

BARRAGENS DE ENROCAMENTO NO BRASIL: EVOLUÇÃO, AVANÇOS E PERSPECTIVAS

Rockfill Dams in Brazil: Evolution, Advances and Perspectives

Alberto S. F. Sayão^a, Paulo Teixeira da Cruz^b, Leonardo de Almeida Ferreira^c

^a Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio, Brasil.

^b Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, Brasil.

^c PUC-Rio e Ministério do Desenvolvimento Regional, Brasil.

RESUMO – O barramento de rios para uso nas cidades próximas tem sido usual desde a Antiguidade. No Brasil há registros de barragens no Nordeste desde o século XVI. O presente artigo apresenta uma breve revisão histórica de importantes barragens brasileiras de enrocamento construídas no século XX, para geração hidroelétrica, com ênfase nos avanços e desafios no projeto e construção. Ao final, são apresentadas as principais conclusões, e as vantagens e limitações do uso recente técnica de núcleo asfáltico no Brasil, além das perspectivas da engenharia de barragens de enrocamento no Brasil e no mundo para a próxima década.

ABSTRACT – Damming of rivers for water supply to riverside populations has been common practice for centuries. In Brazil, there are records of dams in the Northeast since the 16th century. This paper presents a brief review of important Brazilian rockfill dams for hydroelectric generation, built in the 20th century, with focus on the advances and challenges in design and construction. The final part presents the main conclusions and the advantages and limitations of the recent use of the asphalt core technique in Brazil, in addition to the perspectives of rockfill dam engineering in Brazil and worldwide for the next decade.

Palavras Chave – Barragens no Brasil, Enrocamento, Núcleo asfáltico, Usinas Hidrelétricas.

Keywords – Dams in Brazil, Rockfill, Asphalt Core, Hydroelectric Power Plants.

1 – INTRODUÇÃO - A ENGENHARIA BRASILEIRA DE BARRAGENS

Em 1961, com a demanda crescente de energia elétrica no país, a CEMIG (Centrais Elétricas de Minas Gerais), decidiu fazer um levantamento do potencial existente nas bacias hidrográficas do Estado. Faltavam, entretanto, os recursos financeiros e o apoio técnico para um empreendimento deste porte e a CEMIG buscava financiamento com o BIRD (Banco Interamericano para Reconstrução e Desenvolvimento).

Em novembro de 1962 foram concluídos os entendimentos, embasados por um contrato com a *Canambra Engineering Consultants Ltda*, um consórcio de duas empresas consultoras canadenses e uma americana, para o inventário dos recursos hídricos no Estado de Minas Gerais, com foco na geração hidroelétrica, irrigação e abastecimento. A equipe da Canambra-CEMIG era composta por 8 engenheiros consultores norte-americanos e mais de 100 engenheiros, técnicos e geólogos brasileiros. Em 4 anos foram percorridos mais de 10 mil km nas bacias dos principais rios de Minas Gerais. Foram mais de 135.000 km² de estudos aerofotogramétricos, com helicópteros e aeronaves de pequeno porte.

E-mails: sayao@puc-rio.br (A. Sayão), ptcruz@terra.com.br (P. Cruz), leonardo.ferreira@mdr.gov.br (L. Ferreira)

O relatório final da Canambra foi concluído em 1966, e seria importante para otimizar os novos investimentos em usinas de energia elétrica. O governo brasileiro interessou-se pela iniciativa da CEMIG e, em 1963, ampliou os estudos à Região Sudeste, com um contrato entre FURNAS e Canambra. Depois, a Canambra seria novamente contratada para estudar o potencial energético nas regiões Norte, Nordeste e Sul.

A partir dos anos 1980, os inventários seriam revisados, pois os condicionantes ambientais ganhavam espaço nos estudos. Projetos com grandes reservatórios e áreas inundadas foram alterados para um maior número de usinas com reservatórios menores. Com isso, os empreendimentos passaram a ser ambientalmente viáveis, porém menos eficientes.

Nas décadas de 1950 a 1980, as obras dos grandes projetos hidroelétricos marcaram a época áurea da Engenharia brasileira de barragens, porque conseguiram reunir profissionais com experiência prática e excelente formação acadêmica. Estas grandes obras deram destaque ao Brasil como um país construtor de usinas hidrelétricas produtivas e seguras. Grandes barragens como Furnas (Figura 1) e outras, mencionadas no item 3, tiveram fases de construção marcadas por um clima de informalidade e colaboração, com reuniões frequentes no campo, com a participação de projetistas, consultores, empreiteiros, fiscais e o concessionário. Assim, o projeto resultava do esforço conjunto de todos. Nessas reuniões informais, eram definidos os materiais do núcleo, transições, filtros e espaldares das barragens, tipo da rocha nos enrocamentos e camadas de *rip-rap*. Existia um projeto conceitual predefinido, mas a sua adaptação e eventuais alterações ocorriam no local da obra.

Estas usinas faziam parte de um plano de infraestrutura de âmbito nacional, embora algumas obras fossem implantadas por empresas hidrelétricas estaduais. Havia verbas para investigação, consultoria, tratamentos da fundação e revisões do projeto. Naquela época áurea (anos 1960 a 1980), os desenhos “*as built*” da barragem, ao final da obra, não eram exigidos. Os desenhos e seções de projeto eram ajustados aos materiais de construção disponíveis no campo. Com o tempo, houve alterações significativas nos procedimentos de projeto e construção:

1. Formalismo do projeto e da obra, com a presença de representantes de cada instituição. Com isso, as reuniões de obra perderam a informalidade e passaram a seguir uma agenda pré-definida. Este fato, porém, não interferiu na qualidade dos projetos, cujos ajustes aos materiais de construção e às condições locais da fundação e continuaram a ser feitos;

2. Como mencionado, a partir da década de 1980, restrições ambientais tornariam inviáveis as obras de grandes hidrelétricas. Por exemplo, a Usina de Belo Monte, originalmente prevista com um grande reservatório, passou a ser uma usina a fio d’água, de produtividade baixa, para reduzir o

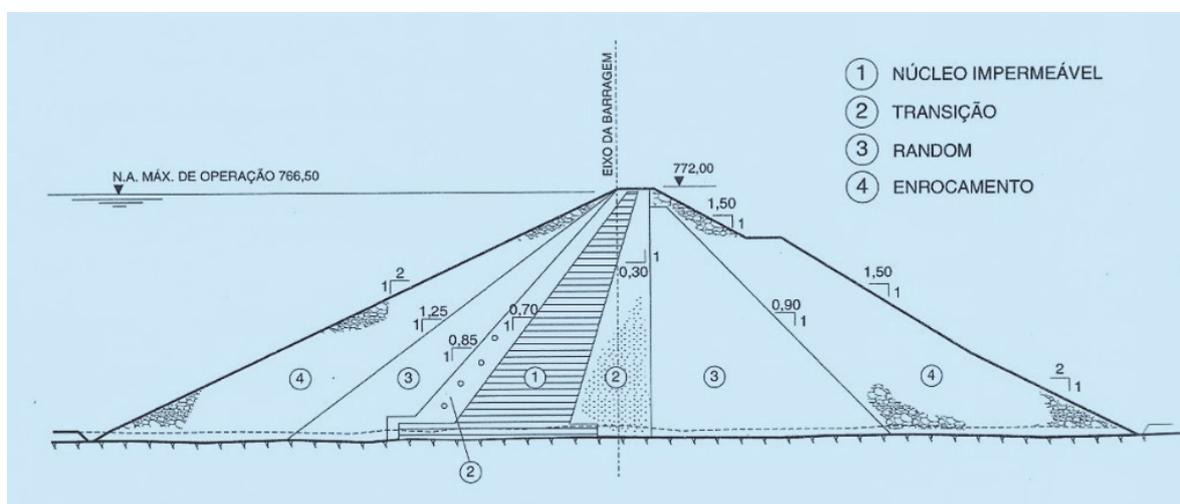


Fig. 1 – Barragem de Furnas. Seção transversal de enrocamento com núcleo argiloso.

alagamento de áreas de floresta e terras indígenas, com um reservatório incapaz de regular as vazões do Rio Xingu;

3. Com o fim das grandes obras, os empreendimentos de irrigação e abastecimento passaram a ser construídos com diques e barragens menores, em projetos contratados com prioridade para o menor preço. Com isso, as investigações de campo e laboratório foram reduzidas ao mínimo necessário. As obras passaram a ser construídas com fiscalização também definida pelo menor preço, e sem a presença dos projetistas.

Em alguns casos, a empresa contratada para supervisionar a obra da barragem consegue incluir na equipe um engenheiro que participou do projeto, para fazer os ajustes às condições locais da fundação, pouco conhecidas, devido à redução das investigações. Não é raro as barragens serem construídas com desenhos preliminares do projeto básico, incorretamente aceito como projeto executivo. Em decorrência dessa nova realidade, quando as obras entram em operação, pode surgir a necessidade de um tratamento da fundação, sempre mais difícil e oneroso com a obra já concluída. Houve, portanto, um claro retrocesso na Engenharia Brasileira de Barragens nos últimos 30 anos.

2 – RESUMO HISTÓRICO

Desde a antiguidade, o homem tem construído estruturas para barramento de rios em locais selecionados estrategicamente, com a finalidade principal de reservar água. A barragem mais antiga de que se tem notícia foi *Sadd El Kafara*, no Egito, construída por volta do ano 2.500 A.C., provavelmente para irrigação, abastecimento e controle de cheias na bacia do Rio Nilo. As ruínas da Barragem *El Kafara* foram descobertas em escavações (Figura 2) do arqueólogo alemão Georg Schweinfurth, no século XIX (1885), a uns 30 km ao sul da capital Cairo (Structurae, 2021).

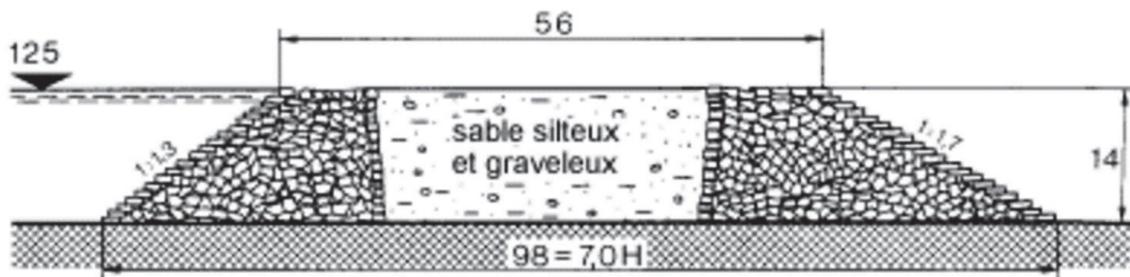
Os estudos indicam que a barragem tinha 4 m de altura, 110 m de comprimento, e 56 m de largura na crista, com volume total de 100 mil m³. Segundo Jansen (1988), a construção da barragem deve ter durado mais de 10 anos, até a obra ser destruída de forma brusca, por erosão interna (*piping*) ou transbordamento, ainda durante a construção, pois não há evidências de ter existido um reservatório. É interessante notar que, com o baixo grau de evolução da engenharia naqueles tempos, as dimensões da barragem eram exageradas, se comparadas aos padrões atuais.

Apesar disso, El Kafara já apresentava características usuais de barragens modernas: um maciço zonado, com espaldares resistentes de enrocamento (blocos de rocha talhados com arestas de 30 cm) e um núcleo central de solo fino, menos permeável. O colapso da barragem deve ter sido catastrófico, pois os egípcios ficariam oito séculos sem construir outras barragens de terra. Nos tempos modernos, as primeiras barragens de enrocamento foram construídas na Califórnia (década de 1850), para prover de água os garimpos e minerações na árida região oeste americana (Cruz e Sayão, 2014).

No Brasil, a engenharia de barragens começou com a Barragem do Cedro (em alvenaria de pedras), ainda no final do século 19, a mando do Imperador Pedro II, para mitigar os efeitos das secas frequentes no sertão cearense (Miguez, 2009). Construída de 1890 a 1906, a 160 km da capital Fortaleza, a importância histórica da obra e a beleza natural da região, conhecida como Monumento Natural dos Monólitos de Quixadá, com o monólito de granito da Pedra da Galinha Choca, seriam reconhecidas pelo tombamento no IPHAN (Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional), em 1977, e a indicação em 2015 para receber o título de Patrimônio Mundial da Unesco (Organização das Nações Unidas para Educação, Ciência e Cultura), após obras de recuperação e iluminação (Figura 3).



(a) Enrocamento na face de jusante.



(b) Seção transversal

Fig. 2 – Barragem El Kafara



Fig. 3 – Barragem do Cedro. Visão noturna, após obras de recuperação.

3 – BARRAGENS DE ENROCAMENTO NO BRASIL

Neste item, serão comentadas algumas das principais barragens de enrocamento de diferentes tipos construídas no Brasil, ao longo do século 20.

3.1 – Boqueirão de Piranhas

A primeira barragem de enrocamento no Brasil seria construída somente nos anos 1930. Localmente conhecida por Açude do Boqueirão de Piranhas, os estudos iniciais foram feitos pela firma americana *Dwight Robinson*, em 1921 e 1922. Após alguns anos de atraso, a obra seria iniciada em 1932 no Alto Rio Piranhas, região ocidental do Estado da Paraíba, sob a chefia de Moacyr Monteiro Ávidos, engenheiro da Inspetoria de Obras Contra as Secas (IFOCS). Infelizmente, ele que viria a falecer poucas semanas depois, vitimado por uma grave epidemia de tifo no canteiro de obras.

Ao ser inaugurado em 1936, o Açude Piranhas seria oficialmente nomeado como Barragem Eng. Ávidos, em homenagem ao referido engenheiro. A barragem, com 360 m de extensão e 44 m de altura, destaca-se por exibir uma seção zonada (Figura 4a), com uma cortina central de concreto, apoiada em gnaisses, para marcar a separação física entre os espaldares de argila compactada (a montante) e de enrocamento (a jusante).

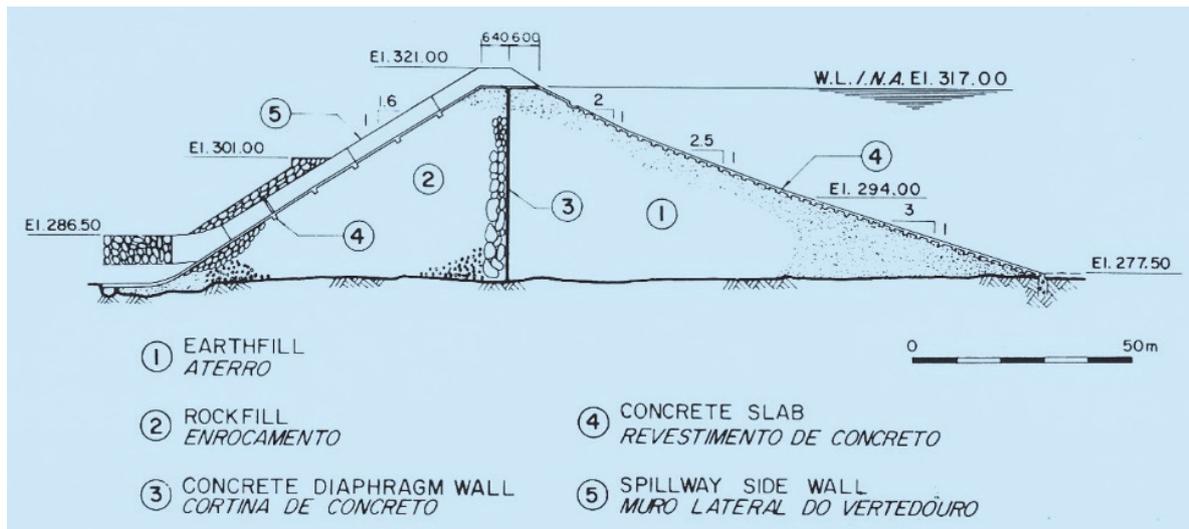
O projeto era norteado pelo conceito de minimizar a entrada de água na aba montante e, a partir do eixo, facilitar a saída controlada da água na aba jusante. Nota-se ainda o uso de placas de concreto para revestir as faces de montante (Figura 4b) e de jusante (Figura 4c), no local onde foi instalado o vertedouro de soleira livre (Figura 4d), ou sangradouro, como se diz no Nordeste do Brasil. Piranhas foi a única barragem deste tipo no mundo a durar mais de 30 anos (DNOCS, 1982).

Em 1972, a barragem seria reformada pelo DNOCS (Departamento Nacional de Obras Contra as Secas), devido a recalques e abertura de trincas no concreto do vertedouro causados por uma cheia no rio Piranhas anos antes. Um novo vertedouro foi construído na ombreira direita, com o apoio técnico do USBR (*Bureau of Reclamation*), do governo americano. Do ponto de vista histórico, Boqueirão de Piranhas destaca-se também por ter sido a primeira barragem brasileira a utilizar rolos pé-de-carneiro (Figura 4e), surgido nos EUA, em 1904, para promover uma compactação uniforme do solo argiloso. Nos anos 2010, o Açude Eng. Ávidos seria incluído no extremo do Eixo Norte da obra da transposição do Rio São Francisco, que deve solucionar o problema crônico das estiagens frequentes no Sertão Nordestino (Ferreira e Sayão, 2020).

Na década de 1940, a evolução das barragens no Brasil seria paralisada, devido à 2ª Guerra Mundial. Ainda assim, o juiz cearense José Linhares, no breve período em que exerceu a Presidência, após a deposição de Getúlio Vargas em 1945, transformaria a IFOCS (Inspetoria Federal de Obras Contra as Secas) no DNOCS (Departamento Nacional de Obras Contra as Secas), com recursos escassos e para obras de açudes (CBDB, 2011).

3.2 – Furnas

No final dos anos 1950, o Brasil viria a conhecer um processo intenso de desenvolvimento, com o Plano de Metas, proposto pelo Presidente Juscelino Kubitschek em 1956. O plano prometia ao país um progresso acelerado, sob o lema “Cinquenta anos em cinco”, com ênfase nas áreas de indústria, transportes e energia. A ameaça de um colapso energético, porém, ainda rondava o país que, em 1960, dispunha de apenas 3.700 MW de capacidade total instalada em hidrelétricas (CBDB, 2011). Em pouco tempo, o Brasil estaria ocupado por canteiros de obras importantes, como a construção de Brasília, no Planalto Central, e de grandes barragens em usinas hidrelétricas na Região Sudeste, com destaque para Furnas, que, pelas dimensões até então inéditas, seria considerada o marco inicial da maturidade da engenharia brasileira de barragens.



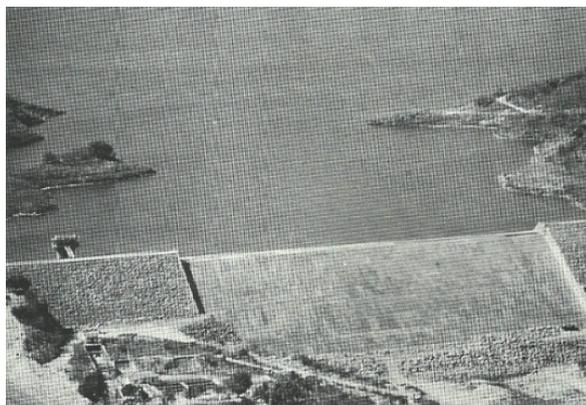
(a) Seção transversal



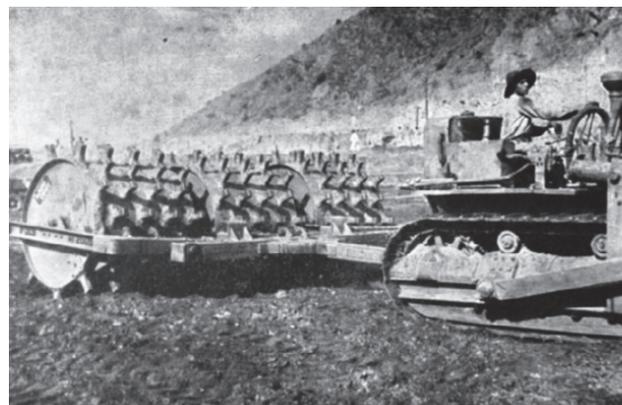
(b) Placas de concreto na face montante



(c) Placas de concreto no sangradouro



(d) Revestimento de concreto na face jusante (vertedouro)



(e) Rolos pé-de-carneiro, compactação do maciço argiloso

Fig. 4 – Barragem Eng. Ávidos (Ex - Açude Piranhas).

Pela primeira vez no Brasil, uma barragem de terra teria altura superior a 100 m e um vertedouro com capacidade para 13.000 m³/s. A usina de Furnas, com potência de 1.200 MW seria uma obra ousada, um grande desafio técnico para a época. Ainda em 1958, eram iniciadas as obras de desvio do Rio Grande com dois túneis na ombreira esquerda (Figura 5). As dificuldades enfrentadas na obra dos túneis de desvio são detalhadas por Miguez (2009). Dois anos depois, começava a construção

da barragem de enrocamento com núcleo de argila e transições arenosas, cuja seção foi mostrada anteriormente na Figura 1. O núcleo alargado na base visava ampliar o contato impermeável com a rocha de fundação. O grande volume de escavações obrigatórias em rocha sã (quartzos e xistos) viabilizou a obra de enrocamento com 127 m de altura.



Fig. 5 – Barragem de Furnas. Construção do túnel de desvio.

O presidente Kubitschek inaugurou Brasília em abril de 1960, e concluiu seu mandato em janeiro de 1961, com a economia em expansão e muitas obras em andamento. A década de 1960 foi caracterizada pela nacionalização das técnicas de projeto e construção de grandes obras de enrocamento no Brasil. Nos anos 1950, firmas internacionais fizeram os projetos de grandes barragens, como Furnas, Foz do Areia e Itaipu.

A engenharia brasileira capacitou-se e passaria a planejar os aproveitamentos hidroelétricos nas regiões Sul e Sudeste. Os grandes projetos seriam elaborados por firmas nacionais, tais como Geotécnica, Engevix, Hidroservice, Promon e Themag, nos rios Grande, Iguaçu, Tietê, e outros, que seriam transformados em “escadas” de represas sucessivas. Neste contexto, a CESP (Centrais Elétricas de São Paulo), criada em 1966, passaria a construir grandes barragens, como Chavantes e Ilha Solteira. Em novembro de 1964, com os túneis de desvio fechados e a barragem concluída, iniciava-se o enchimento de um dos maiores reservatórios do Brasil, com área de 1.440km², que envolveria milhares de propriedades em 34 municípios de Minas Gerais, e exigiria intensas negociações para viabilizar a obra.

Apesar dos problemas técnicos e jurídicos, os fatores relevantes para a definição do local da usina foram a proximidade geográfica das maiores cidades do país (São Paulo, Rio de Janeiro e Belo Horizonte), a geologia favorável, com um cânion longo e profundo, a abundância de chuvas, e a disponibilidade de materiais de construção variados na região. A construção da UHE Furnas exigiria uma concentração incomum de equipamentos de porte, com 200 caminhões, 44 tratores e 17 escavadeiras. A usina seria inaugurada em 1965, pelo Presidente Castelo Branco, com apenas seis turbinas a gerar 900 MW na fase na fase inicial de operação (Figura 6).



Fig. 6 – Barragem de Furnas. Fase inicial de geração com seis unidades.

Na década de 1970, mais duas máquinas completariam o sistema gerador, com 1.216 MW de capacidade total instalada. Oito dutos de adução em aço, com 6,5 m de diâmetro, fornecem água para as turbinas. Além de produzir energia, a represa de Furnas permite regularizar a vazão dos rios Grande e Paraná e, assim, estabilizar a energia gerada nas usinas a jusante. Com Furnas, o Brasil entrou para o rol das grandes potências em Engenharia de Barragens.

3.3 – Poço da Cruz

Antes de Furnas, nas décadas de 1930 a 1950, a Barragem de Poço da Cruz foi construída no Rio Moxotó, Sertão de Pernambuco, um projeto do antigo IFOCS (atual DNOCS), para irrigação, abastecimento e piscicultura. Uma pequena central hidrelétrica com 2 turbinas Francis seria

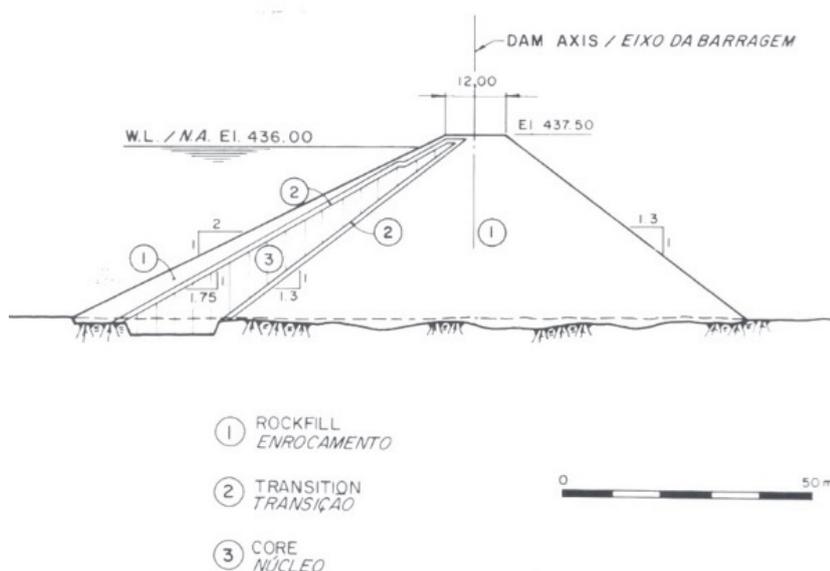


Fig. 7 – Barragem de Poço da Cruz. Seção transversal.

instalada e desativada pouco tempo depois. A barragem, com comprimento de 162 m e altura de 43 m e seção zonada de enrocamento, tem características singulares com núcleo delgado, inclinado para montante (Figura 7).

A obra foi iniciada em 1937 e concluída em 1957, sendo inaugurada pelo Presidente Juscelino Kubitschek. A barragem seria depois renomeada como Açude Público Eng. Francisco Saboia, em homenagem ao ex-Diretor Geral do DNOCS. Em 2014, a barragem seria submetida a obras de alteamento e recuperação, para que o reservatório passasse a integrar o Eixo Leste da transposição do Rio São Francisco (Ferreira e Sayão, 2020).

3.4 – Foz do Areia

Os anos 1980 começaram com muitas obras importantes de Engenharia na Região Sudeste, a maioria iniciada na década anterior, com destaque para Itaipu Binacional (Sória, 2012) e uma série de usinas hidrelétricas, com grandes barragens no Rio Iguaçu, no Paraná. Do ponto de vista histórico, deve-se citar a Usina de Foz do Areia, com capacidade instalada de 2.511 MW, cujo contrato para os estudos de engenharia foi firmado pela COPEL (Companhia Paranaense de Energia Elétrica), com o consórcio MKE-KEIC (*Milder Kaiser Engenharia e Kaiser Engineers International Corporation*) no final de 1973.

Em agosto de 1974, estava definido o local para implantação da usina, no município de Pinhão, a 240 km de Curitiba e 5 km após a foz do Rio Areia. As obras civis foram iniciadas em outubro de 1976 pela CBPO, empresa do Grupo Odebrecht. Segundo Rosi (1983), na época da construção, Foz do Areia era a maior barragem do mundo, em enrocamento com face de concreto, devido à altura (160 m), extensão de crista (828 m), e volume total (14.000.000 m³). Além da barragem, o projeto incluía dois túneis de desvio, seis condutos forçados escavados em rocha, uma casa de força do tipo semi-abrigada, na ombreira direita, e um vertedouro de superfície, em concreto armado controlado por comportas, na ombreira esquerda.

As características geológicas e topográficas do local, típicas da Região Sul do Brasil, foram decisivas para o detalhamento do Projeto Foz do Areia. O cronograma e o custo da obra foram os fatores determinantes na definição do projeto. Com o alto teor de umidade natural do solo argiloso local e as dificuldades de compactação desse material em condições de chuvas frequentes, a barragem de enrocamento com face de concreto (BEFC) foi uma opção mais fácil e econômica do que a alternativa usual de barragem de enrocamento com núcleo argiloso (Mello, 1975).

Foz do Areia seria então a primeira barragem brasileira do tipo BEFC e o projeto hidroelétrico mais importante do Rio Iguaçu, por ser o de maior geração e o posicionado mais a montante do rio, responsável pelo controle da vazão para as demais usinas previstas a jusante. Durante o projeto e a obra, inéditos no Brasil, a COPEL contou com o apoio de um Conselho de Consultores, com os renomados engenheiros *Barry Cooke*, *Victor de Mello* e *Nelson Sousa Pinto*, todos experientes em projetos hidrelétricos. Uma ensecadeira com altura de 45 m permitiu o desvio do Rio Iguaçu através de dois túneis não revestidos em basalto são, com diâmetros de 12 m e comprimento de 600 m, projetados para vazões de até 3.800 m³/s. A Figura 8 ilustra a ensecadeira de montante em execução, notando-se o emboque dos túneis de desvio do rio. A Figura 9 mostra a obra, com o rio desviado por túneis na margem direita e a laje de concreto em execução. Deve-se registrar o sério incidente que ocorreu na escavação do emboque dos túneis de desvio, com o desabamento de blocos do maciço de basalto colunar com fraturas subverticais (Figura 10), cujos detalhes estão reportados em CBDB (2009).

A seção da barragem é dividida em zonas distintas, como mostra a Figura 11. A montante, seriam usados blocos de basalto são, com um teor máximo de 25% de brecha basáltica, compactados em camadas de 0,80 m. A jusante, seriam camadas compactadas de 1,60 m de basalto, intercaladas com brecha. A compactação do enrocamento foi efetuada com rolo liso vibratório de 10 toneladas, e jateamento de água, com um volume igual a 25% do volume do enrocamento. A molhagem promove a remoção das partículas finas e uma melhor eficiência na compactação com os rolos

vibratórios, o que reduz os assentamentos verticais, ou recalques, do maciço, durante a construção e a operação (Cruz, 1996).

A montante, foi especificada uma zona de transição (“*cushion zone*”) entre a face de concreto e o enrocamento, com material fino, processado (triturado) para partículas de diâmetro máximo de 15 cm. Este material era colocado em camadas de 0,40 m, e compactado com seis passagens do rolo liso vibratório de 10 t, movido por um guindaste, em direção ascendente (Figura 12a).



Fig. 8 – UHE Foz do Areia. Ensecadeira em construção, com os túneis desvio do rio na margem direita.



Fig. 9 – UHE Foz do Areia. Face de concreto em construção, com o rio desviado na margem direita.



Fig. 10 – UHE Foz do Areia. Desmoronamento no emboque dos túneis de desvio (CBDB, 2009).

O talude de montante da zona de transição recebeu um revestimento de emulsão asfáltica, com recobrimento de areia, para evitar erosão superficial e facilitar a compactação. Este processo construtivo foi adotado em muitas barragens de enrocamento no Brasil e no mundo, até um novo método ser desenvolvido com concreto extrusado no paramento de montante e depois aperfeiçoado na obra da UHE Itá, no Rio Uruguai, na divisa de Santa Catarina e Rio Grande do Sul. O Método de Itá foi descrito por Resende (1999).

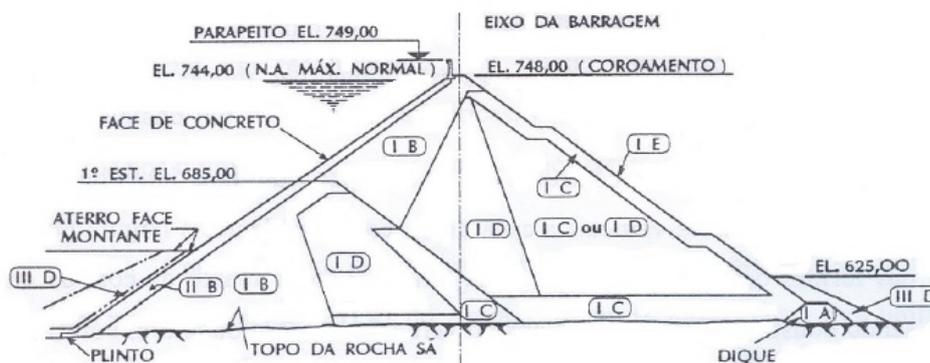


TABELA DE MATERIAIS				
MATERIAL	CLASSIFICAÇÃO	ZONA	METODO DE COLOCAÇÃO	DADOS DE COMPACTAÇÃO
ENROCAMENTO	BASALTO MACIÇO (ATÉ 25 % DE BRECHA BASÁLTICA)	I A	LANÇADO	—
		I B	COMPACTADO EM CAMADAS DE 0,80 m	ROLO VIBRATÓRIO 4 PASSADAS 25 % DE ÁGUA (10 TON.)
		I C	COMPACTADO EM CAMADAS DE 1,60 m	ROLO VIBRATÓRIO 4 PASSADAS 25 % DE ÁGUA (10 TON.)
		I D	COMPACTADO EM CAMADAS DE 0,80 m	ROLO VIBRATÓRIO 4 PASSADAS 25 % DE ÁGUA (10 TON.)
		I E	ROCHA DA FACE COLOCADA	—
TRANSIÇÃO II	BRITA CORRIDA DE BASALTO MACIÇO	II B	GRADUADA MENOR QUE Ø 6" COMPACT. EM CAM. – 0,40 m	CAMADAS : ROLO VIBR. MIN. 4 PASSADAS FACE : ROLO VIBR. MIN. 6 PASSAD. ASCEN.
ATERRO III	MATERIAL IMPERMEÁVEL CAPA DE TERRA	III D	MENOR QUE 3/4" COMPACT. EM CAM. – 0,30 m	ROLO PNEUMÁTICO OU EQUIPAMENTO DE CONSTRUÇÃO

Fig. 11 – Barragem Foz do Areia. Seção transversal.

Em Foz do Areia, a laje de concreto na face montante tem espessura variável, de 0,80 m (na base), até 0,30 m, no topo. Por razões estéticas, a face de jusante foi executada com blocos arrumados de basalto maciço, posicionados cuidadosamente com a pá de um trator (Figura 12b). Uma avaliação

do comportamento da barragem durante a construção, com base na instrumentação de campo, foi reportada por Albuquerque Jr e Byrne (1993). Mais detalhes sobre o projeto e construção de Foz do Areia estão descritos por Pinto et al (1985a).

A primeira unidade geradora de Foz do Areia seria inaugurada em setembro de 1980. A Figura 13 mostra a usina em operação, a barragem com o reservatório cheio e o vertedouro fechado.



(a) Compactação da transição com rolo vibratório



(b) Posicionamento dos blocos na face jusante

Fig. 12 – Barragem Foz do Areia. Compactação da camada de transição com rolo vibratório.



Fig. 13 – UHE Foz do Areia em operação, com o vertedouro fechado.

A construção de Foz do Areia gerou controvérsia e oposição no Paraná, pois causaria a submersão em 1979 da Usina Salto Grande do Iguaçu, aproveitamento pioneiro no Rio Iguaçu com 15,2 MW, inaugurada em 1967. Foz do Areia seria depois renomeada oficialmente como UHE Gov. Bento Munhoz da Rocha Netto, em homenagem ao governador que fundou a COPEL em 1954.

3.5 – Segredo

O sucesso do Projeto Foz do Areia serviu de incentivo para a Copel avançar com os planos de implantação da usina de Segredo, um pouco a jusante, no mesmo rio Iguaçu, com potência de 1.260

MW. A usina está localizada no município de Mangueirinha, a 280 km de Curitiba. O projeto de Segredo considerou as condições pluviométricas, geológicas e topográficas da região, para otimizar o cronograma de execução e o enchimento do reservatório (Pinto et al, 1985b). O projeto ficaria célebre por ter sido o primeiro a apresentar em 1987 o Relatório de Impacto Ambiental (RIMA) para uma usina hidrelétrica no Brasil.

Segredo incluiu uma casa de força do tipo semi-abrigada, com quatro unidades geradoras de 315 MW e uma barragem de enrocamento com face de concreto (BEFC) com 145 m de altura e 700 m de comprimento, formando um reservatório de 81 km² e profundidade máxima de 112 m, controlado por um vertedouro com seis comportas do tipo segmento. A tomada d'água promove a adução da água aos quatro condutos forçados, na ombreira esquerda (Figura 14).

A execução da barragem foi viabilizada pela obra de dois túneis de desvio em basalto, com diâmetro de 13 m e comprimento de cerca de 700 m, também na margem esquerda. As obras de desvio do Rio Iguaçu (Figura 15a) ocorreram de setembro de 1987 a junho de 1988. Com o rio já desviado pelos túneis (Figura 15b), a construção da barragem avançou rapidamente. No corpo da barragem, o enrocamento era compactado em camadas de 0,80 m, com molhagem e 6 passagens de um rolo liso vibratório de 10 t. A Figura 15c mostra a concretagem da laje de montante, executada com forma deslizante, a ensecadeira de enrocamento, com 61 m de altura, e uma ponte metálica de serviço, já desativada, pois ficaria submersa com o enchimento do reservatório.

A exemplo de Foz do Areia, por razões estéticas, a face de jusante foi preparada com blocos arrumados por um trator (Figura 15d). As escavações para implantação do circuito hidráulico da usina, canal de adução, tomada d'água, condutos forçados, casa de força e canal de fuga, foram realizadas de setembro de 1988 a dezembro de 1989. Em 1992, a UHE de Segredo foi inaugurada e renomeada como Usina Hidrelétrica Gov. Ney Braga, em homenagem ao ex-prefeito de Curitiba e ex-governador do Paraná, nas décadas de 1960 e 1980. A Figura 16 mostra a UHE de Segredo em operação.

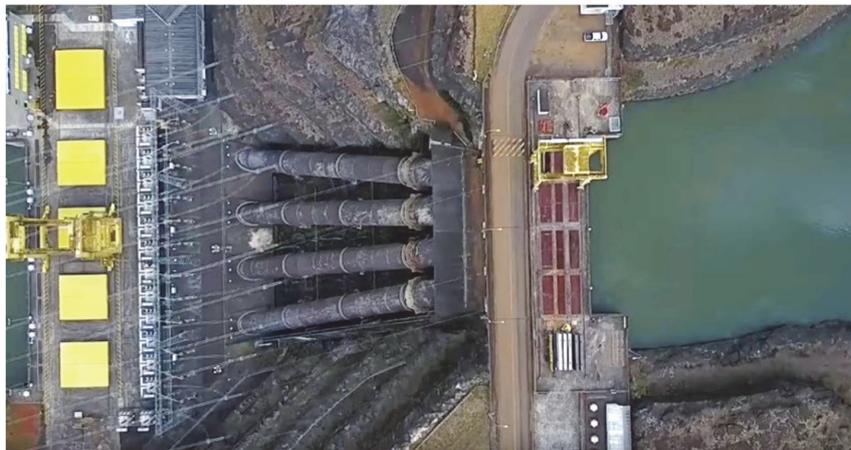


Fig. 14 – UHE de Segredo. Canal de adução, tomada d'água e condutos forçados.

Albuquerque Jr. (1993) apresenta análises tridimensionais do comportamento da barragem de Segredo, durante o enchimento do reservatório, com base em resultados da instrumentação de campo. Diferentes modelos de comportamento do enrocamento foram adotados nas análises, com destaque para o Modelo Hiperbólico (Duncan e Chang, 1970), considerado simples e eficiente. Os parâmetros de deformabilidade do enrocamento foram definidos com base na experiência anterior com Foz do Areia e em resultados de ensaios em materiais similares, publicados na literatura (Albuquerque Jr e Byrne, 1993).



(a) Emboque dos túneis no canal de desvio do rio



(b) Canal e túneis de desvio em operação, lado montante.



(c) Concretagem da laje na face montante



(d) Posicionamento dos blocos na face jusante

Fig. 15 – UHE de Segredo.



Fig. 16 – UHE de Segredo. Vista aérea da usina em operação, com reservatório cheio.

Os deslocamentos verticais mostram uma assimetria marcante na face de concreto, com dois pontos de recalques acentuados, um no leito do rio e o outro próximo à ombreira direita. Estes pontos correspondem às zonas mais afetadas pela geometria do vale, pois o leito do rio exibiu um perfil irregular, com cotas variáveis. Os recalques na crista mostraram-se simétricos, independentes da geometria do vale. Estas observações referem-se apenas à fase de enchimento, considerada a mais crítica na vida útil de uma barragem de enrocamento (Albuquerque Jr, 1993). Os deslocamentos verticais máximos, previsto e medido na seção instrumentada, foram respectivamente 30 cm e 28 cm. Durante o enchimento, os deslocamentos horizontais previstos na face de montante mostram uma configuração similar à dos deslocamentos verticais.

As análises da barragem de Segredo mostram a influência da geometria do vale nas deformações da face de montante. A previsão dos deslocamentos longitudinais é relevante para indicar a tendência de movimento dos painéis da laje de concreto. As tensões iniciais consideradas na análise do enchimento foram obtidas em uma análise prévia de simulação da sequência construtiva da barragem no campo (Saboya Jr et al, 1994). Depois de Foz do Areia e Segredo, dezenas de outras grandes barragens de enrocamento com face de concreto foram construídas no Brasil e no mundo, muitas delas já relatadas e analisadas por Cruz et al (2014).

3.6 – Emborcação

Nos anos 1980, outras importantes usinas foram construídas na Região Sudeste, com base no relatório da Canambra (1966). No final dos anos 1970, a Cemig contratou a empresa Leme Engenharia para o projeto da Usina Hidrelétrica de Emborcação, localizada no Rio Paranaíba, na divisa dos municípios de Araguari (Minas Gerais) e Catalão (Goiás), a 570 km de Belo Horizonte.

Em 1975 foi outorgada à Cemig a concessão para a construção, realizada pela Construtora Andrade Gutierrez de 1977 a 1981. O projeto da usina é composto por uma barragem de enrocamento com núcleo central de argila, com 158 m de altura (Figura 17) e 1.500 m de comprimento na crista, e um vertedouro de superfície na ombreira esquerda, com capacidade de

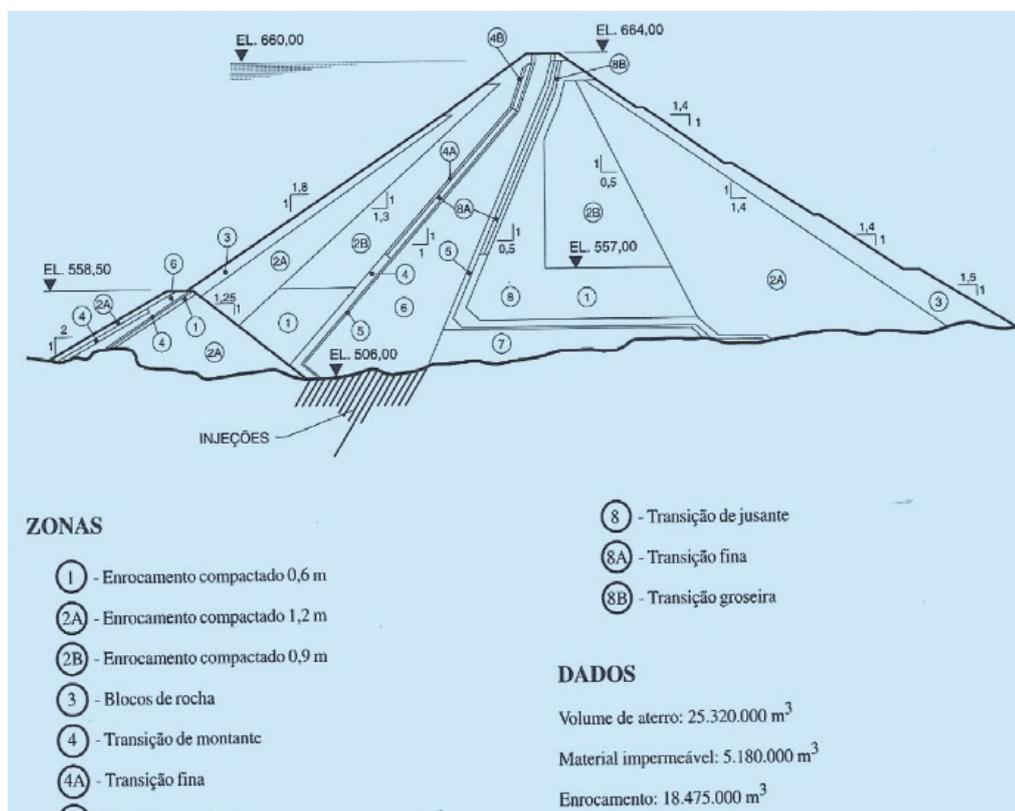
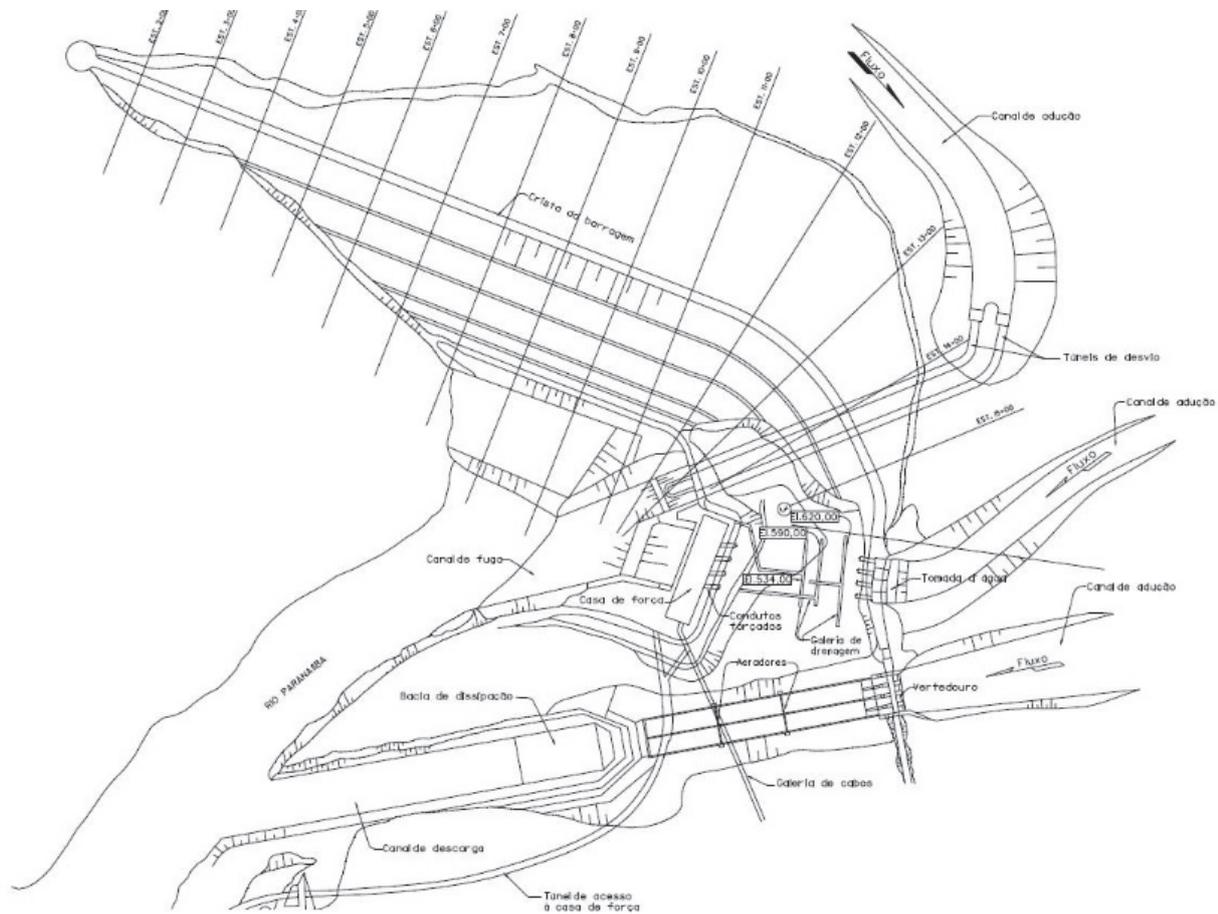


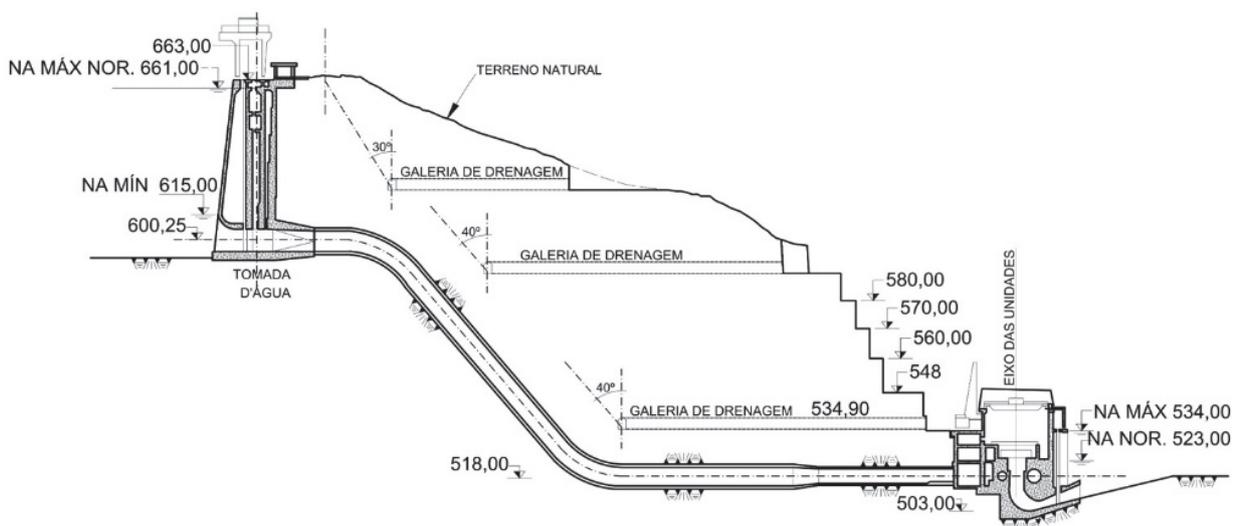
Fig. 17 – Emborcação. Seção transversal da barragem (Cruz, 1996).

descarga de 8.300 m³/s, controlado por comportas. O arranjo geral (layout) da usina é apresentado na Figura 18a.

Viotti (1989) ressalta que as principais sugestões de Mello (1977), em sua *Rankine Lecture*, foram acolhidas no projeto de Emborcação, então considerado “estado da arte” em engenharia de



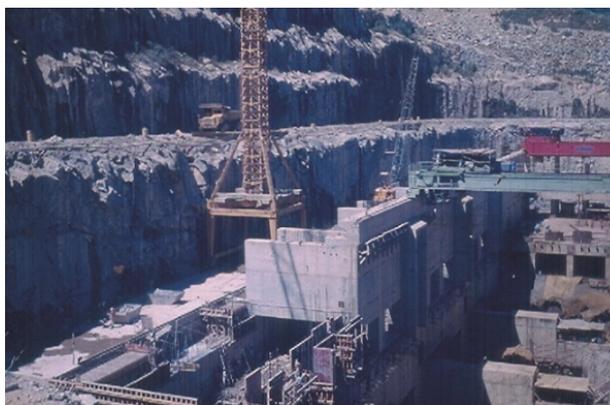
(a) Arranjo geral da usina



(b) Perfil dos condutos forçados no circuito hidráulico de geração

Fig. 18 – UHE de Emborcação.

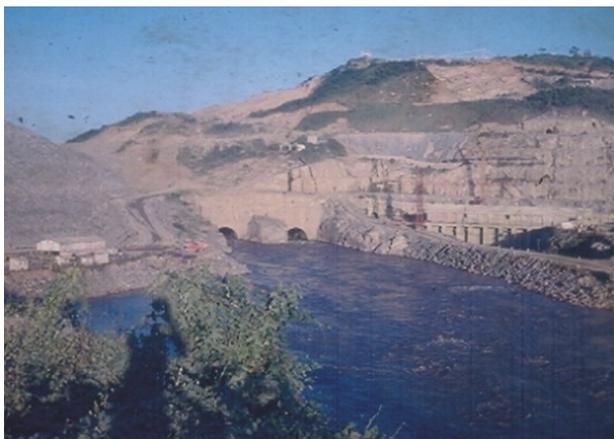
barragens de enrocamento. A descrição detalhada dos diversos materiais usados na barragem é apresentada por Divino (2010). Na margem esquerda, foi construído ainda um canal de tomada d'água, para adução às turbinas através de quatro condutos forçados escavados em rocha (Figura 18b), com diâmetros variando de 7,5 m (no emboque) a 6,0 m, na entrada da casa de força, embutida no maciço rochoso (Figura 19a). O empreendimento hidrelétrico inclui ainda dois diques de terra homogêneos, com alturas de 7 m e 17 m, para fechamento da área inundada pelo reservatório de regularização com capacidade de armazenamento de 18.000 hm³. As obras civis foram executadas pela Construtora Andrade Gutierrez, no período de 1977 a 1981.



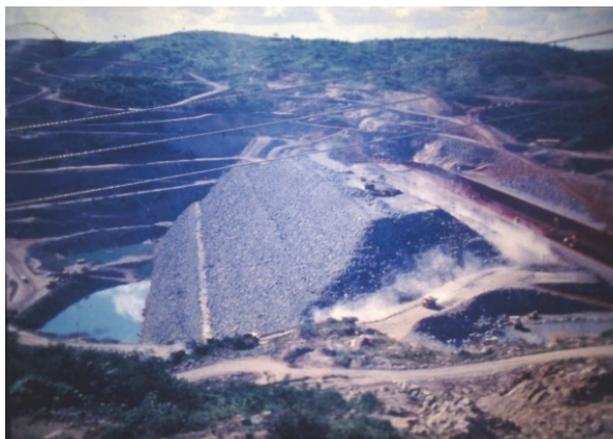
(a) Construção da casa de força, ombreira esquerda



(b) Canal e túneis de desvio, lado montante



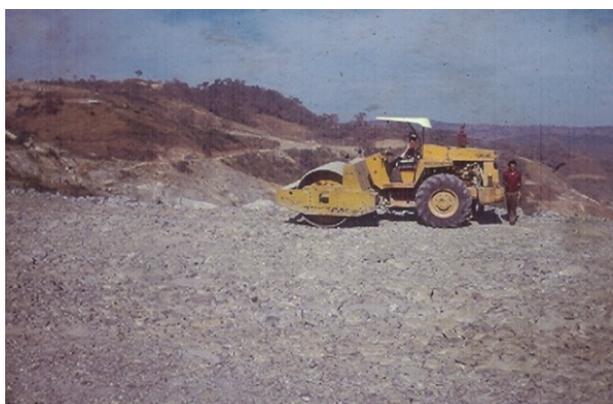
(c) Túneis e canal de desvio, lado jusante



(d) Construção da barragem, vista da aba jusante



(e) Lançamento do enrocamento na aba jusante



(f) Compactação do enrocamento com rolo liso vibratório, aba jusante

Fig. 19 – UHE de Emborcação.

Para permitir a construção da barragem principal, o rio Paranaíba foi desviado através de dois túneis e os respectivos canais de acesso (montante) e descarga (jusante), na margem esquerda, como mostram as Figuras 19b e 19c. Com o rio já desviado, as ensecadeiras foram concluídas, sendo a ensecadeira de montante depois incorporada à seção da barragem. A construção da barragem evoluiu com rapidez, em especial espaldar na aba de jusante, que prosseguiu sempre acima do restante do maciço (Figura 19d). As Figuras 19e e 19f ilustram as atividades de lançamento e compactação do enrocamento de jusante.

Apesar do grande volume de escavações obrigatórias em rocha na ombreira esquerda, foi necessária a exploração de uma pedreira de rocha gnáissica na margem direita (Figura 20), para completar o volume de enrocamento da Barragem de Emborcação. Em 1982, a usina iniciou sua operação com duas unidades geradoras de 298 MW de potência unitária (Figura 21). No ano seguinte, mais duas unidades geradoras seriam instaladas, completando 1.000 MW de potência instalada. Pouco depois, a usina foi renomeada para UHE Theodomiro Santiago, em homenagem ao professor e ex-secretário de Finanças de Minas Gerais.



Fig. 20 – UHE de Emborcação. Pedreira de granito-gnaisse.

Deve-se ressaltar que a barragem de Emborcação sofreu recalques acentuados, na construção e enchimento do reservatório, sendo registradas trincas longitudinais a montante e na crista da barragem (Figura 22). Uma discussão do comportamento da barragem foi reportada por Divino (2010), com base em análises numéricas com o módulo Sigma do programa GeoStudio 2007 e em dados da instrumentação, nos locais onde os instrumentos de deslocamentos verticais e horizontais da barragem não foram danificados na construção.

A análise numérica indicou as causas principais para os recalques excessivos: i) Colapso com a submersão do enrocamento de montante, que exibia alta deformabilidade após compactação sem molhagem; e ii) Deformações no núcleo argiloso e materiais de jusante. As trincas longitudinais na Barragem de Emborcação foram observadas após alguns ciclos de enchimento e rebaixamento do reservatório, com a usina em operação.

Divino (2010) reporta que, para evitar que as águas pluviais causassem lixiviação da transição arenosa, em contato com o enrocamento, e agravassem o problema na barragem, decidiu-se

preencher as trincas com areia e o monitoramento foi intensificado. Viotti (1997) comenta que as trincas longitudinais não ameaçaram a segurança da barragem e a experiência adquirida foi aplicada com sucesso no projeto da barragem de Nova Ponte, construída pela Cemig dez anos depois.



Fig. 21 – UHE de Emborcação. Usina em operação.



Fig. 22 – Emborcação. Trincas longitudinais na crista da barragem após o enchimento do reservatório.

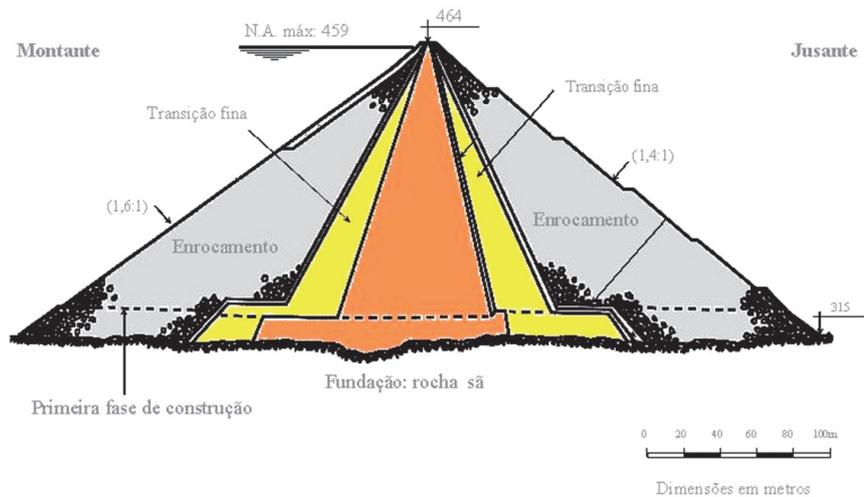
3.7 – Serra da Mesa

Nos anos 1980, muitas hidrelétricas foram construídas com grandes barragens de enrocamento, em todas as regiões do Brasil. Uma usina com grande importância no panorama energético nacional é Serra da Mesa, localizada em Minaçu, no Alto Rio Tocantins em Goiás, a 230 km em linha reta de Brasília. Com a operação das suas três unidades geradoras, Serra da Mesa passou a ter potência nominal instalada de 1.275 MW. Para o projeto, foi contratada a IESA, Internacional de Engenharia

S.A. A barragem tem seção de enrocamento com núcleo central argiloso (Figura 23a), com 154 m de altura máxima e 1.500 m de comprimento de crista. O reservatório de Serra da Mesa seria o maior do Brasil (Figura 23b), com um volume de 54 bilhões de m³, em uma área de 1.784 km². O projeto inclui ainda um vertedouro com capacidade de descarga de 15.000 m³/s em cinco comportas de 15 m x 20 m cada.

O projeto da UHE Serra da Mesa teve características marcantes. A principal é a casa de força subterrânea (Figura 24a), embutida na ombreira esquerda, em um batólito granito-gnáissico são, com granulação média a fina e coloração cinza clara, com excelentes características geomecânicas (RQD = 100%, segundo Sayão e Castro, 1998).

A formação rochosa é circundada por um paragnaisse bandado e anéis de quartzito micáceo fraturado. Os espaldares de enrocamento da barragem foram construídos com o material rochoso proveniente das escavações obrigatórias e de pedreiras de granito nas proximidades da obra.



(a) Seção transversal da barragem



(b) Vista aérea do reservatório com a usina em operação

Fig. 23 – Hidrelétrica Serra da Mesa.

A compactação do enrocamento foi feita em camadas de 1,0 m de espessura por seis passagens de rolo liso vibratório, com peso estático de 81 kN no tambor, sem adição de água. O material arenoso das zonas de transição a montante e jusante do núcleo foi obtido pelo processamento de uma pedra de quartzito amarelado (Figura 24b).

Em junho de 1988, a Construtora Camargo Correa iniciou as obras de desvio do rio, no granito da ombreira direita, com dois túneis de 18 m de altura, 680 m de comprimento e 12 m de largura. O sistema de desvio incluía ainda os canais de acesso e restituição, vistos na Figura 25. Dezoito meses depois, em dezembro de 1989, a obra seria paralisada após a primeira etapa de construção da barragem, sendo retomada somente em 1994, após cinco períodos de cheia do Rio Tocantins. O desvio foi iniciado em outubro de 1996, com o fechamento das comportas dos túneis de desvio. O desvio do Rio Tocantins foi executado na ombreira direita através de dois túneis de 680 m de comprimento, escavados no granito, com seção em arco-retângulo, com 12 m de largura e 18 m de altura. O sistema de desvio incluiu ainda os canais de acesso e restituição, vistos na Figura 25.

Devido a restrições financeiras, pouco antes do desvio, Furnas decidiu adiar por um ano a operação da usina, sendo necessários um novo planejamento e a revisão do cronograma da obra, em preparação para enfrentar os períodos de cheia do Rio Tocantins durante paralisação dos serviços. Com o rio desviado, duas ensecadeiras de CCR (concreto compactado a rolo) seriam construídas no recinto ensecado, com previsão de galgamento no período chuvoso. A adoção de ensecadeiras galgáveis possibilitou a otimização dos volumes de aterro, e a prorrogação dos investimentos previstos para o primeiro ano de construção.

O controle do Rio Tocantins no período construtivo foi uma característica inovadora do projeto de Serra da Mesa, por prever um primeiro estágio de construção, no qual a barragem (já com 16 m de altura) seria protegida contra o galgamento por uma camada de enrocamento com 1,5 m de espessura, sobre uma camada selante de argila supercompactada. Durante a paralisação, o primeiro estágio da barragem principal foi galgado nos cinco períodos chuvosos em anos consecutivos, sob lâminas d'água de até 14 m, com uma vazão de 6.700 m³/s (Figura 26). Os detalhes da paralisação foram estudados em modelo reduzido no laboratório de Furnas no Rio de Janeiro (Carvalho, 2021). Os detalhes do projeto estão reportados por Martins et al (1991). Na retomada dos serviços (segundo estágio), a camada de proteção mostrou-se estável, não havendo danos na barragem galgada (Caproni et al, 1994).

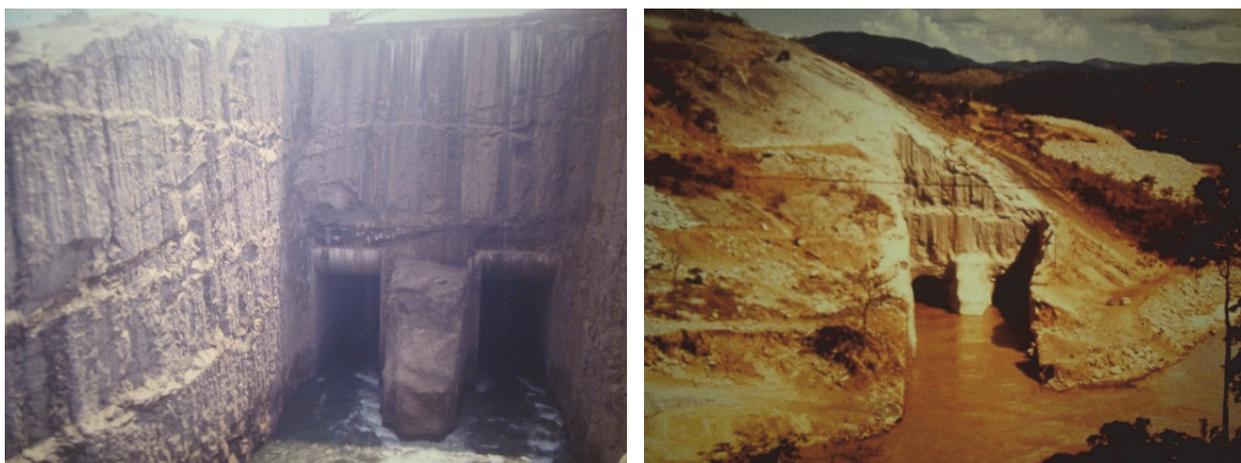


(a) escavação da casa de força



(b) Pedreira de quartzito para material das transições

Fig. 24 – Serra da Mesa – Maciço de granito-gnáissico de boa qualidade.



(a) Emboque

(b) Desemboque

Fig. 25 – UHE Serra da Mesa. Túneis de desvio do Rio Tocantins na ombreira direita.



Fig. 26 – Serra da Mesa. Galgamento da barragem (1ª fase) durante uma cheia do Rio Tocantins.

Ao final das obras, houve problemas judiciais com as demandas ambientais de uma pequena comunidade indígena a jusante da barragem, que poderia ter problemas com o fechamento do fluxo no Rio Tocantins para o enchimento do lago de Serra da Mesa. Finalmente, em outubro de 1996, as comportas dos túneis de desvio seriam fechadas para dar início ao maior reservatório do Brasil em volume de água.

Uma campanha detalhada de ensaios de caracterização geomecânica da rocha granítica e do maciço de enrocamento de Serra da Mesa foi realizada nos laboratórios de Furnas (Goiânia) e Cedex (Espanha) e está reportada por Maia et al (2004). Os ensaios físicos indicaram que o granito de Serra da Mesa é uma rocha densa e o enrocamento tem ângulo de talude natural em repouso de 37° e partículas semi-arredondadas. Os ensaios de durabilidade (*slake* e degradação MD (Micro Deval) indicaram uma resistência elevada ao desgaste das partículas.

Nos ensaios mecânicos, os resultados de carga pontual (PLT) em blocos de rocha com diâmetro equivalente de 50mm indicaram resistência $q_u = 182$ MPa, inferior ao valor médio de 200 MPa obtido em compressão uniaxial em testemunhos da rocha. Nestes ensaios obteve-se ainda módulo de Young $E = 63$ GPa. Os ensaios de compressão confinada com 1,0m de diâmetro no enrocamento denso mostraram deformabilidade baixa (Figura 27), com módulo oedométrico M da ordem de 150 MPa, e quebra dos contatos entre as partículas durante o carregamento até 2 MPa (Maia et al, 2004).

Ensaio triaxiais em corpos de prova do enrocamento denso, com 23 cm de diâmetro e 46 cm de altura indicaram envoltória de resistência curva (Figura 28), com ângulos de atrito entre 36° e

50°, em função do nível de tensão confinante, independentemente da granulometria do material. Os enrocamentos bem graduados, com presença de finos, mostraram maior resistência ao cisalhamento. A Figura 29 apresenta os resultados de módulos de Young e coeficientes de Poisson tangentes iniciais, E_i e ν_i , e os módulos secantes, E_{50} e ν_{50} (obtidos a 50% da tensão desviadora na ruptura). Observa-se que os parâmetros de deformabilidade variam com o nível de tensão confinante σ'_3 , independentemente do nível de deformação.

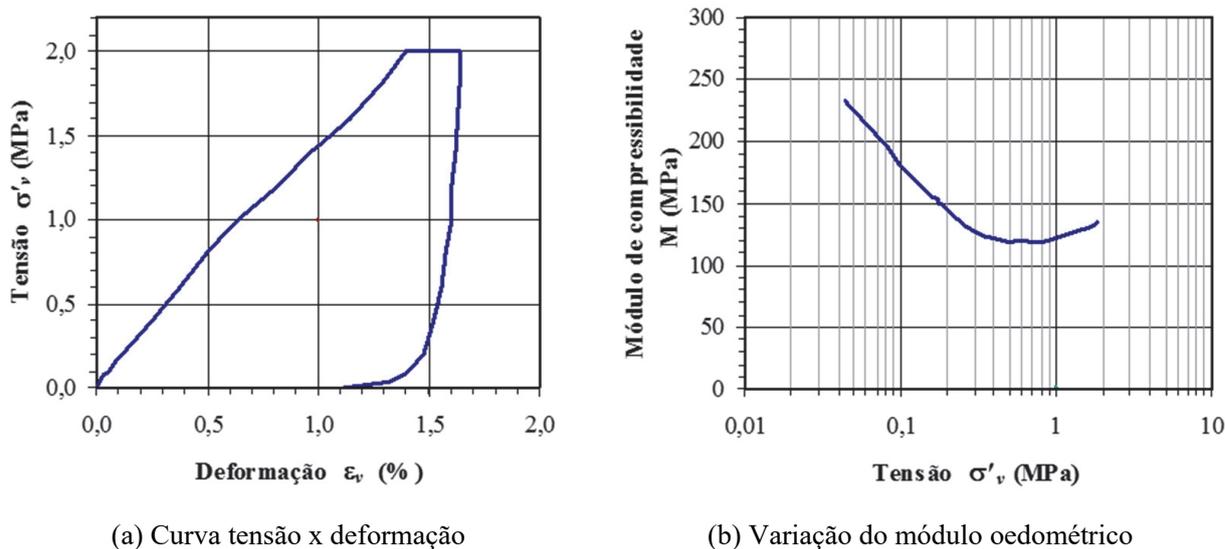
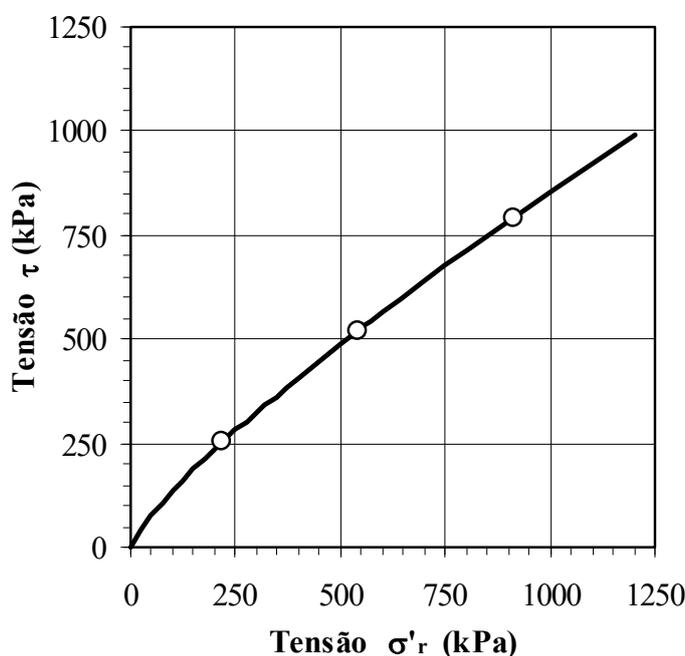


Fig. 27 – Serra da Mesa. Ensaio de compressão confinada no enrocamento denso (Maia et al, 2004).



(a) Corpo de prova com 2 membranas



(b) Envoltória de resistência

Fig. 28 – Serra da Mesa. Ensaios triaxiais no enrocamento denso (Maia et al, 2004).

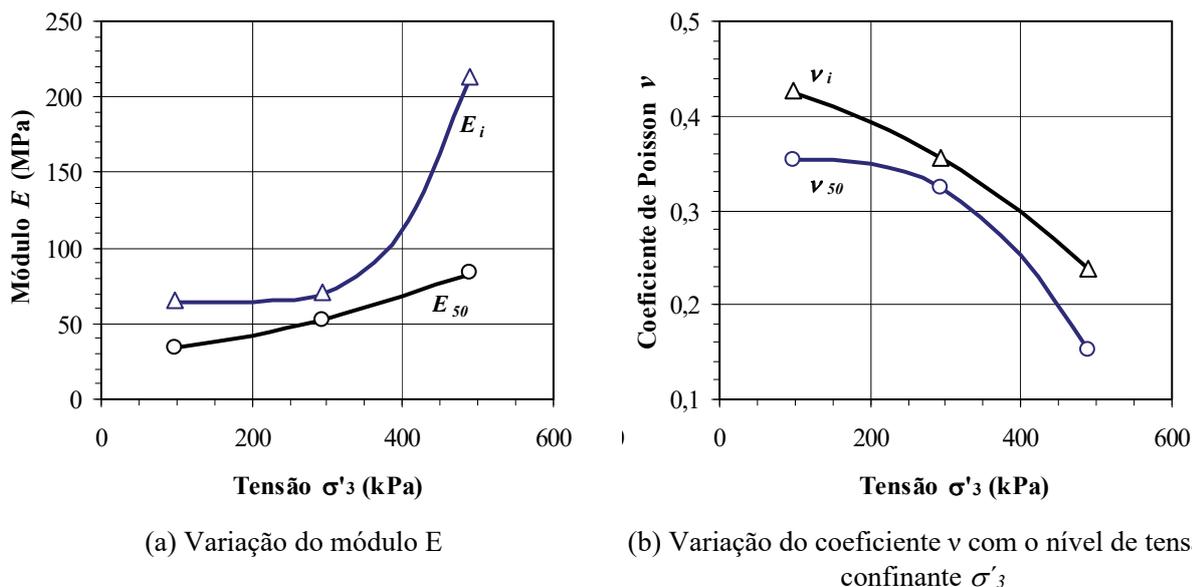


Fig. 29 – Serra da Mesa. Ensaios triaxiais no enrocamento denso para determinação da deformabilidade (Maia et al, 2004).

4 – AVANÇOS RECENTES

Dois artigos publicados por Cooke e Sherard (1987a, 1987b) resumem o estado do conhecimento sobre barragens de enrocamento com face de concreto (BEFC) e continuam a ser um guia valioso e atual sobre a prática e as tendências recentes, junto com os principais detalhes de projeto e construção dessas barragens, incluindo especificações, espessura da face, qualidade do concreto e da rocha, e tratamento da fundação (Cruz et al, 2009).

A discussão de alguns itens daqueles dois artigos foi o tema da Conferência Pacheco Silva apresentada por Cruz (2008), com base em novos dados do comportamento das obras de BEFC após 1987. Um relato completo dos principais avanços sobre barragens de enrocamento está fora do escopo do presente artigo, e somente um tema recente de interesse prático será abordado a seguir.

4.1 – Núcleo Asfalto

Dentre os tipos usuais de barragens de enrocamento, o mais comum e mais antigo é o que utiliza o núcleo impermeável de solo argiloso. No Brasil, a técnica do núcleo de concreto asfáltico impermeável é o desenvolvimento mais recente, com claras vantagens ambientais e financeiras. As primeiras barragens com núcleo asfáltico foram construídas nas usinas hidroelétricas de Foz de Chapecó (2010), no Rio Uruguai, divisa entre os estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul, e de Jirau (2016), no Rio Madeira, na Amazônia. Ambos os locais apresentam condições climáticas desfavoráveis para obras com solo argiloso, de difícil compactação em épocas de chuvas frequentes. Detalhes sobre as características usuais em núcleos de concreto asfáltico estão reportadas em Cruz e Sayão (2014).

4.1.1 – Vantagens

Obras em enrocamento com núcleo asfáltico apresentam vantagens marcantes em relação ao enrocamento com face de concreto:

- a) Maior segurança no atendimento do cronograma definido em projeto, sem atrasos impostos por variações pluviométricas;
- b) Flexibilidade construtiva de uso de pistas provisórias no talude montante para acesso de veículos e equipamentos à praça de compactação, na crista da barragem. No caso de obras com face de concreto, os acessos ficam restritos ao talude de jusante;
- c) Possibilidade de iniciar o enchimento do reservatório antes da conclusão da barragem, o que é importante no caso de grandes reservatórios, que podem requerer muitos meses para o primeiro enchimento e início da operação da usina;
- d) O núcleo asfáltico é um elemento vedante flexível, em posição com proteção permanente contra deterioração, trincas ou desgaste devido às condições externas ao maciço da barragem.

4.1.2 – Desvantagens

Obras em enrocamento com núcleo asfáltico apresentam também alguns inconvenientes em relação a outros tipos de barragens de enrocamento:

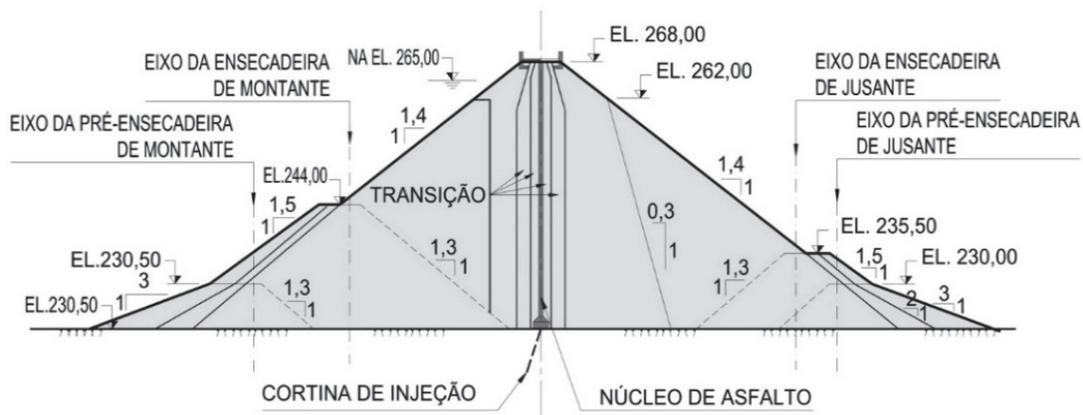
- a) Necessidade de uma usina central de asfalto. Este requisito não ocorre em obras de grande porte, onde o projeto inclui a construção de estradas pavimentadas, dentro ou fora do canteiro da obra;
- b) No caso de região com rocha fraturada, o tratamento da fundação com injeção de calda de cimento precisa ser executado antes do da obra do núcleo. O projeto deve prever uma galeria para permitir um eventual reforço da injeção com a barragem em operação;
- c) A reduzida espessura do núcleo asfáltico (tipicamente 0,5 m a 1,0 m) requer atenção especial no projeto e execução, para contornar o elevado gradiente hidráulico na base, que deve ser alargada no contato com a fundação;
- d) A compactação das camadas de concreto asfáltico exige atenção permanente quanto à temperatura de lançamento da mistura asfáltica, usualmente entre 170° C e 110° C.

Na Europa, a primeira obra construída com núcleo asfáltico foi a Barragem Vale do Gaio (1948), de 45 m de altura, em Portugal (Guimarães, 2011). Nesta barragem, o núcleo de mastique betuminoso foi compactado com placas vibratórias (Cruz e Sayão, 2014). Depois, nos anos 1960 e 1970, a Alemanha e a Noruega também construiriam grandes barragens com concreto asfáltico no núcleo ou na face, com o uso de máquinas pavimentadoras, que eram uma novidade, na época.

4.1.3 – Foz do Chapecó

Esta foi a primeira barragem do tipo BENA (enrocamento com núcleo asfáltico) no Brasil. Construída pela Construtora Camargo Corrêa de março de 2007 a outubro de 2010, um prazo considerado recorde para uma barragem com 48 m de altura e 548 m de comprimento (Figura 30).

O núcleo de concreto asfáltico tem apenas 55 cm de largura e funciona como uma cortina de vedação central, para impedir a passagem de água, com quatro materiais dispostos em sequência de montante para jusante: transição fina, transição grossa, enrocamento fino e enrocamento grosso, com blocos de diâmetro máximo variáveis entre 75 mm a 500mm. A Figura 31a ilustra o lançamento das transições e da massa de asfalto aquecida (temperatura entre 110°C e 170°C). Mais detalhes sobre a construção do núcleo asfáltico de Foz do Chapecó estão apresentados por Guimaraes (2011). A Figura 31b ilustra os trabalhos de compactação, logo após o lançamento dos materiais com o uso da máquina pavimentadora.



(a) Seção transversal da barragem



(b) Vista aérea da obra da barragem em abril de 2010

Fig. 30 – Foz do Chapecó.



(a) Lançamento do núcleo asfáltico e transições da barragem



(b) Máquina pavimentadora e rolos compactadores em ação no núcleo asfáltico e transições

Fig. 31 – Foz do Chapecó. Aspectos construtivos.

Sayão et al (2013) apresentam uma metodologia numérica para a previsão dos deslocamentos em barragens de enrocamento com núcleo de concreto asfáltico, com o programa de elementos finitos Plaxis 2D. O método de previsão foi validado por uma retroanálise do comportamento da Barragem Megget (Escócia), construída no final dos anos 1970, e depois aplicado para o caso de Foz do Chapecó. A simulação numérica procurou reproduzir a sequência construtiva no campo, e as alterações do nível do reservatório de Foz de Chapecó. Em 2010 a UHE Foz do Chapecó entrou em operação, com 855 MW de potência instalada (Figura 32).



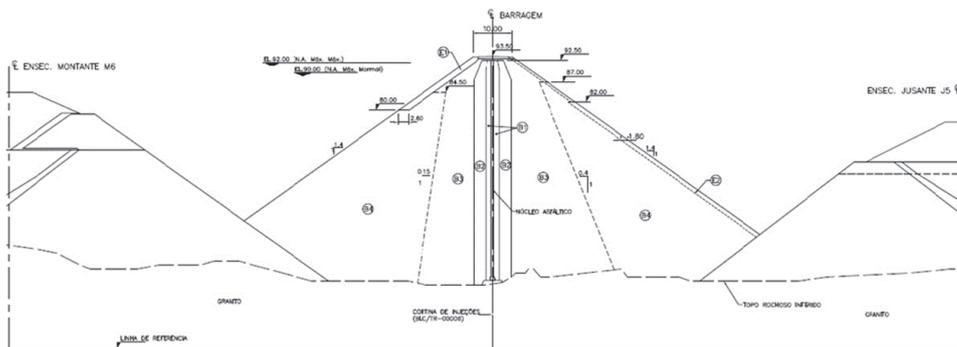
Fig. 32 – Foz do Chapecó. Vista aérea da usina em operação no Rio Uruguai.

4.1.4 – Jirau

Com o sucesso de Foz do Chapecó, Jirau seria a segunda barragem do tipo BENA (enrocamento com núcleo asfáltico), a ser construída no Brasil pela Construtora Camargo Corrêa, em parceria com a empreiteira norueguesa *Veidekke*. A licença de instalação da usina hidrelétrica, com capacidade de geração de 3.750 MW, foi outorgada em junho de 2009 ao consórcio "ESBR - Energia Sustentável do Brasil".

A barragem de Jirau tem 62 m de altura e 1,2 km de comprimento de crista e é formada por seções em concreto, terra e enrocamento. A seção principal, em enrocamento com núcleo asfáltico (Figura 33a), tem 60 m de altura e 1,1 km de comprimento e foi construída em cerca de 12 meses. Pode-se notar que partes das enscadeiras foram incorporadas aos pés das abas de montante e jusante da barragem principal.

A usina está instalada no Rio Madeira, afluente do Rio Amazonas, a 120 km de Porto Velho, capital do estado de Rondônia. A Figura 33b mostra a usina em operação. Como a região apresenta índices elevados de precipitação na estação chuvosa, a preferência por uma barragem com núcleo asfáltico foi a opção natural da projetista Leme Engenharia. A Figura 34 mostra a execução do núcleo e transições. O sistema gerador utiliza 50 turbinas horizontais do tipo Bulbo, que são eficientes na operação com pequenas alturas de queda, de até cerca de 6 m a 8 m de coluna d'água. Em 2011 houve uma paralisação da obra por seis meses, devido a demandas trabalhistas e o cronograma foi redefinido, mas o início da geração seria mantido em início de 2013.



(a) Seção transversal da barragem com núcleo asfáltico



(b) Vista aérea da usina em operação no Rio Madeira, em meados de 2013

Fig. 33 – Jirau.



Fig. 34 – Jirau. Máquina pavimentadora e rolos compactadores em atividade.

5 – PERSPECTIVAS

A China é hoje o país líder mundial em barragens com face de concreto (BEFC) e vive uma situação semelhante à do Brasil na década de 1970, com grandes obras de enrocamento. Para o futuro próximo (década 2020), não há ainda planos de grandes barragens no Brasil, mas várias obras com face de concreto estão previstas na América Latina (Argentina Chile, e Colômbia), Ásia (Indonésia e China), e Oceania (Austrália e Nova Zelândia). Pode-se também prever a conclusão de projetos em andamento na África (Etiópia e Lesoto). No Brasil, a EPE (Empresa de Pesquisa Energética) prevê a implantação de 10 novas usinas hidrelétricas, sendo três na Amazônia, uma na Região Centro Oeste, e seis no Sul, totalizando 1.914 MW (EPE, 2021). Por outro lado, em 2029, a matriz energética brasileira deverá contar com apenas 17% de energia hidroelétrica, uma redução expressiva em relação a 2019, quando as hidrelétricas correspondiam a 61% da capacidade instalada (PDE, 2019). Para o próximo decênio, é previsto o aumento de outras fontes de energia limpa.

6 – CONCLUSÕES

As barragens de enrocamento continuarão a ser frequentes no Brasil, devido às vantagens econômicas, com a rapidez e facilidade de construção, além da pouca influência das condições climáticas. Em especial, novas barragens com núcleo asfáltico (BENA) são esperadas, após o sucesso das duas primeiras (Foz do Chapecó e Jirau), desde que o equipamento distribuidor do concreto asfáltico esteja disponível.

7 – AGRADECIMENTOS

O presente trabalho só foi possível com o auxílio de vários especialistas em barragens. Os autores agradecem as diversas sugestões oferecidas pelos professores Anna Laura Nunes, Ana C. Sieira, Carlos H. Medeiros, F. Saboya, e Paulo C. Maia e pelos consultores Bayardo Materón, Fernando Resende, Flavio Miguez, Manoel Freitas, Manuel Martins, Nelson Caproni Jr, e Rogerio Menescal.

8 – REFERÊNCIAS

- Albuquerque Jr, F. S. (1993). *Análise de barragens de enrocamento com face de concreto durante o período de construção e enchimento*. Tese de doutorado, Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio. 261p.
- Albuquerque Jr, F. S.; Byrne P.M. (1993). *Parameters for stress and deformation analysis of rockfill dams*, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 30, Number 4, pp. 690-701.
- Caproni Jr., N.; Graça, N.G.; Martins Filho, G. (1994). *Retomada da Construção da Barragem de Serra da Mesa Após Cinco Períodos de Galgamento*, XXI Seminário Nacional de Grandes Barragens, CBDB, Rio de Janeiro, vol. 1, p. 65-74.
- Carvalho, E. (2021). Desvio do Rio Tocantins em Serra da Mesa. Comunicação pessoal, em abril de 2021.
- CBDB (2009). *Desvio grandes Rios Brasileiros*, coordenador: Erton Carvalho, Rio de Janeiro, 180p.
- CBDB (2011). *A História das Barragens no Brasil, Séculos XIX, XX e XXI: Cinquenta Anos do Comitê Brasileiro de Barragens*, coordenador: F. Miguez de Mello. Rio de Janeiro, 524p.
- Cooke, J.B. and Sherad, J (1987a). *Concrete Face Rockfill Dam: I. Assessment*. ASCE, Journal of Geotechnical Engineering, v. 113. N.10, pp.1096-1112.

- Cooke, J.B. and Sherard, J (1987b). *Concrete Face Rockfill Dam: II. Design*. ASCE, Journal of Geotechnical Engineering, v. 113. N.10, pp. 1113-1132.
- Cruz, P. T. (1996). *100 Barragens Brasileiras*, Editora Oficina de Textos, SP, Brasil, 647p.
- Cruz, P. T. (2008). *A Partial review of Barry Cooke and James Sherard 1987 papers on concrete face rockfill dams (CFRD)*. 8a Conf. Pacheco Silva, 14º Cobramseg, Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Eng. Geotécnica, ABMS, Búzios, RJ, 16p.
- Cruz, P. T.; Sayão, A. S. F. (2014). *Barragens de enrocamento com núcleo asfáltico*, Revista Fundações e Obras Geotécnicas, Editora Rudder, SP, N. 41, Fev 2014, pp. 70-74.
- Cruz, P. T.; Materón, B.; Freitas, M. (2009). *Barragens de Enrocamento com Face de Concreto*, Editora Oficina de Textos, SP, Brasil, 448p.
- DNOCS (1982). *Barragens no Nordeste*, coordenador: José Amaury Aragão, 160p.
- Divino, P. L. (2010). *Comportamento de Enrocamentos em Barragens. Estudo de Caso, Barragem de Emborcação*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Geotécnica, Escola de Minas, UFOP, 188p.
- Duncan, J. M.; Chang, C. Y. (1970). *Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils*, ASCE Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, 96 (SM5), pp. 1629-1653.
- EPE (2021). *Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2020 – Panorama Nacional*. Capacidade instalada de Geração Elétrica no Brasil (MW), portal da EPE. <https://www.epe.gov.br>.
- Ferreira, L. A.; Sayão, A. S. F.; Nunes, A.L.L.S. (2020). *Monitoramento do Túnel Milagres: Projeto de Integração do Rio São Francisco*. Revista Brasileira de Engenharia de Barragens, RBEB (CBDB), ano VI, No. 09, pp. 47-56.
- Jansen, R. B. (1988). *Advanced Dam Engineering for Design, Construction, and Rehabilitation*. Van Nostrand Reinhold, New York, 809p.
- Maia, P. C. A.; Sayão, A. S. F.; Nunes, A. L. L. S. (2004). *Caracterização Geotécnica do Enrocamento da Barragem de Serra da Mesa*, Brasil, 2º Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia, Aveiro, Portugal, 10p.
- Martins, M.A.; Barros, P.A.; Moura, F.I. (1991). *Aproveitamento Hidroelétrico de São Félix, Usina Serra da Mesa, Estágio Galgável da Barragem*, Aracaju-SE, XIX Seminário Nacional de Grandes Barragens, Anais.
- Mello, V. F. B. (1975). *Dispositivos de Impermeabilização de Barragens de Enrocamento e Apreciação Simultânea da Proteção dos Taludes*. Revista Geotecnia, SPG – Sociedade Portuguesa de Geotecnia, N. 14, pp 23-51.
- Mello, V. F. B. (1977). *Reflections on design decisions of practical significance to embankment dams*. 17th Rankine Lecture, Géotechnique, vol 27, pp. 279-355.
- Miguez, F. M. (2009). *Acidentes nos Túneis de Desvio na UHE Furnas*. Desvio de Grandes Rios Brasileiros, CBDB, pp. 67-87.
- Pinto, N. S.; Marques Filho, P. L.; Maurer, E. (1985a). *Foz do Areia Dam – Design, Construction and Behaviour*, ASCE Symposium on Concrete Face Rockfill Dams, Detroit, Michigan, USA. Edited by J. Barry Cooke and James L. Sherard, pp. 173 – 191.
- PDE (2019). *Plano Decenal de Expansão de Energia, elaborado anualmente pela EPE, sob as diretrizes da Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético*, Ministério de Minas e Energia do Brasil. <https://www.gov.br/mme/pt-br>.

- Pinto, N. S.; Marques Filho, P. L.; Maurer, E. (1985b). *Segredo Dam – Basic Design Aspects*, ASCE Symposium on Concrete Face Rockfill Dams, Detroit, Michigan, USA. Edited by J. Barry Cooke and James L. Sherard, pp. 587 – 593.
- Guimarães, R.C. (2011). *Barragens com núcleo de concreto asfáltico -análise do comportamento mecânico e hidráulico do núcleo*, Tese de Doutorado. UnB, 189p.
- Rosi, M. N. (1983). *Foz do Areia, Retroanálise pelo Método dos Elementos Finitos*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio. 229p.
- Saboya Jr, F.; Rocha Filho, P.; Toniatti, N. B. (1994). *Análise do Comportamento da Barragem de Segredo Durante a Construção e o Enchimento*. Revista Geotecnia, SPG – Sociedade Portuguesa de Geotecnia, N. 70, pp. 01-25.
- Sayão, A. S. F.; Castro, C.H. (1998). *Previsão do Comportamento da Barragem de Serra da Mesa Durante a Construção*. 11º Cobramseg, Cong. Brasileiro de Mecânica dos Solos e Eng. Geotécnica, Brasília, ABMS, vol. 1, p. 423-430.
- Sayão, A. S. F.; Nunes, Sieira, A. C. C. F.; Peña, A. H. V.; Nunes, A.L.L.S. (2013). *Barragens de Enrocamento Com Núcleo de Concreto Asfáltico*. Revista Brasileira de Engenharia de Barragens (CBDB), ano I, N. 01.
- Sória, M. Z. (2012). *Usina de Itaipu, Integração Energética entre Brasil e Paraguai – Uma Síntese Histórica da Itaipu Binacional*. Editora UFPR, 251p.
- STRUCTURAE (2021). *International Database and Gallery of Structures*, visualizado em Jan 2021: <https://structurae.net/structures/sadd-el-kafara-dam>.
- Viotti, C.B. (1989). *Emborcação Dam: A Rankine Lecture Design – A Successful Performance*. Victor de Mello Volume, A tribute to Prof. V. F. B. de Mello, Editora Edgar Blucher Ltd, São Paulo, pp. 517-527.
- Viotti, C.B. (1997). *Longitudinal cracking at Emborcação dam*. 19th International Congresson Large Dams, ICOLD, Florence, Italy, v.04. pp. 735-747.