

oficina de textos

projeto de USINAS HIDRELÉTRICAS

passo a passo

Geraldo Magela Pereira



Apoio e patrocínio:



projeto de USINAS
HIDRELÉTRICAS
passo a passo

Geraldo Magela Pereira

© Copyright 2015 Oficina de Textos

Grafia atualizada conforme o Acordo Ortográfico da Língua Portuguesa de 1990, em vigor no Brasil desde 2009.

Conselho editorial Cylon Gonçalves da Silva; Doris C. C. K. Kowaltowski;
José Galizia Tundisi; Luis Enrique Sánchez;
Paulo Helene; Rozely Ferreira dos Santos;
Teresa Gallotti Florenzano

Capa e projeto gráfico Malu Vallim

Diagramação Casa Editorial Maluhy Co.

Foto capa Usina Hidroelétrica Tucuruí (Cortesia Eletronorte)

Preparação de figuras Maria Lucia Rigon

Preparação de textos Monica Fernanda Rodrigues Gama

Revisão de textos Carolina Messias

Impressão e acabamento Vida & Consciência

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

Pereira, Geraldo Magela

Projeto de usinas hidrelétricas passo a passo /
Geraldo Magela Pereira. -- São Paulo : Oficina
de Textos, 2015.

Bibliografia

ISBN 978-85-7975-162-2

1. Energia elétrica - Produção 2. Usinas
hidrelétricas - Projetos e construção I. Título.

15-01219

CDD-621.312134

Índices para catálogo sistemático:

1. Usinas hidrelétricas : Engenharia
621.312134

Todos os direitos reservados à **Oficina de Textos**

Rua Cubatão, 959

CEP 04013-043 – São Paulo – Brasil

Fone (11) 3085 7933 Fax (11) 3083 0849

www.ofitexto.com.br e-mail: atend@ofitexto.com.br



COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS – CBDB

O Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB), sociedade civil sem fins lucrativos de escopo técnico-científico, representa, no Brasil, a Comissão Internacional de Grandes Barragens. O CBDB tem por finalidade estimular e apoiar o desenvolvimento das técnicas de planejamento, projeto, construção, operação e manutenção de barragens e obras conexas, incluindo usinas hidrelétricas e manejo de rejeitos de mineração, compatibilizando-as com o meio ambiente.

Para consecução de sua finalidade cabe ao CBDB:

- promover conferências, seminários e congressos e editar publicações, visando ao intercâmbio de conhecimentos;
- divulgar a legislação concernente e colaborar para sua atualização e cumprimento;
- divulgar conhecimentos de aplicações de critérios e metodologias;
- estimular pesquisas técnicas e científicas;
- estimular o interesse de entidades de ensino e estudantes e propor aos poderes públicos medidas que visem a assegurar a qualidade, a segurança e a economicidade das barragens;
- colaborar com entidades que planejam, projetam, constroem ou utilizam barragens e obras conexas, para aperfeiçoar seus métodos e observar o comportamento desses empreendimentos;
- colaborar com a Comissão Internacional de Grandes Barragens no que se tornar necessário e/ou conveniente;
- propugnar pela ética nos assuntos da engenharia de barragens.

DIVULGAÇÃO E APRIMORAMENTO DO CONHECIMENTO:

O Comitê Brasileiro de Barragens – CBDB – tem como um dos seus principais objetivos proporcionar a difusão do conhecimento técnico sobre barragens e obras hidrelétricas, realizando diversos eventos técnicos sobre temas gerais ou específicos que estejam na pauta do meio técnico nacional quando da sua realização.

O principal evento promovido pelo CBDB é o SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, que acontece aproximadamente a cada dois anos. Já foram realizados trinta eventos. O CBDB organiza também simpósios sobre Pequenas Centrais Hidrelétricas, Instrumentação, Barragens de Rejeitos, Segurança de Barragens e cursos e palestras diversos.

O CBDB mantém doze Comissões Técnicas que congregam especialistas visando a atualizar e difundir conhecimento técnico específico para informação e aperfeiçoamento da profissão. Essas comissões se relacionam com grupos homólogos do ICOLD no ambiente internacional.

Publica livros diversos de referência para a Engenharia de Barragens brasileira. Edita a *Revista Brasileira de Engenharia de Barragens*, anual, e mantém o Boletim Informativo do CBDB, emitido a cada dois meses. Mantém disponível aos sócios vasto arquivo na web, com trabalhos, boletins, livros, entre outras publicações.

A sede do Comitê é no Rio de Janeiro, na Rua Real Grandeza 219, bloco C, sala 1007, CEP: 22.281-031, havendo núcleos regionais em São Paulo, Minas Gerais, Paraná, Goiás/Brasília, Bahia, Ceará, Rio de Janeiro, Pernambuco, Santa Catarina e Rio Grande do Sul.

Agradecimentos

Inicialmente, agradeço ao Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB) pelo patrocínio para a edição deste livro.

O livro só pôde ser feito graças à colaboração de vários amigos com quem trabalhei ao longo da minha carreira, que me ensinaram muito e que colaboraram com muitas informações.

A Murilo Lustosa Lopes, engenheiro civil, meu grande amigo, pelos conselhos desde o primeiro dia da escola de Engenharia e pela boa vontade em colaborar, mesmo com a agenda lotada, tendo construtivamente criticado vários capítulos.

A Sérgio Correia Pimenta, engenheiro civil, grande amigo, pelo estímulo para a realização do livro e pelo apoio no sentido de buscar o patrocínio do CBDB.

A Álvaro Lima de Araújo, engenheiro civil, pela boa vontade em fornecer dados, inúmeras fotos e pela revisão do capítulo de Hidrologia.

A Oduvaldo Barroso da Silva, engenheiro civil, grande amigo, que autorizou a utilização de seus slides sobre o planejamento da expansão da geração.

A Daniel Santos, engenheiro civil, jovem hidráulico, pela colaboração na elaboração deste trabalho.

A Roberto Corrêa, geólogo de Engenharia, meu amigo, professor particular de várias disciplinas, incluindo Geologia, pelas informações disponibilizadas.

A Paulo Fernandes Guimarães, geólogo de Engenharia, que aprendi a admirar por sua seriedade e seus conhecimentos, mais um professor de Geologia, pelos dados fornecidos e pela revisão do capítulo sobre esse tema.

Ao meu amigo Guido Guidicini, geólogo, que sempre me incentivou, pela disposição em comentar o capítulo de estudos geológicos e geotécnicos.

A Carlos Roberto Bizerril, biólogo, amigo e meu competente orientador da área ambiental.

A Vantuil Ribeiro, engenheiro eletricitista, amigo politécnico de vários projetos, por ter colaborado com a revisão do sumário, dos capítulos de Hidrologia e de equipamentos e sistemas elétricos, e pelo texto sobre a garantia física da usina.

A João Lopes Ferreira Neto, engenheiro eletricitista, amigo de vários projetos, por fornecer informações para a elaboração do livro na área institucional.

A Ewaldo Schlosser, engenheiro eletricitista, meu paciente professor de Eletricidade, pela revisão do capítulo de equipamentos e sistemas elétricos, bem como do capítulo sobre subestação da usina e interligação ao sistema.

A Helmar Alves Pimentel, engenheiro mecânico, pela revisão do capítulo de turbinas.

A Sílvia Martins, bibliotecária, com quem trabalhei por muitos anos, pela ajuda constante na busca dos *papers* e dos livros de que precisava. Ela teve um papel fundamental na formação de minha biblioteca pessoal.

A Homero Teixeira, geólogo, pelo apoio diário durante o tempo em que trabalhamos juntos e pelos livros que me doou.

A Raul Odemar Pitthan, engenheiro civil, com quem trabalhei por muitos anos, um exemplo de pessoa, pelo estímulo rotineiro, pelas lições de coordenação de projetos e pela revisão geral do texto.

Agradeço, especialmente, a Flávio Campos e a Claudia Brandão, do Centro de Documentação da Leme Engenharia, pela atenção, colaboração e doação de vários artigos, incluindo uma cópia do livro *Hydraulique technique* (Jaeger, 1954).

Agradeço minha amiga e ex-chefe Shoshana Signer pelo incentivo e pelas aulas sobre como fazer este livro, entre outras.

Espero que este livro, que teve por base a experiência do autor e de amigos colaboradores e que abrange uma coletânea de textos, figuras e tabelas que objetivam principalmente orientar os jovens engenheiros no início de suas carreiras pelos sempre desafiantes caminhos de projetos de usinas hidrelétricas, venha ser útil também a todos que se interessam por essa fascinante área da Engenharia.

GERALDO MAGELA PEREIRA

Apresentação

Na dedicatória deste livro, há uma menção à minha pessoa relativa ao final do ano de 1979, quando não só o Magela, mas muitos outros engenheiros estavam meio que desarvorados com a engenharia de barragens no Brasil. Nessa menção, ele me agradece por “tê-lo empurrado para frente”, e agora, passados 35 anos, somos presenteados com o livro *Projeto de Usinas Hidrelétricas*, uma obra de fôlego, que deve ter custado ao Magela muito trabalho e muitas noites de insônia.

Parabéns, Geraldo Magela Pereira.

Em 1977, Edgard Blücher publicou o livro *Usinas hidrelétricas*, do engenheiro G. P. Schreiber, que orientou muitas empresas de engenharia em projetos de usinas hidrelétricas. No entanto, depois disso, todo o conhecimento acerca da evolução, legislação, projeto e construção de hidrelétricas encontrou-se disperso em publicações do CBDB, Eletrobrás, Centrais Elétricas e Aneel e em normas técnicas, trabalhos em congressos de barragens e meio ambiente e alguns livros técnicos dedicados a temas específicos de barragens.

O autor Geraldo Magela, num trabalho de síntese, uniu todas essas informações dispersas num único volume, que trata de todos os aspectos do projeto civil de uma hidrelétrica, precedido das fases de inventário, estudos hidrológicos e energéticos, geológicos e geotécnicos, e de toda a carga legislativa e burocrática, além de discutir os aspectos eletromecânicos e, no Cap. 10, a interligação da usina ao Sistema Interligado Nacional (SIN).

Após uma introdução teórica sobre a matéria de cada capítulo, a obra é enriquecida com inúmeros projetos de hidrelétricas brasileiras e mesmo algumas internacionais, que são reproduzidos neste livro com detalhes.

O autor ainda se deu ao trabalho de “traduzir” 152 siglas e abreviaturas do jargão dos profissionais do ramo.

São apresentados exemplos de planejamento de geração e das fases de estudos e projetos para uma pequena central hidrelétrica (PCH) (Poço Fundo), os quais são ilustrados com dados de obras do porte de Tucuruí.

No Cap. 1, sobre a história (ou evolução) das usinas hidrelétricas, pode-se constatar que o Brasil é o terceiro país no mundo em potencial hidrelétrico, ficando atrás somente da China e da Rússia, países continentais como o Brasil.

No entanto, o potencial não construído supera em muito o que já foi construído e está em construção.

De um potencial total estimado em 249 GW, 56% encontram-se na região amazônica, em diversos empreendimentos que estão para ser implantados a médio e longo prazo.

Entre 1980 e 2000, a capacidade instalada passou de 30 GW para pouco mais de 70 GW, mas entre 2000 e 2010 o incremento na capacidade instalada não passou de 6 GW (fontes do livro).

O Cap. 12 trata de riscos e gestão do patrimônio e inclui os principais acidentes com barragens em países estrangeiros. No caso brasileiro, são listados os acidentes causados por galgamento (Orós, Euclides da Cunha e Limoeiro), além daqueles devido a fundações e de barragens de rejeito.

No que se refere a Euclides da Cunha, há um dado importante do qual fui testemunha. Eu e o geólogo Ricardo F. da Silva, então do IPT, estivemos no local do acidente no dia seguinte à sua ocorrência e encontramos o ex-operador da usina, que havia sido demitido da Cesp porque, numa enchente anterior, havia aberto as comportas do vertedor sem consultar a matriz em São Paulo. Ou seja, a falta de agilidade na tomada de decisão levou à ruptura a barragem Euclides da Cunha e, na cascata, a barragem do Limoeiro.

Este livro não serve só para os jovens engenheiros, como sugere o autor, mas também para engenheiros como eu, com 80 anos, que, ao folhear as páginas do livro, vou reconhecendo esta e aquela obra em que estive envolvido e que são precedentes de um tipo de barragem que deu certo e que traz confiança ao empreendedor em um novo projeto com características semelhantes.

Poderia dar-me ao trabalho de comentar capítulo a capítulo, mas o Magela já o fez na introdução do livro, e muito melhor do que eu o faria.

PAULO TEIXEIRA DA CRUZ

Prefácio

Desde a Antiguidade, a humanidade vem utilizando reservatórios para acumular água para sua sobrevivência. Além dessa finalidade primordial, os reservatórios são também indispensáveis para a melhor gestão dos riscos associados a eventos hidrológicos extremos. Certamente, num primeiro momento, os reservatórios afetam o equilíbrio ecológico da região, mas, na maioria dos casos, o ser humano consegue se adaptar ao novo ambiente ecológico, muitas vezes com até melhor qualidade de vida. Do ponto de vista da geração de energia, a hidreletricidade é, com certeza, menos impactante que a maioria das alternativas aplicáveis, além de ser uma fonte constantemente renovável.

O projeto de uma usina hidrelétrica, isto é, de uma instalação que transforme a energia potencial da água em energia elétrica, é uma atividade que não é padronizável. Cada novo projeto é um interessante desafio de engenharia e as equipes precisam trabalhar com as diferentes condições de cada local de forma integrada, para conceber um projeto funcional, econômico e ambientalmente sustentável. O desenvolvimento do projeto, aqui entendido como a própria usina, o reservatório, a subestação de manobra e a linha de transmissão associada, é uma atividade multidisciplinar que engloba áreas de Engenharia Civil, Geologia, Engenharia Mecânica e Elétrica, Engenharia Ambiental, Engenharia Econômica, Construção e Montagem, bem como a Engenharia de Operação e Manutenção das Obras Cíveis e dos Equipamentos Eletromecânicos. Na Engenharia Civil, as disciplinas de *Topografia* e de *Hidrologia* se sobressaem, pois caracterizam a *queda bruta da usina* (H) e as *vazões disponíveis* (Q), *parâmetros fundamentais para o cálculo da energia*, bem como as *vazões extremas de projeto do vertedouro* (Pinto; Holtz; Martins, 1973). Há que se ter atenção especial quanto ao *dimensionamento do reservatório*, bem como aos estudos de *Sedimentologia*, uma vez que o assoreamento reduz o volume do reservatório e pode, conseqüentemente, comprometer a capacidade de geração de energia. A *Geologia* também se destaca, porque avalia as *fundações das estruturas*, nas quais se deposita grande parte da *segurança do empreendimento*. No que diz respeito ao reservatório, registram-se, em especial, os trabalhos “Water storage for sustainable development and poverty eradication” (Gomide, 2012) e *World water, resources, usage and the role of man-made reservoirs* (White, 2010). No que diz respeito à segurança, podem ser citados, em especial, os trabalhos de Peck: “A influência de fatores não técnicos na qualidade de barragens” (1973), traduzido por Cruz, e “Onde foi parar o senso crítico?” (1982), traduzido por Guidicini, os quais continuam atuais para o meio técnico envolvido nos projetos e na construção de barragens.

Com isso em mente, e observando a carência de uma bibliografia que englobasse, de forma geral, as diversas disciplinas que envolvem o desenvolvimento de um projeto hidrelétrico, bem como as vastas oportunidades que ainda restam nesse campo no Brasil no século XXI, o autor resolveu organizar este livro. Objetiva-se, assim, facilitar o desempenho da vida profissional das novas gerações de engenheiros que venham a ingressar no setor elétrico ou em outros setores que demandem os conhecimentos relativos às estruturas hidráulicas. Este livro é um manual simples que apresenta o passo a passo para se conceberem as usinas hidrelétricas, incluindo a legislação, com uma visão generalista do projeto.

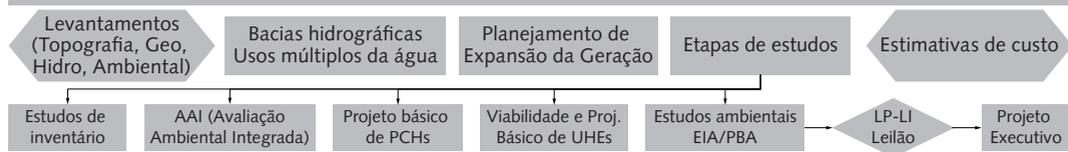
A próxima seção oferece ao leitor o esquema do livro como um panorama dos principais assuntos aqui abordados.

ESQUEMA DO LIVRO

1 – A HISTÓRIA DAS USINAS HIDRELÉTRICAS

Introdução Usinas no Brasil Desenvolvimento Transf. da energia Componentes Grandes usinas

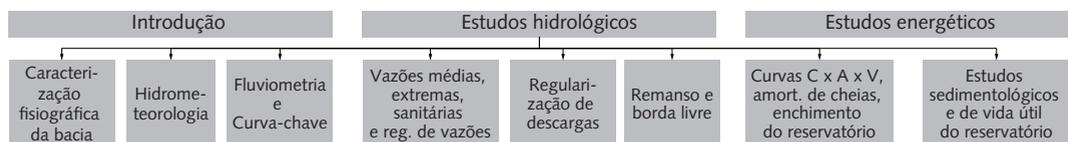
2 – O PLANEJAMENTO DA GERAÇÃO E AS FASES DE ESTUDOS E PROJETOS



3 – TIPO DE USINA E TIPO DE ARRANJO DE OBRAS

Introdução Tipos de usinas Tipos de arranjos das obras

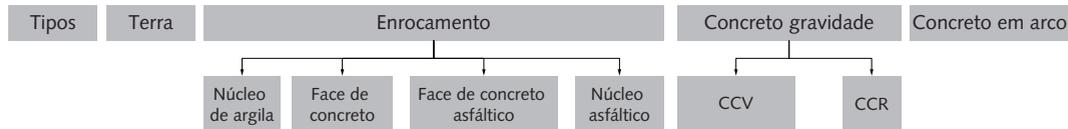
4 – ESTUDOS HIDROLÓGICOS E ENERGÉTICOS



5 – ESTUDOS GEOLÓGICOS E GEOTÉCNICOS

Introdução Sondagens e ensaios Parâmetros característicos Tratamentos de fundações Sistema de drenagem Instrumentação Materiais de construção

6 – BARRAGENS



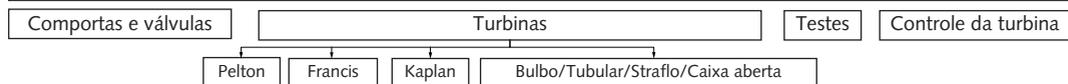
7 – VERTEDOUROS

Tipos Dimensionamento Dissipação de energia, erosão Cavitação Aspectos operativos Acompanhamento de protótipos

8 – CIRCUITO DE ADUÇÃO E GERAÇÃO

Canal de adução Tomada de água Condutos forçados Túnel de adução Chaminé de equilíbrio Casa de força Canal de fuga

9 – EQUIPAMENTOS MECÂNICOS PRINCIPAIS



10 – EQUIPAMENTOS E SISTEMAS ELÉTRICOS, ARRANJO GERAL DA UNIDADE, SUBESTAÇÃO E INTERLIGAÇÃO, OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DA USINA

Geradores Arranjo geral da unidade Transformadores Sistemas auxiliares Sistemas de proteção Subestação e interligação Operação/manutenção

11 – ASPECTOS CONSTRUTIVOS

Etapas de construção Projeto de desvio do rio Cronograma Acessos, canteiros, etc. Modalidades de contratação

12 – RISCOS E GESTÃO DO PATRIMÔNIO

Acidentes com barragens Riscos Gestão do patrimônio

Sumário

INTRODUÇÃO, 23

1 A HISTÓRIA DAS USINAS HIDRELÉTRICAS, 25

- 1.1 As usinas hidrelétricas no Brasil, 27
- 1.2 O desenvolvimento das hidrelétricas – eventos marcantes, 36
- 1.3 Transformação da energia potencial em energia elétrica, 38
- 1.4 Componentes de uma usina hidrelétrica, 40
- 1.5 Grandes hidrelétricas do mundo, 41

2 O PLANEJAMENTO DA GERAÇÃO E AS FASES DE ESTUDOS E PROJETOS, 44

- 2.1 As bacias hidrográficas e os usos múltiplos da água, 44
- 2.2 Planejamento da expansão da geração de energia, 47
- 2.3 Etapas de estudos e projetos, 51
- 2.4 Estimativa de custo e avaliação técnico-econômica da usina, 66

Anexo A1: Aproveitamento ótimo do potencial, 70

3 TIPOS DE USINA E TIPOS DE ARRANJO DE OBRAS, 74

- 3.1 Tipos de usina hidrelétrica, 74
- 3.2 Tipos de arranjo das obras, 77

Anexo A2: Exemplos adicionais de arranjos gerais de obras de usinas hidrelétricas, 88

4 ESTUDOS HIDROLÓGICOS E ENERGÉTICOS, 119

- 4.1 Estudos hidrológicos, 120
- 4.2 Estudos energéticos e econômicos, 146

5 ESTUDOS GEOLÓGICOS E GEOTÉCNICOS, 155

- 5.1 Sondagens, ensaios, classificações e modelos geológicos, 157
- 5.2 Parâmetros característicos dos materiais, 175
- 5.3 Tratamentos das fundações, 179
- 5.4 Sistemas de drenagem, 182
- 5.5 Instrumentação das fundações, 185
- 5.6 Materiais naturais de construção, 186

6 BARRAGENS, 188

- 6.1 Tipos de barragem, 188
- 6.2 Barragens de terra, 188
- 6.3 Barragens de enrocamento, 201
- 6.4 Barragem de concreto gravidade, 218
- 6.5 Barragens de concreto em arco, 228

7 VERTEDOUROS, 237

- 7.1 Tipos de vertedouro e critérios de escolha, 237
- 7.2 Dimensionamento hidráulico, 244
- 7.3 Dissipação de energia, 251
- 7.4 Cavitação, 271
- 7.5 Aeração, 283
- 7.6 Aspectos operativos de vertedouros e monitoramento, 293

8 CIRCUITO DE ADUÇÃO E GERAÇÃO, 298

- 8.1 Canal de adução, 298
- 8.2 Tomada de água, 300
- 8.3 Conduitos forçados, 305
- 8.4 Túnel de adução, 318
- 8.5 Chaminés de equilíbrio, 332
- 8.6 Casa de força, 340
- 8.7 Canal de fuga, 353

9 EQUIPAMENTOS MECÂNICOS PRINCIPAIS, 357

- 9.1 Comportas e válvulas, 357
- 9.2 Turbinas, 374
- 9.3 Turbinas Pelton – de ação, 390
- 9.4 Turbinas Francis, 392
- 9.5 Turbinas Kaplan, 395
- 9.6 Turbinas bulbo, 398
- 9.7 Turbina tubular, 401
- 9.8 Turbina straflo, 402
- 9.9 Instalação de turbina em canal aberto (*open flume*), 402
- 9.10 Testes de desempenho da turbina, 403
- 9.11 Controle da turbina, 404
- 9.12 Equipamentos e sistemas auxiliares mecânicos, 405

- 10 EQUIPAMENTOS E SISTEMAS ELÉTRICOS, ARRANJO GERAL DA UNIDADE, SUBESTAÇÃO E INTERLIGAÇÃO, OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DA USINA, 407**
 - 10.1 Gerador síncrono, 407
 - 10.2 Arranjo geral da unidade geradora, 422
 - 10.3 Transformadores principais, 426
 - 10.4 Sistemas auxiliares elétricos, 429
 - 10.5 Sistemas de proteção, 432
 - 10.6 Subestação e interligação da usina ao sistema, 438
 - 10.7 Operação e manutenção da usina, 449
- 11 ASPECTOS CONSTRUTIVOS, 451**
 - 11.1 Etapas de construção, 451
 - 11.2 Projeto do desvio do rio, 452
 - 11.3 Planejamento da construção, 462
 - 11.4 Planejamento da montagem, 467
 - 11.5 Acessos e canteiro de obras, 467
 - 11.6 Modalidades de contratação, 467
- 12 RISCOS E GESTÃO DO PATRIMÔNIO, 475**
 - 12.1 Resumo dos principais acidentes com barragens, 475
 - 12.2 Riscos associados aos aproveitamentos hidrelétricos, 489
 - 12.3 Gestão do patrimônio de instalações hidrelétricas, 496

Introdução

Os capítulos deste livro foram organizados com base na experiência de projetos do autor, que se considera um engenheiro civil “generalista”. Apresenta-se um mínimo da teoria de cada disciplina envolvida: Engenharia Civil (Topografia, Hidrologia, Hidráulica, Geologia e Geotecnia), Engenharia Mecânica e Engenharia Elétrica, bem como Engenharia Ambiental.

O Cap. 1, “História das usinas hidrelétricas”, aborda as obras hidráulicas antigas (*ancient works*) e os princípios fundamentais da transformação da energia potencial da água em energia elétrica. Além, disso, trata do desenvolvimento das usinas, listando eventos que marcaram a evolução e o progresso da geração da energia hidrelétrica, traz um resumo das implantações de usinas no Brasil, descreve os componentes de uma planta de geração, bem como apresenta tabelas com algumas das grandes centrais de geração do mundo, ranqueadas por potência, pela queda bruta e pela altura da barragem.

O Cap. 2, “O planejamento da geração de energia hidrelétrica e as fases de estudos e projetos”, trata das bacias hidrográficas e dos usos múltiplos da água desde a fase dos Estudos de Inventário Hidrelétrico – primeiros estudos que, considerando a *topografia* da bacia, definem os locais, a quantidade e os tipos de usina a serem implantados para o ótimo aproveitamento do potencial do curso d’água. Esses estudos são a base do planejamento da expansão da geração de energia elétrica para atender ao crescimento da demanda. Abordam-se também as demais fases de estudos até o Projeto Executivo, incluindo a metodologia para estimativa de custos dos aproveitamentos, bem como a Avaliação Ambiental Integrada (AAI) da bacia, considerando a metodologia aplicada atualmente para essas análises, que são contratadas pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), vinculada ao Ministério das Minas e Energia (MME).

O Cap. 3, “Tipos de usina e tipos de arranjo de obras”, trata basicamente das usinas em função da seção do vale onde serão construídas, do tipo de operação (sem e com reservatório de regularização), da característica de utilização (de base ou de ponta) e da queda aproveitada (baixa, média ou alta). Além disso, abordam-se os tipos de arranjo geral das obras civis desses aproveitamentos hidrelétricos.

O Cap. 4 apresenta os “estudos hidrológicos”, de fundamental importância para o adequado projeto de uma usina, uma vez que *definem a disponibilidade de água* na seção do curso d’água escolhida para a sua implantação. Discorre também acerca dos estudos energéticos para o dimensionamento da potência a ser instalada no empreendimento.

O Cap. 5 apresenta os “Estudos geológicos e geotécnicos”, de capital importância, uma vez que envolvem a *caracterização detalhada das fundações* das estruturas componentes da usina, bem como a caracterização completa

das fontes de materiais naturais de construção disponíveis na região do empreendimento.

Os capítulos seguintes abordam, basicamente, o dimensionamento de todas as estruturas definitivas do aproveitamento hidrelétrico: Cap. 6, “Barragens”, Cap. 7, “Vertedouros”, e Cap. 8, “Circuito de adução e geração”, incluindo os temas: canal de adução, tomada de água, conduto(s) forçado(s) ou túnel de adução, chaminé de equilíbrio, casa de força e canal de fuga.

No Cap. 9, “Equipamentos mecânicos principais”, são apresentados os equipamentos mais importantes da usina: comportas, válvulas e turbinas. No Cap. 10, “Equipamentos e sistemas elétricos, arranjo geral da unidade, subestação e interligação, operação e manutenção da usina”, são apresentados os geradores, o arranjo geral da unidade, os transformadores, os sistemas auxiliares elétricos, os sistemas de proteção, a subestação da usina e a interligação ao sistema de transmissão, bem como um resumo dos aspectos relacionados à operação e à manutenção da usina.

O Cap. 11, “Aspectos construtivos”, aborda as etapas de construção e o projeto de desvio do rio, bem como o cronograma das obras e as modalidades de contratação atualmente praticadas no país.

O Cap. 12, “Riscos e gestão do patrimônio”, apresenta um resumo sobre os riscos associados aos aproveitamentos hidrelétricos e a gestão do patrimônio das obras hidráulicas, incluindo um resumo dos principais acidentes ocorridos com barragens pelo mundo.

Esta é uma primeira edição. Espera-se que ela atenda aos objetivos e que tenha, de fato, valor para os jovens engenheiros. Solicita-se aos leitores que tenham comentários, críticas ou sugestões para torná-la mais completa, que os enviem para o autor (magela@centroin.com.br), visando ao aprimoramento das edições futuras.

A história das usinas hidrelétricas

Apesar de a Terra e o sistema solar terem se originado há 4,6 bilhões de anos, foi somente durante o período Quaternário, época do Holoceno, há 10 mil anos, que os seres humanos desenvolveram a agricultura, tendo vivido a maior parte de sua história como caçadores e coletores de alimentos. Apenas nos últimos 9 - 10 mil anos, eles descobriram como plantar e dominar animais. Tais mudanças provavelmente ocorreram nas colinas da Síria e do Iraque dos dias atuais.

As barragens têm servido aos povos por pelo menos 5 mil anos, como atestam as ruínas de obras pré-históricas de irrigação na Mesopotâmia, no Egito, Índia, Pérsia e no Extremo Oriente (Jansen, 1980). O Quadro 1.1 apresenta uma cronologia do conhecimento a respeito da água.

Quadro 1.1 Cronologia de conhecimento a respeito da água antes de Cristo (a.C.)

Período	Tipo de uso
Pré-histórico	Minas de água e fontes naturais
III a II milênio a.C.	Barragens, cisternas e poços
II milênio a.C.	Suprimento de água por gravidade: canais e condutos
século VIII a VI a.C.	Linhas longas de abastecimento de água com túneis e pontes, bem como intervenções para aproveitamentos de água cárstica
século VI a.C.	Banheiros públicos: banheiras, chuveiros, latrinas, lavanderias Uso definitivo de dois ou três tipos de qualidade de água: potável, subpotável e não potável, incluindo uso para irrigação
século VI a III a.C.	Tubos pressurizados e sistemas de sifão

Fonte: Mays (1999).

A história remota das barragens não é bem conhecida. Muitas datas antes de 1.000 a.C. podem ser somente estimadas, particularmente no que diz respeito ao Egito antigo, cuja cronologia peculiar às vezes lança apenas uma fraca luz em muitas dinastias e suas realizações de engenharia.

Ruínas de obras na Índia e no Sri Lanka (Ceilão) oferecem alguma evidência de como os reservatórios de água foram criados pelas civilizações antigas. Um dos métodos comuns de construção envolvia barreiras de terra nos rios, sendo que alguns dos lagos formados passavam a ocupar vastas áreas.

Os materiais de construção eram transportados em cestas ou outros *containers*. A compactação era realizada incidentalmente pelo pisotear dos pés dos transportadores, método usado até hoje em alguns países onde os

Em 1844, Foucault iluminou a Place de La Concorde, em Paris, com lâmpadas a arco.

Em 1856, James Maxwell (1831-1879) traduziu matematicamente a visão de Faraday em relação à eletricidade e ao magnetismo.

Em 1882, Thomas Edison (1849-1931) fabricou lâmpadas incandescentes e todos os outros componentes necessários para a instalação de luz elétrica em residências. Edison e sua equipe instalaram caldeiras e dínamos em um edifício de Nova York. Além disso, também instalaram linhas de cabos para distribuir energia elétrica para a região de Wall Street.

Também em 1882, entrou em operação a primeira usina hidrelétrica nos Estados Unidos da América, a Vulcan Street Plant, de 12,5 kW, no Fox River (Appleton, Wisconsin) (Fig. 1.13). Na mesma época, começou a operação de uma usina hidrelétrica da Minneapolis Brush Electric Company.

Em 1888, Nikola Tesla (1856-1943) inventou o motor de indução, o que abriu o caminho para a utilização das fontes de corrente alternada, e o transformador chamado bobina de Tesla.

Em 1901, a transmissão de energia por longas distâncias se tornou econômica na América após a instalação de um equipamento de corrente alternada na UHE Niagara Falls, no Estado de Nova York, por George Westinghouse, possibilitando a expansão do uso das usinas hidrelétricas.

Nos anos 1930, a capacidade das turbinas hidráulicas se tornou maior, o que coincide com o aumento da demanda de energia. As grandes usinas (> 15 MW) e o aumento crescente da capacidade das turbinas se tornaram a



Fig. 1.13 Vista lateral da Vulcan Street Plant, a primeira usina hidrelétrica dos EUA, no Fox River (Appleton, Wisconsin)

Foto: Royalbroil (2010). Disponível em:

<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:AppletonLocks1FoxRiverHistoricDistrict.jpg>

norma. A potência das turbinas a vapor foi também aumentando rapidamente e o custo da eletricidade continuou a cair.

No período 1940-1970, na América, o custo de operar e manter velhas e pequenas hidrelétricas se tornou maior que a renda que elas produziam. Dessa forma, as pequenas centrais (< 15 MW) foram sendo aposentadas e deu-se a escalada das grandes centrais (> 15 MW), o que pode ser visto na Fig. 1.14. Uma tendência similar ocorreu na Europa. O crescimento das grandes hidrelétricas no resto do mundo só disparou a partir de 1960.

1.3 Transformação da energia potencial em energia elétrica

Apresenta-se na Fig. 1.15 o esquema típico da instalação de uma usina hidrelétrica.

O recipiente 1 representa um reservatório, criado por uma barragem, que alimenta a turbina. O recipiente 2 representa o canal de fuga da usina por meio do qual se restituem as águas ao leito natural do rio. A instalação 3 compreende a casa de força, que abriga o conjunto formado pela turbina hidráulica e o

gerador elétrico, os quais são acoplados por um eixo. A altura total de queda H (energia potencial por unidade de peso) é igual à diferença entre os níveis do reservatório e do canal de fuga, desprezando-se a altura de velocidade, $V^2/2g$, da ordem de 0,2 m.

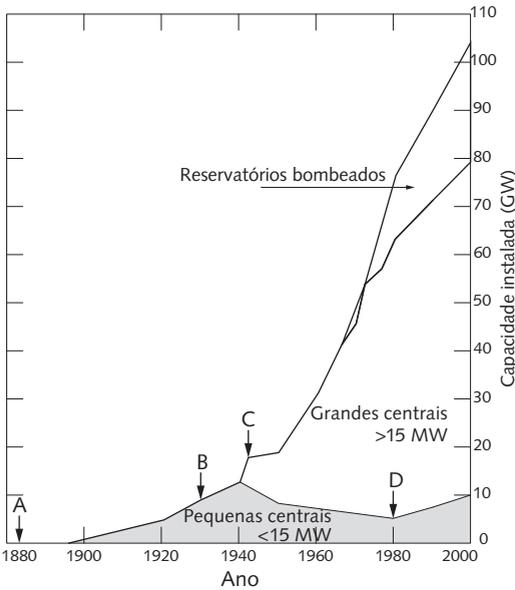
A água que se encontra no reservatório possui uma energia potencial em comparação à água presente no canal de fuga. Essa energia é dada pela Eq. 1.1:

$$E = \gamma \cdot H \cdot V = \rho \cdot g \cdot V \cdot H \quad (1.1)$$

A energia por unidade de tempo é a potência, P . Como V/T é a vazão Q :

$$P = \gamma \cdot Q \cdot H = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \quad (1.2)$$

Nessas expressões, conforme se utilize o sistema internacional MLT (massa, comprimento, tempo), ou o sistema prático FLT (força, comprimento, tempo) tem-se os dados da Tab. 1.1.



- (A) A primeira hidrelétrica, UHE Vulcan Street (12,5 kW) começou a operar em 1882 em Appleton (Wisconsin)
- (B) Primeira hidrelétrica reversível começou a operar em 1929 (Rocky River)
- (C) UHE Grand Coulee (5.463 MW) em 1941
- (D) Aprovação de legislação para incentivar Pequenas Centrais (<15 MW)

Fig. 1.14 Capacidade instalada na América (1882-2000)

Fonte: Gulliver e Arndt (1991).

2.1 As bacias hidrográficas e os usos múltiplos da água

No Brasil existem 12 regiões hidrográficas, como mostra a Fig. 2.1 (conforme a Resolução 32, de 15 de outubro de 2003, do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH)). Em sete delas, prevalece o nome de seus rios principais: Amazonas, Tocantins-Araguaia, São Francisco, Parnaíba, Paraná, Paraguai e Uruguai. As outras são agrupamentos de vários cursos d'água, não havendo um rio principal como eixo e, por isso, são chamadas de bacias agrupadas: Bacia do Atlântico Sul, do Atlântico Sudeste, do Atlântico Leste, do Atlântico Nordeste Oriental e Bacia do Atlântico Nordeste Ocidental.

O Brasil possui uma das mais amplas, densas, diversificadas e extensas redes fluviais de todo o mundo. Aproximadamente 13% de toda a água doce do planeta está em território brasileiro. O Brasil possui o terceiro maior potencial hidrelétrico do mundo, depois da China e da Rússia. As bacias do Amazonas e do Paraguai ocupam, predominantemente, extensas áreas de planícies. As bacias do Paraná e do São Francisco são tipicamente de planalto.

Dentre as quedas de água naturais e que foram aproveitadas para implantação de usinas hidrelétricas, merecem destaque as de Urubupungá (rio Paraná), Pirapora, Sobradinho, Itaparica e Paulo Afonso (rio São Francisco). As cachoeiras do rio Iguaçu estão entre aquelas preservadas por seu valor cênico, ambiental e turístico (Fig. 2.2).

Os rios brasileiros apresentam regime pluvial, ou seja, são abastecidos pelas águas das chuvas. A precipitação média anual na América do Sul é de 1.600 mm (aproximadamente o dobro da precipitação média anual nos demais continentes) e, no Brasil, é de 1.800 mm.

Em decorrência do predomínio do clima tropical, na maior parte do território brasileiro, as cheias ocorrem no verão (de dezembro a março), à exceção de alguns rios nordestinos, cujas cheias ocorrem entre as estações do outono e do inverno (abril a julho). Os rios da região Amazônica, por terem temporalmente diferentes contribuições (precipitações e degelo dos Andes), têm vazante atenuada. Já os rios da região Sul, devido à possibilidade de precipitações intensas ao longo o ano civil (frentes frias combinadas com centros de baixa pressão atmosférica), também têm vazantes pouco precisas no tempo e, em geral, de menor severidade. À exceção de alguns rios da região semiárida do Nordeste, os rios são perenes.

Quando se pensa em explorar os recursos hídricos de uma bacia hidrográfica para fins de geração de energia, é obrigatório avaliar todos os outros possíveis usos da água nessa bacia, o que é feito na primeira fase de estudos,

de cada fase de estudo de uma UHE. O processo para implantação de um empreendimento hidrelétrico no Brasil é extenso, complexo e burocrático.

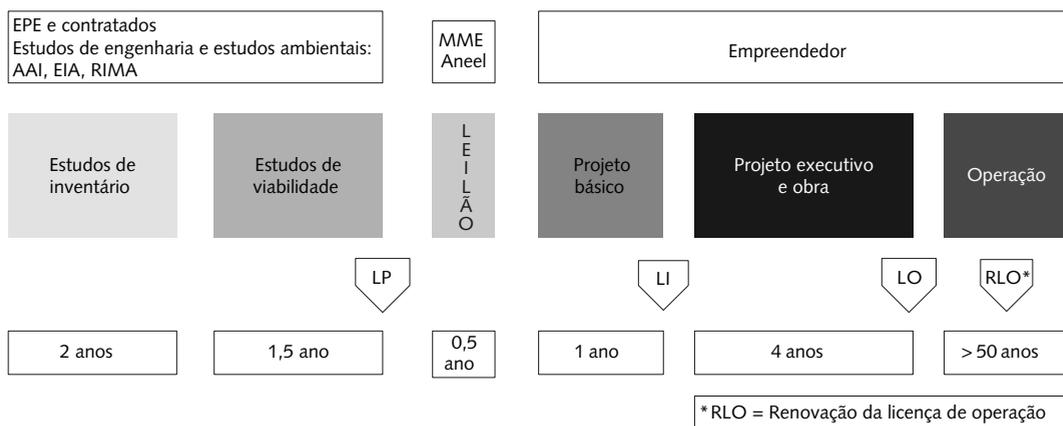


Fig. 2.13 Etapas de estudos para uma UHE (leilão)

Fonte: adaptado de Aneel (2014).

2.3.1 Estudos de inventário hidrelétrico

O potencial hidrelétrico de uma bacia (Aneel, 1998a) corresponde ao total estimado que pode ser técnica, econômica e ambientalmente aproveitado, considerando-se a configuração do sistema elétrico de referência, o qual contempla as usinas em operação, em construção ou planejadas, e leva em conta os cenários de utilização múltipla da água.

Antes do início efetivo dos Estudos de Inventário, é elaborado, em escritório, um planejamento detalhado dos mesmos, utilizando-se, principalmente, a base cartográfica do IBGE.

Os Estudos de Inventário são realizados de acordo com a metodologia constante das diretrizes para elaboração de EIH/ELB (Eletrobras, 2007). Destaca-se que esses estudos são a base do planejamento da expansão da geração hidrelétrica do país. São desenvolvidos em duas fases: estudos preliminares e estudos finais de inventário. Na primeira fase, são estudadas diversas alternativas de divisão da queda e selecionadas duas ou três para detalhamentos em nível de estudos finais.

Nesses estudos, são identificados os aproveitamentos que serão futuramente implantados na bacia hidrográfica em foco, os quais, de acordo com critérios da Aneel/Eletrobras, são classificados em:

- MCHs: com potência instalada menor que 1,0 MW, de acordo com a Resolução nº 395, de 4 de dezembro de 1998, da Aneel (1998b);
- PCHs: com potência instalada entre 1,0 MW e 30,0 MW, de acordo com a Resolução nº 652, de 9 de dezembro de 2003, da Aneel (2003);
- UHEs: com potência instalada maior que 30 MW.

Nessa fase, também são detalhados e ajustados os cronogramas de implantação dos programas ambientais, em função das datas de evolução das obras de engenharia.

2.4 Estimativa de custo e avaliação técnico-econômica da usina

2.4.1 Elaboração do Orçamento Padrão Eletrobras (OPE)

Nos estudos e projetos que são encaminhados à Aneel, a estimativa de custos do aproveitamento deve ser realizada utilizando-se as planilhas do OPE.

O OPE é uma planilha composta de contas padrão, listadas a seguir. Na opinião do autor, e de diversos técnicos que militam no setor há muitos anos, a estrutura do orçamento é antiga, confusa e já deveria ter sido revisada. A realidade é que, para participar dos leilões de energia, cada empresa participante utiliza sua própria metodologia de orçamento e de avaliação de riscos, seguros etc., na formulação de sua proposta. Entretanto, se não houver um orçamento padrão, fica complexa a avaliação comparativa das propostas. Por isso, o ideal é que as entidades públicas e privadas interessadas rediscutam o OPE e o atualizem, de forma racional e otimizada, para que todos o adotem.

Segue a descrição resumida das contas do OPE:

- **conta 10:** terrenos, relocações e outras ações socioambientais. É a conta dos custos ambientais. Em um contrato EPC, o risco dessa conta é muito elevado;
- **conta 11:** estruturas e outras benfeitorias. Engloba a casa de força e a vila dos operadores;
- **conta 12:** barragens e adutoras. Engloba o desvio do rio, as barragens de terra e de concreto, o vertedouro, o circuito de adução (tomada de água, conduto forçado ou túnel adutor, chaminé de equilíbrio e canal/túnel de fuga), bem como construções especiais (eclusa, por exemplo);
- **conta 13:** turbinas e geradores;
- **conta 14:** equipamentos elétricos acessórios;
- **conta 15:** diversos equipamentos da usina;
- **conta 16:** estradas de rodagem, de ferro e pontes – inclui aeroporto;
- **conta 17:** custos indiretos. Engloba o canteiro e acampamento, engenharia e administração do proprietário.

A conta 10 é considerada, integralmente, como custo ambiental, alcançando um valor alto em relação às outras contas. Entretanto, há custos nela que não refletem nada em relação às ações de ordem ambiental. O custo do terreno do reservatório, por exemplo, é geralmente bastante elevado e tem que ser despendido, de forma obrigatória, independentemente das atividades mitigadoras ou compensatórias dos impactos do empreendimento. Incluindo-se os terrenos, a conta 10 às vezes alcança cerca de 20% do custo global do empreendimento, percentual esse imputado à área ambiental como benefícios que, na realidade, não existem. Por isso, na rediscussão do OPE, esse custo

As condições naturais das bacias hidrográficas e do meio ambiente no seu entorno condicionam o desenvolvimento dos estudos e projetos de aproveitamento dos recursos hídricos nelas disponíveis.

No Brasil, historicamente, a primeira fase de estudos de uma bacia, os chamados Estudos de Inventário Hidrelétrico (EIH), sempre foi desenvolvida pelo MME, por meio da Eletrobras (ELB), até 1994, e, posteriormente, pela EPE. Esses estudos obrigatoriamente contemplavam a utilização dos usos múltiplos da água, o que já se poderia considerar uma primeira Avaliação Ambiental Integrada (AAI) da bacia.

Cabe destacar que, nos antigos estudos da Canambra Engineering Consultants (Canambra), realizados na década de 1960, essa avaliação já era feita. A Canambra era um consórcio formado por especialistas canadenses e americanos que veio para o Brasil contratado pela Eletrobras.

O resultado dos estudos e avaliações técnicas determina as finalidades dos futuros reservatórios: se deverão ter o simples objetivo de fornecer água para gerar energia ou atender a múltiplos objetivos, como controle de cheias, abastecimento urbano e rural e uso industrial (usos consuntivos), irrigação, navegação, turismo e lazer, aquicultura e pesca, criação de animais e manutenção de ecossistemas (usos não consuntivos).

Os usos para irrigação e navegação podem conflitar com o uso para geração em virtude das prioridades definidas para o aproveitamento racional dos recursos hídricos da bacia. Por isso, todos os usos devem ser devidamente equacionados.

Nos EIH, como visto anteriormente, são definidas quantas usinas poderão ser implantadas na bacia hidrográfica, bem como os seus níveis de água operativos (ou de operação), os quais, como será abordado adiante, caracterizarão os tipos de cada empreendimento.

3.1 Tipos de usina hidrelétrica

3.1.1 Usinas em função do tipo de operação

As usinas hidrelétricas podem se caracterizar como as que não utilizam águas do reservatório, conhecidas como usinas a fio d'água (*run of river*), e as de reservatórios de regularização.

As usinas hidrelétricas a fio d'água são usinas sem reservatório de regularização, cujo nível de água operativo (NA) não varia (ou varia muito pouco). Nessas usinas, incluem-se as usinas com regularização diária ou semanal, que permitem o fornecimento da potência máxima em períodos de ponta.

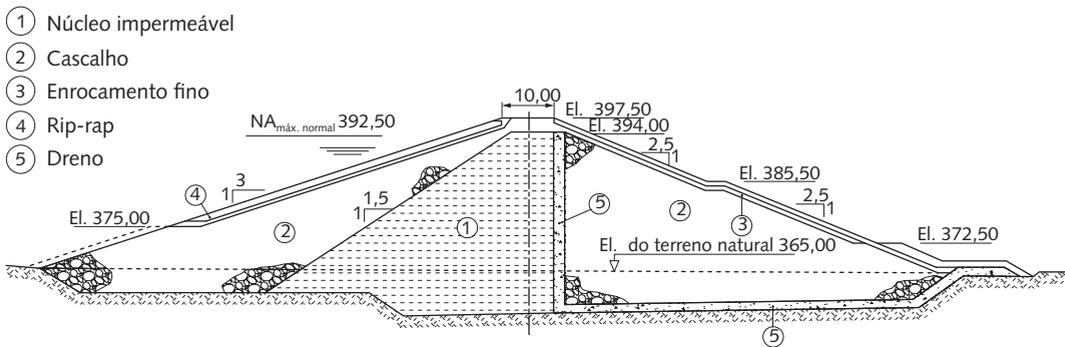


Fig. 3.27 UHE Sobradinho, seção típica da barragem

Fonte: CBDB (1982).

Fig. 3.28 UHE

Sobradinho, vista aérea.

No primeiro plano, há estruturas de concreto: vertedouro de fundo, vertedouro de superfície em funcionamento e casa de força

Fonte: CBDB (2006, p. 76).



O arranjo geral das obras contempla as seguintes estruturas:

- barragem de enrocamento com face de concreto, com crista na elevação 651,00 m, comprimento de 665 m e altura máxima de 185 m;
- vertedouro na ombreira esquerda com 119,4 m de largura, com seis comportas de 15 m de largura e 20 m de altura, com capacidade máxima de vazão de 23.840 m³/s. A calha de concreto tem 274 m de comprimento e dois degraus aeradores, para prevenir a cavitação do concreto. A dissipação de energia é em salto de esqui;
- tomada de água na ombreira esquerda com 52,3 m de altura e 24,3 m de largura, com seis comportas tipo vagão de 6,54 m de altura por 6,20 m de largura;
- túnel de pressão, em número de três, com diâmetro interno de 6,9 m e comprimento de 39,2 m, com trecho reforçado de 117,1 m;
- casa de força abrigada com 45 m de altura e 91,8 m de comprimento,

A2.7 UHE Itá

O arranjo das obras da usina de Itá (2000), no rio Uruguai (SC/RS), tem dois vertedouros e o circuito hidráulico de adução e geração é de derivação, paralelo ao segundo vertedouro (Figs. 3.33 e 3.34).

O reservatório inunda uma área estimada em 141 km² no NA máximo normal, na elevação 370,00 m. O NA máximo de cheia está na elevação 375,70 e o NA mínimo normal, na elevação 364,00 m.

O arranjo geral das obras contempla as seguintes estruturas:

- barragem de enrocamento com face de concreto, com crista na elevação 375,50 m, comprimento de 880 m e altura máxima de 125 m;
- vertedouro de superfície: principal com 130,50 m de largura e 39 m de comprimento; auxiliar com 85,50 m de largura e 54 m de comprimento; com capacidade máxima de vazão de 49.940 m³/s. A calha de concreto do vertedouro principal tem 193 m de comprimento e a calha do auxiliar tem 120 m revestidos de concreto, mais 155 m não revestidos. A dissipação de energia é em salto de esqui;
- tomada de água tem 35,5 m de altura e 88,8 m de largura, com cinco comportas tipo vagão de 9,30 m de altura por 7,20 m de largura;
- condutos forçados, em número de cinco, com diâmetro interno de 6,8 m e 18,35 m de comprimento;
- casa de força abrigada com 56 m de altura e 120,5 m de comprimento, incluindo a área de montagem, com cinco turbinas Francis de eixo vertical, de 290 MW cada, vazão turbinada de 313 m³/s e queda de 102 m. A velocidade de operação é de 128,6 rpm e os geradores têm capacidade de 305 MVA, velocidade de operação de 128,6 rpm e fator de potência 0,95.

O desvio do rio foi feito por cinco túneis, como exposto em CBDB (2009). Os volumes principais das obras civis são:

- | | |
|---------------------------|-------------------------------------------|
| • escavação em terra | 9,6 m × 10 ⁶ m ³ ; |
| • escavação em rocha | 8,0 m × 10 ⁶ m ³ ; |
| • escavação do túnel | 6,42 × 10 ⁵ m ³ ; |
| • enrocamento e transição | 11,1 m × 10 ⁶ m ³ ; |
| • concreto | 5,0 m × 10 ⁵ m ³ ; |
| • cimento | 115 m × 10 ³ t; |
| • aço | 30 m × 10 ³ t. |

A2.8 UHE Corumbá

A UHE Corumbá (1997), no rio Corumbá, tem arranjo semelhante aos de Barra Grande e Campos Novos, porém, os condutos forçados são aparentes. Esses condutos têm diâmetro interno de 6,8 m e comprimentos que variam entre 131 m e 144 m (CMDB, 2000) (Fig. 3.35).



Fig. 3.47 UHE Nova Ponte (rio Araquari, MG), vista aérea de jusante
Fonte: CBDB (2006, p. 58).

A barragem é de enrocamento com núcleo de argila, com 142 m de altura máxima sobre as fundações e taludes de 1,65:1,0 a montante e de 1,3:1,0 a jusante. O comprimento total na crista é de 1.600 m.

O vertedouro de superfície em calha na ombreira direita tem quatro comportas de 11 m × 17,35 m e comprimento de 61,60 m. A capacidade máxima de vazão é de 6.140 m³/s.

A calha do vertedouro tem um comprimento total de 699,50 m, sendo o trecho inicial de 164,50 m, revestido de concreto. O restante da calha, com 535 m, não é revestida. Essa solução, como a de Serra da Mesa, merece destaque, uma vez que o escoamento flui por longo trecho

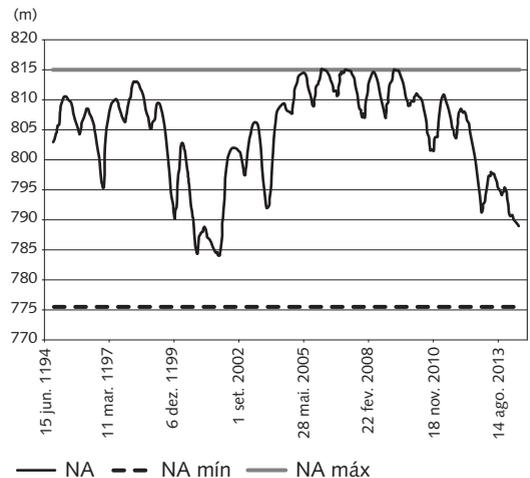


Fig. 3.48 UHE Nova Ponte (MG), evolução dos níveis d'água do reservatório
Fonte: Cemig (2014).

Apresentam-se neste capítulo, em particular, os estudos hidrológicos correspondentes aos projetos de PCHs. Os estudos para as UHEs seguem a mesma linha, mas com grau de complexidade maior e com aspectos específicos particulares. Como visto no Cap. 1, a potência a ser instalada numa usina hidrelétrica, em geral, é diretamente proporcional ao produto da vazão média pela queda média líquida. Esses parâmetros, juntamente com a curva-chave do canal de fuga da usina e as informações cartográficas, são os principais dados de entrada do projeto.

A definição da série de vazões médias deve ser feita com o apoio de um consultor de Hidrologia com experiência comprovada em estudos dessa natureza. Quanto à série de vazões extremas, cabe registrar que sua importância se deve ao fato de que grande parte dos acidentes com usinas decorre da insuficiência de capacidade de vazão dos vertedouros (> 20%) (Icold, 1995), o que significa que as cheias foram subdimensionadas (ver exemplo do acidente da barragem de El Guapo no Cap. 12).

A curva-chave do canal de fuga caracteriza a variação dos níveis de água do canal de fuga (variação da queda) em função das vazões defluentes da usina (iguais à soma das vazões turbinadas com as vazões vertidas). A determinação dessa curva é feita com base no histórico de dados do posto fluviométrico instalado no próprio canal de fuga da usina. Se o histórico de leituras é longo, a curva-chave pode ser obtida com boa precisão. Como isso é raro, nos projetos atuais têm-se utilizado dados de outros postos existentes na bacia, transpostos para o local da usina. Esses dados, juntamente com os obtidos no local por meio de medições sistemáticas, possibilitam obter uma curva-chave com razoável precisão.

Essa curva pode ser aprimorada na medida em que a série de dados vai ficando mais extensa ao longo dos estudos e depois no período de operação da usina. Destaca-se que, no modelo atual do setor elétrico, para PCH, é feita uma verificação anual do histórico da geração durante o mês de julho, com o resultado sendo emitido pela SRG, Aneel em agosto. A energia média comercializada pode ser aumentada ou diminuída em função do histórico da operação.

Os levantamentos cartográficos na área do reservatório, bem como os levantamentos topográficos do local da usina, devem ser realizados obedecendo-se às normas de cartografia da SGH, Aneel, com vistas a minimizar os eventuais erros (que não são raros).

Apresentam-se, a seguir, os estudos hidrológicos, tomando como referência o Relatório de Projeto Básico de uma usina, a PCH Poço Fundo, em São José do Vale do Rio Preto (RJ), elaborado pela Watermark Engenharia (RJ). Para essa

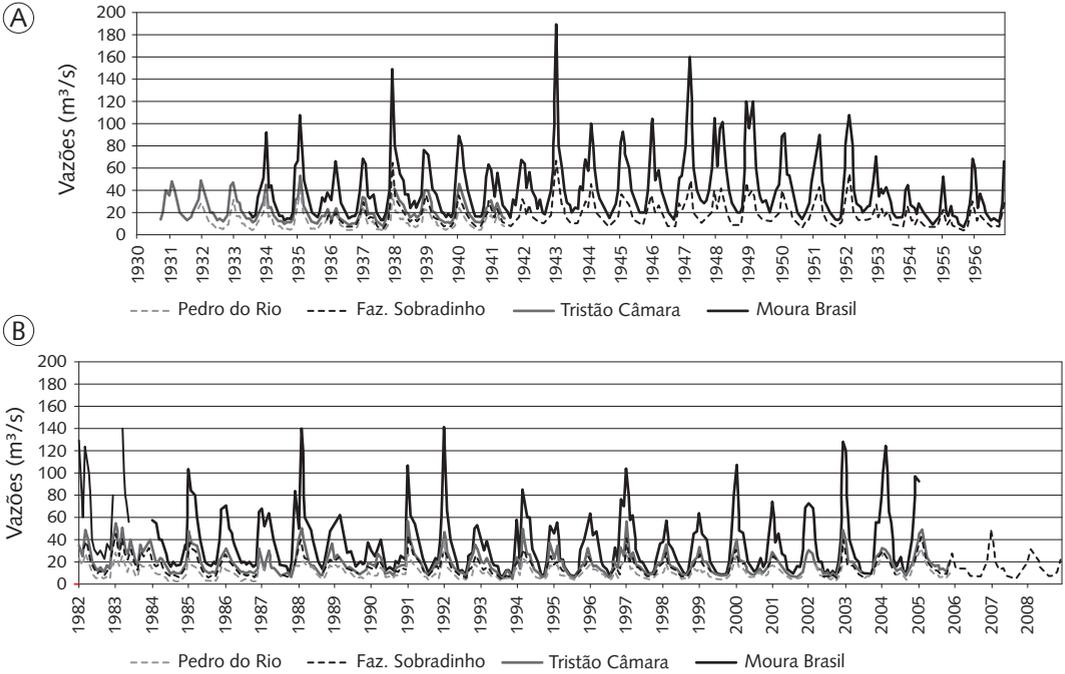


Fig. 4.2 Hidrograma de vazões médias mensais dos postos da bacia do rio Piabanha (RJ): (A) 1930-1956 e (B) 1982-2006

Fonte: Projeto Básico da PCH

Para preencher as falhas existentes nos registros, estabelecem-se correlações de vazões médias mensais entre eles, permitindo, assim, que se obtenha uma série contínua comum de vazões médias mensais para todos os postos, relativa ao maior período de observação. Essas correlações são apresentadas em gráficos típicos, como o indicado na Fig. 4.3.

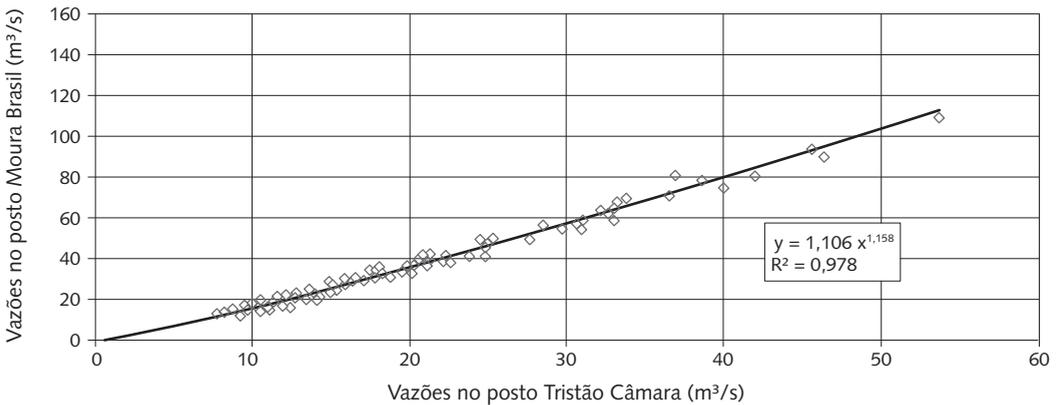


Fig. 4.3 Correlação de vazões médias mensais. Posto: Moura Brasil vs. Tristão Câmara

Fonte: Projeto Básico da PCH.

Tab. 4.20 Cálculo do tempo de assoreamento previsto para o reservatório da PCH Poço Fundo

Sigla	Descrição / Fórmula	Un.	Valor
AD	Área de Drenagem	(km ²)	730
Q _{MLT}	Descarga líquida média de longo período	(m ³ /s)	16,86
L	Comprimento do reservatório	(m)	5.191
NA _{res}	Nível de água máximo normal do reservatório	(m)	691,00
A _{res}	Área do reservatório no NA máximo normal	(10 ³ m ²)	140
V _{res}	Volume do reservatório no NA máximo normal	(10 ⁶ m ³)	0,47
Q _{st}	Descarga sólida média de longo período	(t/ano)	43.518
IS	Índice de Sedimentação = $V_{res}^2 / (Q^2 \cdot L)$	–	1,83 E + 5
ER	Eficiência de Retenção** (dado pela curva de Churchill)	(%)	20%
Pc	Porcentagem de argila contida no sedimento	(%)	25%
Pm	Porcentagem de silte contida no sedimento	(%)	25%
Ps	Porcentagem de areia contida no sedimento	(%)	50%
Wc	Coeficiente de compactação da argila*	–	0,416
Wm	Coeficiente de compactação do silte*	–	1,121
Ws	Coeficiente de compactação da areia*	–	1,554
Kc	Constante dependente do tipo de operação do reservatório (argila)*	–	0,256
Km	Constante dependente do tipo de operação do reservatório (silte)*	–	0,091
Ks	Constante dependente do tipo de operação do reservatório (areia)*	–	0,000
K	Constante dependente do tipo de operação do reservatório (total)*	–	0,087
g _i	Peso específico aparente inicial = $Wc \cdot Pc + Wm \cdot Pm + Ws \cdot Os$	(t/m ³)	1,161
T'	Tempo de assoreamento (cálculo inicial) = $V_{res} \cdot g_i / (Q_{st} \cdot ER)$	(anos)	69,22
g _T	Peso específico aparente médio em T anos (compactado) = $Kc \cdot Pc + Km \cdot Pm + Ks \cdot Ps$	(t/m ³)	1,319
T	Tempo de assoreamento (corrigido) = $V_{res} \cdot g_T / (Q_{st} \cdot ER)$	(anos)	78,63

*Valores válidos para o caso de “sedimento sempre ou quase sempre submerso”.

**A eficiência de retenção obtida pela curva de Churchill para o sedimento em suspensão foi nula. Considerou-se 20% de retenção, referentes à porcentagem estimada para o sedimento do leito.

eficiência de retenção obtida da curva de Churchill foi nula, graças a um baixo índice de sedimentação. Consideraram-se 20% de retenção, referente apenas ao sedimento do leito.

No entanto, apresenta-se, no Quadro 4.1, uma lista de reservatórios de usinas hidrelétricas com algum tipo de problema. Essa lista, elaborada pelo professor Newton de Oliveira Carvalho (1994), ressalta a importância desse assunto para os jovens engenheiros.

Como registrado por Carvalho (1994), a bacia do rio Doce é uma das mais prolíficas na produção de sedimentos no país. As chuvas intensas e as grandes declividades da bacia são as principais causas naturais que favorecem a erosão do seu solo. Como causas antrópicas, destacam-se a exploração de minérios a

4.2.5 Dimensionamento energético-econômico

Para o dimensionamento energético-econômico da usina, deve-se realizar uma análise dos incrementos, pela qual se aumenta gradualmente a potência instalada da usina até que os benefícios econômicos resultantes da energia adicional sejam superados pelo custo desse aumento, considerando-se os parâmetros econômicos.

O custo anual foi calculado para uma vida útil econômica de 30 anos, uma taxa de juros de 12% ao ano e custo anual de operação e manutenção de R\$10,00/MWh. Os custos das alternativas de motorização utilizados no dimensionamento energético-econômico, estimados em função do arranjo da obra concebido como descrito anteriormente, constam da Tab. 4.23.

Tab. 4.23 PCH Poço Fundo, custos das alternativas (Projeto Básico)

Pot. Inst. (MW)	Custo total (R\$)	Custo anual (R\$/ano)	Custo incremental (R\$)
12	59.168.870,00	7.984.044,00	–
13	60.952.189,00	8.225.580,00	241.536,00
14	62.437.950,00	8.424.919,00	199.340,00
15	63.980.630,00	8.628.697,00	203.778,00
16	65.493.610,00	8.826.160,00	197.463,00

Data de referência: abril de 2010

Os benefícios energéticos, valorizados pelos parâmetros de mercado, bem como a análise dos benefícios/custos em nível incremental constam das Tabs. 4.24. e 4.25.

Tab. 4.24 Poço Fundo, benefícios energéticos (Projeto Básico)

Pot. inst. (MW)	Energia média (MW médios)	Benefício anual (R\$)	Benefício anual incremental (R\$)
12	7,29	8.940.456,00	–
13	7,52	9.222.528,00	282.072,00
14	7,69	9.431.016,00	208.488,00
15	7,83	9.602.712,00	171.696,00
16	7,94	9.737.616,00	134.904,00

Data de referência: abril de 2010

A análise desses dados permite concluir que a potência da PCH Poço Fundo deve ser igual a 14 MW, uma vez que, a partir dessa motorização, a relação benefício/custo fica inferior a 1 (um), ou seja, o custo da energia é superior ao

Os estudos geológicos e geotécnicos, à semelhança dos estudos topográficos e hidrológicos, são de muita importância para o projeto, a construção e a segurança de uma usina hidrelétrica, independentemente de seu tamanho. Uma vez que a barragem retém água, o subsolo deve ser exaustivamente investigado e muito bem caracterizado, por equipe experiente, para embasar o projeto das fundações das estruturas componentes do arranjo geral das obras da usina. Ênfase deve ser dada à pesquisa das ombreiras, especialmente as muito íngremes e com capeamento espesso de solo.

É necessário conhecer em detalhes a capacidade de suporte, a permeabilidade e a deformabilidade do maciço de fundação. Em função das cargas que são transmitidas para o subsolo, nos diversos casos de carregamento, esses parâmetros subsidiam os estudos e projetos de engenharia que definem as cotas de assentamento das estruturas, bem como os projetos de escavação, tratamento, drenagem e instrumentação da fundação, visando à segurança da obra.

As características dos sítios, o arranjo geral das obras e o porte do empreendimento condicionam a extensão do programa de investigações das fundações e de caracterização dos materiais que serão utilizados na construção. Esse programa deve incluir, também, pesquisas das condições das encostas em geral, se esse for um aspecto crítico, em função das características geomorfológicas ao longo de toda a extensão do reservatório. Além disso, é necessário pesquisar e caracterizar os materiais das áreas de empréstimo de solo, as pedreiras, as jazidas de areia e cascalho mais próximas do sítio, os locais prováveis para áreas de bota-fora, as áreas para as instalações industriais, bem como as áreas para os canteiros de obras e instalações de apoio.

As lições aprendidas com os acidentes com barragens (Cap. 12), com rupturas pelas fundações, ombreiras e por galgamento, muitos deles com perda de vidas, corroboram a necessidade de que os estudos e as investigações geológicas e geotécnicas necessários sejam feitos e planejados por engenheiros e geólogos de engenharia com comprovada experiência em projetos dessa natureza, em todas as fases de estudos. Cabe lembrar que as barragens já ultrapassaram, e muito, 200 m de altura, o que significa colunas de água também maiores que essa medida, ou seja, pressões muito elevadas.

Para sensibilizar os jovens engenheiros sobre a importância do tema, faz-se menção especial à V Lauritz Bjerrum Memorial Lecture, apresentada em Oslo, Noruega, em 05 de maio de 1980, por Ralph B. Peck: “Where has all the judgement gone?”. Esse trabalho foi traduzido por Guidicini e publicado em junho de 1982 pela ABMS com o título “Onde foi parar o senso crítico?”. Essa palestra discorreu, entre outros acidentes, sobre a ruptura da barragem

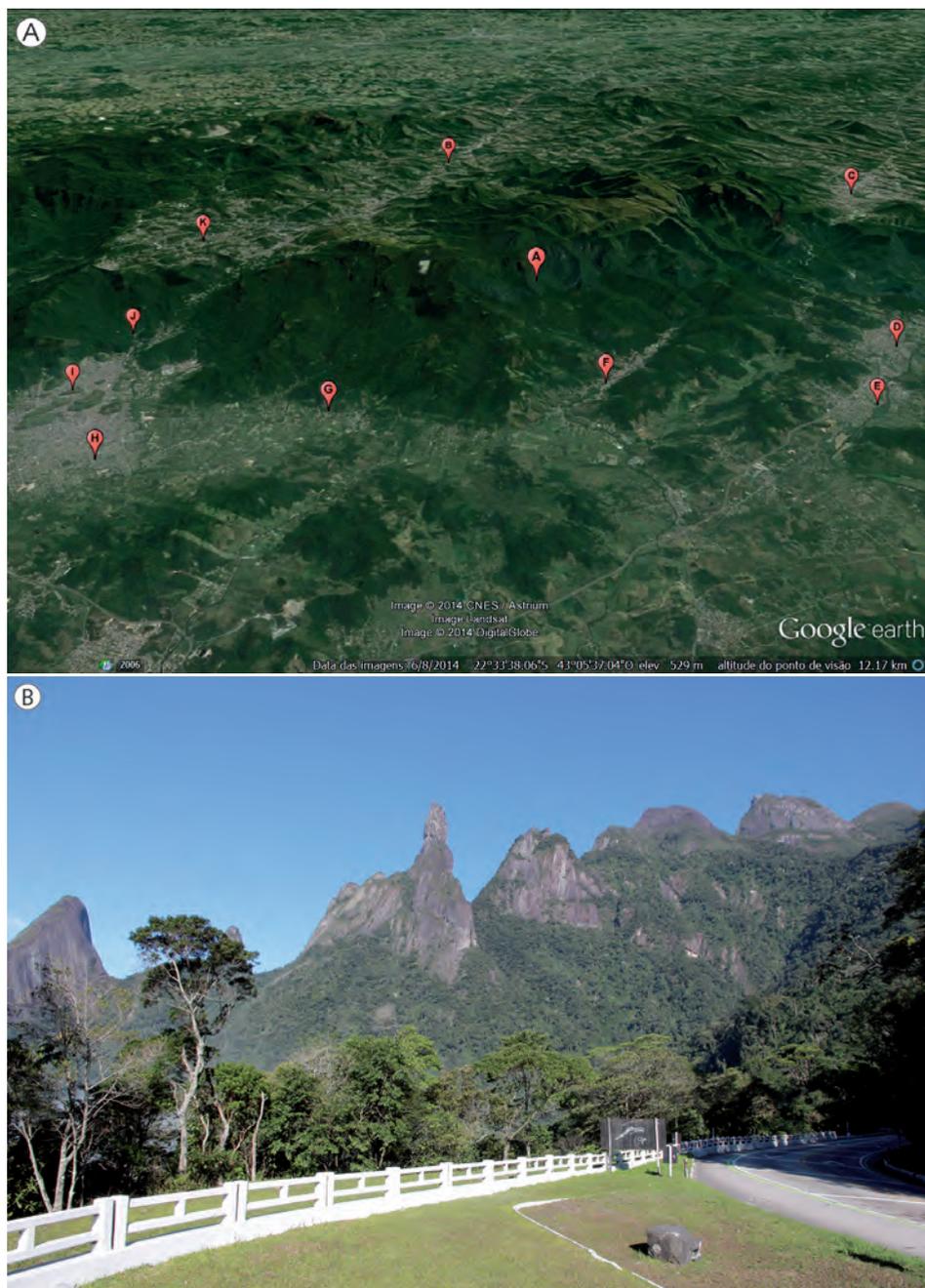


Fig. 5.2 (A) Serra dos Órgãos ((a) Serra dos Órgãos; (b) Itaipava; (c) Teresópolis; (d) Guapimirim; (e) Parada Modelo; (f) Santo Aleixo; (g) Rio do Ouro; (h) Piabetá; (i) Frágoso; (j) Raiz da Serra; (k) Petrópolis) e (B) rochas pertencentes à suíte da Serra dos Órgãos. Trata-se do maior batólito granítico exposto no Estado do Rio de Janeiro

Fonte: (A) Google Earth/CNES/Astrium; DigitalGlobe (2014); (B) Halley Pacheco de Oliveira (2013). Disponível em: <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Serra_dos_%C3%93rg%C3%A3os_01.jpg?uselang=pt-br>

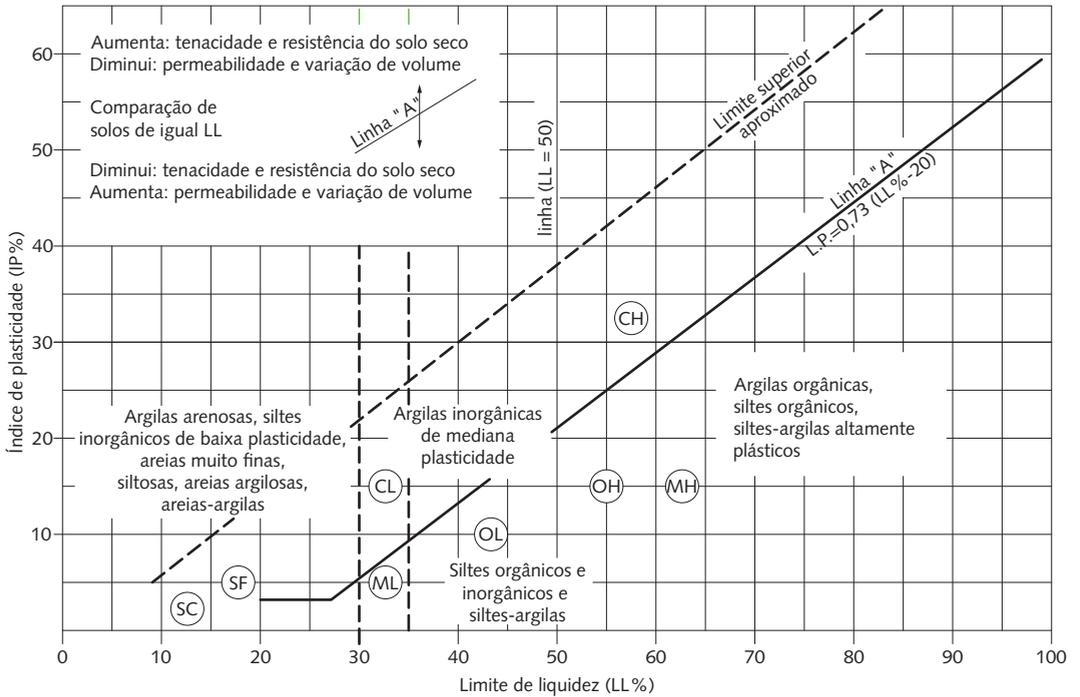


Fig. 5.10 Carta de plasticidade (SUCS/USBR)
 Fonte: Oliveira e Brito (1998).

Tab. 5.2 Unidades e parâmetros geomecânicos (UHE Itaipu)

Unidades geomecânicas	Parâmetros geomecânicos							
	C kg/cm ²	ϕ °	E 10 ³ kg/cm ²	K _n kg/cm · cm	K _t	M	γ t/m ³	K _{eq} cm/s
1) Solo	0,2	28	0,3	-	-	0,30	1,7	10 ⁻⁴
2) Matacões de basalto	2,0	32	2	-	-	0,25	2,2	10 ⁻⁴
3) Basalto denso	15	45	200	-	-	0,18	2,9	10 ⁻⁵
4) Contato	0	45	-	200	8	-	-	10 ⁰
5) Brecha arenosa	8	30	80	-	-	0,22	2,3	10 ⁻⁴
6) Brecha argilosa	0	27	40	-	-	0,22	2,2	10 ⁻³
7) Basalto vesicular-amigdaloidal	10	37	150	-	-	0,20	2,6	10 ⁻⁴
8) Descontinuidade sub-horizontal	0	38	-	200	70	-	-	10 ⁰
9) Basalto denso	12	40	180	-	-	0,19	2,7	10 ⁻⁵
10) Contato aberto	0	45	-	200	80	-	-	10 ⁰
11) Brecha arenosa intemperizada	6	30	60	-	-	0,18	2,2	10 ⁻⁴

Fonte: Monticeli (1986 apud Costa, 2012, p. 71).

em que:

B = parâmetro de pressão neutra medido em ensaios triaxiais;

γ = peso específico do solo acima do ponto (t/m^3);

z = profundidade do ponto (m).

O coeficiente de consolidação, C_v (cm^2/s), caracteriza a taxa de redução da pressão neutra durante o processo de consolidação e é proporcional ao produto da permeabilidade pelo módulo de deformabilidade do material. Como dito anteriormente, esse coeficiente é determinado em ensaios oedométricos, ou triaxiais, drenados, medindo-se a mudança de volume com o tempo de uma amostra submetida à carga externa constante (Lambe; Whitman, 1969).

Todos esses estudos, investigações e ensaios são os desejáveis e necessários para caracterizar em detalhes as fundações das barragens, inclusive seus parâmetros de resistência, permeabilidade e deformabilidade, para permitir a elaboração de um projeto seguro e confiável de tratamento das fundações e, também, das estruturas de barragens.

5.2 Parâmetros característicos dos materiais

Nos casos de projetos em que são feitas poucas investigações e ensaios, deve-se recorrer à bibliografia existente para conseguir dados e parâmetros que tenham por base a experiência de obras com materiais semelhantes. Por essa razão, apresentam-se as Tabs. 5.3 a 5.9 e o Quadro 5.10, que contêm parâmetros característicos de fundações e de materiais utilizados na construção. Como já citado, em face dos riscos envolvidos, a utilização dessas informações deve ser feita somente com o apoio de engenheiros e consultores com experiência comprovada em projetos dessa natureza.

Apresentam-se, na Fig. 5.15, as curvas clássicas de Leps (1970), extraídas de Kjaernsli, Valstad e Höeg (1992) sobre a resistência ao cisalhamento de enrocamentos.

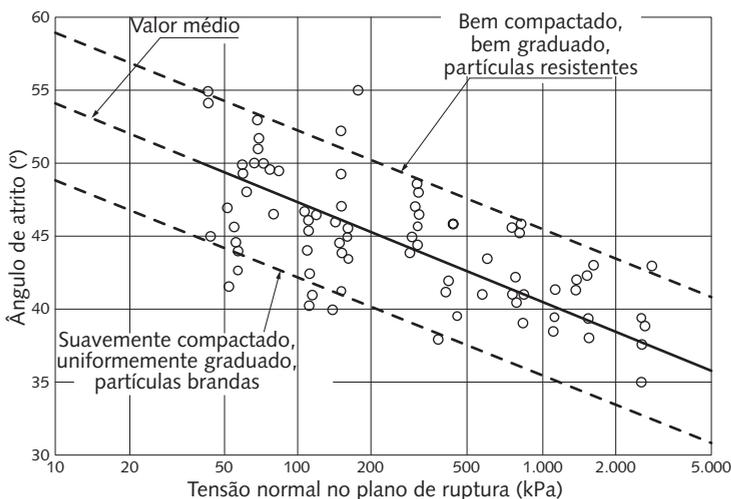


Fig. 5.15 Resistência ao cisalhamento de enrocamentos
 Fonte: Leps (1970) apud Kjaernsli, Valstad e Höeg (1992).

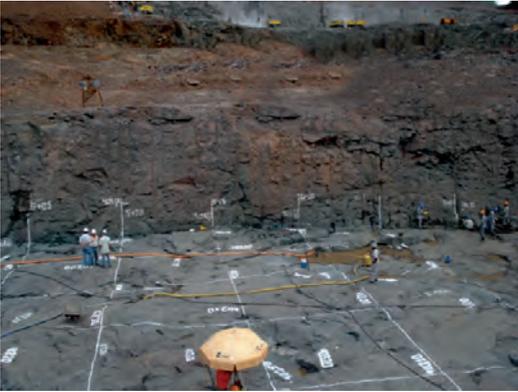


Fig. 5.19 Fundação em rocha basáltica limpa e com marcação para mapeamento geológico e geotécnico. UHE Barra dos Coqueiros (GO), fundação das adufas/vertedouro
Foto: Paulo Guimarães (2008).

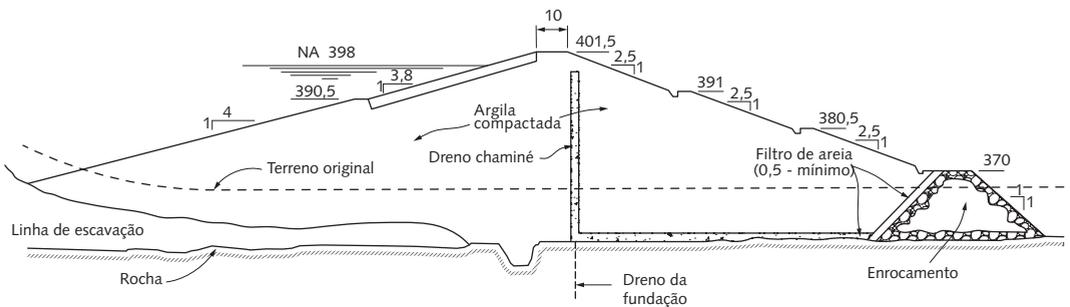


Fig. 5.20 Barragem do Vigário (RJ)
Fonte: Sherard et al. (1963 apud Cruz, 1996).

galerias de drenagem a grandes profundidades na fundação. As galerias devem ser projetadas para serem mantidas sempre drenadas, preferencialmente por gravidade ou por bombeamento. Galerias inundadas devem ser adotadas somente em casos especiais.

Recomenda-se uma consulta aos casos dos sistemas de drenagem dos projetos das UHEs Itapebi, no rio Jequitinhonha, Peixe Angical, no rio Tocantins, e Porto Primavera, no rio Paraná, apresentados em CBDB (2009).

5.5 Instrumentação das fundações

O tema relativo à instrumentação das fundações e observação das obras é de fundamental importância para a avaliação contínua da segurança das estruturas componentes dos empreendimentos hidrelétricos.

A deformabilidade dos maciços rochosos de fundação é uma matéria complexa, cujos estudos se iniciaram do Brasil na década de 1950. O conhecimento da deformabilidade, isto é, a relação entre as solicitações e as deformações delas resultantes, é de fundamental importância na mecânica das rochas aplicada ao estudo das fundações de barragens de concreto.

6.1 Tipos de barragem

Os tipos de barragem são variáveis e influenciados por condicionantes locais. Os mais comumente usados são:

- barragem de terra com seção homogênea;
- barragem de enrocamento com núcleo impermeável, face de concreto, face de concreto asfáltico e núcleo asfáltico;
- barragem de concreto tipo gravidade (CCV e CCR) e barragem em arco.

As soluções tecnicamente viáveis são diversas e a escolha da seção deverá ser feita em um processo iterativo pelo critério de menor custo global. As barragens de interligação com as estruturas de concreto, através dos muros de abraço ou de encosto, são de enrocamento com núcleo que, com seus taludes mais íngremes, possibilitam reduzir o comprimento dos muros e, conseqüentemente, os custos.

6.2 Barragens de terra

Barragens de terra têm sido usadas para retenção e armazenamento de água para consumo, irrigação e movimentação de rodas d'água. Continuam sendo, até hoje, o tipo mais comum, porque a construção envolve a utilização de materiais em seu estado natural com um mínimo de processamento. Essas barragens eram projetadas com base em métodos empíricos e a bibliografia sobre o assunto registra vários de casos de ruptura.

A partir de 1930, o avanço da Mecânica dos Solos e dos equipamentos de construção possibilitou grandes avanços para o projeto das barragens de terra, que passaram a ser elaborados com base em procedimentos de engenharia mais racionais. Esses procedimentos incluíram:

- investigações detalhadas para caracterização das fundações e das áreas de empréstimo de materiais naturais de construção;
- aplicação de técnicas de engenharia no projeto;
- planejamento detalhado e controle dos métodos de construção.

6.2.1 Critérios de projeto e tipo de seção

Segundo Cruz (1996), a arte de projetar uma barragem está ligada à habilidade de controlar o fluxo de água pelo conjunto barragem-fundação. A estabilidade externa (taludes) e interna (conjunto barragem-fundação) deve atender aos requisitos básicos de segurança estabelecidos em função do tipo da obra e das diversas condições de carregamento. Para atender a esses requisitos de

segurança, três princípios básicos de projeto devem ser obedecidos: o do controle do fluxo, o da estabilidade dos espaldares e o da compatibilidade das deformações dos vários materiais.

Princípio do controle do fluxo

Com relação ao eixo, pelo lado de montante, todo o esforço deve ser concentrado no sentido de vedar ao máximo a barragem e sua fundação, introduzindo todos os sistemas de vedação necessários. Pelo lado de jusante, deve-se facilitar ao máximo a saída da água, introduzindo todos os sistemas de drenagem necessários na barragem e na fundação.

Princípio da estabilidade

Os espaldares da barragem devem ter características de resistência que garantam a estabilidade dos taludes. Essas características têm que ser compatibilizadas com os materiais de fundação, a fim de garantir a estabilidade do conjunto barragem-fundação para as várias condições de carregamento.

Princípio da compatibilidade das deformações

A compressibilidade dos materiais das várias zonas da barragem e de sua fundação deve ser compatibilizada por zonas adicionais de transição, a fim de reduzir os recalques diferenciais e totais que venham a prejudicar o desempenho dos sistemas de drenagem e de vedação, seja pela ocorrência de trincas que tornem feições de fluxo concentrado, seja pela inversão dos gradientes de fluxo nos sistemas de drenagem, devido a recalques totais excessivos.

A definição da seção típica mais adequada para uma barragem de terra é feita com base nos seguintes aspectos:

- características, disponibilidade e trabalhabilidade dos materiais existentes nas áreas de empréstimo próximas da barragem;
- geologia do local e atividade sísmica;
- regime hidrológico regional, no que tange à pluviometria;
- forma e tamanho do vale (aspectos topográficos) e características da fundação;
- integração ao arranjo geral, cronograma de construção e esquema de desvio.

O projeto de uma barragem de terra apresenta normalmente as seguintes características:

- seção em solo compactado com os materiais suficientemente impermeáveis, com taludes relativamente suaves, função dos critérios de estabilidade e com proteções contra as erosões superficiais;
- juntas podem ser necessárias em função do planejamento da construção;

- o custo do tratamento da fundação (tratamento da superfície do maciço e injeções de consolidação e impermeabilização) é significativamente menor porque o trabalho pode ser executado na região de montante, área do plinto (Fig. 6.7), independentemente da construção do maciço, e porque a área da superfície a ser tratada é menor;
- para regiões de clima chuvoso, a vantagem é ampliada.

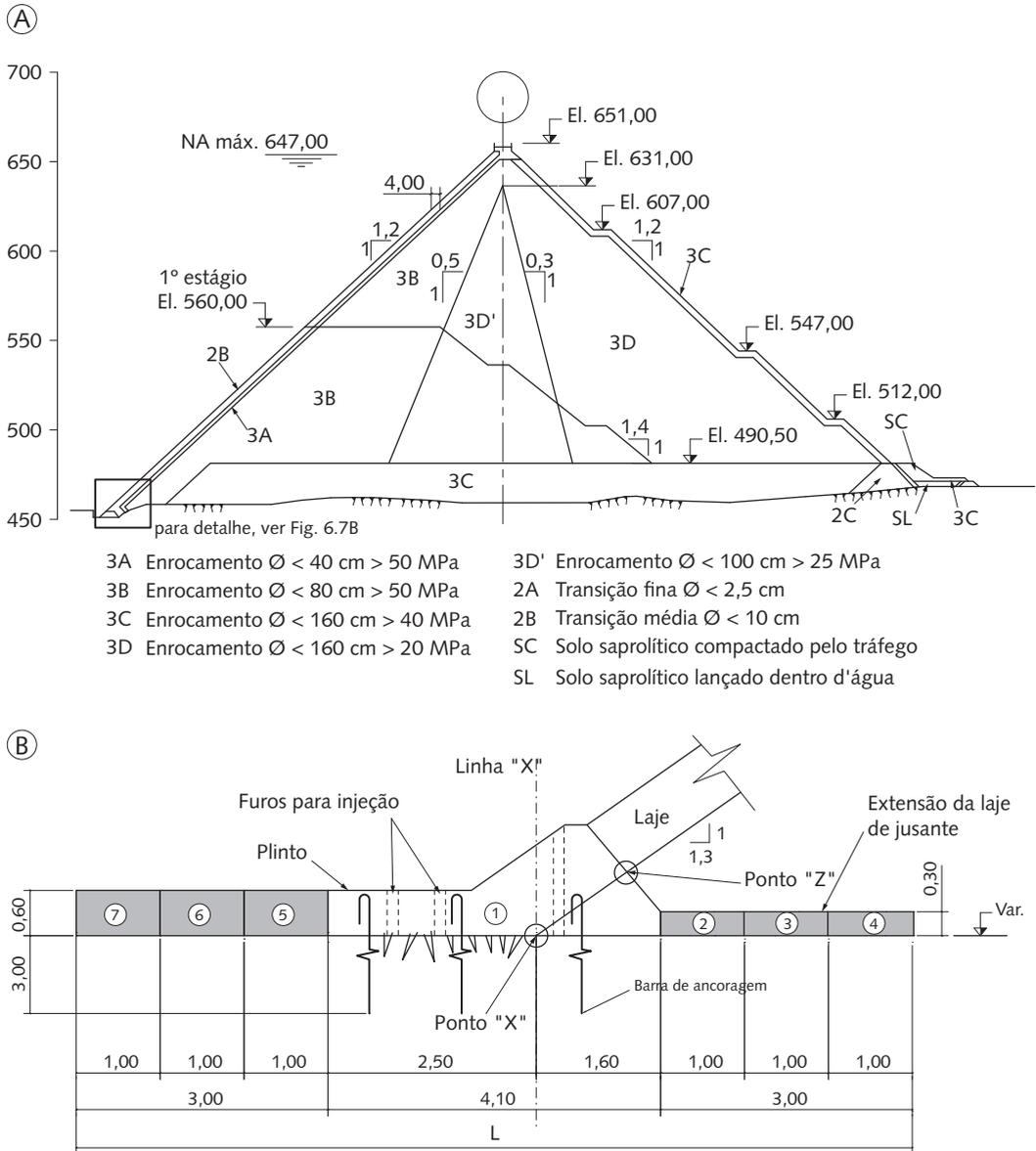


Fig. 6.7 (A) BEFC, UHE Barra Grande (altura = 185 m). (B) Dimensões das lajes do plinto da UHE Barra Grande

Fonte: (A) CBGB (2009) e (B) Cruz (2009).



Fig. 6.15 Barragem Krasnoyarsk (6.000 MW e 128 m de altura), rio Yenisey, Rússia
Foto: Denis Belevich (2006). Disponível em:
<[http://commons.wikimedia.org/wiki/
File:060721-ges.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:060721-ges.jpg)>.

o tornam menos econômico que o método convencional de construção de barragens em aterro. Outra desvantagem é a limitação do uso de equipamentos devido à pequena praça de trabalho.

No dimensionamento da estrutura, devem ser observados todos os critérios, procedimentos e normas internacionalmente consagradas, hoje condensadas no documento de Eletrobras e CBDB (2003). No que tange ao concreto, os materiais a serem utilizados devem obedecer ao disposto no capítulo 4 desse manual: “Propriedade dos materiais” (Eletrobras; CBDB, 2003, p. 83-114). É preciso realizar as análises de estabilidade para todos os

casos correntes de carregamento descritos a seguir:

- Condição de Carregamento Normal (CCN): corresponde a todas as combinações de ações que apresentam grande probabilidade de ocorrência ao longo da vida útil da estrutura, durante a operação normal ou manutenção de rotina, em condições hidrológicas normais.
- Condição de Carregamento Excepcional (CCE): corresponde a uma situação de combinação de ações com baixa probabilidade de ocorrência ao longo da vida útil da estrutura. Em geral, essas combinações consideram a ocorrência de somente uma ação excepcional, tais como condições hidrológicas excepcionais, defeitos no sistema de drenagem, manobras de caráter excepcional, efeitos sísmicos etc., com as ações correspondentes à condição de carregamento normal.

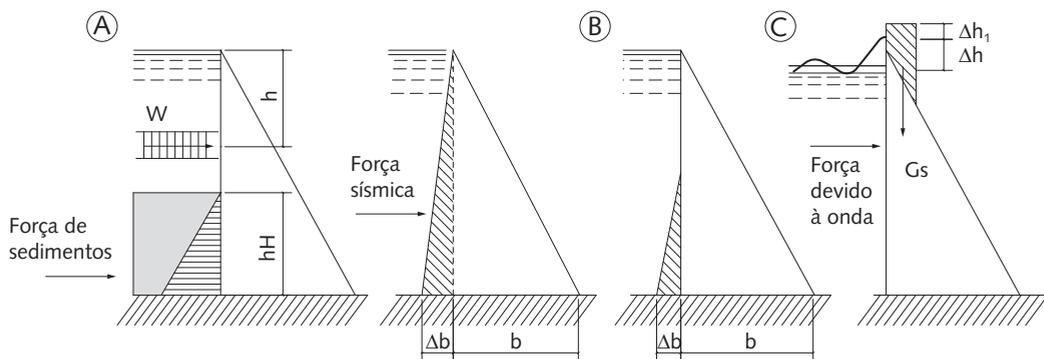


Fig. 6.16 Mudança da seção da barragem em função dos esforços internos e das condições de operação
Fonte: Grishin (1982).

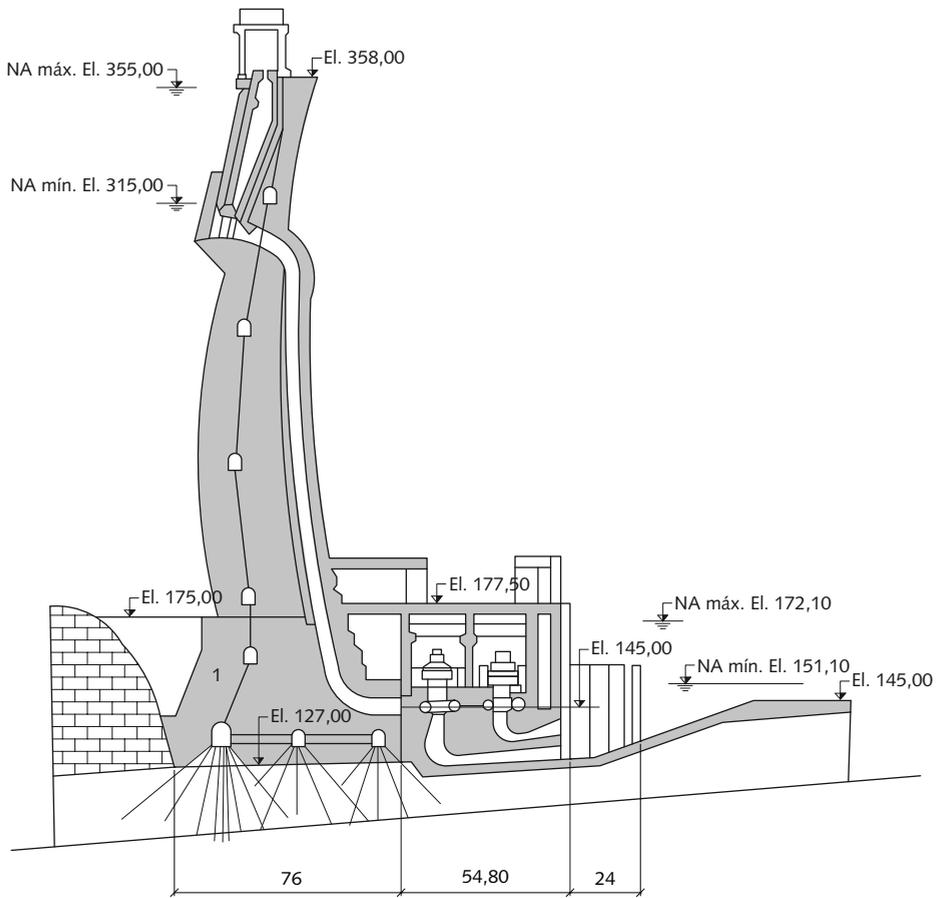


Fig. 6.28 Usina Chirkreysk, seção transversal
 Fonte: Grishin (1982).



Fig. 6.29 Usina Chirkreysk, vista de jusante. Observar saída do vertedouro em túnel na margem esquerda
 Foto: Cañra20K (2012). Disponível em: <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Chirkey_HPP-7.JPG>.

O vertedouro é a estrutura do aproveitamento hidrelétrico dimensionada para extravasar o volume das cheias que possam exceder a capacidade de armazenamento do reservatório, com o objetivo de proteger a barragem contra o galgamento. Ou seja, é a estrutura empregada para evitar que o nível de água máximo *maximorum* do reservatório seja ultrapassado (Fig. 7.1).

Este capítulo abrange a definição dos tipos de vertedouro e os critérios de escolha de cada tipo, o dimensionamento hidráulico de sua estrutura e da estrutura terminal para dissipação da energia vertente. Abrange ainda temas relativos à cavitação na calha da estrutura, erosões na região a jusante, além dos aspectos referentes ao plano de operação das comportas.



Fig. 7.1 Vertedouro da UHE Tucuruí
Foto: cortesia Eletronorte.

7.1 Tipos de vertedouro e critérios de escolha

Nos projetos de usinas hidrelétricas, podem ser adotados vários tipos de vertedouro, dependendo do arranjo geral do aproveitamento, como apresentado no Cap. 3. Normalmente, os aspectos topográficos e geológicos dos sítios condicionam a definição do arranjo geral das obras, bem como a escolha do tipo de vertedouro.

Em geral, as estruturas dos vertedouros compreendem cinco elementos distintos: canal de entrada, estrutura de controle, calha de descarga, dissipador de energia e canal de restituição do escoamento à calha do rio.

Como abordado no Cap. 3, os vertedouros podem ser: incorporados ao corpo do barramento principal; laterais (*side channel spillways*); ou estruturas separadas (isoladas) do barramento, posicionadas nas ombreiras.

Os vertedouros podem ser de superfície ou de fundo, como ilustram exemplos que serão apresentados a seguir:

- os vertedouros de superfície, livres ou controlados por comportas, permitem o rebaixamento do nível do reservatório até a sua crista;
- os vertedouros de fundo, controlados por comportas, permitem o esvaziamento total ou parcial do reservatório.

Os vertedouros têm seções típicas variadas:

- seções com paramento de montante vertical e paramento de jusante inclinado em perfil *Creager*, sobre o qual o escoamento flui; após o perfil

7.2 Dimensionamento hidráulico

Apresenta-se a seguir um resumo do roteiro para o dimensionamento hidráulico do vertedouro. Destaca-se, inicialmente, que a vazão para o dimensionamento da estrutura do vertedouro deve atender ao preconizado no item 3.4 de Eletrobras e CBDB (2003) a saber:

- para barragens com alturas maiores que 30 m ou cujo colapso envolva risco de perdas de vidas humanas (existência de habitações permanentes a jusante), a vazão de projeto dos órgãos extravasores será a máxima provável (VMP);
- para barragens de altura inferior a 30 m ou com reservatório com volume menor que $50.000.000 \text{ m}^3$, e não havendo risco de perdas de vidas humanas (inexistência de habitações permanentes a jusante), a vazão de projeto será definida por meio de uma análise de risco, respeitada a recorrência mínima de mil anos (Eletrobras; CBDB, 2003, p. 22).

O dimensionamento hidráulico determina a largura (L), ou comprimento efetivo da crista da estrutura, e a altura da carga hidráulica sobre a crista, que, para os vertedouros controlados, é a altura da comporta, ou maior, quando se admite sobrelevação do nível do reservatório nas grandes enchentes.

Como registrado no Cap. 4 deste livro, mais de 20% dos acidentes com barragens se devem à insuficiência de capacidade de vazão dos vertedouros (Icold, 1995). Nesses casos, pode-se depreender que a vazão estimada para o projeto dessa estrutura foi superada, o que significa que pode ter havido erro na determinação da vazão de projeto e também no dimensionamento hidráulico das estruturas.

O dimensionamento hidráulico de uma soleira vertente não controlada considera cristas ideais com geometrias dos quadrantes de montante e jusante definidas nas cartas 111-1 e 111-2/1 do “Hydraulic Design Criteria” (HDC) (US Army Corps of Engineers, 1977). Esses perfis dependem da carga hidráulica sobre a estrutura (H_0), da inclinação do paramento de montante e da altura da crista sobre o piso do canal de entrada no vertedouro (P), que influencia a velocidade do escoamento de aproximação na crista, como definido na Fig. 7.14.

A capacidade de vazão de uma soleira vertente não controlada é dada pela Eq. 7.1:

$$Q = C_0 \cdot L \cdot H^{3/2} \quad (7.1)$$

em que:

Q = descarga total (m^3/s);

C_0 = coeficiente de vazão variável;

L = comprimento efetivo da crista (m);

H = carga hidráulica (m).

Isso significa que a capacidade de descarga do vertedouro depende da carga de energia sobre a crista (h_t), do comprimento efetivo da crista (L) e do coeficiente de vazão, determinados conforme apresentado adiante.

7.2.1 Dimensionamento do vertedouro da UHE Tucuruí

Seguem algumas notas sobre o vertedouro da UHE Tucuruí (Fig. 7.1), um dos maiores do mundo, projeto no qual o autor trabalhou durante alguns anos (de 1981 a 1986). Sua participação se estendeu até concluir o treinamento da

equipe de operação da usina na obra (de 1984 a 1986).

A evolução dos estudos estatísticos de cheias ao longo do projeto é apresentada na Tab. 7.1. Também foram desenvolvidos estudos para a definição da Precipitação Máxima Provável (PMP), que conduz à determinação da Vazão Máxima Provável (VMP), por meio da metodologia preconizada pelo World Meteorological Organization (WMO), que utiliza o modelo *Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation* (SSARR). A VMP foi definida em 105.800 m³/s. Entretanto, perante a

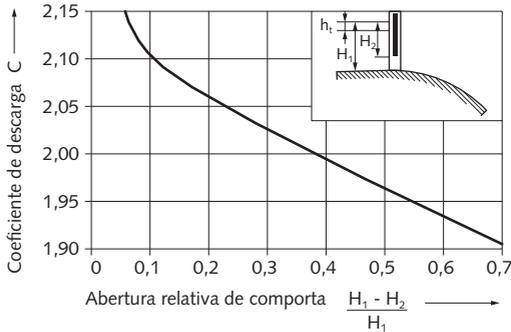


Fig. 7.19 Coeficientes de descarga para escoamento controlado

Fonte: Lysne (2003).

complexidade das alternativas meteorológicas envolvidas, foi adotada a vazão de 110.000 m³/s como capacidade máxima do vertedouro (*ultimate capacity*).

Como registrado na memória técnica da usina, o dimensionamento hidráulico do vertedouro foi feito para a descarga $Q = 100.000 \text{ m}^3/\text{s}$, com uma carga de projeto $H_0 = 22 \text{ m}$. O NA máximo normal do reservatório foi fixado na elevação 74,00 m. Portanto, estava definida a altura da crista na elevação 52,00 m.

Como o leito do rio a montante do vertedouro está na elevação 0,00 m, ficou caracterizado um tirante de água a montante $P = 52,00 \text{ m}$, com relação à crista do vertedouro. Logo, tem-se $P/H_0 = 2,36$.

Tab. 7.1 Vazões de cheia – Gumbel

TR (anos)	Vazões (m ³ /s)		
	P. básico (1974)	Revisão (1979)	Após enchente (1980)
25	45.800	48.100	52.400
50	50.900	53.500	58.600
100	56.000	58.900	64.700
200	61.100	64.200	70.800
500	67.700	71.200	78.900
1.000	72.800	76.600	85.000
10.000	89.600	94.300	105.300

Fonte: Eletronorte (1989).

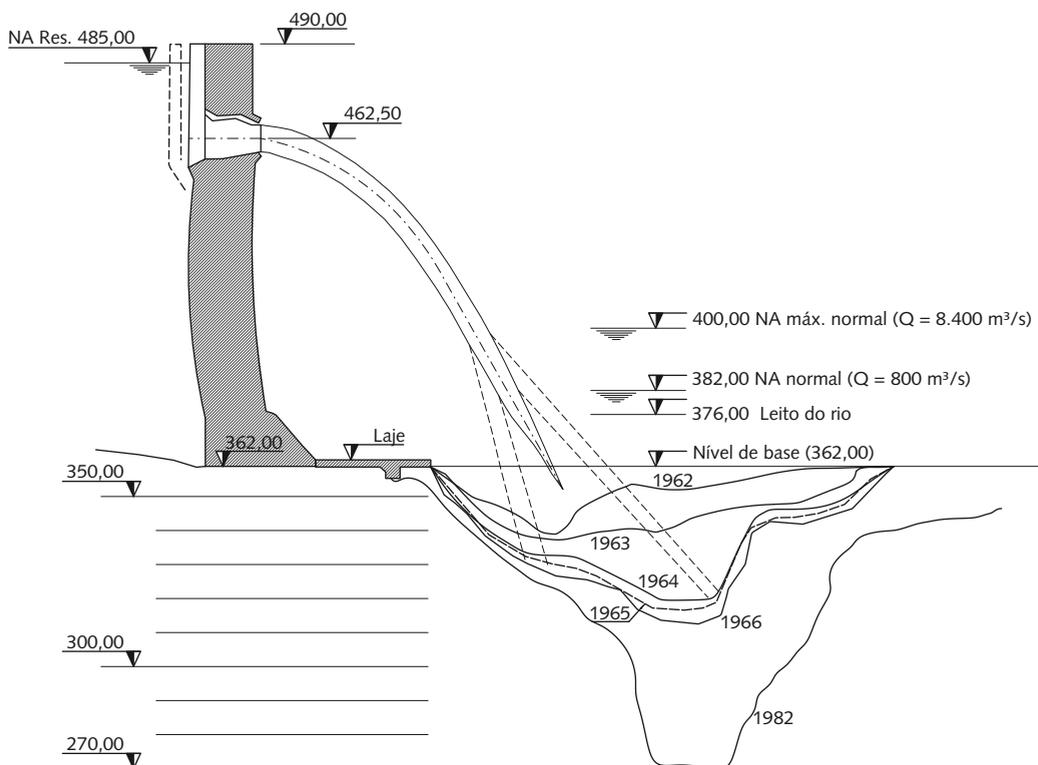


Fig. 7.31 Barragem de Kariba, vertedouro em orifício em salto de esqui ($Q = 8.400 \text{ m}^3/\text{s}$)
 Fonte: Hartung e Häusler (1973), Whittaker (1984), Mason (1986), Magela (1996) e CBDB (2002).



Fig. 7.32 UHE Kariba, vista aérea de jusante
 Foto: Suesen (2014). Disponível em: <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kariba,_Zimbabwe_10.JPG>.

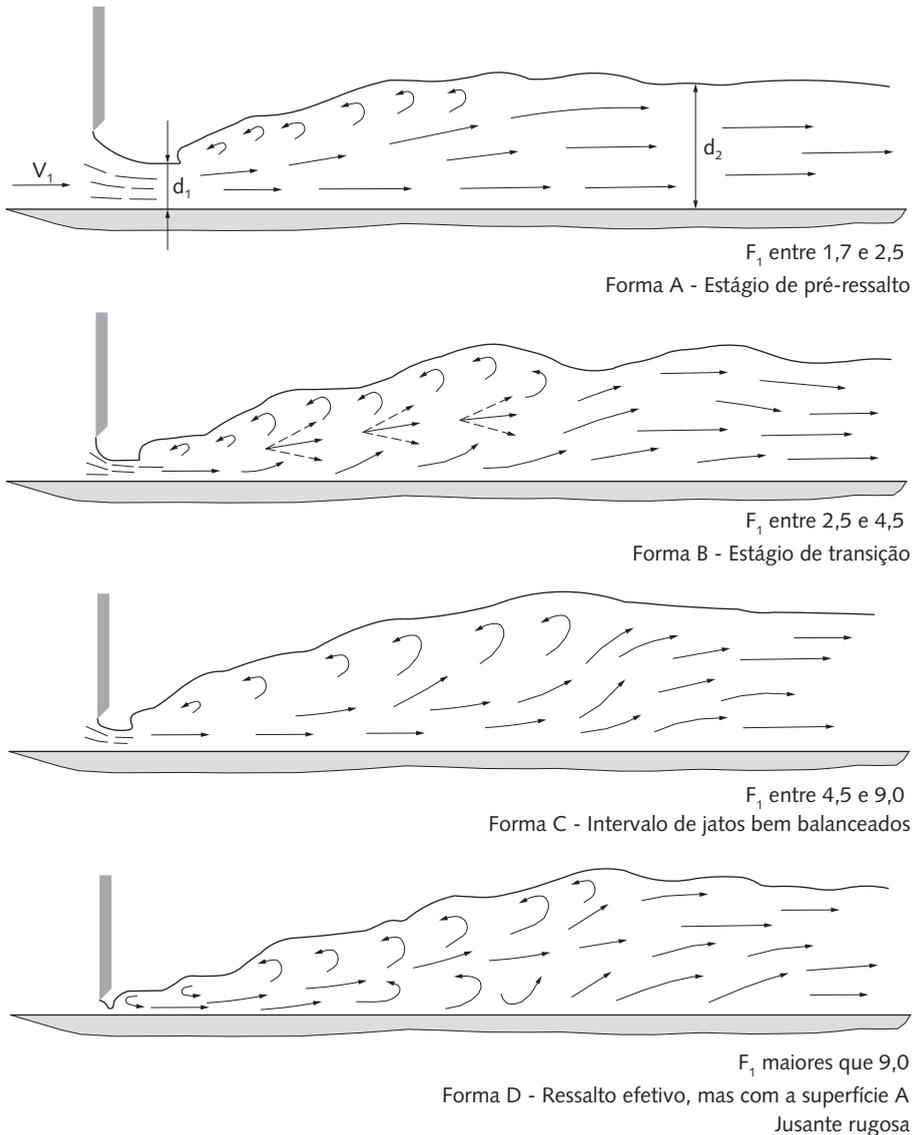


Fig. 7.39 Tipos de ressalto hidráulico (em função do número de Froude).

Fonte: USBR (1983 apud Lysne, 2003).

do descarregador de fundo. Na Fig. 7.43C, pode-se notar o tamanho do bloco em comparação ao das pessoas próximas. Ao fundo, vê-se o muro divisor com o vertedouro de superfície. Já na Fig. 7.43D observa-se a cicatriz dos blocos arrancados, com diâmetros maiores que as pessoas.

Dois fatores contribuem para a ocorrência de efeitos erosivos:

- conhecimento incompleto da curva-chave, principalmente para vazões altas;
- a operação parcial do vertedouro, fazendo com que, para determinada

Este capítulo abrange os aspectos relacionados com o projeto das estruturas do circuito hidráulico de adução e geração: canal de adução, tomada de água, conduto forçado, casa de força e canal de fuga (Fig. 8.1). Dependendo do arranjo geral das obras, a solução pode ser em túnel de adução, alimentando o conduto forçado. Se o arranjo for em túnel de adução ou conduto sob pressão, em geral, dependendo da sua extensão, pode ser necessária uma chaminé de equilíbrio, como será visto neste capítulo.

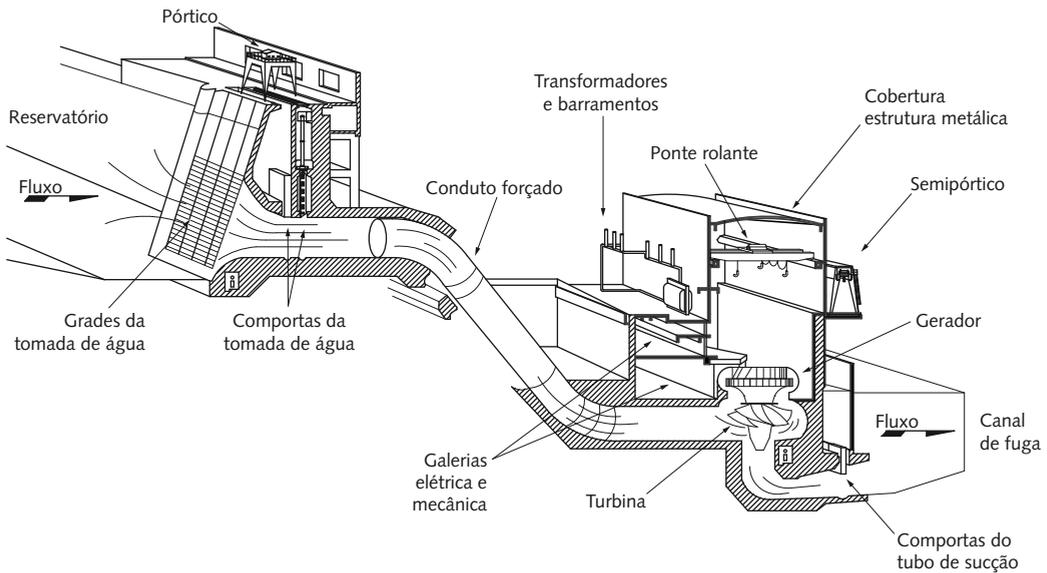


Fig. 8.1 Ilustração de um circuito hidráulico de adução e geração

8.1 Canal de adução

Para as usinas com arranjos de obras de derivação e desvio, com casa de força a jusante, pode existir um canal de adução clássico para conduzir o escoamento de aproximação à tomada de água. Nesses casos, sua forma em planta deve ser cuidadosamente estudada. O escoamento de aproximação à tomada de água é subcrítico, hidraulicamente tranquilo, bem acomodado às superfícies de contorno e sem descolamentos, a fim de minimizar a formação de vórtices e as perdas de carga.

A montante da tomada de água, trecho final do canal, podem ser necessários uma câmara de carga, um desarenador e, muitas vezes, um vertedouro

8.3 Condutos forçados

Os condutos forçados conduzem o escoamento da tomada de água às turbinas. O escoamento em pressão ao longo dos condutos pode ser permanente ou não permanente, uniforme ou não uniforme. Escoamento permanente e uniforme é aquele cujas características não variam com o tempo. A vazão em qualquer seção permanece constante. Escoamento não permanente é aquele em que ocorrem mudanças de vazão e pressão. O escoamento pode ser ainda laminar ou turbulento, dependendo do número de Reynolds ($Re = V \cdot D/\nu$), como apresentado adiante.

O comprimento do conduto forçado é variável em cada projeto. Como orientação geral, procura-se reduzir seu comprimento, levando em consideração que seu custo é relativamente elevado porque é o conduto sujeito às pressões mais altas.

A velocidade máxima do escoamento nos condutos forçados resulta de considerações econômicas. Em geral, a velocidade máxima do escoamento nos condutos revestidos de concreto pode atingir até 7,0 m/s e 8,0 m/s nos condutos de aço, segundo os critérios de Eletrobras e CBDB (2003).

8.3.1 Perdas de carga

As fontes primárias de perdas de carga no conduto são o atrito com as paredes, as curvas e as bifurcações. Essas perdas são estimadas utilizando-se a fórmula de Darcy-Weisbach ou a de Manning-Strickler. A fórmula de Darcy-Weisbach é dada pela expressão:

$$h_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (8.6)$$

em que:

h_f = perda de carga no conduto (m);

f = coeficiente universal de resistência de Darcy-Weisbach;

L = comprimento do conduto (m);

D = diâmetro do conduto ($4 \times$ raio hidráulico nas seções não circulares) (m);

V = velocidade média do escoamento no conduto (m/s);

g = aceleração da gravidade (m/s^2).

O coeficiente de resistência, função da rugosidade da parede, do diâmetro do conduto e da velocidade do escoamento, é dado pela Fórmula de Colebrook-White (1939):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[\frac{2\varepsilon}{D} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right] \quad (8.7)$$

em que:

f = coeficiente de resistência de Darcy-Weisbach, extraído do gráfico de Moody (Fig. 8.4). Esse coeficiente pode ser, também, obtido dos gráficos 224-1 a 224-1/5 do HDC (1973);

ε = rugosidade da parede (m);

ε/D = rugosidade relativa (ou $\varepsilon/4R$, sendo R = raio hidráulico);

Re = número de Reynolds = $V \cdot D/\nu$;

ν = viscosidade cinemática = $1,01 \times 10^{-6} m^2/s$ (para água a $20^\circ C$).

ou

$$h = V \sqrt{\gamma \cdot g \left(\frac{1}{K} + \frac{D}{e \cdot E} \right)} \quad (8.17)$$

Para um dado conduto, a sobrepressão h é proporcional à velocidade V , no caso de um fechamento instantâneo.

A celeridade a se calcula com o apoio do teorema da quantidade de movimento, isto é, a variação da quantidade de movimento durante um intervalo de tempo t = soma das forças exteriores.

$$V \left(\frac{\gamma \cdot \pi \cdot D^2}{4} x \right) \frac{1}{t} = \gamma \cdot h \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (8.18)$$

ou

$$a = \frac{x}{t} = \frac{h \cdot g}{V} \quad (8.19)$$

ou

$$h = \frac{a \cdot V}{g} \quad (8.20)$$

Substituindo-se h na Eq. 8.17, encontra-se:

$$a = \sqrt{\frac{g}{\gamma \left(\frac{1}{K} + \frac{D}{e \cdot E} \right)}} \quad (8.21)$$

em que:

a = velocidade da onda do golpe de aríete (m/s);

ρ = massa específica da água, igual a 1.000 kg/m³;

K = módulo de elasticidade volumétrica da água, igual a 21,4 × 10⁸ N/m²;

D = diâmetro do conduto (m);

C_e = coeficiente para redução da expansão nas juntas do tubo;

E = módulo de elasticidade do material do conduto, igual a 2,10 × 10¹¹ N/m² para o aço;

e = espessura da parede do conduto (m).

A celeridade depende apenas das características D , e , E do tubo e do módulo de elasticidade volumétrica K da água.

A Eq. 8.20 { $h = (a \cdot V)/g$ } mostra que a sobrepressão h é independente do comprimento L do conduto. Esta surpreendente constatação resulta da hipótese do fechamento instantâneo. Na realidade, a sobrepressão h depende, com efeito, do comprimento do conduto.

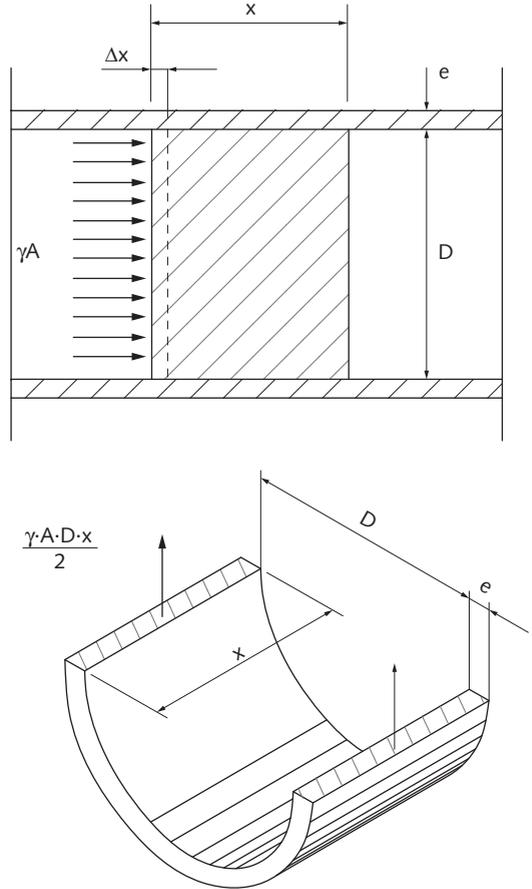


Fig. 8.9 Solicitação de um elemento do conduto ao golpe de aríete
Fonte: Stucky (1958).

As principais elevações da casa de força são definidas considerando-se os níveis de água notáveis de jusante e de submergência da turbina e, conseqüentemente, do tubo de sucção, que condiciona a definição da cota

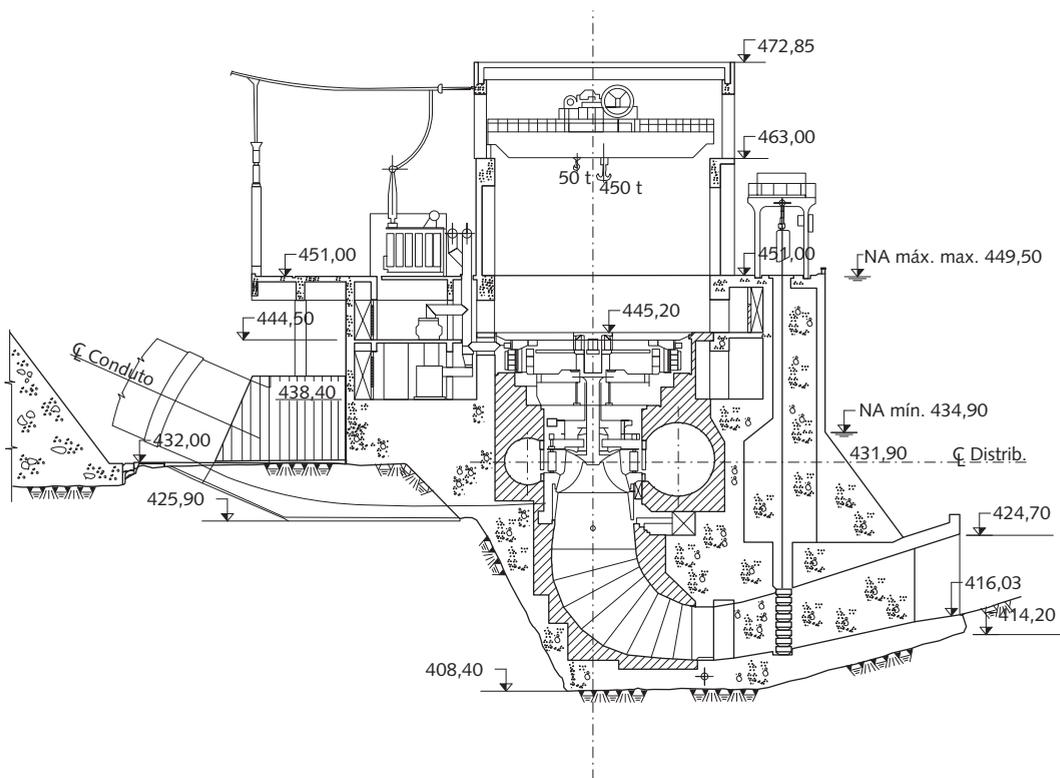


Fig. 8.27 UHE Itumbiara, casa de força abrigada no pé da barragem. $L = 189$ m (com área de montagem) e seis turbinas Francis de 380 MW cada
Fonte: CBDB (2000).



Fig. 8.28 UHE Itumbiara (2.082 MW), rio Paranaíba, Furnas, em operação desde 1980 (unidade 01)

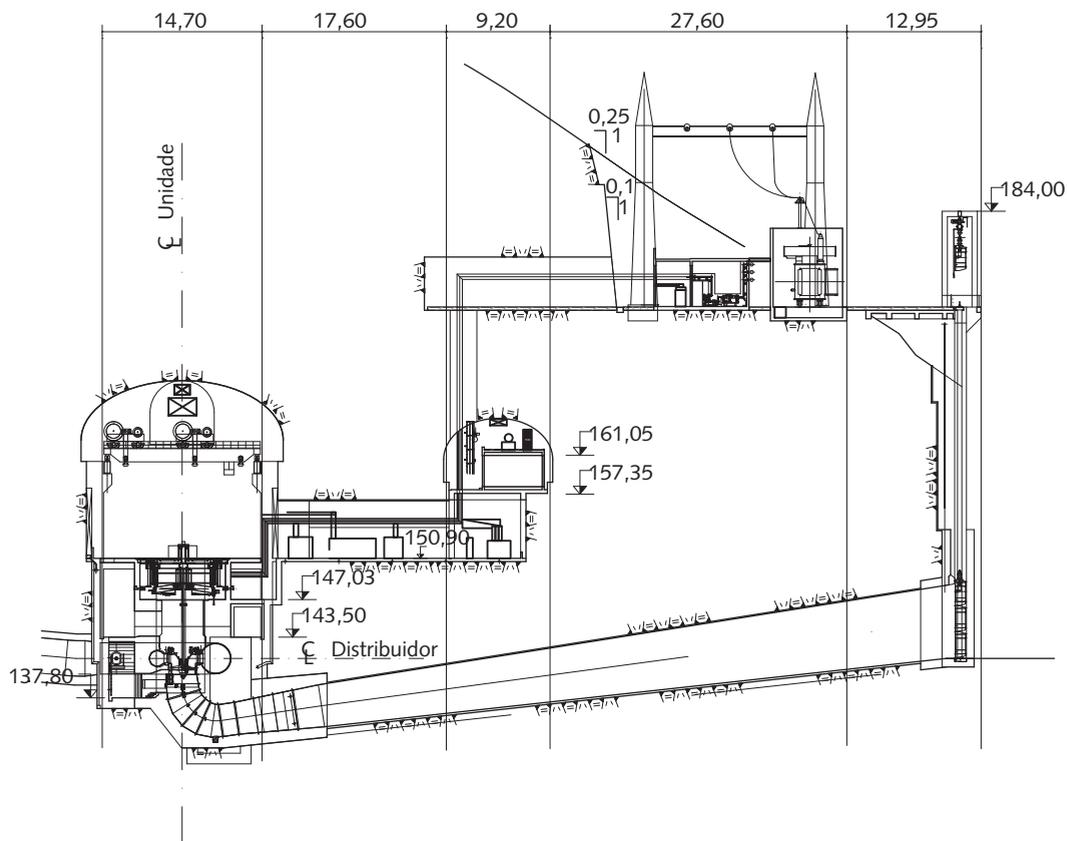


Fig. 8.41 UHE Castro Alves, casa de força subterrânea
 Fonte: CBDB (2009).

Para os canais com superfície livre, a largura é comumente variável ao longo de seu comprimento. No início, a largura será igual à da casa de força. Junto à confluência com o rio, a largura ao final do canal deverá ter dimensão suficiente para não introduzir qualquer controle sobre o escoamento.

A declividade do canal também será variável, em função da diferença de elevação entre o fundo do tubo de sucção e o fundo do rio. No início, devem-se adotar rampas ascendentes suaves, como 1 (V):6 (H) ou 1 (V):10 (H), de acordo com a geometria do tubo de sucção.

Quando a casa de força é subterrânea, tem-se um túnel de fuga para restituição do escoamento ao rio, como mostrado nas Figs. 8.44 e 8.45 (também nas Figs. 8.40, 8.41 e 8.42). Os aspectos do dimensionamento foram apresentados anteriormente.

Apresentam-se, neste capítulo, os equipamentos mecânicos principais da usina: comportas, válvulas e turbinas. Os equipamentos e sistemas auxiliares mecânicos, bem como os equipamentos de levantamento, não fazem parte do escopo deste livro.

9.1 Comportas e válvulas

A construção de comportas originou-se nas obras de irrigação, abastecimento de água e navegação fluvial. Na Antiguidade, a água era represada por pequenas barragens e desviada para canais de irrigação. A água excedente era descarregada por cima da barragem. Foram então construídas barragens móveis, isto é, comportas que podiam ser movimentadas, abertas, para dar passagem à água em excesso, permitindo maior flexibilidade de operação às obras hidráulicas.

Em função do objetivo deste livro, abordam-se, em resumo, as comportas utilizadas nas obras de usinas hidrelétricas, seja dos circuitos de adução, comportas e válvulas de fundo (*outletworks*), seja dos vertedouros, comportas de superfície, conforme Davis (1952), Kohler (1969) e Erbisti (2002).

A complexidade dos vários tipos de comporta e válvula impede uma descrição detalhada dos aspectos especiais de cada tipo. Dessa forma, serão apresentadas apenas as características básicas importantes para a seleção desses dispositivos. Para detalhes, recomenda-se consultar as referências bibliográficas, bem como os fabricantes e fornecedores de comportas e válvulas.

9.1.1 Considerações preliminares

À exceção dos canais de adução de superfície (ou tubulações de baixa pressão), os circuitos de adução pressurizados usam normalmente comportas e válvulas de fundo, para proteção das turbinas e dos condutos forçados. Os vertedouros controlados, normalmente, são dotados de comportas de superfície. Observa-se, ainda, que existem os descarregadores de fundo (Fig. 7.12).

Antes da seleção do dispositivo, os requisitos hidráulicos básicos, tais como a carga máxima e a descarga, precisam ser obrigatoriamente definidos. Esses requisitos fornecem a base para determinar as dimensões e o número de condutos necessários.

As dimensões do conduto, ou condutos, são o ponto de partida para a seleção das comportas e válvulas, uma vez que os vários tipos têm limitação de carga máxima (queda máxima). A limitação de carga pode ocorrer por conta de vedações ou possíveis problemas hidráulicos (tendências de cavitação e seus danos, perdas de carga, manutenção requerida e custo). O tamanho é usualmente limitado pela fabricação e pelos problemas de transporte.



Fig. 9.17 UHE Funil (rio Paraíba do Sul, RJ), vista de jusante. Observar detalhe do bloco da válvula dispersora, tipo hollow-jet ou Howell-Bunger, junto à margem esquerda

Fonte: José Lins (2010). Eletrobras/Furnas. Disponível em: <<https://www.flickr.com/photos/eletrobrasfurnas/4862704223/>>.



Fig. 9.18 Válvula borboleta (A) fechada e (B) aberta em montagem

Destaca-se que as válvulas borboleta (Fig. 9.18) são as mais usadas como válvula de guarda a montante das turbinas, onde os condutos são longos. Podem ser usadas também como válvula de guarda de válvulas dispersoras (de jusante), para fechamento de emergência do conduto de descarga (Fig. 9.17).

9.2 Turbinas

Apresenta-se a seguir um resumo sobre os principais fundamentos e critérios de escolha de uma turbina para usina hidrelétrica, sendo conhecidas a queda

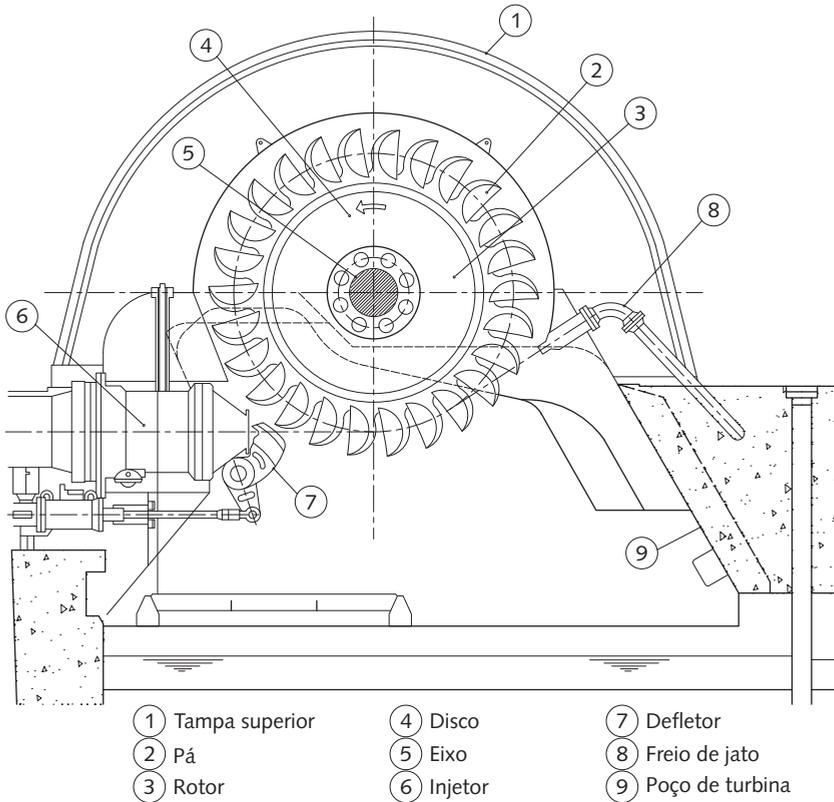


Fig. 9.25 Turbina Pelton
 Fonte: ABNT (1987).

9.3.3 Dimensões

Dependendo da vazão e da queda, as turbinas Pelton são projetadas com um número de jatos que varia de 1 a 6. O parâmetro decisivo é o número de velocidade. Aumentar o número de velocidade implica aumentar o número de jatos.

Em geral, máquinas com um ou dois jatos têm eixo horizontal. Com mais de dois jatos, requer eixo vertical que possibilite afastar a descarga de água do rotor adequadamente. Os diâmetros dos rotores estão, usualmente, entre 1,0 m e 5,0 m.

O número de conchas varia entre 18 e 24 para as rodas Pelton modernas. O diâmetro máximo do jato D_{JET} não deve exceder 10% do passo do diâmetro da roda. A largura da concha W relativa ao D_{JET} não deve exceder $W/D_{JET} = 3,4$. Conchas mais largas reduzem a eficiência.

9.3.4 Dados de desempenho

A turbina Pelton tem uma boa eficiência para um amplo intervalo de vazão. A eficiência de pico está entre 91% e 92% para um bom projeto hidráulico.

Este capítulo apresenta um resumo dos estudos e projetos de desvios de rios para implantação das usinas hidrelétricas, bem como dos aspectos relacionados ao modelo de contratação, planejamento da construção e consequências sobre o respectivo cronograma. Trata-se, portanto, de mais um item multidisciplinar do projeto, envolvendo hidrologia (vazões de projeto), dimensionamentos hidráulicos e geotécnicos, além de diversos especialistas em construção pesada das obras civis e da montagem dos equipamentos eletromecânicos.

Após as mudanças do setor elétrico promovidas pelo governo federal no final dos anos 1990, que possibilitaram a participação efetiva da iniciativa privada na obtenção de concessões para exploração de empreendimentos hidrelétricos, os cronogramas de implantação foram significativamente reduzidos. Vários fatores colaboraram para isso: a redução da participação do Estado nos empreendimentos, o aumento da eficiência da gestão da implantação, o modelo de contratação das obras (contratos EPC – engenharia, fornecimento e construção, em português), e a evolução dos métodos construtivos. Destaca-se que a utilização de formas deslizantes na execução das estruturas permitiu praticamente dobrar o avanço das camadas de concretagem e reduzir o tempo de construção pela metade.

A redução do prazo construtivo sob a óptica da participação privada aumenta significativamente a Taxa Interna de Retorno (TIR) do capital investido. Além disso, permite antecipar as receitas da venda de energia, maximizando o lucro no planejamento do negócio (*business plan*) para o EPC ou outro tipo de contratação semelhante.

11.1 Etapas de construção

A construção de uma usina normalmente prevê o desvio do rio em duas fases, como descrito a seguir. Para detalhes sobre o assunto, recomenda-se consultar o livro *Desvio de grandes rios brasileiros* (CBDB, 2009).

11.1.1 Primeira fase de desvio

No caso de barragens em vales bem abertos, como ocorre em trechos inferiores de rios, normalmente estrangula-se o fluxo em parte da calha por meio da construção de uma ensecadeira de primeira fase. A área protegida, ensecada, é esgotada e nela se constroem, entre outras estruturas, aquelas por onde o rio escoará na etapa subsequente de desvio.

Nos casos de barragens em vales estreitos (V), comuns em trechos superiores e médios dos rios, não é possível estrangular o fluxo em parte da calha



Fig. 11.4 UHE Tucuruí, vista aérea das obras com desvio do rio pelas adufas sob o vertedouro
Foto: Álvaro Lima de Araújo – ELN.

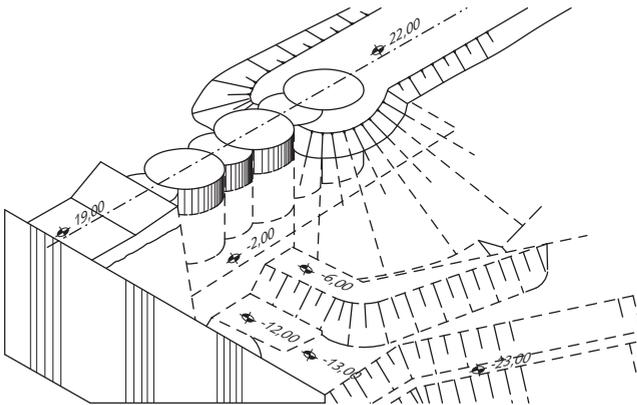


Fig. 11.5 UHE Tucuruí, 3ª fase de desvio do rio, perspectiva das ensecadeiras B e celular

Nos casos em que a ensecadeira abriga a região das obras da casa de força, que, se inundada, produz altos prejuízos, o projeto tem sido feito para a vazão com um tempo de recorrência (TR) de 100 anos, até para atender a exigência de empresas seguradoras. Resulta, naturalmente, uma ensecadeira com cota mais elevada, cujo risco de galgamento é pequeno e o custo da obra, evidentemente, é maior.

Se a ensecadeira abrigar somente a região das obras do barramento e do vertedouro, com serviços de escavação, concretagens e aterros, que, se inundada, provoca prejuízos não tão altos, o projeto é feito para vazões com TRs menores, admitindo-se, portanto, um risco maior de galgamento. Esses projetos têm sido feitos para TR de 25 anos. A experiência brasileira registra vários casos de projetos que contemplam o galgamento da ensecadeira de primeira fase (conferir exemplos dos projetos da UHE Corumbá I e da UHE Serra da Mesa em CBDB (2009)).



Fig. 11.10 UHE Tucuruí, construção do vertedouro: concretagem da camada 21 jusante, utilizando-se forma deslizante



Fig. 11.11 Construção do vertedouro da UHE Tucuruí, exemplo de forma temporariamente fixa (camadas 24 a 28). Remoção de painel: (A) notar aspecto da superfície do concreto e (B) início do acabamento da superfície com desempenadeira de madeira

Quanto à produtividade, consegue-se fazer, no Brasil, de 10 m a 12 m de túnel por dia em duas frentes de escavação, considerando-se um túnel de PCH de 5,0 m de diâmetro (20 m^2 de área) em rocha de boa qualidade e levando-se em conta os ciclos normais do processo de escavação convencional, 20 horas de trabalho por dia, a utilização de jumbos hidráulicos, projeto de ventilação eficiente e um ótimo emprego dos equipamentos. Para túneis maiores, Nilsen e Thidemann (1993) apresentam os dados constantes da Fig. 11.12, considerando-se 100h de trabalho por semana.

empreendimento, que anteriormente ficava a cargo dos quadros técnicos e administrativos do proprietário.

A gerenciadora, nesse caso, utiliza seus quadros de profissionais para todas as atividades já listadas, cabendo ao proprietário o poder decisório em cada evento, com base nos informes gerenciais submetidos pela empresa gerenciadora.

As vantagens desse modelo são:

- o proprietário pode dispor das equipes qualificadas da gerenciadora, que é capaz de alocar profissionais especializados para cada atividade ou etapa específica, e dispensar a manutenção de quadros técnicos próprios para tarefas, com duração limitada, que não constituem sua atividade-fim;
- limitar as interfaces com múltiplas empresas contratadas, concentrando sua atenção no acompanhamento do desempenho da gerenciadora. O proprietário participa de reuniões com os diversos atores envolvidos no empreendimento para ter maior segurança na tomada de decisões.

O proprietário deve evitar o risco de ficar distante dos eventos cotidianos em função do bom desempenho da gerenciadora, logo, deve evitar transferir, crescente e demasiado poder à gerenciadora na tomada de decisões que extrapolem as que podem e devem lhe ser delegadas.

11.6.2 *Turn-key*

Atualmente são frequentes novas modalidades de contratação tomando como objeto o que se tem denominado “pacotes”, como o *turn-key*. O proprietário, a partir dos estudos de viabilidade com termos de referência e especificações funcionais bem detalhadas, contrata o empreendimento com uma única organização capaz de desenvolver os projetos executivos, fornecer os materiais e equipamentos, executar as obras e montagens, por em marcha o empreendimento executado, preparar pessoal para a operação e outras tarefas, que podem incluir a sua própria operação e manutenção.

Ou seja, o proprietário contrata um EPC. Nesse instante, são constituídos os consórcios para atender esse tipo de demanda. Normalmente, os consórcios são formados por empresas de consultoria de engenharia (estudos, projetos e gerenciamento), de construção e montagem industrial, fabricantes de equipamentos e demais fornecedores de bens e serviços. Alguns desses parceiros poderão ser subcontratados, não participando do consórcio.

Os consórcios podem ser organizados em SPCs, compostas por empresas constituídas especificamente para a execução de um determinado empreendimento (Fig. 11.15).

As SPCs têm personalidade jurídica própria, em que seus sócios ou acionistas, consórcios estáveis, ou alianças duradouras formam uma parceria consolidada para atuação conjunta em todos ou em determinados setores ou regiões.

Este capítulo apresenta algumas considerações clássicas sobre aspectos relacionados aos riscos de aproveitamentos hidrelétricos decorrentes das possibilidades de ruptura da barragem ou de suas obras anexas. Destacam-se, sobretudo, as perdas de vidas humanas e os impactos econômicos, sociais e ambientais resultantes. Segue também um resumo dos aspectos sobre a gestão do patrimônio das obras hidráulicas durante sua vida útil. Em função do exposto neste livro, este capítulo traz um resumo dos principais acidentes com barragens.

12.1 Resumo dos principais acidentes com barragens

Apresenta-se, a seguir, um resumo de alguns acidentes notáveis ocorridos com barragens, a fim de instigar os jovens engenheiros a se debruçarem sobre o assunto. O autor não teve qualquer intenção de discutir as causas desses acidentes.

- Malpasset (1959, França): deformabilidade da fundação;
- Vajont (1963, Itália): deslizamento da ombreira esquerda para dentro do reservatório;
- Teton (1976, EUA): *piping*;
- El Guapo (1999, Venezuela): insuficiência de capacidade de vazão do vertedouro;
- Lower San Fernando (1971, EUA): liquefação do talude;
- Sayano-Shushensk (Rússia, 2009): ruptura na usina (diversas máquinas por cavitação, entre outras causas, como apresentado adiante neste capítulo);
- Bieudron (2000, Suíça): ruptura do conduto forçado por cavitação.

Cabe registrar também os acidentes com a barragem da Pampulha, em Belo Horizonte (1954), com as barragens das PCHs Camará (2004, Paraíba), Apertadinho (2008, Rondônia), Espora (2008, Goiás) e Algodões I (2009, Piauí), além dos acidentes com as barragens de rejeitos Fernandinho (1985), Pico São Luiz (1985) e Cataguases (2003), todas em Minas Gerais. Alguns desses acidentes já foram referidos no Cap. 6.

Cabe destacar ainda os casos de rompimento por galgamento das barragens de Orós, no rio Jaguaribe, Ceará (1960), que desabrigou cem mil pessoas (CBDB, 2000), bem como das barragens de Euclides da Cunha (CBDB, 1982), em São José do Rio Pardo (SP), e Limoeiro, em Mococa (SP), todas da CESP, em 1977 (Oliveira; Leme, 1985).

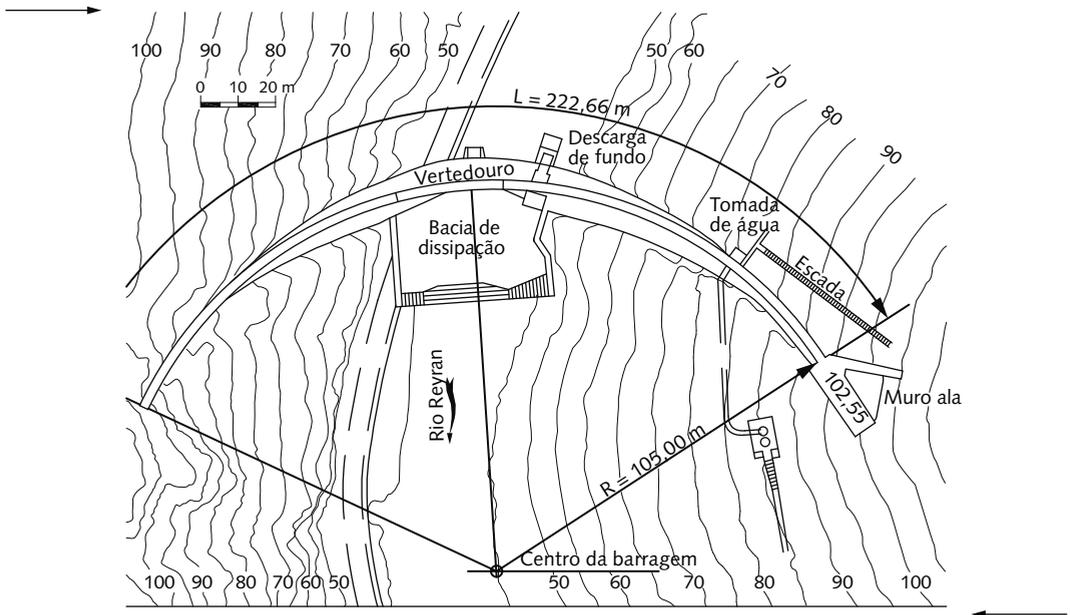


Fig. 12.5 Barragem de Malpasset. Planta sem escala

12.1.2 Barragem de Vajont (Itália): 9/10/1963

A barragem de Vajont está localizada nos Alpes italianos, em Longarone, cuja geologia é composta de dolomitos, a cerca de 100 km ao norte de Veneza. A barragem é de concreto em arco, com comprimento na crista de 1.850 m e altura de 266 m. Seu reservatório tem capacidade de 115 milhões de metros cúbicos. Na época do acidente, era a barragem mais alta do mundo.

Durante o enchimento do reservatório, uma massa gigantesca de solo e rocha, com cerca de 270 milhões de metros cúbicos, escorregou para dentro do reservatório a uma velocidade de 30 m/s, na vertente esquerda.

A onda gerada, de mais de 100 m de altura, galgou a barragem e varreu o vale a jusante, destruindo a cidade de Longarone e causando a morte de mais de 2.000 pessoas. Notavelmente, a barragem resistiu ao choque sem ruir.

Antes da conclusão da barragem, o diretor da obra estava preocupado com a estabilidade do encontro esquerdo. Reconhecimentos efetuados em 1958 e 1959 identificaram cicatrizes de escorregamentos antigos na ombreira direita.

O primeiro enchimento, ainda antes do fechamento da barragem (concluída em setembro de 1960), foi iniciado em fevereiro de 1960. Em março, os projetistas reconheceram que uma grande massa do terreno se apresentava instável na margem esquerda. Decidiu-se manobrar com o nível de enchimento do reservatório, ao mesmo tempo em que se executavam as galerias drenantes na encosta instabilizada.

O problema parecia estar sendo resolvido, mas entre abril e maio de 1963, o nível do reservatório subiu rapidamente. Optou-se por realizar um esvaziamento do reservatório. Em outubro, a encosta deslizou.

Principais quantitativos da reconstrução:

- 30.000 m³ de concreto convencional e 350.000 m³ de CCR;
- 350.000 m³ de aterro compactado.

12.1.5 Talude de montante da barragem Lower San Fernando (EUA):

9/2/1971

Apresenta-se, a seguir, um registro da ruptura por liquefação, em 9/2/1971, do talude de montante da barragem Lower San Fernando após a ocorrência de um terremoto. A barragem, com 44 m de altura, foi construída em aterro hidráulico sobre uma camada de aluvião, com 5 m de espessura. A barragem de montante (*upper*) sofreu danos menores.

Esse acidente foi amplamente estudado e está disponível em diversos trabalhos na internet para consulta dos interessados. A Fig. 12.14 mostra as barragens (*lower* e *upper*) e reservatórios do sistema de abastecimento de água de San Fernando, perto de Los Angeles, Califórnia. A Fig. 12.15 mostra o talude da barragem rompido.



Fig. 12.14 Vista geral das barragens e reservatórios de San Fernando

Fonte: Lloyd Cluff (1971). NISEE, Univ. of California, Berkeley.

12.1.6 Ruptura da Barragem Sayano-Shushensk (República da Khakassia, Sibéria, Rússia) 17/8/2009)

Apresenta-se, a seguir, um resumo sobre o acidente da UHE Sayano-Shushensk (6.500 MW), no rio Yenisei (Khakassia, próximo a Sayanogorsk), com o objetivo de mostrar e instigar os jovens engenheiros a pesquisarem os detalhes sobre o assunto na internet. Segundo as matérias disponíveis, aconteceu uma série de erros e 75 pessoas perderam suas vidas no acidente. A usina era a sexta do mundo em potência (Tab. 1.2 e Figs. 12.16 e 12.17). Ver mapa de localização Fig. 12.18.

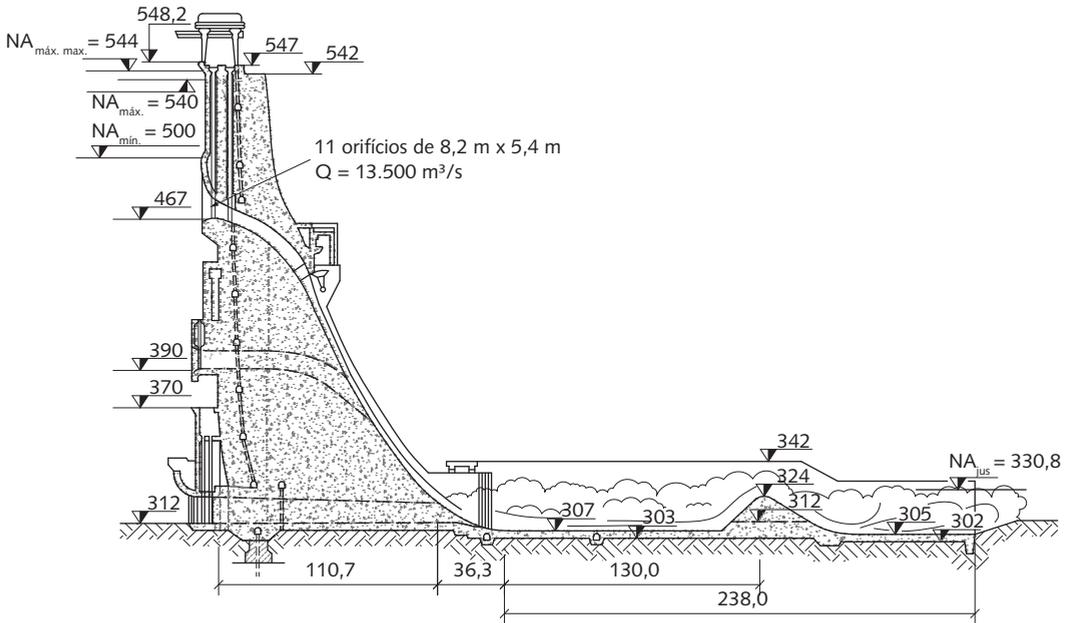


Fig. 12.20 UHE Sayano-Shushensk, corte do vertedouro (alt. máx. = 245 m)
 Fonte: Grishin (1982).

como injeções de consolidação e impermeabilização do maciço rochoso no entorno. Essa medida visou reduzir o fluxo de água entre o conduto e o maciço, por meio da folga que aparece em função das condições operacionais: o conduto expande quando tem carga e contraí quando a carga é removida. O alinhamento do conduto foi relocado para uma região próxima onde não houve dano e o maciço é de melhor qualidade. A reconstrução foi concluída em dezembro/2009 e a usina entrou em operação em janeiro/2010.

12.2 Riscos associados aos aproveitamentos hidrelétricos

12.2.1 Riscos de rupturas de barragens – ondas de submersão

Os aproveitamentos de alta e média queda (item 3.1.3) têm, geralmente, reservatórios com grande volume de água. O risco principal para a população ribeirinha, assim como para os bens no entorno, é a liberação acidental e instantânea dessa água, implicando na formação de uma onda de submersão que se propagará pelo vale a jusante. O principal fenômeno que origina uma onda de submersão é a ruptura da própria barragem. Essa ruptura pode ser progressiva ou instantânea, parcial ou total, segundo o tipo de barragem. A Tab. 12.1 fornece uma lista parcial dos acidentes que ocorreram a partir de 1900, com mais de 50 vítimas. Uma lista mais completa é apresentada por Jansen e USBR (1980).

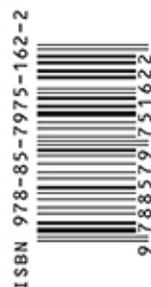
Uma onda de submersão pode também resultar de um deslizamento de terra de grandes proporções para dentro do reservatório (grandes proporções

O autor Geraldo Magela, num trabalho de síntese, uniu [todo o conhecimento acerca da evolução, legislação, projeto e construção de hidrelétricas] num único volume, que trata de todos os aspectos do projeto civil de uma hidrelétrica, precedido das fases de inventário, estudos hidrológicos e energéticos, geológicos e geotécnicos, e de toda a carga legislativa e burocrática, além de discutir os aspectos eletromecânicos e [...] a interligação da usina ao Sistema Interligado Nacional (SIN).

Este livro não serve só para os jovens engenheiros, como sugere o autor, mas também para engenheiros como eu, com 80 anos, que, ao folhear as páginas do livro, vou reconhecendo esta e aquela obra em que estive envolvido e que são precedentes de um tipo de barragem que deu certo e que traz confiança ao empreendedor em um novo projeto com características semelhantes.

Paulo Teixeira da Cruz
Professor Doutor da Escola Politécnica da USP
Consultor internacional em barragens

Geraldo Magela Pereira graduou-se em Engenharia Civil pela Universidade de Brasília em 1974. Com 40 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.



Patrocínio:

