Conhecendo os componentes de uma usina hidrelétrica

Bruno Oliveira

oficina de textos

Copyright © 2017 Oficina de Textos

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

CONSELHO EDITORIAL Arthur Pinto Chaves; 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, projeto gráfico e preparação de figuras ALEXANDRE BABADOBULOS
Diagramação PRAGITECH
Preparação de texto HÉLIO HIDEKI IRAHA
Revisão de texto PAULA MARCELE SOUSA MARTINS

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

Oliveira, Bruno Alexandre de
Conhecendo os componentes de uma usina hidrelétrica [livro eletrônico] / Bruno Alexandre de Oliveira. -- São Paulo : Oficina de Textos, 2017.
4 Mb ; e-PUB

Bibliografia
eISBN: 978-85-7975-272-8

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

17-03345 CDD-621.312134

Índices para catálogo sistemático:
1. Usinas hidrelétricas : Engenharia 621.312134

Todos os direitos reservados à OFICINA DE TEXTOS

Prefácio

Este livro submete ao leitor, de forma geral e objetiva, a familiarização, via fotos e explicações, dos típicos arranjos, componentes e obras hidráulicas usualmente utilizados em hidrelétricas; também apresenta as possíveis práticas adotadas para as obras destes componentes no circuito de geração.

Relativamente aos projetos é necessário salientar que, em casos importantes, devem ser verificados via modelo hidráulico reduzido para sinalizar a solução empregada, entre outras investigações de campo e laboratório. Não obstante são apresentadas algumas formulações de dimensionamento; trata-se de indicações do MME e da Eletrobrás, para uma primeira ideia. Os projetos devem ser desenvolvidos por especialistas experientes de distintas áreas de conhecimento, pois se trata de obras complexas, de grande responsabilidade.

Quanto às obras, a alternativa definida em projeto para a execução da hidrelétrica, preliminarmente deve ter sido embasada e validada em conjunto com possíveis fornecedores.

Este trabalho se tornou possível com o apoio decisivo e integrado e a autorização de uso de informações que foram interpretadas para atender aos objetivos propostos, bem como de imagens canalizadas por experientes Professores, empreendedores, fornecedores, diretores, engenheiros, técnicos e operários. Muitos casos de sucesso apresentados ficaram em relatórios não oficiais e na memória dos barrageiros brasileiros recentes, aos quais este material é dedicado, em

particular aos Professores Zulcy de Souza e Lucio de Medeiros.

Sumário

Prefácio

CAPÍTULO 1 Arranjos e componentes de hidrelétricas

1.1 Fundamentos para conceber arranjos hidrelétricos

1.2 Típicos arranjos hidrelétricos utilizados no Brasil

1.3 Típicos componentes de centrais hidrelétricas

CAPÍTULO 2 Reservatórios

2.1 Finalidades de reservatórios em hidrelétricas

2.2 Tipos gerais

2.3 Parâmetros mínimos para a definição

2.4 Formulações gerais aplicadas

2.5 Quando iniciar a obra

2.6 Etapas gerais de obras no reservatório

2.7 Principais dificuldades durante e após a obra

CAPÍTULO 3 Barragem de concreto

3.1 Avaliações gerais iniciais

3.2 Tipos usuais de barragens de concreto

3.3 Parâmetros mínimos para a definição

3.4 Formulações gerais aplicadas

3.5 Quando iniciar a obra

3.6 Etapas gerais de obras na barragem de concreto

3.7 Principais dificuldades durante e após a obra

CAPÍTULO 4 Descarregador de cheias

4.1 Princípios introdutórios

4.2 Tipos usuais de descarregadores de cheias

4.3 Parâmetros mínimos de definição

4.4 Formulações gerais aplicadas

4.5 Quando iniciar a obra

4.6 Principais dificuldades durante e após a obra

CAPÍTULO 5 Desarenador

5.1 Finalidades do desarenador

5.2 Tipos utilizados de desarenadores

5.3 Formulações gerais aplicadas

5.4 Principais dificuldades durante e após a obra

CAPÍTULO 6 Tomada d'água

6.1 Funções de um típico arranjo de tomada d'água

6.2 Tipos usuais de tomadas de água

6.3 Formulações gerais aplicadas

CAPÍTULO 7 Câmara de carga

7.1 Finalidades da câmara de carga

7.2 Típico arranjo de câmara de carga

7.3 Formulações gerais aplicadas

CAPÍTULO 8 Barragem de materiais mistos

8.1 Fatores relevantes de implantação

8.2 Tipos usuais de materiais empregados em barragens de materiais mistos

8.3 Parâmetros mínimos para a definição

8.4 Formulações gerais aplicadas

8.5 Quando iniciar a obra

8.6 Etapas gerais de obras na barragem de solo e enrocamento

8.7 Principais dificuldades durante e após a obra

CAPÍTULO 9 Canal de adução

9.1 Condições para considerar a alternativa do canal de adução

9.2 Tipos de canais utilizados

9.3 Formulações gerais aplicadas

9.4 Quando iniciar a obra

9.5 Etapas gerais de obras no canal de adução

9.6 Principais dificuldades durante e após a obra

CAPÍTULO 10 Tubulação de adução em baixa pressão

10.1 Fatores para definir a alternativa da tubulação de adução em baixa pressão

10.2 Tipos de materiais empregados em tubulações de adução em baixa pressão

10.3 Parâmetros mínimos para a definição

10.4 Formulações gerais aplicadas

10.5 Quando iniciar a obra

10.6 Etapas gerais de obras na tubulação de adução em baixa pressão

10.7 Principais dificuldades durante e após a obra

CAPÍTULO 11 Túnel de adução

11.1 Circunstâncias de favorecimento da alternativa do túnel de adução

11.2 Típica seção para túneis de adução

11.3 Parâmetros mínimos de definição

11.4 Formulações gerais aplicadas

11.5 Quando iniciar a obra

11.6 Etapas gerais de obras no túnel de adução

11.7 Principais dificuldades durante e após a obra

CAPÍTULO 12 Chaminé de equilíbrio

12.1 Aspectos e finalidades relevantes para definir o uso de chaminés de equilíbrio

12.2 Seções usualmente utilizadas para chaminé de equilíbrio

12.3 Necessidade de implantação da chaminé de equilíbrio

12.4 Formulações gerais aplicadas

12.5 Quando iniciar a obra

12.6 Etapas gerais de obras na chaminé de equilíbrio

12.7 Principais dificuldades durante e após a obra

CAPÍTULO 13 Tubulação de adução em alta pressão – conduto forçado (*penstocks*)

13.1 Condições preliminares e relevantes para a obra da tubulação de adução em alta pressão

13.2 Tipos de materiais utilizados para tubulação de aduções em alta pressão

13.3 Parâmetros mínimos de definição

13.4 Formulações gerais aplicadas

13.5 Quando iniciar a obra

13.6 Principais dificuldades durante e após a obra

CAPÍTULO 14 Casa de força

14.1 Fatores preliminares e relevantes de projeto civil e obras de casa de forças

14.2 Tipos de arranjos usualmente utilizados para casa de força
14.3 Formulações gerais aplicadas
14.4 Etapas gerais de obras na casa de força
14.5 Principais dificuldades durante e após a obra

CAPÍTULO 15 Canal de fuga
15.1 Funções gerais do canal de adução
15.2 Tipos gerais
15.3 Orientações gerais para o dimensionamento geométrico do canal de fuga
15.4 Quando iniciar a obra

CAPÍTULO 16 Desvio do rio
16.1 Atribuições do desvio do rio
16.2 Esquemas de implantação
16.3 Formulações gerais aplicadas

Referências bibliográficas

1 Arranjos e componentes de hidrelétricas

Este capítulo aborda os fundamentos a serem levados em consideração para a definição preliminar de arranjos em hidrelétricas. Em seguida são apresentadas algumas alternativas possíveis de tipos gerais de arranjos dos principais componentes, bem como feita a descrição sucinta de suas funções no circuito de geração.

1.1 Fundamentos para conceber arranjos hidrelétricos

É fundamental conhecer, mesmo que sucintamente, como usualmente é concebido um arranjo hidrelétrico, para melhor entendimento integrado das construções de obras civis dos típicos elementos que compõem estes tipos de empreendimento.

Um arranjo ótimo para um aproveitamento hidrelétrico é definido via processo iterativo em que várias alternativas são configuradas, projetadas e orçadas a partir do posicionamento das componentes do empreendimento que vise a combinação ideal nas seguintes disciplinas: meio ambiente, social, segurança, turismo, permanência da navegabilidade (se aplicável ou até mesmo a possibilidade de oferecer a navegação em trecho do rio não navegável devido a futura formação

Fig. 1.4 UHE Belo Monte – Sítio Pimental (233,1 MW)
Fonte: Norte Energia – Foto: Regina Santos.

1.2.4 Central hidrelétrica de derivação

As *centrais hidrelétricas de derivação*, muito utilizadas devido ao grande potencial apresentado no Brasil em razão dos rios que escoam em altitudes consideráveis em relação ao mar, como nas Serras Gaúcha, Catarinense e da Mantiqueira, são implantadas em locais com relevo altamente acidentado, no qual o reservatório é formado em determinado rio e o sistema de adução conduz as vazões necessárias para a geração de energia e descarga em outro.

Um dos exemplos desse tipo de CH é mostrado na Fig. 1.5, em que a barragem foi implantada com o consequente reservatório formado no *Rio Passo Fundo*, ainda que o canal de fuga restitua a descarga turbinada pelas unidades geradoras em outro rio: o *Rio Erechim*.

exposta.

Fig. 1.16 PCH Rio Tigre (2,08 MW)

Fonte: uso da imagem gentilmente autorizado pelo concessionário do empreendimento.

1.3.6 Sistema de alta pressão

Sistemas que apresentam alta declividade frequentemente apresentam alternativas que envolvem túneis e tubulações, de modo individual ou combinado.

Túneis são considerados quando o trecho do sistema de alta pressão for muito longo, a topografia desfavorável à construção de tubulação em alta pressão e a rocha apresentar boa qualidade, além de evidenciar

2 Reservatórios

O início do capítulo cita os possíveis estudos introdutórios que devem ser desenvolvidos acerca deste componente. Apresenta os aspectos a serem levados em consideração para a definição preliminar dos tipos. Após é "itemizado" parâmetros precedentes para determinar o melhor custo benefício em termos de área destinada para o reservatório da CH. Em seguida apresenta as formulações para auxiliar preliminarmente na decisão quanto aos volumes e vida útil do reservatório. Logo após é indicado quando a obra deve ser iniciada. Por fim são feitos comentários sobre as etapas construtivas, principais dificuldades durante e após a obra.

2.1 Finalidades de reservatórios em hidrelétricas

Em aproveitamentos hidrelétricos, um reservatório possui a finalidade de acumular a água nas ocasiões de excesso para uso em períodos de escassez, visando suprir aos grupos geradores com as vazões regulada e ordenada, conforme a demanda de energia na rede elétrica.

Consequência natural da topografia a montante do barramento do curso do rio, é no reservatório que ocorrem estudos, entre outros, *energéticos*, que busca a melhor eficiência da capacidade energética de armazenamento do ciclo de carga (conforme exemplifica a Fig. 2.1, a alternativa apresenta um enorme volume útil, para o caso, $19x10^9$ m^3, e

Fig. 2.6 PCH Albano Machado (3,00 MW)
Fonte: Marcio Zanotto.

2.3 Parâmetros mínimos para a definição

O critério preliminar para definir o melhor custo benefício do tamanho do reservatório é comparar o valor presente da energia gerada da central hidrelétrica com os custos devidos às compensações de áreas, e MME (2000) recomenda se prevenir de:

- Inundação de terras indígenas, viável mediante discussão, edição e permissão via Congresso Nacional;
- Inundação de áreas de quilombos e necessidade de relocação, possível após autorização do Congresso Nacional;
- Inundação de áreas de preservação ambientais legalmente constituídas, como, por exemplo, parques nacionais e outras unidades de conservação da fauna e flora, além de ecossistemas importantes, como a Mata Atlântica e o Pantanal Mato-grossense;

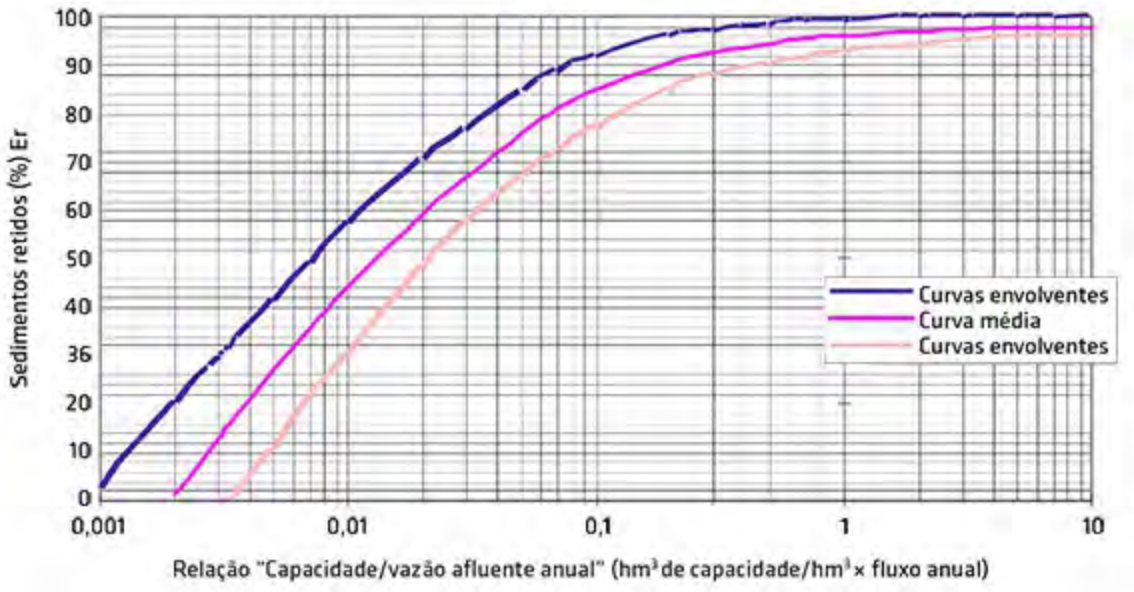

Fig. 2.8 Curva de *Brune*

Fonte: Eletrobrás (2003).

Deve ser calculado o índice de sedimentação *IS* para a utilização da curva de *Brune*:

$$IS = V_t / (Q^2 L) \qquad (2.6)$$

Em que:

IS = índice de sedimentação;

V_t = volume total do reservatório, em m^3;

Q = vazão média afluente, em m^3/s;

L = comprimento do reservatório, em *m*.

Com o valor de *IS*, encontra a porcentagem de sedimento que sai do reservatório, por intermédio da curva de *Churchill*, Fig. 2.9, e por diferença de *100%*, obtêm se a eficiência de retenção, que deverá ser expressa em fração.

Fig. 2.15 PCH São Francisco Verdadeiro (14,00 MW): trabalhos de cortes de troncos das árvores derrubadas e selecionadas, que no caso servirá para lenhas

Fonte: uso da imagem gentilmente autorizado pelo concessionário do empreendimento.

- *Etapa 4:* A abertura de acessos provisórios é a etapa executiva necessária para remover e estocar os materiais provenientes dos serviços de supressão da vegetação. Esta tarefa pode ser visualizada pela Fig. 2.16. A experiência prática tem mostrado que para manter esses acessos em condições de trafegabilidade ao longo do período de obras geralmente necessita de drenagens, também executada provisoriamente. Um exemplo deste tipo de drenagem pode ser observado na Fig. 2.17, que foi executada uma linha de tubulações de concreto para condicionar um destino adequado das águas superficiais que, evidentemente, prejudicariam os acessos em

3 Barragem de concreto

Descreve os fatores para auxiliar preliminarmente na determinação da definição do tipo da barragem de concreto. Assim como nos demais capítulos, estabelece parâmetros introdutórios para auxiliar na definição dos tipos; em seguida são apresentadas formulações e diversas tabelas de modo a auxiliar o leitor nas decisões preliminares. Logo após é indicado quando a obra deve ser iniciada. Por fim são feitos comentários sobre as etapas construtivas, principais dificuldades durante e após a obra.

3.1 Avaliações gerais iniciais

Conhecer a *hidrologia*, *geologia*, *geotecnia* e *topografia* local do eixo do barramento, *acessos*, *custos*, *equipamentos*, *experiência* e *conhecimento da projetista e de possíveis fornecedores*, além de disponibilidade de materiais necessários para a execução são fatores determinantes para caracterizar não somente a barragem de concreto, mas sim facilitar todas as outras possibilidades de definição do tipo e construção.

A Fig. 3.1 mostra uma alternativa de barragem no qual o fator custo foi preponderante para a definição ser em *Concreto Compactado a Rolo (CCR)*. Alternativa esta que permite aperfeiçoar o prazo construtivo quando comparada às alternativas de barragem de concreto (massa, ciclópico, armado). Para maiores informações quanto à alternativa de CCR é sugerida a leitura de Filho (2003).

Fig. 3.5 PCH São Francisco Verdadeiro (14,00 MW)

Fonte: uso da imagem gentilmente autorizado pelo concessionário do empreendimento.

3.6 Etapas gerais de obras na barragem de concreto

A sequência finita, no mínimo, que representa as etapas construtivas gerais na barragem de concreto é esquematizada via imagens representadas pelas Figs. 3.7 a 3.19.

Evidente que as etapas apresentadas não esgotam as análises necessárias para a conclusão da atividade com possibilidades existentes para que os resultados desejados permaneçam com a confiabilidade necessária para o bom desenvolvimento da obra, a ser seguido de

Fig. 3.19 PCH São Francisco Verdadeiro (14,00 MW): barragem mostrada apresenta em sua ombreira esquerda o tipo de barragem em solo e enrocamento, este tipo de barragem é designada por barragem mista destes tipos de materiais em que trecho é de concreto adjacente ao trecho em solo e enrocamento

Fonte: uso da imagem gentilmente autorizado pelo concessionário do empreendimento.

3.7 Principais dificuldades durante e após a obra

Surpresas geológicas e hidrológica (que pode ocasionar rompimento de ensecadeiras) podem ser importantes dificuldades durante a obra. Essas surpresas antecipadamente são resultantes preliminarmente de

4 Descarregador de cheias

Descreve as funções da estrutura, é desta forma que o capítulo é iniciado. Assim como nos demais capítulos, estabelece preliminarmente parâmetros para a definição dos tipos, se controlado ou não por comportas; em seguida apresentam-se formulações de modo a auxiliar o leitor nas decisões preliminares. Logo após é indicado quando a obra deve ser iniciada. Por fim são descritas as principais dificuldades durante e após a obra.

4.1 Princípios introdutórios

Serve para dar condições de segurança à barragem e demais estruturas da central hidrelétrica, sem ocasionar perturbações que prejudiquem a operação. O *descarregador de cheias,* além de controlar cheias, também tem a função de restituir a jusante do barramento às vazões não necessárias para a geração de energia; pode ou não ser controlado por comportas (quando necessário, no mínimo duas unidades).

Nos do tipo soleira livre (não controlado por comportas) inexiste controle sobre as descargas que excedem a necessidade de gerar energia. Os controlados por comportas, a partir do acionamento delas, pode-se determinar a cota em que a água do reservatório irá atingir, além de permitir a vazão que escoará para jusante do descarregador de cheias.

Fig. 4.9 PCH Albano Machado (3,00 MW): sistema de desvio que compõe a barragem e soleira livre em execução com auxílio de bomba lança de concreto

Fonte: acervo pessoal.

4.6 Principais dificuldades durante e após a obra

Durante a obra, seguir as recomendações no Cap. 3; e, após a obra, atenção ao desgaste da superfície, resultante de procedimentos e materiais inadequados usados durante a construção, além de ruptura por ineficiência de escoamento devido a surpresas hidrológicas da bacia para o projeto, não detectadas na fase de estudos.

5 Desarenador

Descreve as funções do componente, é desta forma que o capítulo é iniciado. Informa o tipo mais comum; em seguida são apresentadas recomendações e tabelas de modo a auxiliar o leitor na decisão preliminar de optar pela necessidade do desarenador. Logo após é indicado quando a obra deve ser iniciada. Por fim são descritas as principais dificuldades durante e após a obra.

5.1 Finalidades do desarenador

Para desenvolver um obstáculo à passagem de sedimentos em suspensão no escoamento ao longo do sistema de adução, é necessário prever uma e/ou mais regiões para a decantação e respectiva futura remoção dos sedimentos decantados. Denomina-se desarenador, posicionada geralmente a montante e/ou nas próprias estruturas, como *canais, tomada d'água e câmara de carga*.

A Fig. 5.1 mostra a região do *desarenador* e a *comporta de limpeza*.

6 Tomada d'água

O capítulo descreve as funções da estrutura. Informa os tipos usuais; em seguida são apresentadas formulações e diversas tabelas de modo a auxiliar o leitor nas decisões preliminares.

6.1 Funções de um típico arranjo de tomada d'água

A *tomada de água* é projetada para coletar água do reservatório e conduzi-la ao sistema de baixa e/ou de alta pressão, regula a vazão e retém os detritos carreados pelo escoamento.

Em função de necessidades específicas, devem-se prever acessórios, tais como: pórticos de manobras, grades, limpa-grades, comportas ensecadeira, comportas vagão, comportas desarenadoras, e de controle de vazão.

A experiência em projetos de tomada de água mostra tipicamente o seguinte arranjo:

- Canal de aproximação do escoamento, conforme Fig. 6.1;
- Uma câmara de decantação do material em suspensão, caso indique necessidade nos estudos sedimentológicos;
- A tomada de água em si, como na Fig. 6.1, contém equipamentos como grades, comportas, limpa-grades, instrumentação.

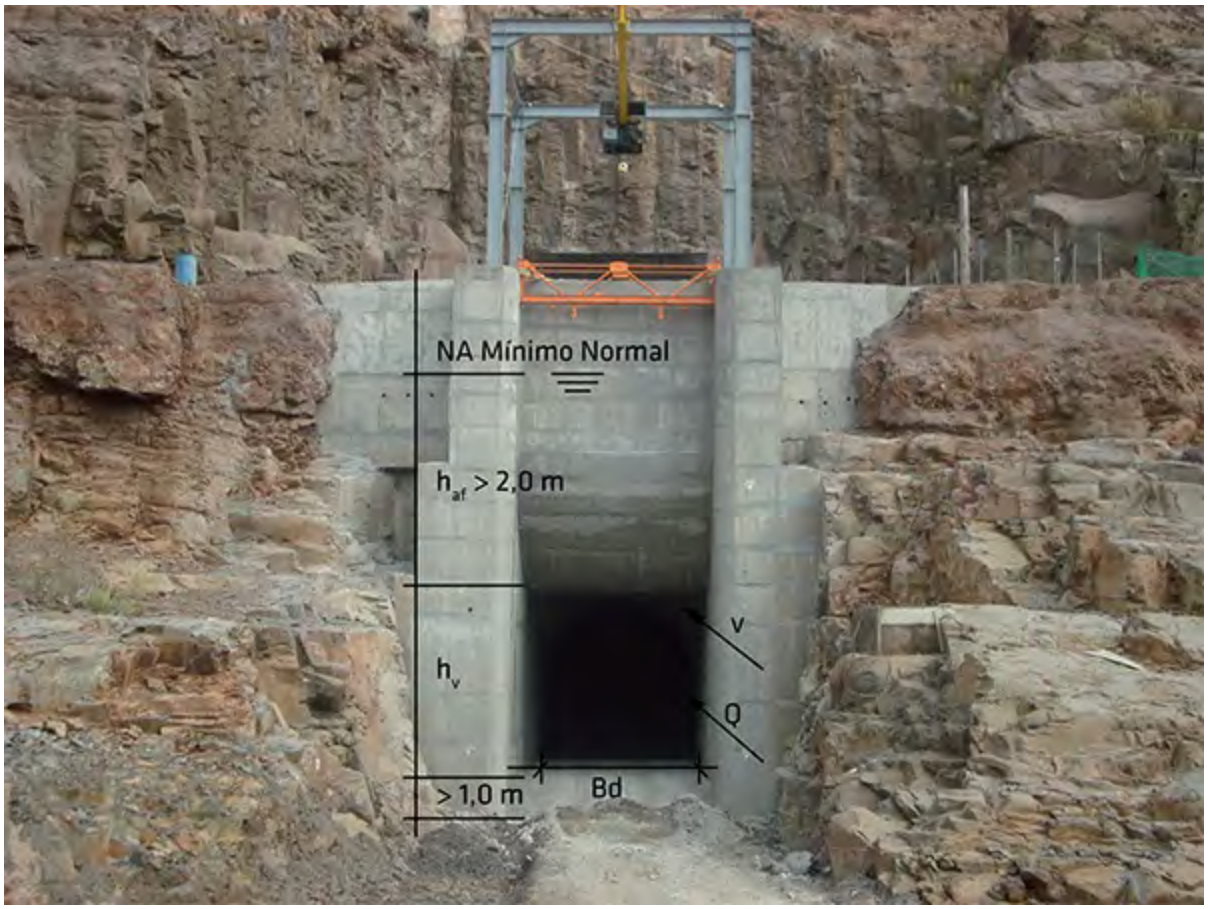

Fig. 6.4 PCH Toca do Tigre (12,00 MW): esquema das componentes das formulações da tomada de água
Fonte: acervo pessoal.

O afogamento mínimo (h_{af}) pode ser avaliado pela fórmula de *Gordon* (ver componentes da fórmula no esquema representado na Fig. 6.4):

$$h_{af} = k\ v\ h_v^{0,5} \qquad (6.2)$$

Em que:

h_{af} = afogamento mínimo, em *m*;

v = velocidade de escoamento na seção, em *m/s*;

k = valor de *0,545* para condições simétricas do fluxo e *0,725* para assimétrica;

7 Câmara de carga

O capítulo descreve as funções da estrutura. Assim como nos demais capítulos, informa aspectos sobre definições introdutório do tipo; em seguida são apresentadas formulações de modo a auxiliar o leitor nas decisões preliminares.

7.1 Finalidades da câmara de carga

Promove o escoamento da superfície livre ao escoamento sob pressão, a *câmara de carga* interliga o *canal adutor* ao *conduto forçado*, deve atender, sob condições críticas na operação da central hidrelétrica, aos seguintes aspectos:

- Em partida brusca da turbina, garantir que não entre ar no conduto forçado, seu volume útil deve ser equivalente com a variação da vazão de zero ao valor máximo;

- Em parada brusca da turbina, garantir a estabilidade funcional da câmara de carga e do canal adutor, geralmente por meio de um extravasor lateral, conforme Fig. 7.1, no *canal*, localizado o mais próximo possível da *câmara de carga*.

8 Barragem de materiais mistos

O capítulo indica os possíveis trabalhos introdutórios a serem realizados para o sucesso de implantação da estrutura. Assim como nos demais capítulos, estabelece parâmetros para a definição dos tipos; em seguida são apresentadas formulações e diversas tabelas de modo a auxiliar o leitor nas decisões. Logo após é indicado quando a obra deve ser iniciada. Por fim são feitos comentários sobre as etapas construtivas, principais dificuldades durante e após a obra.

8.1 Fatores relevantes de implantação

Realizar a *caracterização geológico-geotécnica*, *topográfica* e *balanço de materiais*, durante a concepção do arranjo geral da CH, são fatores relevantes preliminares para o sucesso de sua implantação.

Outros fatores a serem incluídos: verificação da forma do vale, custo da obra, tamanho e localização do vertedouro, disponibilidade e economicidade dos materiais, condições climáticas e trabalhabilidade, cronograma de construção, esquema de desvio, características geológicas, geotécnicas e topográficas da fundação e integração ao arranjo geral, devendo o eixo da barragem estar posicionado em local mais estreito do rio.

As imagens a seguir mostram três exemplos de barragens com materiais mistos: as Figs. 8.1 e 8.3 de enrocamento com face de concreto, a Fig.

Fig. 8.5 UHE Campos Novos (880,00 MW): barragem formada pelo enrocamento a jusante e a montante à face de concreto
Fonte: disponível em <http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=282673>.

8.3 Parâmetros mínimos para a definição

Algumas recomendações preliminares para o estabelecimento de parâmetros visando à definição do tipo de barragem devem ser adotadas, como as associadas a cada tipo de barragem a seguir, recomendadas em Eletrobrás (2003):

8.3.1 Barragem de solo e enrocamento (Fig. 8.6)

Fig. 8.12 PCH São Francisco Verdadeiro (14,00 MW): superfície apresentada durante a fase de limpeza fina para as caracterizações geotécnica, geológica e topográfica superficial da fundação que receberá o corpo maciço da barragem de solo e enrocamento, solução adotada em projeto
Fonte: uso da imagem gentilmente autorizado pelo concessionário do empreendimento.

- *Etapa 4:* Após a apresentação da área da fundação dentro das condições informadas pela etapa anterior, identificam-se os alinhamentos, as elevações, as dimensões e as seções transversais da barragem via trabalhos de topografia, realizam-se as verificações superficiais em campo no que se refere aos aspectos geológicos e geotécnicos devem ser confirmados com os previstos em projeto. Caso detectadas deficiências nas verificações, por exemplo,

9 Canal de adução

Mostra os aspectos a serem levados em consideração preliminarmente para a definição da seção da estrutura. Informa os tipos e em seguida apresentam-se formulações e diversas tabelas de modo a auxiliar o leitor nas decisões preliminares. Logo após é indicado quando a obra deve ser iniciada. Por fim são feitos comentários sobre as etapas construtivas, principais dificuldades durante e após a obra.

9.1 Condições para considerar a alternativa do canal de adução

A definição da seção mais adequada e de seus possíveis tratamentos estará em função das condições topográficas e geológico-geotécnicas além da minimização da soma do custo da estrutura com o valor presente da energia perdida.

A Fig. 9.1, mostra um *canal de adução* em solo revestido com manta em *PEAD*, para o caso foi necessária para melhorar as condições de impermeabilização; a Fig. 9.2 exemplifica um canal em rocha.

Fig. 9.5 PCH Rio Tigre (2,08 MW): aqueduto em trecho de sistema de adução da usina

Fonte: uso da imagem gentilmente autorizado pelo concessionário do empreendimento.

9.3 Formulações gerais aplicadas

> *Servem para uma primeira estimativa, entretanto, os projetos devem ser desenvolvidos por especialistas experientes das diferentes áreas de conhecimento, pois se trata de obras complexas, de grande responsabilidade.*

O canal de adução deve ser compatível com a vazão de escoamento,

Fig. 9.13 PCH Albano Machado (3,00 MW): operador manipulando uma perfuratriz que executa trabalhos de perfurações em rocha para condicionar os trabalhos com explosivos para a formação da geometria do canal de adução

Fonte: acervo pessoal.

- *Etapa 6:* Concluídas as tarefas descritas na etapa anterior, são realizados nesta etapa os trabalhos para armar os explosivos, sinalizar e isolar de possíveis transeuntes à área visando a liberação para a explosão, desmontar a rocha, remove-la e realizar eventuais tratamentos mediante um parecer de geólogo. Essas atividades podem ser vistas pelas Figs. 9.14, 9.15 e 9.16. Importante salientar que o *canal de adução*, durante e após as obras, deve ter garantidos o esgotamento e controles de água existente na área destinada

10 Tubulação de adução em baixa pressão

O capítulo mostra as condições mínimas necessárias para a definição da alternativa em assunto. Assim como nos demais capítulos, estabelece parâmetros introdutórios para a definição dos tipos; em seguida são apresentadas formulações e diversas tabelas de modo a auxiliar o leitor nas decisões preliminares. Logo após é indicado quando a obra deve ser iniciada. Por fim são feitos comentários sobre as etapas construtivas, principais dificuldades durante e após a obra.

10.1 Fatores para definir a alternativa da tubulação de adução em baixa pressão

A tubulação de adução em baixa pressão é uma alternativa possível de ligação entre a tomada de água e a chaminé de equilíbrio ou conduto forçado caso inviabilizado o emprego de canal de adução.

A Fig. 10.1 com seus pertences, no caso blocos de apoio na Fig. 10.1, mostra um exemplo de *tubulação de adução em baixa pressão* em madeira, a qual foi substituída no início dos anos 2000, por trechos de canal em rocha e em solo revestido por PEAD e, também, por trechos de aquedutos. A substituição foi justificada devido aos elevados custos de operação e manutenção ao longo do tempo.

10.4 Formulações gerais aplicadas

Servem para uma primeira estimativa, entretanto, os projetos devem ser desenvolvidos por especialistas experientes das diferentes áreas de conhecimento, pois se trata de obras complexas, de grande responsabilidade.

O primeiro processo a conhecer é o diâmetro da tubulação; a seguir algumas recomendações:

- *Diâmetro mínimo:* diâmetro mínimo a ser adotado é o que produz uma perda de carga por atrito igual a 1% da queda bruta e dimensionado segundo a Eq. 10.1:

$$D = (1{,}526\ Q^{0{,}388})\ [\ (K_a\ L_{cf})\ /\ (H_b)\ ]^{0{,}204} \qquad (10.1)$$

Em que:

Q = vazão de projeto (*m³/s*);

H_b = queda bruta (*m*);

L_{cf} = comprimento equivalente do conduto de baixa pressão (*m*);

K_a = coeficiente de perda de carga em trechos retos que varia com o material da tubulação.

Tab. 10.1 Valores de K_a em função do material da tubulação

Tubulação	K_a
Aço novo, com juntas soldadas ou sem costuras	0,32
Cimento amianto	0,34
Concreto armado	0,38

Fonte: MME (2000).

Fig. 10.12 PCH São Francisco Verdadeiro (14,00 MW): suspensão de parte da tubulação para contribuir adequadamente com os trabalhos de montagem da tubulação de adução em baixa pressão

Fonte: uso da imagem gentilmente autorizado pelo concessionário do empreendimento.

- *Etapa 4:* Nesta etapa se realiza os trabalhos de instalação de papel grafitado quando a tubulação se apoia sobre os blocos de concreto, são realizadas as execuções dos estágios remanescentes de concreto dos blocos de apoio, conforme mostrado na Fig. 10.13 uma etapa em andamento dos serviços de concretagem de bloco de ancoragem na tubulação de adução em baixa pressão da PCH Rio Tigre, e também os trabalhos de acabamentos de pinturas na tubulação para a finalização da execução, conforme o que mostra

11 Túnel de adução

Inicia com os estudos a serem levados em consideração para a tomada de decisão preliminar sobre definição da alternativa de uso de túnel. Assim como nos demais capítulos, estabelece parâmetros mínimos para a definição introdutória dos tipos; em seguida são apresentadas formulações e diversas tabelas de modo a auxiliar o leitor nas decisões preliminares. Logo após é indicado quando a obra deve ser iniciada. Por fim são feitos comentários sobre as etapas construtivas, principais dificuldades durante e após a obra.

11.1 Circunstâncias de favorecimento da alternativa do túnel de adução

No sistema hidráulico de geração, quando a *casa de força* não for incorporada na *barragem* e a *topografia*, a geologia e a *geotecnia* não favorecer a adução por *canais* e *condutos*, busca-se a alternativa de projetar e executar *túneis*; quando esta for a alternativa, o maciço rochoso deve apresentar as seguintes condições mínimas: presença de suficiente cobertura de rocha ao longo do túnel, como mostrado na Fig. 11.1a e ter baixa *permeabilidade* e sem suspeita de existir materiais *erodíveis*.

11.6 Etapas gerais de obras no túnel de adução

A sequência finita, no mínimo, que representa as etapas construtivas gerais no túnel de adução são aqui esquematizadas via imagens representadas pelas Figs. 11.6 a 11.16.

Evidente que as etapas apresentadas aqui não esgotam as análises necessárias para a conclusão da atividade com possibilidades existentes para que os resultados desejados permaneçam com a confiabilidade necessária para o bom desenvolvimento da obra, a ser seguido de acordo com a prática usual e as normas da ABNT.

As etapas construtivas gerais são compostas por seis partes, detalhadas para uma melhor compreensão do processo metodológico. Na Fig. 11.5 é possível visualizar o algoritmo do procedimento.

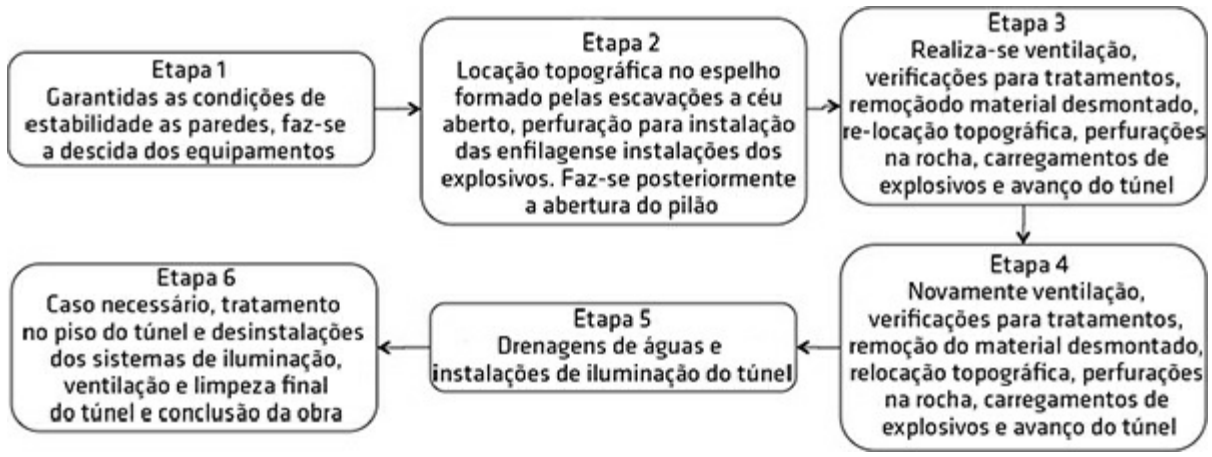

Fig. 11.5 Mínimas etapas gerais de obras no túnel de adução
Fonte: acervo pessoal.

Com certo grau de adaptação é razoável admitir que o algoritmo mostrado na Fig. 11.5 possa ser aplicado ao procedimento construtivo geral do componente tema no Cap. 16 (quando o tipo de *desvio do rio*

Fig. 11.12 PCH Queixada (30,00 MW): trabalhos de perfurações na rocha para avanço de construção do túnel de adução
Fonte: acervo pessoal.

- *Etapa 4:* Em novo ciclo, nesta etapa são realizadas as atividades de ventilação, verificações para tratamentos, e caso necessário, executa os tratamentos como pode ser visualizado na Fig. 11.13, remoção do material desmontado na etapa anterior, como mostrado na Fig. 11.14, relocação topográfica, perfurações na rocha, carregamentos de explosivos nas perfurações e continuidade de avanço do túnel.

12 Chaminé de equilíbrio

Inicia com os estudos a serem levados em consideração para a tomada de decisão preliminar sobre a necessidade ou não de chaminé de equilíbrio. Assim como nos demais capítulos, estabelece parâmetros mínimos introdutórios para a definição dos tipos; em seguida são apresentadas as possíveis formulações e diversas tabelas de modo a auxiliar o leitor nas decisões preliminares. Logo após é indicado quando a obra deve ser iniciada. Por fim são feitos comentários sobre as etapas construtivas, principais dificuldades durante e após a obra.

12.1 Aspectos e finalidades relevantes para definir o uso de chaminés de equilíbrio

Sob aspecto hidráulico, e quando necessária a sua instalação no circuito de geração, a utilização da chaminé de equilíbrio deve atender as seguintes hipóteses mínimas:

- Regular a frequência inicial das unidades geradoras, quando em *partida brusca*, deve garantir que não entre ar no conduto forçado;

- Reduzir as variações de pressão que se propagam ao longo da tubulação de alta pressão, quando em *parada brusca* das unidades geradoras, mantém a estabilidade funcional dela e da tubulação de

Fig. 12.3 PCH Toca do Tigre (12,00 MW): chaminé de equilíbrio do tipo "cálice" em construção e trabalhos de remoção feitos pela minicarregadeira em plano logo abaixo da área da seção de transição transversal
Fonte: arquivo pessoal.

12.3 Necessidade de implantação da chaminé de equilíbrio

Para avaliar a necessidade da instalação da *chaminé de equilíbrio* no circuito de geração, é necessário conhecer os conceitos de *tempo efetivo do regulador* (T_e), *tempo total do regulador* (T_c), *sobrevelocidade*, *tempo transitório hidráulico* (T_p) e *tempo transitório mecânico* (T_s).

- *Tempo efetivo do regulador (T_e):* é o tempo de fechamento do regulador, em segundos.

- *Tempo total do regulador (T_c):* é o tempo total de ação do servomotor, em segundos (*s*), o *tempo efetivo do regulador acrescido* de *0,25* a *1,5 s*.

Fig. 12.13 PCH Marco Baldo (16,00 MW): pórtico instalado na plataforma superior da chaminé de equilíbrio utilizado para içamento do material
Fonte: acervo pessoal.

- *Etapa 2:* Quando aplicável, executam-se tratamentos das escavações mediante parecer de geólogo assim que apontarem as verificações de campo. Um típico tratamento realizado é na projeção de concreto, conforme mostra a Fig. 12.14 e aplicações de tirantes, além de instalação de drenos horizontais profundo, comumente designado por DHP.

13 Tubulação de adução em alta pressão – conduto forçado (penstocks)

O capítulo mostra as funções e condições necessárias introdutórias para a definição da alternativa em assunto. Assim como nos demais capítulos, estabelece parâmetros para a definição preliminar dos tipos; em seguida são apresentadas formulações e diversas tabelas de modo a auxiliar o leitor nas decisões preliminares. Logo após é indicado quando a obra deve ser iniciada. Por fim são descritas as principais dificuldades durante e após a obra.

13.1 Condições preliminares e relevantes para a obra da tubulação de adução em alta pressão

Estrutura essencial que compõe o circuito de geração da central hidrelétrica, é nela que surgem as principais dificuldades construtivas devido aos difíceis acessos em função da elevada irregularidade topográfica, conforme mostrado na Fig. 13.1.

NOTAS: Altura do bloco A ≥ 2 . D, conforme a solução geométrica para o bloco;
Largura da base do bloco B = 3 . D, exceto na região assinalada, onde deve ser B = 4 . D.
Comprimento da base do bloco C - tabelado.

13.5 Quando iniciar a obra

Assim que os primeiros estágios dos blocos de ancoragem estiverem prontos é que se inicia a montagem da tubulação de alta pressão, conforme mostrado na Fig. 13.9.

Fig. 13.9 PCH São Francisco Verdadeiro (14,00 MW): primeiros estágios dos blocos de apoio e de ancoragem executados, assim permitindo o início de execução das tubulações de adduções de alta pressão
Fonte: uso da imagem gentilmente autorizado pelo concessionário do

14 Casa de força

O capítulo informa as funções da estrutura. Indica fatores a serem levados em consideração preliminar para o dimensionamento civil. Logo após é indicado quando a obra deve ser iniciada. Por fim são feitos comentários sobre as etapas construtivas, principais dificuldades durante e após a obra.

14.1 Fatores preliminares e relevantes de projeto civil e obras de casa de forças

Em função das múltiplas disciplinas que se interagem para a construção da *casa de força*, sem aqui se limitar, é nesta estrutura que envolve as seguintes interfaces:

- Mecânica;
- Elétrica;
- Arquitetura;
- Civil;
- Meio ambiente.

Em hidrelétricas a *casa de força*, durante e após a obra, possui as finalidades de alojar, proteger, operar e manter as unidades geradoras e demais equipamentos para a geração de energia, além de

Fig. 14.7 PCH Carlos Gonzato (9,00 MW): *casa de força* que abriga duas unidades geradoras de eixo horizontal composto por turbina hidráulica com rotor Francis acoplado a gerador elétrico e de simples sucção e duto para liberação de calor, de saída por cima do gerador inclinada e posterior verticalmente

Fonte: acervo pessoal.

Fig. 14.14 PCH Foz do Chopim (29,072 MW): *casa de força* externa que abriga duas unidades geradoras compostas por turbinas hidráulicas de eixo vertical com rotor Kaplan de capacidade instalada de 29,072 MW

Fonte: uso da imagem gentilmente autorizado pelo concessionário do empreendimento.

15 Canal de fuga

Mostra os aspectos a serem levados em consideração para a definição da seção da estrutura. Estabelece parâmetros de modo a auxiliar o leitor nas decisões preliminares. Logo após indica o momento do início da obra, sob o contexto das demais obras de implantação da CH.

15.1 Funções gerais do canal de adução

O *canal de fuga* é construído para direcionar e restituir a vazão turbinada ao rio, sua geometria condicionada pelo tipo e dimensões da *casa de força* e distância entre esta e o rio.

As Figs. 15.1, 15.2 e 15.3 mostram exemplos de canais de fuga: o primeiro em operação e os demais em fase de obra.

Fig. 15.3 PCH Queixada (30,00 MW): canal de fuga em obras que também serve de caminho dos caminhões que transportam materiais provenientes das escavações da casa de força
Fonte: acervo pessoal.

15.2 Tipos gerais

Existem os tipos, menos comum, de túneis pressurizados e não pressurizados, para a restituição da vazão turbinada ao rio, e os mais comum, como pode ser observado pelas imagens anteriores, de canais, que é objeto discutido neste capítulo. Deve-se consultar bibliografia específica para o caso no qual a restituição seja via túneis.

admissível (em função do Tempo de Recorrência, conforme Tab. 16.2), calcula *A* (nunca inferior a 16,00 m², deve apresentar dimensões d mínimas para o retângulo de 4,00 m × 4,00 m e altura até 16,00 m, como mostrado na Fig. 16.9) como aproximação inicial da área da seção transversal do túnel por meio da *Equação da Continuidade*, apresentada na Eq. 16.11:

Fig. 16.10 PCH Toca do Tigre (12,00 MW)
Fonte: acervo pessoal.

Tab. 16.2 Tempo de recorrência relacionado com a velocidade máxima de escoamento no túnel de desvio

Tempo de recorrência (anos)	Velocidade máxima (m/s)
10	15
100 a 200	20
500	25

Fonte: Eletrobrás (2003).