

Geotecnia de
BARRAGENS
em **ARENITOS**



Em todo serviço bem feito,
o Sistema Confex/Crea
está ao seu lado.



Muito mais do que materiais e equipamentos, tudo que é bem construído ou bem reformado tem junto o Sistema Confex/Crea fiscalizando a documentação, conferindo os registros dos profissionais e garantindo a segurança de quem trabalha e de quem contrata.

Na cidade ou no campo, conte com o profissional do Sistema Confex/Crea.

ERALDO LUPORINI PASTORE
MANOEL DE S. FREITAS JR

Geotecnia de
BARRAGENS
em **ARENITOS**



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA
DE ENGENHARIA E AMBIENTAL

São Paulo, 2022

2022, Associação Brasileira de Geologia de Engenharia – ABGE

Av. Professor Almeida Prado, 532 – Prédio 36 – 2º andar

Cidade Universitária – São Paulo – SP – CEP: 05508-901

Impresso no Brasil

Autores

Eraldo Luporini Pastore

Manoel de Souza Freitas Jr

Projeto Gráfico, Diagramação e Capa

Rita Motta – Editora Tribo da Ilha

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)**

Pastore, Eraldo Luporini
Geotecnia de barragens em arenitos / Eraldo
Luporini Pastore, Manoel de Souza Freitas Junior. --
1. ed. -- São Paulo : ABGE, 2022.

ISBN 978-65-88460-05-4

1. Arenito - Análise 2. Barragens em arenitos -
Projetos e construção - Brasil 3. Geotecnia -
Barragens 4. Mecânica das rochas I. Freitas Junior,
Manoel de Souza. II. Título.

22-101696

CDD-624.1

Índices para catálogo sistemático:

1. Geotecnia 624.1

Maria Alice Ferreira - Bibliotecária - CRB-8/7964

A ABGE, os autores, integrantes de equipe, revisores e o editor não possuem responsabilidade de qualquer natureza por eventuais danos ou perdas a pessoas ou bens originados do uso desta publicação.

Todos os direitos reservados à ABGE



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA
DE ENGENHARIA E AMBIENTAL

DIRETORIA ABGE GESTÃO 2021/2022

Presidente: Delfino Luiz Gouveia Gambetti
Vice Presidente: Fernando Facciolla Kertzman
Diretora Secretária: Marcela Penha Pereira Guimarães
Diretora Financeira: Sílvia Maria Kitahara
Diretora de Comunicação: Maria Heloisa B. Oliveira Frascá
Diretor de Eventos: Otávio C. Brasil Gandolfo

Conselho Deliberativo: Ana Elisa Abreu, Delfino Luiz Gouveia Gambetti, Fábio Augusto Gomes Vieira Reis, Fernando Facciolla Kertzman, Iramir Barba Pacheco, Ivan José Delatim, João Antônio Curtis, João Paulo Monticelli, José Luiz Albuquerque Filho, José Tarcísio de Melo Pinheiro, Marcela Penha Pereira Guimarães, Maria Heloisa B. Oliveira Frascá, Otávio C. Brasil Gandolfo, Renata Augusta Rocha N. de Oliveira, Ricardo Antônio Abrahão, Ricardo Vedovello e Sílvia Maria Kitahara.

Conselho Consultivo: Adalberto Aurélio Azevedo (Presidente), Carlos Manoel Nieble, Fernando Facciolla Kertzman, Fernão Paes de Barros, Jayme de Oliveira Campos, Giacomo Ré, Guido Guidicini, Kenzo Hori, João Jerônimo Monticelli, Luiz Ferreira Vaz (in memoriam), Luiz Francisco Saragiotto, Maria Heloisa Barros de Oliveira Frascá, Murillo Dondici Ruiz, Nivaldo José Chiossi, Tarcísio Barreto Celestino e Wilson Shoji Yiomasa.

NÚCLEO CENTRO-OESTE

Presidente: Gabriel do Nascimento Ribeiro
Conselho Deliberativo: Bruna Maria Cruz Fernandes, Caiubi Emanuel Souza Kuhn, Diogo Eduardo de Oliveira Martins, Kurt João Albrecht, Patrícia de Araújo Romão, Rodrigo Luiz Gallo Fernandes e Raphael Teixeira de Paiva Citon

NÚCLEO MINAS GERAIS

Presidente: Romildo Dias Moreira Filho
Conselho Deliberativo: Alberto Ferreira Do Amaral, Ângelo Almeida Zenobio, Ellen Delgado Fernandes, Fábio Soares Magalhães, Frederico Nascimento Mendes Bezerra, Luís de Almeida P. Bacellar, Maria Giovana Parizzi e Yan Lucas de Oliveira Pereira Dos Santos.

NÚCLEO NORTE

Presidente: Dianne Danielle Farias Fonseca
Conselho Deliberativo: Claudio Fabian Szlafsztein, Elton Rodrigo de Andretta, Iris Celeste Nascimento Bandeira, José Sidney Barros, Milena Marília Nogueira de Andrade e Sheila Gatinho Teixeira.

NÚCLEO RIO DE JANEIRO E ESPÍRITO SANTO

Presidente: Marcela Tuler Castelo Branco
Conselho Deliberativo: Aline Pimentel da Silva, Altair Carrasco de Souza, Ana Caroline Duarte Dutra, Analice Ramos Pereira Gomes, Cristiane Tinoco dos Santos, Giovanna Tristão Rodrigues da Cunha, Nelson Meirim Coutinho, Thiago Dutra Dos Santos e Raquel Batista Medeiros da Fonseca.

NÚCLEO SUL

Presidente: Erik Wunder
Conselho Deliberativo: Adelar José Strieder, Andrea Valli Nummer, Adriana Ahrendt Talamini, Cezar Augusto Burkert Bastos, Débora Lamberty, Karina Retzlaff Camargo, Malva Andrea Mancuso e Mariano Badalotti Smaniotto.

SECRETARIA ABGE

Gerente Executiva: Luciana Marques
Av. Prof. Almeida Prado, 532 | Prédio 36 | Cidade Universitária | São Paulo - SP
Fones: (11) 3767-4361 | (11) 3719-0661
E-mail: abge@abge.org.br | Site: abge.org.br

▷ POLÍTICA DE PATROCÍNIO DO CONFEA VALORIZA CIÊNCIA

De norte a sul, de leste a oeste, há mais de 40 barragens com fundação em arenitos no Brasil. A presente publicação alia conceitos teóricos a casos concretos de barragens com fundação em arenitos no nosso país e no exterior, reunindo experiências que servirão como base de consulta para profissionais, estudantes e pesquisadores. É com orgulho que o Conselho Federal de Engenharia e Agronomia patrocina a Associação Paulista de Geólogos para levar a público a obra “Geotecnia de barragens em arenitos”.

A boa gestão das relações entre entidades e conselhos de fiscalização é condição indispensável para a eficiência, a eficácia e a efetividade do sistema profissional. Apesar de integradas, essas organizações possuem finalidades e papéis próprios. O Confea é o órgão central desse conjunto que atua de forma coesa em prol de um objetivo comum: zelar pela proteção dos cidadãos e contribuir para o progresso sustentável do Brasil.

A fim de fortalecer essa sinergia e aprimorar as entregas à nação, o Confea investe em ações de patrocínio, que funcionam como suporte para projetos de cunho científico e técnico, como a presente publicação. Tenha uma boa leitura!

Eng. civ. Joel Krüger

Presidente do Confea



AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Prof. Paulo T. Cruz, pelos valiosos ensinamentos a nós transmitidos ao longo de anos de convívio profissional na área de Geotecnia, e ao Dr. Nick Barton, pelo incentivo para transformarmos em livro o vasto material sobre fundação de barragens por nós acumulado na apresentação de inúmeras palestras em congressos e conferências.

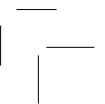
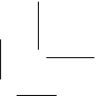
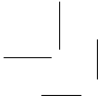
Os autores agradecem ainda à ABGE – Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, na pessoa de seu presidente Eng. Delfino Gambetti, pelo incentivo e viabilização da publicação deste livro.

SÓCIOS PATROCINADORES DA ABGE



SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO	11
CAPÍTULO 1. PREFÁCIO	13
CAPÍTULO 2. DEFINIÇÕES, ESTATÍSTICA E FALHAS NOTÁVEIS	15
CAPÍTULO 3. <i>PIPING</i>	20
CAPÍTULO 4. BARRAGENS BRASILEIRAS SOBRE ARENITO	33
CAPÍTULO 5. CATEGORIAS, PROPRIEDADES E COMPORTAMENTO	40
CAPÍTULO 6. MÉTODOS DE INVESTIGAÇÃO DIRETA	46
CAPÍTULO 7. ENSAIOS DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA	53
CAPÍTULO 8. PRÁTICAS DE ENGENHARIA RECOMENDADAS PARA O PROJETO DE BARRAGENS POR CATEGORIA DE ARENITO	61
CAPÍTULO 9. ESTABILIDADE AO DESLIZAMENTO	102
CAPÍTULO 10. CASOS DE OBRAS NO BRASIL E NO EXTERIOR	129
BIBLIOGRAFIA	188



APRESENTAÇÃO

Eraldo Luporini Pastore e Manoel de Souza Freitas Jr são, desde muitos anos, consultores na área da Geotecnia de barragens tanto da fundação quanto do corpo das barragens. Também é oportuno citar que Eraldo teve participação ativa em inúmeros túneis. Além das barragens brasileiras, as consultorias e atuações dos autores se estenderam pela América Central e Latina, e à longínqua China. E, agora, ambos nos brindam com um livro sobre barragens com fundação em arenitos.

Esta obra trata de 25 principais barragens fundadas em arenitos, entre as quais nove apresentaram algum tipo de problema e mesmo ruptura. Os autores, além de mencionarem as extensas áreas de arenito que ocorrem no Brasil e de descreverem detalhadamente os métodos de investigação, as categorias, as propriedades e o comportamento dos arenitos, tratam dos sistemas de drenagem e vedação das barragens para as várias categorias de arenitos e discutem da estabilidade ao deslizamento e também acerca das equações da resistência ao cisalhamento.

No Capítulo 9, os autores descrevem, com detalhes, a ruptura de uma barragem e as soluções associadas à segurança de diques do projeto da transposição do rio São Francisco. E, ainda, trazem detalhes de projeto, construção e desempenho de mais sete barragens com fundação em arenitos.

Para os jovens projetistas – e porque não os mais vividos –, esta é uma leitura importante e até mesmo obrigatória caso se envolvam em um projeto, ou em acidente de dique ou de barragem com fundação em arenitos.

Parabéns por compartilharem valiosos conhecimentos!

Paulo Cruz

PREFÁCIO

A grande experiência brasileira na área de barragens até os anos 80 se concentrava principalmente em regiões de ocorrência de maciços basálticos da bacia do Paraná, tais como, entre outras, Ilha Solteira, Promissão, Água Vermelha e Itaipu.

Um dos primeiros registros dessa época de barragens com fundação em basalto/arenito é o da Barragem de Barra Bonita, cujos estudos geológicos tiveram início em 1952. Essa barragem foi concluída entre 1962 e 1963, estando os extensos estudos de sua fundação, cuja principal preocupação era a ocorrência de *piping* na camada de arenito, relatados em Ruiz (1969). Posteriormente, com a expansão dos aproveitamentos para outras regiões do Brasil, novos desafios foram surgindo com a construção de barragens sobre maciços areníticos os quais ocorrem em grande extensão no território brasileiro.

Em fase expansionista mais recente, uma das primeiras barragens construída totalmente sobre arenito foi a PCH Baruito, em Campos Novos dos Parecis (MT), em 2001, com 20 m de altura. Inúmeros problemas foram encontrados durante as obras, sendo o principal associado ao *piping* com desmoronamento dos taludes de

escavação. Ainda pouco se conhecia sobre arenitos, tendo sido necessário implantar dispositivos de controle de fluxo de custo extremamente elevado do tipo diafragma plástico para conseguir concluir esse empreendimento com segurança.

Outras barragens em arenito enfrentaram sérios problemas construtivos, como as da PCH Sítio Grande (BA) e PCH Inxú (MT). O problema mais grave de todos foi o da ruptura da PCH Apertadinho (RO) em 2008, que à época foi amplamente divulgada na mídia nacional.

É importante lembrar que, apenas no Brasil, existem mais de 40 barragens com fundação em arenito. Além disso, a experiência internacional no tratamento de fundações de barragens constituídas por materiais friáveis é bastante significativa.

Dessa forma, este livro contempla conceitos teóricos ao mesmo tempo em que apresenta casos de barragens com fundação em arenitos no Brasil e no exterior, procurando transmitir experiências adquiridas até o presente momento sobre este tema sem a pretensão, no entanto, de esgotar assunto tão complexo.

DEFINIÇÕES, ESTATÍSTICA E FALHAS NOTÁVEIS

O arenito é uma rocha sedimentar clástica (ou detrítica) formada pelo acúmulo e posterior diagênese de grãos minerais ou partículas de rocha com mais de 50% de grãos com tamanho entre 2 mm (areia muito grossa) e 0,06 mm (areia muito fina na escala de Wentworth).

Quando sofre metamorfismo (pressão e temperatura elevadas na crosta terrestre), o arenito transforma-se em metarenito (grau de metamorfismo baixo) ou quartzito (grau de metamorfismo elevado), passando a ser classificado como rocha metamórfica e apresentando elevada resistência mecânica (Resistência à Compressão Simples > 100 MPa). As Figuras 1.1, 1.2 e 1.3 mostram uma amostra macroscópica (amostra de mão), microscópica e afloramento de arenito.



Figura 1.1 Amostra macroscópica

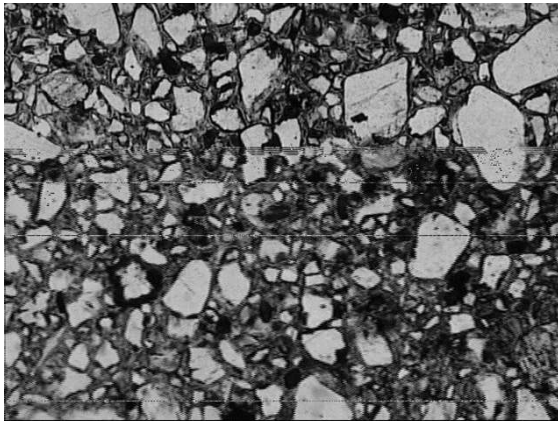


Figura 1.2 Amostra microscópica



Figura 1.3 Afloramento de maciço arenítico com estruturas sedimentares e camadas friáveis

▷ ESTATÍSTICA DE FALHAS EM BARRAGENS (FEMA, 2015)

Foster et al. (1998 apud FEMA, 2015) conduziram um estudo sobre ocorrências de falhas em grandes barragens de terra ocorridas até 1986 com base no Registro Mundial de Grandes Barragens do International Committee on Large Dams (ICOLD), o qual inclui um banco de dados de 11.192 barragens. Estas barragens cobrem uma ampla gama de idade, tipo de barragem, técnicas construtivas e condições de fundação. Estes autores elaboraram a Tabela 1.1, que mostra o número de barragens e tipos de falhas associadas.

Tabela 1.1 Sumário de incidentes em barragens de terra

Tipo de ocorrência	número de casos		percentual	
	todos	em operação	todos	em operação
overtopping	46	40	35.9	34.2
vertedouro	16	15	12.5	12.8
subtotal	62	55	48.4	47
piping na barragem	39	38	30.5	32.5
piping na fundação	19	18	14.8	15.4
piping na barragem e fundação	2	2	1.6	1.7
subtotal	59	57	46.1	48.7
escorregamentos	7	5	5.5	4.3
terremoto/liquefação	2	2	1.6	1.7
desconhecido	8	7		
Número total de ocorrências	136	124		

No referido estudo, o *piping* – um dos fenômenos que atinge principalmente solos não coesivos – representa quase metade das causas das falhas. Além disso, os resultados indicam que “1 em cada 200 barragens” apresentam falhas por *piping* e “1 em cada 60” tiveram algum tipo de *piping*. No caso de *piping* pela fundação, 25% ocorrem durante o enchimento e 75% até os cinco primeiros anos de operação.

▷ FALHAS NOTÁVEIS (FEMA, 2015)

As seguintes barragens são conhecidas no meio técnico por terem apresentado falhas que foram atribuídas ao fenômeno de *piping*.

Teton Dam (1976)

Erosão interna do núcleo da barragem ao longo de juntas na rocha de fundação (e/ou fraturamento hidráulico do núcleo siltoso) com falha da barragem.

Quail Creek Dike (1988)

Erosão interna do núcleo da barragem decorrente de intensa percolação no contato com a fundação provocada por múltiplas fases de injeção na fundação e no fraturamento hidráulico.

A. V. Watkins Dam (2006)

Medidas emergenciais requeridas em decorrência de erosão regressiva pelo solo da fundação sob baixo gradiente hidráulico.

Várias barragens (Austrália-1960 e Oklahoma-1970)

Falhas das barragens construídas com solos dispersivos foram relatadas por vários autores (Sherard et al., 1976).

Walter Bouldin Dam (1975)

Falha da barragem por erosão interna na fundação.

Wister Dam (1949)

Eminência de falha em barragem de solo dispersivo desencadeada por recalque diferencial sobre o canal de drenagem original.

Fontenelle Dam (1964 e 1965)

Eminência de falha da barragem decorrente de erosão interna do núcleo exposto à intensa percolação ao longo do contato fundação/barragem.

Black Rock Dam (1909)

Erosão interna pelo solo da fundação abaixo de camada de basalto em razão de excessiva percolação e saída não protegida.

PIPING

▷ O QUE É PIPING?

Entre os tipos conhecidos de mecanismos de erosão interna, encontram-se: a erosão em fugas concentradas (por exemplo, arraste de partículas no contato solo/concreto); a erosão retrogressiva ou *pi-ping*; a instabilidade interna ou sofusão (erosão seletiva de finos contidos em um esqueleto de grãos de maiores dimensões sem mudança significativa de volume) e o *sinkhole* (erosão ascendente vertical com surgimento de cavidades na superfície). A esse respeito Sherard (1979) relata que a ocorrência do fenômeno em crista e taludes de barragens tem sido registrado frequentemente em solos glaciais e aluvionares. A explicação seria a instabilidade intrínseca de solos largamente graduados (altos valores de CNU), internamente instáveis, criando-se uma incompatibilidade entre a porção fina e a fração grossa e não atendimento aos Critérios de Filtro.