

ESTUDO DA REDE DE FLUXO NO CORPO DE UMA BARRAGEM DE TERRA HOMOGÊNEA

Renan Rodrigues Parra Assumpção Ferreira¹, Fernando Cesar Dias Ribeiro³

^{1,3} Engenharia Civil, Centro Universitário FEI

renan.rpa.ferreira@hotmail.com, fcribeiro@fei.edu.br

Resumo: O presente trabalho tem por objetivo estudar a rede de fluxo no maciço de uma barragem de terra homogênea decorrente da diferença de potencial hidrostático entre montante e jusante. As vazões da rede serão determinadas a partir de modelagem computacional e medições em um modelo físico, construído na escala 1:100.

1. Introdução

O escoamento da água em regime permanente, no aterro de uma barragem de terra, partindo-se do lado de maior potencial hidrostático para o de menor potencial, isto é, de montante à jusante, recebe o nome de Rede de Fluxo, e é regido pela equação da continuidade de Laplace. Esta, assume o formato descrito na Equação 1, quando o solo apresenta isotropia quanto à condutividade hidráulica e o escoamento é bidimensional. [1]

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

Esta equação, representa duas famílias de curvas denominadas linhas de fluxo, que descrevem a trajetória das partículas no escoamento, e linhas equipotenciais, superfícies de mesma carga piezométrica, ortogonais entre si.

A partir do cálculo de percolação, que se baseia na Lei de Darcy, descrita na Equação 2, é possível determinar a vazão total da rede.

$$Q = k \cdot i \cdot A \quad (2)$$

A Figura 1 ilustra uma rede de fluxo no aterro de uma barragem de terra [2].

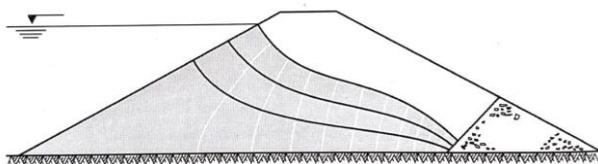


Figura 1 – Rede de Fluxo em barragem de terra [2].

2. Metodologia

Objetivando a análise do comportamento de redes de fluxo no maciço de uma barragem de terra homogênea, por distintas modelagens, a metodologia do projeto seguiu as etapas descritas:

- Revisão bibliográfica acerca dos principais métodos de dimensionamento geotécnico de barragens de terra, especialmente quanto às inclinações dos taludes, altura, largura de crista e sistemas de drenagem interna;
- Projeto e dimensionamento do modelo estudado, incluindo fundação permeável, aterro da barragem e dispositivos de controle de percolação;
- Ensaios de compactação Proctor Normal e determinação do coeficiente de permeabilidade a carga variável no solo argiloso empregado no aterro, regidos

pelos normas NBR 7182 e NBR 14545, respectivamente e determinação do coeficiente de permeabilidade em solos granulares a carga constante conforme NBR 13292;

- Modelagem geotécnico-computacional, através do *software Rocscience – Slide*, para determinação da vazão teórica da rede de fluxo do modelo em estudo, com base nos parâmetros $\gamma_{d,máx}$ e coeficiente de permeabilidade (k) obtido nos ensaios no solo realizados em laboratório;
- Construção do modelo físico no laboratório de Engenharia Civil do Centro Universitário da FEI, incluindo tanque de acrílico, sistemas hidráulicos de abastecimento, vertedouros, instalação dos piezômetros, fundação permeável, parede diafragma de bentonita, aterro e sistemas de drenagem interna;
- Medições de vazão e carga piezométrica no modelo físico;
- Comparação e discussão dos resultados obtidos em ambas as modelagens;
- Conclusões e considerações finais sobre o projeto.

3. Resultados

A seguir, são apresentados os principais resultados obtidos no decorrer do projeto, referentes aos ensaios de permeabilidade do material argiloso e granular, ao ensaio de compactação Proctor Normal, ao ensaio desenvolvido neste projeto para determinação do grau de compactação do aterro do modelo físico, as vazões da rede de fluxo teórica e real, e as leituras piezométricas nos taludes de montante e jusante.

Os parâmetros do solo obtidos no ensaio de compactação Proctor Normal são: peso específico seco máximo, ordenada de maior valor na curva de compactação, e teor de umidade ótimo, correspondente à abscissa do ponto de máximo da curva. Estes valores, obtidos graficamente são de 1,56 g/cm³ e 24,5%, respectivamente, e estão apresentados na Figura 2.

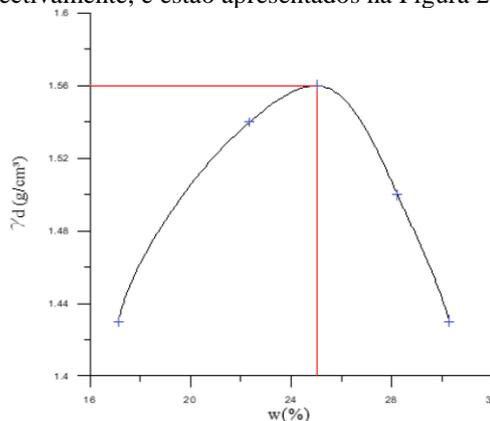


Figura 2 – Ensaio de Compactação Proctor Normal.

Para determinação do coeficiente de permeabilidade (k) do material argiloso do aterro, foi realizado o ensaio regido pela NBR 14545 [3]. Para tanto, foram realizadas 3 medições para obter um resultado médio que possa mitigar eventuais discrepâncias nas medições. A Tabela 1, reúne os resultados obtidos nas três medições. O valor médio foi de $7,57 \cdot 10^{-7}$ cm/s.

MEDIDA 1			MEDIDA 2			MEDIDA 3		
Dados de Entrada			Dados de Entrada			Dados de Entrada		
d _{tubo}	2,8	cm	d _{tubo}	2,8	cm	d _{tubo}	2,8	cm
T _{água}	20,0	°C	T _{água}	21,0	°C	T _{água}	20,5	°C
Δt	87180,0	s	Δt	335940,0	s	Δt	97200,0	s
H _{inicial}	73	cm	H _{inicial}	72,4	cm	H _{inicial}	80	cm
H _{final}	72,4	cm	H _{final}	71	cm	H _{final}	79,4	cm
Dados de Saída			Dados de Saída			Dados de Saída		
K _{temp}	9,44E-07	cm/s	K _{temp}	5,79E-07	cm/s	K _{temp}	7,72E-07	cm/s
Cte	1,000000		Cte	0,975000		Cte	0,989000	
K _{20°C}	9,44E-07	cm/s	K _{20°C}	5,65E-07	cm/s	K _{20°C}	7,64E-07	cm/s

Tabela 1 – Resultado do ensaio para determinação do coeficiente de permeabilidade do material argiloso.

Quanto ao coeficiente de permeabilidade do material granular utilizado no sistema de drenagem interna, o ensaio realizado seguiu a NBR 13292 [4], e obteve-se valor médio de 2,592 cm/s, conforme é demonstrado na Tabela 2.

MEDIDA	V (cm³)	Δt (s)	Q (cm³/s)	ΔH (cm)	k (cm/s)
1	373	29,85	12,496	0,5	2,864
2	317	24,90	12,731	0,6	2,431
3	465	35,78	12,996	0,6	2,482
k _{médio}					2,592

Tabela 2 – Resultado do ensaio para determinação do coeficiente de permeabilidade do material granular.

A Figura 2 exibe a modelagem no *software Rocscience – Slide*, para a determinação da vazão teórica de 11,4 L/dia. Para esta modelagem considerou-se coeficiente de permeabilidade da argila bentonita empregada na parede diafragma de $2 \cdot 10^{-7}$ m/s.

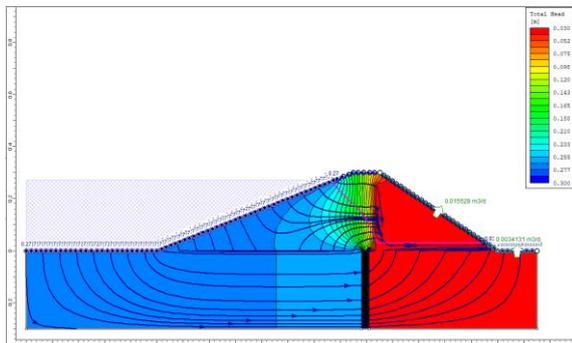


Figura 2 – Modelagem geotécnico-computacional para determinação da vazão da rede de fluxo.

Para o modelo físico construído na escala 1:100, a determinação da vazão real foi feita em 5 medições consecutivas com duração de 24 horas cada. Os resultados de cada ensaio assim como a vazão média de 13,73 L/dia, são exibidos na Tabela 3.

ENSAIO	M _{água} (kg)	T(°C)	ρ (kg/L)	V _{água} (L)	Q (L/dia)
1	14,2	20	0,998207	14,23	14,23
2	12,9	20	0,998207	12,92	12,92
3	14,2	21	0,997990	14,23	14,23
4	13,4	20	0,998207	13,42	13,42
5	13,8	20	0,998207	13,82	13,82
				Q _{média}	13,73

Tabela 3 – Resultados da vazão real do modelo físico.

4. Conclusões

Partindo-se da comparação entre os resultados de vazão obtidos em ambas as modelagens, conclui-se que o comportamento do escoamento de fluido no aterro de uma barragem é bem similar às previsões teóricas, sendo notável a formação de superfícies equipotenciais e linhas de fluxo, concretizando, portanto, a teoria de redes de fluxo.

O resultado numérico da vazão da rede, por sua vez, apresentou discrepâncias entre as modelagens. Fato este ocorrido possivelmente por razões construtivas do modelo físico (controle de compactação, influência dos vazios do solo no modelo em escala, etc.) e por falta de considerações de fenômenos importantes na modelagem geotécnico-computacional (efeitos de fronteira nas regiões de contato acrílico-solo e irregularidades na interface de materiais de diferentes granulometrias).

4. Referências

- [1] DAS, Braja M.; SOBHAN, Khaled. *Fundamentos de engenharia geotécnica*. 8 ed. Tradução Noveritis do Brasil. Revisão técnica Roberta Boszczowski. São Paulo: Cengage Learning, 2014.
- [2] PINTO, Carlos de S. *Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas*. 3 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.
- [3] Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 14545 Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável*. 2015.
- [4] Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 13292 Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante*. 2014.

Agradecimentos

Ao Centro Universitário FEI por fomentar a pesquisa acadêmica através do programa de Iniciação Científica.

¹ Aluno de IC do Centro Universitário FEI. Projeto com vigência de 05/17 a 04/18.