos poucos caindo no tanque, perturbando o sistema da barragem. Nesse momento, a estrutura da barragem já está gravemente danificada e a sua ruptura é iminente, apresentando alto risco potencial. O desmoronamento total da barragem ocorre quando o nível da água atinge 17 cm e a força total a que a barragem estava submetida é de $F = (5,7 \pm 0,2)$ kN.

Vale mencionar que a Eq. (13) possui duas contribuições: uma que surge devido à pressão hidrostática da coluna de água represada pela barragem e a segunda devida à pressão atmosférica que atua sobre a superfície superior livre da água represada. No modelo de barragem de aterro utilizado neste trabalho, o valor máximo da força devida à pressão hidrostática fica limitado a 48 N. Para barragens de aterro reais, o volume de água represado é imenso e o valor da força resultante proveniente da pressão hidrostática do líquido represado pode facilmente superar o valor da pressão atmosférica.

Pode-se constatar claramente que o tipo de solo utilizado para construção da barragem terá influência direta na força total à qual ela pode ser submetida. Os cálculos acima determinam o valor de força máxima que a água irá aplicar sobre as paredes da barragem de aterro.

Além disso, nota-se que a geometria da estrutura também influencia na determinação da força total a que a barragem será submetida. Devido ao formato piramidal do modelo de barragem aqui apresentado, a intensidade da força que atuará na superfície da barragem é multiplicada pelo fator $\sin \theta$. Para ângulos menores, menor será a força total a que a barragem ficará submetida.

O sistema de alerta foi acionado quando foi detectada a infiltração da barragem, o que é um indicativo de falha na estrutura dessa instalação.

6. Considerações finais e perspectivas de trabalhos futuros

Esse modelo de barragem de aterro e seu sistema de alerta de risco de ruptura iminente foi elaborado com o propósito de tornar a aprendizagem de con-

ceitos relacionados à hidrostática mais fluido e eficaz, na medida em que aproxima os conceitos abordados em sala de aula com acontecimentos do cotidiano, além de utilizar materiais de baixo custo e acessíveis.

Os desastres ambientais de Mariana e Brumadinho trouxeram à tona medidas de segurança e acompanhamento das diversas barragens espalhadas não só por Minas Gerais, mas por toda a extensão nacional.

O sistema de alerta construído utilizando a plataforma Arduino Uno R3 é acionado quando os sensores detectam infiltração na estrutura da barragem e emitem sinais sonoros e luminosos de alerta. Aprimoramentos futuros podem ser realizados nesse sistema, como por exemplo a introdução de um sistema de envio de mensagens automáticas para as autoridades e moradores próximos às imediações das barragens.

Além disso, para se verificar o percurso do fluxo da água após o rompimento da barragem, pode-se utilizar tanques mais compridos.

Cálculos hidrostáticos mostram que a força total a que a barragem é submetida é de aproximadamente 6,7 kN e que o sistema de alerta é acionado quando a força total atinge um valor de aproximadamente 4 kN. Além

disso, a ruptura total da barragem ocorre quando a força total atinge um valor em torno de 5,7 kN.

Esse modelo de barragem é de fácil reprodução e execução, além de ser elaborado utilizando-se material de baixo custo. Contudo, seu transporte pode ser um pouco arriscado, tendo em vista que trepidações podem danificar facilmente a estrutura montada. Sugere-se construir sua instalação no local onde será realizada a demonstração. Nota-se também que o tempo de execução é relativo e depende das dimensões do tanque utilizado para a montagem da barragem.

Finalmente, o modelo de barragem proposto simula o deslizamento de barragens com sistema de monitoramento e oferece uma contribuição significativa para o ensino da física, integrando conceitos de hidrostática, geologia, segurança e computação. Baseado nas teorias de Piaget e Vygotsky, que enfatizam a construção ativa do conhecimento e a mediação social na aprendizagem, o projeto proporciona aos alunos uma experiência prática e real, aproximando a teoria da realidade cotidiana. Além de promover uma compreensão mais profunda dos princípios da física, ele estimula habilidades como pensamento crítico, resolução de problemas e análise de dados. A utilização de tecnologia de monitoramento e simulação favorece uma aprendizagem dinâmica e interativa, tornando o estudo da física mais relevante e aplicável e contribuindo para o desenvolvimento intelectual dos estudantes, preparando-os para lidar com questões complexas de forma mais eficaz e crítica.

O modelo de barragem com sistema de alerta foi desenvolvido para facilitar o ensino de hidrostática e conectar teoria e prática no ensino de física com materiais de baixo custo e replicáveis

7. Anexo: código de programação do sistema de alerta de ruptura com Arduino

Apresentamos abaixo os códigos envolvidos na programação do Arduino Uno R3 utilizado no sistema de alerta de ruptura de barragem de aterro.

Recebido em: 1 de Julho de 2024

Aceito em: 4 de Fevereiro de 2025

Notas

¹Fonte: Disponível em <https://pt.geologyscience.com/ramos-de-geologia/geologia-de-engenharia/constru%C3%A7%C3%A3o-de-barragem/>, acesso em 24/6/2024.

²Disponível em https://en.wikipedia.org/wiki/Simon_Stevin, acesso em 27/6/2024.

³<https://www.tinkercad.com/>, acesso em 24/6/2024.

⁴<https://www.redesocialdecidades.org.br./br/BA/camacari>, acesso em 27/6/2024.

Referências

- [1] B. Caniato, *Barragens em Minas Gerais Têm Risco Alto de Rompimento, diz Agência*. Revista Veja, 12 dez. (2023). Disponível em <https://veja.abril.com.br/coluna/maquiavel/barragens-em-minas-gerais-tem-risco-alto-de-rompimento-diz-agencia>, acesso em 28/6/2024.
- [2] M.R. Botelho, M.P. Faria, C.T.R. Mayr, L.M.G. Oliveira. *Revista Brasileira de Saúde Ocupacional* **46**, e16 (2021).
- [3] R.J.L. Jónatas, *Rotura de Barragens de Aterro por Galgamento: Ensaios Experimentais com Aterros Homogêneos*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Lisboa, 2013.
- [4] L.S. Vygotsky, *A Construção do Pensamento e da Linguagem* (Martins Fontes, São Paulo, 2001).
- [5] J. Piaget, *Classes, Relations et Nombres: Essai sur les Groupements de la Logique et sur la Réversibilité de la Pensée* (Librairie Philosophique J. Vrin, Paris, 1942).
- [6] D. Carvalho, *Barragens, Uma Introdução Para Graduandos* (Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas, 2011).
- [7] Brasil. *Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais*. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, p. 1, 21/9/2010.
- [8] G.G. Garbi, *A Rainha das Ciências: Um Passeio Histórico pelo Maravilhoso Mundo da Matemática* (Livraria da Física, São Paulo, 2010), 5ª ed.
- [9] S. Stevin, *La Disme, ou la Méthode de L'addition des Fractions Décimales* (A Source Book, Paris, 1585).
- [10] H.M. Nussenzveig, *Curso de Física Básica: Fluidos, Oscilações e Ondas, Calor* (E. Blucher, São Paulo, 2014), 5ª ed.
- [11] P.G. Hewitt, *Física Conceitual* (Bookman, Porto Alegre, 2015), 12ª ed.
- [12] P.A. Tipler, G. Mosca, *Física para Cientistas e Engenheiros, Volume 1: Mecânica, Oscilações e Ondas, Termodinâmica* (LTC, Rio de Janeiro, 2019).
- [13] A.M. Luiz, *Física 2: Gravitação, Ondas e Termodinâmica: Teoria e Problemas Resolvidos* (Livraria da Física, São Paulo, 2007).
- [14] D.D. Telles, J.M. Netto, *Física com Aplicações Tecnológicas: Volume 2: Oscilações, Ondas, Fluidos e Termodinâmica* (E. Blucher, São Paulo, 2013).
- [15] D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, *Fundamentos de Física: Volume 2: Gravitação, Ondas e Termodinâmica* (LTC, Rio de Janeiro, 2016), 10ª ed.
- [16] J.W.J. Jewett, R.A. Serway, *Física para Cientistas e Engenheiros, Volume 1: Mecânica* (Cengage Learning, São Paulo, 2023).
- [17] J.L.S. Silva, M.M. Cavalcante, R.S. Camilo, A.L. Galindo. In: *XIV Escola Regional de Computação Bahia, Alagoas e Sergipe (ERBASE)*. Feira de Santana, 2014.
- [18] A.R. Souza, A.C. Paixão, D.D. Uzêda, M.A. Dias, S. Duarte e cols. *Revista Brasileira de Ensino de Física* **33**, 1702 (2011).
- [19] R. Alencar, J.A. Moreira, U.S. Nogueira, In: *Anais do Workshop de Informática na Escola*, Recife, 2017.
- [20] K.C.B. Cunha, R.V. Rocha, *Revista Eletrônica Competências Digitais para Agricultura Familiar* **1**, 200 (2015).
- [21] V.A. Scopacasa, *Revista LA_PRO* **1**, 5 (2008).
- [22] D.F. Borges, C.H.J. Oliveira, H.Q. Freitas, A.M. Jesus, F.C.A. Viali e cols. *Brazilian Journal of Development* **7**, 59555 (2021).
- [23] N.C. Braga, *Eletrônica Básica para Mecatrônica* (Saber, São Paulo, 2005).
- [24] J.E.G. Jesus, *Desenvolvimento de Sensor de Umidade do Solo Utilizando Microcontrolador Arduino*. Trabalho de Conclusão de Curso, UFRPE, 2022.
- [25] J.H. Vuolo, *Fundamentos da Teoria de Erros* (E. Blucher, São Paulo, 1996), 2ª ed.