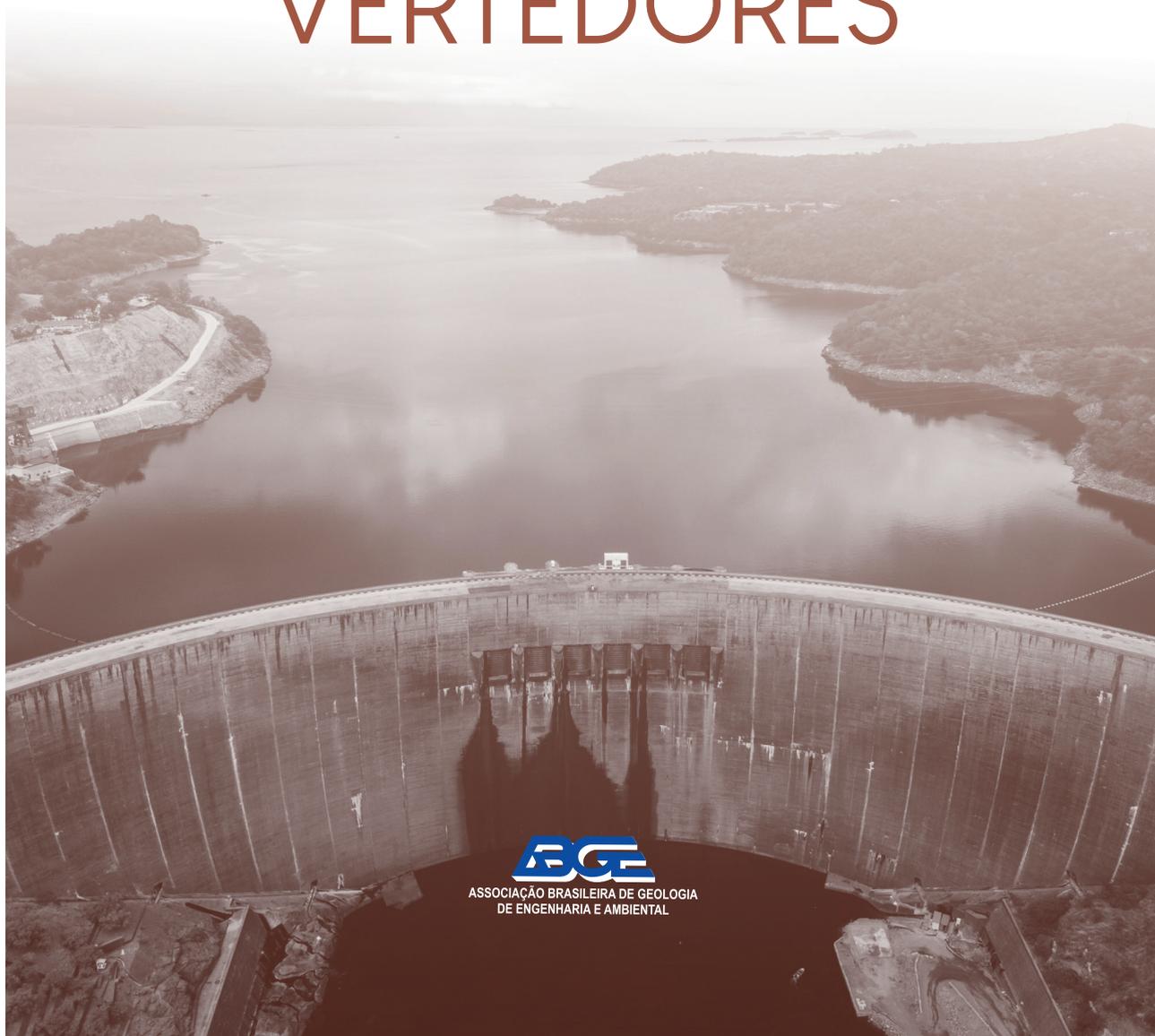


MAGELA G. P.  
BRITO, S. N. A. *In Memoriam.*

# EROSÃO A JUSANTE DE VERTEDORES



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA  
DE ENGENHARIA E AMBIENTAL

**Produção editorial:**

Assistência editorial: *Luciana Marques e Lucimara Gouvêa*

Projeto gráfico/Diagramação/Capa: *Rita Motta*

Impressão: *Gráfica Assahi, São Paulo*

Impresso em papel Offset, 90g, fosco, formato 170x240 mm,  
na tipologia Cambria

Primeira edição impressa em 2023: *1.500 exemplares*

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

Pereira, Geraldo Magela

Erosão a jusante de vertedores Magela G. P /  
Geraldo Magela Pereira, Sergio Nertan Alves de  
Brito. -- 2. ed. -- São Paulo : ABGE, 2023.

ISBN 978-65-88460-15-3

1. Erosão do solo - Controle 2. Geologia  
3. Engenharia ambiental 4. Vertedouros I. Brito,  
Sergio Nertan Alves de. II. Título.

23-163668

CDD-551

**Índices para catálogo sistemático:**

1. Geologia 551

Aline Grazielle Benitez - Bibliotecária - CRB-1/3129

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 2023/2024

**PRESIDENTE:** Fábio Soares Magalhães

**VICE-PRESIDENTE:** Erik Wunder

**DIRETOR SECRETÁRIO:** Sergio Sussumu Tokudo

**DIRETOR FINANCEIRO:** Adalberto Aurélio Azevedo

**DIRETORA DE EVENTOS:** Ana Elisa Silva de Abreu

**DIRETORA DE COMUNICAÇÃO:** Lilian Pimentel

**Conselho Deliberativo:** Fábio Soares Magalhães, Erik Wunder, Sergio Sussumu Tokudo, Adalberto Aurélio Azevedo, Ana Elisa Silva De Abreu, Lilian Pimentel, Luiz Antonio Pereira de Souza, Otávio Coaracy Brasil Gandolfo, Joao Luiz Armelin, João Antônio Curtis, Luiz Alberto Minicucci, Malena D' Elia Otero, Iramir Barba Pacheco, Sergio Augusto De Arruda Camargo, Mauro Gomes Dos Santos Filho, Romildo Dias Moreira.

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

### NÚCLEO RIO DE JANEIRO/ESPÍRITO SANTO

Conselho Deliberativo: Aline Pimentel da Silva, Ana Caroline Duarte Dutra, Giovanna Tristão R. da Cunha, Larissa Mozer, Raquel Batista M. da Fonseca e Rodrigo Ferreira Franca.

### NÚCLEO MINAS GERAIS

Conselho Deliberativo: Alberto Ferreira do Amaral Junior, Angelo Almeida Zenobio, Bruno Felipe Roepke, Diego Moreira da Silva, Ellen Delgado Fernandes, Frederico Nascimento Mendes Bezerra, Maria Giovana Parizzi, Michele Aparecida Flores Costa, Reuber Ferreira Cota, Yan Lucas de O. P. Santos e Walter Dos Reis Junior.

### NÚCLEO SUL

Conselho Deliberativo: Adelir José Strieder, Andréa Nummer, Cezar Augusto Burkert Bastos, Débora Lamberty, Karina R. Camargo, Malva Andrea Mancuso e Marcos A. Musso Laespiga.

### NÚCLEO CENTRO OESTE

Conselho Deliberativo: Bruna M. Cruz Fernandes, Caiubi Emanuel Souza Kuhn, Ingrid Ferreira Lima, Patrícia de Araújo Romão e Rodrigo Luiz Gallo Fernandes.

### NÚCLEO NORTE

Conselho Deliberativo: Claudio Fabian, Dianne D. F. Fonseca, Elton Rodrigo de Andretta, Iris Celeste N. Bandeira, José Sidney Barros e Sheila G. Teixeira.

### SECRETARIA ABGE

Gerente Executiva: Luciana Marques

Assistente Editorial: Lucimara Gouvêa

Assistente Administrativo: Kauany Santos

Auxiliar Administrativo: Maria Esther Reis

Auxiliar Financeiro: Vanessa Oliveira

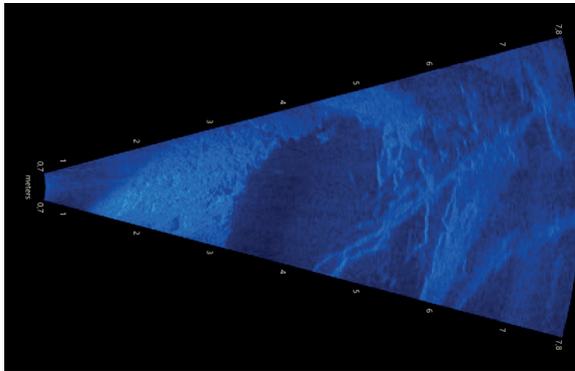
Av. Prof. Almeida Prado, 532 | Prédio 59 | Cidade Universitária | São Paulo – SP

Fones: (11) 3767-4361 | (11) 98687-6560

E-mail: [abge@abge.org.br](mailto:abge@abge.org.br) | Site: [abge.org.br](http://abge.org.br)



# Técnicas de inspeção, monitoramento e mapeamento de Erosão a Jusante de Vertedouros



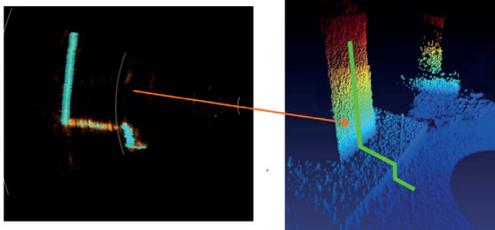
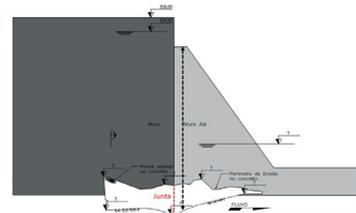
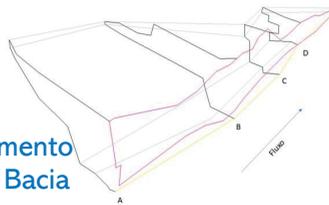
## Sonar de Imagem de alta definição

Erosão a jusante de vertedouro, entre estrutura de concreto e ombreira de jusante.

A erosão foi causada pela queda descontrolada de água da vazão sanitária.

## Sonar de Varredura

Mapeamento e georreferenciamento de erosão em muro de ala de Bacia de dissipação.



## Sonar 3D Subaquático e LiDAR SLAM

Mapeamento 3D (nuvem de pontos) e modelagem subaquática para recuperação de estrutura, de margens de rios e reservatórios.

Entre em contato e descubra todas as soluções e aplicações em inspeção, mapeamento e monitoramento subaquático com ROV e Sonar e mapeamento autônomo de espaços confinados.

Rua Vahia de Abreu, 138 — São Paulo

(11) 9.5778-0935

abio@hibbardinshore.com — www.segurançadebarragens.com

**Hibbard Inshore Brasil**

Profissional de Engenharia,  
Agronomia e Geociências,  
 **você conhece a sua  
Caixa de Assistência?**



A Mútua é a Caixa de Assistência dos Profissionais do Crea e tem a missão de atendê-los com **benefícios, auxílios e seguros** nas áreas social, previdenciária, desenvolvimento de carreira, saúde e qualidade de vida.

Acesse o site [www.mutua.com.br/associe-se](http://www.mutua.com.br/associe-se) e torne-se mutualista você também!

(11) 3257-3750 / 0800 161 0003 

[sp@mutua.com.br](mailto:sp@mutua.com.br) 

[mutua\\_sp](#) 

[mutua.com.br](http://mutua.com.br) 

**CONFEA**  
Conselho Federal de Engenharia  
e Agronomia



**CREA-SP**  
Conselho Regional de Engenharia  
e Agronomia de São Paulo



**mutua** **SP**  
Caixa de Assistência dos Profissionais do Crea



A Walm BH Engenharia Ltda é fruto da junção de um grupo de profissionais experientes e com atuação nas áreas de conhecimento da geologia, geotecnia e recursos hídricos. Está sediada na capital das Minas Gerais desde 2011.

Desde então tem se dedicado à consultoria, estudos e projetos que geram soluções para os inúmeros clientes nos segmentos de mineração, infraestrutura, óleo e gás, geração de energia e agronegócio, com atuação no mercado nacional e internacional. Atuamos em estudos, projetos e consultorias em empreendimentos de grande porte da construção civil e subterrânea, como barragens, túneis, entre outras. A Walm soma conhecimento teórico e prático com a experiência do seu corpo técnico composto por profissionais com doutorado, mestrado e especialização. Nossa equipe permanente, versátil, multidisciplinar e diversa em idade, gênero e experiência, possui elevada capacidade técnica com sólida formação acadêmica nas disciplinas de geologia, geotecnia, hidrotecnia e estruturas, sendo o fator humano, o principal contribuinte para a transformação da empresa em uma das mais sólidas e confiáveis da engenharia de projetos.

O que nos impulsiona para um futuro sustentável, inovador e tecnológico são os desafios apresentados pelas nossas clientes que em parceria, nos possibilitou atuar também com Serviços Técnicos Especializados aplicáveis ao planejamento e operação de minas, e no desenvolvimento e fornecimento de softwares na modalidade Software as a Service (SaaS) como o LOGISOIL Suíte.

Entendemos a grande relevância e importância do livro intitulado "Erosão a Jusante de Vertedouros", tanto para a comunidade técnica, quanto para as empresas que operam e são proprietárias dessas estruturas.

**Walm**  
Engenharia







# SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO	13
PREFÁCIO ABGE	15
PREFÁCIO DOS AUTORES	17
SOBRE O AUTOR	19
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>21</b>
<b>2. MECANISMO DA EROSÃO</b>	<b>22</b>
<b>3. PROFUNDIDADE DA FOSSA DE EROSÃO</b>	<b>23</b>
<b>4. ANÁLISE CRÍTICA</b>	<b>27</b>
<b>5. REFERÊNCIAS</b>	<b>34</b>

## PARTE I

### EROSÃO A JUSANTE DE VERTEDOUROS

<b>1. PROJETO DE DISSIPADORES DE ENERGIA</b>	<b>37</b>
1.1 HISTÓRICO	37
1.2 TIPOS DE DISSIPADORES	38
1.3 CRITÉRIOS DE ESCOLHA	42
1.3.1 Arranjos com Vertedouro Isolado do Barramento	43
1.3.2 Arranjos com Vertedouro Incorporado do Barramento	45
1.3.3 Proposta de Mason para Escolha de Dissipadores	49
1.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	54
<b>2. PROCESSOS DE DISSIPAÇÃO/EROSÕES</b>	<b>56</b>
2.1 SALTO DE ESQUI	56

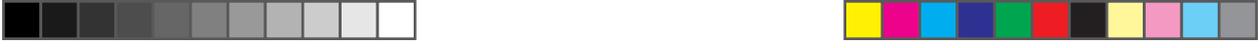
2.1.1	Processo de Dissipação	56
2.1.2	Desenvolvimento da Fossa de Erosão	57
2.2	JATO EM QUEDA LIVRE E JATOS DE ORIFÍCIOS	59
2.3	DISSIPADORES EM RESSALTO HIDRÁULICO	61
2.3.1	Processo de Dissipação	61
2.3.2	Desenvolvimento da Fossa de Erosão	63
<b>3.</b>	<b>ESFORÇOS ATUANTES A JUSANTE DE DISSIPADORES</b>	<b>66</b>
3.1	PRESSÕES HIDRODINÂMICAS A JUSANTE DE JATOS	66
3.1.1	Comprimento do Núcleo do Jato ( $y_k$ )	69
3.1.2	Espessura do Tirante d'Água para Proteção do Maciço (h)	71
3.1.3	Dissipação de Energia ao Longo do Núcleo do Jato ( $\Delta E_n$ )	71
3.1.4	Comprimento do Jato Submerso onde as Pressões Se Anulam	72
3.1.5	Estimativa das Pressões Hidrodinâmicas (P)	73
3.1.6	Estimativa da Pressão Hidrodinâmica Total ( $P_T$ )	74
3.2	PRESSÕES HIDRODINÂMICAS A JUSANTE DE BACIAS	74
<b>4.</b>	<b>AVALIAÇÃO DAS DIMENSÕES DA FOSSA DE EROSIÃO</b>	<b>77</b>
4.1	MODELOS REDUZIDOS	78
4.2	EQUAÇÕES PARA ESTIMATIVA DA PROFUNDIDADE DA FOSSA	80
4.3	MÉTODO ITERATIVO DE YUDITSKII	85
4.3.1	Roteiro para Aplicação do Método de Yuditskii	90
4.4	PESQUISA DE ENFOQUE ALTERNATIVO	90
<b>5.</b>	<b>ASPECTOS OPERATIVOS DE VERTEDORES</b>	<b>92</b>
5.1	ASPECTOS ESPECÍFICOS	92
5.1.1	Dissipadores em Ressalto	92
5.1.2	Dissipadores em Salto de Esqui	93
5.2	ASPECTOS GERAIS	98
5.3	OUTRAS CONSIDERAÇÕES	98
<b>6.</b>	<b>ACOMPANHAMENTO DE PROTÓTIPOS</b>	<b>99</b>
	REFERÊNCIAS	101
	ANEXO I	104
	ANEXO II	108

PARTE II

CONDICIONANTES GEOMECÂNICAS DA  
EROSÃO A JUSANTE DE VERTEDOUROS  
COM DISSIPADOR EM SALTO DE ESQUI

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	112
<b>2.</b>	<b>ESFORÇOS ATUANTES A JUSANTE DE VERTEDOUROS</b>	113
2.1	ESFORÇOS NATURAIS	113
2.2	AÇÕES HIDRÁULICAS NA BACIA DE LANÇAMENTO	114
<b>3.</b>	<b>PREVISÃO DA PROFUNDIDADE DA FOSSA</b>	116
<b>4.</b>	<b>SEQUÊNCIA DE EROSIÃO EM MACIÇOS ROCHOSOS</b>	118
4.1	FASES DO PROCESSO EROSIVO	118
4.2	ESTÁGIOS DO PROCESSO EROSIVO	119
4.3	INFLUÊNCIA DO TIPO DE VERTEDOIRO	120
4.4	A EVOLUÇÃO DO PROCESSO EROSIVO NO TEMPO	120
<b>5.</b>	<b>PARÂMETROS GEOMECÂNICOS DE ESTUDOS ANTERIORES</b>	123
5.1	SPURR	123
5.2	ANTUNES E INFANTI	125
<b>6.</b>	<b>CONDICIONANTES GEOMECÂNICAS</b>	127
6.1	DESALOJAMENTO DE FRAGMENTOS	127
6.2	FRAGMENTAÇÃO/ABRASÃO	132
6.3	TRANSPORTE	132
<b>7.</b>	<b>SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO PROPOSTO</b>	133
<b>8.</b>	<b>AValiação EMPÍRICA DA PROFUNDIDADE DE EROSIÃO</b>	136
8.1	SPURR	136
8.2	BRITO	137
<b>9.</b>	<b>SELEÇÃO DO TIPO DE VERTEDOIRO</b>	142
<b>10.</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	144
	<b>REFERÊNCIAS</b>	145
	<b>PARÂMETROS - UNIDADES</b>	146
	<b>ALGUMAS SIGLAS E ABREVIATURAS</b>	148





---

# APRESENTAÇÃO



A 1ª Edição da Revista 03 sobre “Erosões em Bacias de Lançamento”, foi lançada em 1996 pelo CBDB – Comitê Brasileiro de Barragens. Ela foi preparada por Sergio Nertan Alves de Brito e Geraldo Magela Pereira. O Professor Nelson Pinto fez a Apresentação. Nesse trabalho, Magela percebeu que estava diante de um “Senhor Geólogo de Engenharia”. De imensa competência e de grande simplicidade no trato. Grande Sergio.

Essa 2ª Edição é em homenagem póstuma a Sergio Brito, que nos deixou em 2015. Ela foi autorizada por Guilherme Alvarenga Alves de Brito, filho do Sergio, para o 17º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental” da ABGE, 25 a 28 de setembro de 2022, em Belo Horizonte. Registra-se que o Professor Nelson também autorizou a reapresentação de sua “Apresentação Original”.

Sergio nasceu em 11 de abril de 1941 em Ouro Preto, onde se formou em Geologia em 1963. Fez mestrado na Universidade de Illinois, USA, de onde retornou em 1969. Defendeu sua tese em 1970. Foi geólogo da CEMIG até o ano de 1975. Fundou a BVP Geotecnia e Hidrotecnia em 1970 e, desde então, se transformou no “Sergio Brito”, no primeiro e exímio consultor brasileiro de Geologia de Engenharia, tendo trabalhado para as principais companhias de energia do país.

Ao longo da carreira participou, dentre outras, de diversas obras de usinas hidrelétricas realizando trabalhos importantes. Pode-se destacar a preparação e edição do livro Geologia de Engenharia, em 1998, também para a ABGE, onde está registrada a sua experiência até então.

Assim, a ABGE vem a público registrar seu apreço pelo Geólogo Sergio Brito que muita falta nos faz.

**Delfino Gambetti**

Presidente do Conselho Consultivo ABGE





---

## PREFÁCIO ABGE



A escolha e funcionamento de dissipadores de energia a jusante de vertedores de Usinas Hidrelétricas é uma das disciplinas mais desafiadoras da engenharia de barramentos, principalmente por poder colocar em risco a estrutura como um todo e também pela sua influência a jusante da obra, onde podem existir inúmeras instalações industriais e habitacionais.

Está bem detalhado neste livro do Geraldo Magela o funcionamento e dimensionamento das inúmeras formas e estruturas de dissipação, onde também participa o Prof. Nelson Pinto, além de se utilizar do texto deixado pelo saudoso Geól. Sérgio Brito para vinculação dos aspectos hidráulicos com os aspectos geológicos.

Caracteriza-se como um livro conceitual com formulação extensa para dimensionamento das várias formas de minimizar a energia resultante das vazões defluentes dos vertedores, com inúmeras citações e correlações com Usinas Hidrelétricas em operação.

Casos de insucessos são citados no decorrer desta excelente obra, seja por subdimensionamento ou mesmo devido à superavaliação da resistência do maciço rochoso a jusante.

A ABGE novamente diversifica suas obras literárias, com o auxílio do nosso grande amigo Geraldo Magela.

A ABGE agradece imensamente aos autores, patrocinadores e colaboradores e deseja uma boa leitura.

**Delfino Gambetti**

Presidente do Conselho Consultivo ABGE

**Fabio Soares Magalhães**

Presidente do Conselho Deliberativo da ABGE





---

# PREFÁCIO DOS AUTORES



O tema Erosão a Jusante de Vertedouros é apresentado neste livro dividido em duas partes:

- I. por Geraldo Magela Pereira que apresenta detalhadamente os aspectos hidráulicos da questão;
- II. por Sergio Nertan Alves de Brito que apresenta também detalhadamente os aspectos geológico-geotécnicos da questão; o fechamento para esse livro foi preparado por Magela.

Precede essas duas partes uma apresentação conceitual geral sobre o tema elaborada pelo Professor Nelson Pinto.

Com certeza esse livro será útil para os jovens que militam no setor elétrico nas diversas companhias, seja na retroanálise de processos erosivos que porventura se desenvolvam nas diversas usinas hidrelétricas brasileiras em funcionamento normal, seja nos projetos ainda disponíveis para serem elaborados.

Cabe destacar que esta foi a primeira vez que esse tema multidisciplinar foi abordado conjuntamente por dois especialistas interessados, exclusivamente, na evolução dessa complexa questão.



## SOBRE O AUTOR



### Geraldo Magela Pereira

Graduou-se em Engenharia Civil pela Universidade de Brasília em 1974. Com 50 anos de experiência em projetos de usinas hidrelétricas, trabalhou nas áreas de estudos hidráulicos em modelos reduzidos, Hidráulica, Geotecnia, arranjos das obras, planejamento da construção e coordenação em todas as fases de estudos e projetos.

Participou ativamente no desenvolvimento de propostas e negócios para empreendimentos em contratos tipo EPC. Entre os principais projetos de que participou, destacam-se UHEs Capim Branco e Capim Branco II; UHE Baguari; UHE Balbina; UHE Rosana; UHE Tucuruí (1ª fase), incluindo o treinamento da equipe de operação das 23 comportas do vertedouro; UHE Santa Isabel Alta; UHEs Canoas I e Canoas II; diversas PCHs totalizando 1.000 MW.

Publicou os seguintes livros em português: 1) Projeto de Usinas Hidrelétricas Passo a Passo-2015; 2) Projeto de Vertedouros Passo a Passo-2017; 3) Acidentes e Rupturas de Barragens-2020; 4) Desvio de Rios-2022; 5) Hidrelétricas Projetos Ambientalmente Sustentáveis. Os dois primeiros foram publicados em inglês pela Editora CRC Balkema.





# 1

## INTRODUÇÃO

Em 7 de outubro de 1993 a Comissão de Hidráulica do CBDB promoveu um seminário sobre o tema “Erosões da Jusante de Estruturas Hidráulicas”. O evento contou com o apoio da EPUSP, do CTH-DAEE e da FCTH e ocorreu nas instalações da EPUSP, com presença de 71 engenheiros e técnicos. Quatro especialistas falaram sobre aspectos do tema:

- Geraldo Magela Pereira – Aspectos Hidráulicos
- Sergio Brito – Aspectos Geomecânicos
- Luiz Cesar de Souza Pinto – Modelagem Física
- Eurípedes Vargas – Modelagem Matemática

Os trabalhos dos dois primeiros estão transcritos nas PARTES I e II.

A reunião contou ainda com contribuições espontâneas de Guido Guidicini, sobre as experiências de Balsa Mineiro e Palmar, e de Álvaro Bottini, sobre o vertedouro de Rosana. O assunto foi amplamente discutido, enfocando-se particularmente o inter-relacionamento entre os aspectos hidráulicos e geotécnicos da erosão a jusante de restituições em salto de esqui. Os principais resultados desta atividade são resumidos a seguir.

Um trabalho extensivo de consulta bibliográfica sobre os aspectos hidráulicos do problema foi efetuado no âmbito do subgrupo para o estudo da erosão a jusante de estruturas hidráulicas, GTEJEH, e organizado por Geraldo Magela. A íntegra do trabalho “Erosões a Jusante de Vertedouros” é apresentada na PARTE I.

Os aspectos geotécnicos foram analisados por Sergio Brito que propôs inclusive um método para avaliação da influência da qualidade da rocha na previsão da profundidade da fossa de erosão. A íntegra do trabalho “Condicionantes Geomecânicas da Erosão a Jusante de Vertedouros com Dissipador em Salto de Esqui”, é apresentado na PARTE II.

As questões relativas à modelagem física e matemática não atingiram estágio para publicação.