

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA POLITÉCNICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS E PETRÓLEO**

**TRABALHO DE FORMATURA EM ENGENHARIA DE  
MINAS**

**ESTUDO DA PERCOLAÇÃO DA ÁGUA EM BARRAGENS**

**THAYS DE SOUZA JOÃO LUIZ N ° USP 3181478  
ORIENTADOR: PROF. DR. LINDOLFO SOARES**

2003

TF-2003  
L968e  
1424405

M2003E

**DEDALUS - Acervo - EPMI**



31700005481

## SUMÁRIO

<i>Agradecimentos .....</i>	<i>2</i>
<i>Resumo.....</i>	<i>3</i>
<i>Introdução.....</i>	<i>4</i>
<i>Objetivos.....</i>	<i>5</i>
<i>O problema da percolação da água nas barragens .....</i>	<i>6</i>
<i>A realização do experimento .....</i>	<i>8</i>
<i>Determinação da velocidade de percolação da água .....</i>	<i>10</i>
<i>Resultados obtidos .....</i>	<i>12</i>
<i>A escolha das barragens.....</i>	<i>14</i>
<i>A importância deste experimento .....</i>	<i>16</i>
<i>Anexo – Fotos do Experimento.....</i>	<i>18</i>
<i>Bibliografia.....</i>	<i>19</i>

**Agradecimentos**

Ao meu orientador Prof. Dr. Lindolfo Soares pelo incentivo e confiança.

À minha mãe pelo apoio inesgotável.

A todos que me ajudaram na execução deste trabalho.

## Resumo

O presente trabalho reúne elementos para o projeto de barragens de rejeito através de ensaios em pequena escala utilizando protótipos de barragens de rejeito. O texto visa ao estudo da velocidade de percolação da água nas maquetes utilizadas nos experimentos, estabelecendo uma correlação entre a presença ou ausência de elementos estruturais que compõem a barragem (*cut off*) e a velocidade de percolação. O texto apresenta também parâmetros para determinação da viabilidade de projeto de uma barragem de rejeito com base em parâmetros geológicos e geotécnicos.

## **Introdução**

Este trabalho sobre Barragens consiste numa experiência que mede a velocidade de percolação da água e a permeabilidade da água em duas maquetes de barragens.

A primeira maquete é de uma barragem simples e a segunda é de uma barragem com trincheira. Foram calculadas as velocidades de percolação da água e permeabilidade da água nos solos das duas barragens. Os resultados obtidos serão utilizados na escolha de uma melhor barragem para se utilizar no campo levando em consideração os aspectos geológicos, geotécnicos e estruturais da construção de barragens de rejeito.

## **Objetivos**

Tendo em vista a existência de vasta literatura qualificada sobre o tema Barragens de Rejeito, este trabalho não possui a pretensão de ser inovador com relação. Mas pretende ressaltar mais uma vez, a importância de se projetar barragens de rejeitos levando em conta a construção de fundações seguras e não apenas as viabilidades técnica e financeira da implantação de barragens.

A construção de barragens de rejeitos remonta aos tempos mais longínquos da civilização. Por isso, cada tratamento novo que se dá ao tema de barragens torna-se uma contribuição para os envolvidos com o projeto de construção e melhoria de barragens.

Projetar barragens mais seguras deve ser o objetivo principal de todos os profissionais envolvidos na sua construção. A preocupação com o problema da percolação da água nas barragens não é mera preocupação com aspectos da construção civil. Consiste numa preocupação ambiental para garantir a segurança nas barragens, para isso são aplicadas medidas preventivas contra acidentes e implementa-se o aproveitamento racional da água. O controle de inundações nas fundações das barragens tem como objetivo o aproveitamento racional dos recursos hídricos.

## O problema da percolação da água nas barragens

A construção de barragens em boas condições de segurança contra erosão, assoreamento, desmoronamentos e efeitos decorrentes de abalos sísmicos, deve levar em consideração a permeabilidade do terreno e a velocidade de percolação da água nos solos onde as barragens se encontram assentadas.

Solos muito permeáveis, com destaque para os solos arenosos, apresentam alta velocidade de percolação da água, que ocasiona a diminuição da estabilidade das fundações que estão sobre os solos. Logo, as barragens construídas sobre solos muito permeáveis possuem maior tendência à ruptura, porque seus esforços resistentes são diminuídos e os coeficientes de segurança das barragens são reduzidos.

Os protótipos ensaiados ao permitirem a determinação da permeabilidade do terreno e velocidade de percolação da água, tornam possível a escolha de um local melhor cujo solo é mais adequado para se construir barragens estáveis.

Para a realização deste experimento foram construídas duas barragens impermeáveis e uma trincheira impermeável também. A velocidade de percolação da água ficou condicionada à permeabilidade do solo. A trincheira na segunda maquete teve o papel de *cut off parcial*, ou seja, um tratamento na fundação da barragem que permite a diminuição da permeabilidade do terreno por meio da construção de um desvio no trajeto da água. Isto garante a estabilidade das fundações da barragem e a segurança no projeto das barragens de terra.

A maquete que apresentar menores velocidades de percolação da água e menores coeficientes de permeabilidade será escolhida com a mais adequada ao projeto executivo de barragens.

A preocupação com a velocidade de percolação da água nas barragens nunca é excessiva, porque a percolação de água nas barragens ocasiona rupturas nas fundações, compromete as estruturas drasticamente e gera muitos riscos geológicos.



O compromisso em garantir menores velocidades de percolação da água deve ser atendido primordialmente. A segurança das barragens depende da redução dos efeitos da percolação água. A presença inadequada da água nas fundações ainda continua sendo o principal fator condicionante dos riscos geológicos nas barragens.

### A realização do experimento

O experimento realizado neste trabalho tem por objetivo medir a velocidade de percolação da água em duas maquetes de barragens, sendo a primeira maquete possui apenas a fundação principal da barragem e a segunda maquete apresenta além da fundação principal, uma trincheira.

As maquetes consistem em duas caixas de vidro sem tampa, com as seguintes dimensões: 20 cm x 20 cm x 50 cm. O vidro foi utilizado para permitir uma melhor visualização das linhas de fluxo d'água durante o experimento e também para dar um caráter mais ilustrativo ao trabalho.

Em cada caixa de vidro foram colocados:

- 6 kg de areia com granulometria média não compactada, até a altura de 7 cm;
- um medidor de nível da água feito de tubo PVC, com  $\frac{3}{4}$  " de diâmetro e aproximadamente 18 cm de altura, envolvido por tecido BINDIM (para impermeabilização).

Para a primeira caixa foi construída uma barragem de vidro em forma de tronco de pirâmide que está colocada sobre a areia. Na segunda caixa foi construída uma trincheira de vidro, também em forma de tronco de pirâmide, que encontra-se enterrada com a base maior para cima. Em cima desta trincheira, encontra-se uma barragem de vidro na mesma forma de tronco de pirâmide, que está colocada sobre a areia sem afundar.

Terminada a montagem das maquetes, partiu-se para a realização do experimento. A experiência consistia em colocar nas caixas volumes crescentes de água e medir o tempo que a água levava para atravessar toda a fundação de vidro que constitui a barragem. Na água, foi misturado um corante verde fosforescente e biodegradável chamado URANINA com o intuito de demarcar a trajetória da água para possibilitar uma melhor visualização das linhas de fluxo. Através do efeito fosforescente do corante torna-se mais fácil a tomada das medidas referentes à distância percorrida pela água e seu respectivo intervalo de tempo. O corante URANINA é muito utilizado em experiências com barragens em escala natural para monitoramentos hidrológicos, geológicos e geotécnicos.

Ao final da realização do experimento foram obtidos três grupos de dados para a barragem simples e dois grupos de dados para barragem com trincheira. Não foi possível a utilização do medidor de nível d'água para obter o nível da água nos piezômetros nem determinar a perda de carga durante a colocação dos volumes de água nas maquete, porque a água não se elevou para dentro dos piezômetros. O trajeto da água foi retilíneo. Estes fatos se devem à escala muito reduzida das barragens inviabilizou a obtenção de maiores amostras de dados e a medição de mais parâmetros durante o experimento.

### Determinação da velocidade de percolação da água

Os grupos de dados obtidos para cada barragem foram os volumes de água adicionados nas barragens, a distância percorrida pelo fluxo d'água e o tempo gasto para percorrer tal distância.

A partir destes dados obteve-se a carga efetiva **CE**, em  $\text{kg/cm}^2$  de cada volume adicionado sabendo-se que a área efetiva sujeita à carga de pressão em cada barragem era de  $310 \text{ cm}^2$ .

Depois determinou-se a vazão específica **QE**, através da expressão abaixo:

$$QE = \frac{Q}{L} \quad (1)$$

onde  $Q = \text{vazão} = \frac{\text{volume}}{\text{tempo}} = [\text{L/min}]$

$L = \text{comprimento [m]} = 1 \text{ m}$  no experimento

Em seguida calculou-se a perda de carga específica **PE**, desta forma:

$$PE = \frac{QE}{CE} \quad (2)$$

onde **QE** = a vazão específica = [(L/min)/m]

**CE**= a carga específica aplicada = [kg/cm<sup>2</sup>]

Finalmente, calculou-se a permeabilidade do terreno **k**, em cm/s, pela expressão abaixo:

$$k = PE \times 10^{-4} \quad (4)$$

A velocidade de percolação, **v**, em cm/s, foi determinada pela expressão:

$$v = \frac{d}{\Delta t} \quad (5)$$

onde **d** = distância percorrida pela água

**Δt** = intervalo e tempo para percorrer tal distância

O experimento restringiu-se apenas na determinação da permeabilidade do terreno e da velocidade de percolação da água nas duas maquetes porque estes dados são parâmetros importantes na escolha da maquete de barragem mais adequada em termos construtivos e de segurança. Sendo que a escolha se baseia na análise cuidadosa destes parâmetros.

## **Resultados obtidos**

As tabelas seguintes contêm todos os dados medidos e determinados durante o experimento. Convém chamar a atenção para os valores da **velocidade de percolação (v)** e a **permeabilidade do terreno (k)** obtidos para cada protótipo de barragem.

Tabela 1 – Dados referentes à barragem simples

Volum e (mL)	Área (cm <sup>2</sup> )	Peso (kg)	$\Delta t$ (s)	Distância (m)	Velocidade de percolação (cm/s)	CE (kg/cm <sup>2</sup> )	QE ( <u>L/mi</u> <u>n</u> m)	PE ( <u>L/min</u> (kg/cm <sup>2</sup> )	k (cm/s)
1.240	310	1,240	47	25	0,53	$4,0 \cdot 10^{-3}$	1,58	395	0,0395
1.560	310	1,560	45	32	0,71	$5,03 \cdot 10^{-3}$	2,08	414	0,0414
1.600	310	1,600	45	46	1,02	$5,16 \cdot 10^{-3}$	2,13	413	0,0413

Tabela 2 – Dados referentes à barragem com trincheira

Volum e (mL)	Área (cm <sup>2</sup> )	Peso (kg)	$\Delta t$ (s)	Distância (m)	Velocidade de percolação (cm/s)	CE (kg/cm <sup>2</sup> )	QE ( <u>L/mi</u> <u>n</u> m)	PE ( <u>L/min</u> (kg/cm <sup>2</sup> )	k (cm/s)
1.340	310	1,340	102	26	0,25	$4,3 \cdot 10^{-3}$	0,78	181	0,0181
1.900	310	1,900	70	40	0,57	$6,1 \cdot 10^{-3}$	1,63	267	0,0267

### **A escolha das barragens**

Por meio da análise dos dados referentes às duas maquetes foi possível constatar que a velocidade da água e a permeabilidade do terreno são maiores na barragem simples da primeira maquete.

Na maquete da barragem com trincheira os valores da velocidade de percolação chegam a ser a metade dos valores obtidos na barragem simples. E a permeabilidade no terreno da barragem com trincheira é duas vezes menor que no terreno da barragem simples.

Com base nestes resultados é possível afirmar que a melhor barragem para se construir em campo é a barragem com trincheira da segunda maquete. Através dela garante-se uma menor permeabilidade do terreno minimizando-se assim os efeitos causados pela percolação da água.

Em ambas as barragens haverá a percolação da água, no entanto, esta será menor na barragem com trincheira. O problema da percolação é inviável de ser totalmente extinguido, ele ocorre inclusive em solos argilosos compactados, onde a água atinge coeficientes de permeabilidade reduzidos e baixíssimas velocidades de percolação.

É possível observar que os valores das velocidades de percolação e dos coeficientes de permeabilidade nas duas maquetes de barragem são muito maiores do que aqueles geralmente encontrados nas barragens convencionais.

Isto ocorreu porque embora as dimensões das barragens tenham sido muito reduzidas para executar o experimento, não houve redução a mesma redução no tamanho das partículas de areia constituintes dos solos das barragens. Nas barragens em escala natural, o peso da fundação sobre o solo diminui o número de vazios entre os grãos constituintes do terreno. Os grãos de areia encontram-se mais unidos sob a ação de forças coesivas. Com isso, água percola com maior dificuldade por entre os espaços vazios do terreno.



No experimento com as maquetes, as barragens de vidros exercem um peso consideravelmente menor sobre o terreno. Os grãos de areia apresentam-se mais espaçados e isto facilita a percolação da água por entre eles. Nos protótipos de barragens, a água apresentou maiores velocidades de percolação porque a presença de espaços maiores entre os grãos de areia acabou permitindo que água percolasse com mais facilidade.

### **A importância deste experimento**

Este experimento envolveu a utilização de barragens em escala muito reduzida. As pequenas dimensões das barragens influíram na redução do número de amostras fornecidas pelo ensaio, e ocasionaram o aumento dos valores das velocidades de percolação da água e dos coeficientes de permeabilidade da areia no terreno conforme discutido anteriormente.

Além de permitirem a escolha da barragem mais segura, as maquetes serviram como modelos simples de permeâmetros que são aparelhos utilizados em laboratório para se determinar a permeabilidade de amostras de solo. Estas amostras podem ser de solos argilosos, arenosos, siltosos ou de composição mista. Neste experimento, as maquetes serviram como permeâmetros para solos arenosos.

No momento, não é possível afirmar se as maquetes também servem como permeâmetros para solos argilosos, siltosos ou de composição mista, porque a mesma experiência com as maquetes não foi realizada para estes tipos de solos.

A barragem com trincheira, sem dúvida, é a mais adequada para minimizar o efeito da percolação da água em barragens. A trincheira desvia o caminho da água no solo, dificultando a sua percolação no terreno, e diminuindo seu acúmulo nas camadas do solo e nas fundações que compõem a estrutura da barragem.

O fato das partículas não terem sido reduzidas na mesma escala, ou numa escala proporcional a que foram reduzidas as dimensões das barragens, tornou-se um fator importante na obtenção dos resultados do experimento e na sua posterior análise.

É conveniente chamar a atenção para o fato de que este experimento dará amostras mais significativas de resultados, se for repetido mudando-se os parâmetros construtivos das maquetes. Por exemplo, poder-se-ia utilizar uma barragem que não fosse de vidro e sim de solo compactado, ou construir uma barragem com um tapete drenante de vidro, ou até mesmo manter as mesmas barragens deste experimento mas usando solos de diferentes graus de compactação. Por meio desta ou de mais modificações, as maquetes de barragens tornar-se-ão modelos mais representativos da realidade, podendo propiciar um melhor monitoramento da segurança nas barragens de rejeito convencionais.

**Anexo – Fotos do Experimento**

No anexo, encontram-se as fotos referentes aos dois protótipos de barragem utilizados na realização do presente trabalho.

**Bibliografia**

SOARES, L. Geologia de Engenharia. São Paulo. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo , 2002. [Notas de Aula]

OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. (Ed.). Geologia de Engenharia. São Paulo: ABGE, 1998.

**ANEXO**

**FOTOS DO**

**EXPERIMENTO**















