

DE SETE QUEDAS A ITAIPU

HISTORIOGRAFIA DE UM PROJETO, COM
ÊNFASE NOS ASPECTOS GEOLÓGICOS



ANDREA BARTORELLI | GUIDO GUIDICINI

CONFEA
Conselho Federal dos Engenheiros
e Arquitetos



PATROCINADOR:

CREA
Conselhos Regionais de Engenharia
e Arquitetura



mutua
Instituto de Assistência aos Profissionais de CREA

REALIZADORES:



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA
DE ENGENHARIA E AMBIENTAL



ASSOCIAÇÃO PARANAENSE
DE ENGENHARIA E AMBIENTAL

DE SETE QUEDAS A ITAIPU

HISTORIOGRAFIA DE UM PROJETO, COM
ÊNFASE NOS ASPECTOS GEOLÓGICOS



ANDREA BARTORELLI
GUIDO GUIDICINI

Produção editorial:

Assistência editorial: *Luciana Marques e Denise Amaral*

Projeto gráfico/Diagramação/Capa: *Rita Motta e Ryan Dias*

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

Bartorelli, Andrea, 1941-2024

De sete quedas a Itaipu : historiografia de um projeto, com ênfase nos aspectos geológicos / Andrea Bartorelli, Guido Guidicini. -- São Paulo : ABGE, 2025.

Bibliografia.

ISBN 978-65-88460-46-7

1. Engenharia hidráulica 2. Geologia de engenharia
3. Saltos de Sete Quedas 4. Usina Hidrelétrica de Itaipu I. Guidicini, Guido. II. Título.

25-275029

CDD-621.312134

Índices para catálogo sistemático:

1. Usinas hidrelétricas : Engenharia 621.312134

Eliete Marques da Silva - Bibliotecária - CRB-8/9380

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

Todos os direitos reservados à ABGE



DIRETORIA ABGE GESTÃO 2025/2026

PRESIDENTE: Erik Wunder

VICE-PRESIDENTE: Luiz Alberto Minicucci

DIRETORA SECRETÁRIA: Bruna M. Cruz Fernandes

DIRETOR FINANCEIRO: Delfino Luiz Gouveia Gambetti

DIRETORA DE EVENTOS: Ana Elisa Silva de Abreu

DIRETOR DE COMUNICAÇÃO: Luiz Antonio Pereira de Souza

Conselho Deliberativo: Ana Elisa Silva de Abreu, Álvaro Rodrigues dos Santos, Bruna M. Cruz Fernandes, Camila Milli, Delfino Luiz Gouveia Gambetti, Erik Wunder, Flávio Rogério da Silva, João Antônio Curtis, João Luiz Armelin, José Luis Ridente, José Luiz Albuquerque, Lilian Pimentel, Luiz Alberto Minicucci, Luiz Antonio Pereira de Souza, Malena D'Elia Otero, Márcio Leão, Maria Heloisa B. Oliveira Frasca, Romildo Dias Moreira.

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

NÚCLEO RIO DE JANEIRO / ESPÍRITO SANTO

Alano Burity dos Santos, Ana Caroline Duarte Dutra, Ana Paula Cezario da Silva, Giovanna Tristão, Isabella Robert Rodrigues, Jéssica Tiné Pôssa, Raquel Batista M. da Fonseca e Rodrigo Ferreira Franca.

NÚCLEO MINAS GERAIS

Alberto Ferreira do Amaral Junior, Ângelo Almeida Zenóbio, Denise Silva, Diego Moreira da Silva, Ellen Delgado Fernandes, Frederico Nascimento Mendes Bezerra, Giovana Parizzi, Michele Aparecida Flores Costa, Walter dos Reis Junior e Yan Lucas de O. P. Santos.

NÚCLEO SUL

Andréa Nummer, Cezar Augusto B. Bastos, Débora Lamberty, Karina R. Camargo, Malva Andrea Mancuso, Marcos A. Musso Laespiga e Nicole Borchardt.

NÚCLEO CENTRO OESTE

Bruno Presley, Caiubi Emanuel Souza Kuhn, Ingrid Ferreira Lima, Patrícia de Araújo Romão e Ricardo Vilhena.

NÚCLEO NORTE

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

SECRETARIA ABGE

Gerente Executiva: Luciana Marques

Assistente Editorial: Denise Amaral

Assistente Administrativo: Kauany Santos

Assistente Administrativo: Vanessa Oliveira

Auxiliar Administrativo: Emilly Mendes

Auxiliar De Comunicação: Gabrielle Lima

Av. Prof. Almeida Prado, 532 - IPT (Prédio 59) | Cidade Universitária - São Paulo - SP

Fone: (11) 98687-6560

E-mail: abge@abge.org.br | Site: abge.org.br

Contrate um profissional registrado.

confea.org.br



Quando
um profissional
das geociências
entra na história,
tudo melhora.
**Até para os
Sete Anões.**

O profissional das geociências muda a história.

CONFEA
Conselho Federal de Engenharia e
Arquitetura



CREA
Conselho Regional de Engenharia e
Arquitetura



mutua
Centro de Assistência aos Profissionais da Crea



MENSAGEM



Andrea Bartorelli
04/06/1941 - 01/04/2024

Pouco tempo depois de finalizar o presente texto, Andrea faleceu.

Em seus últimos anos de vida, eu tive a sorte de compartilhar e usufruir de uma intensa troca de ideias, informações, textos e mensagens, que culminaram na feitura de três livros, em coautoria, dois dos quais editados. Ao Andrea, meu muito obrigado.

Guido Guidicini

Autor



AGRADECIMENTOS

Na busca por informações sobre eventos ocorridos já há muitos anos, os autores contaram com a colaboração de amigos e colegas de profissão, que disponibilizaram seus próprios arquivos. Registram-se aqui os agradecimentos a Corrado Piasentin, Ricardo Antônio Abrahão e Zsolt Miklos Gombossy. Todos participaram do projeto e da construção de Itaipu e detêm a memória de inúmeros aspectos relevantes. Os agradecimentos são extensivos às arquivistas da Memória da Eletricidade, em sua sede no Rio de Janeiro, pela presteza em localizar e disponibilizar documentos de interesse.



SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO	1
PREFÁCIO ABGE E AGEPAR	3
PREFÁCIO DOS AUTORES	5
PREFÁCIO DO CONFEA	7
CURRÍCULO DOS AUTORES	9
LINHA DO TEMPO	11
1. CONTEXTO GEOLÓGICO DO RIO PARANÁ	17
2. PRIMEIRAS REFERÊNCIAS ÀS SETE QUEDAS	21
3. ANTECEDENTES SOBRE O POTENCIAL ENERGÉTICO DE SETE QUEDAS	27
3.1 Breve histórico	27
3.2 Alternativas para aproveitamento da energia hidráulica de Sete Quedas	29
3.3 Estudos do Consórcio IECO-ELC e as primeiras referências ao projeto Itaipu	69
4. QUESTÕES FRONTEIRIÇAS E ACORDOS ENTRE BRASIL E PARAGUAI	77
4.1 Os tratados ao longo dos séculos XV a XIX	77
4.2 Brasil e Paraguai rumo ao entendimento	82

5. PROJETO E CONSTRUÇÃO DE ITAIPU	89
5.1 Estudo de alternativas de eixo	90
5.2 Primeiras atividades de campo	93
5.3 Definição do tipo de barragem	96
5.4 Técnicas de investigação	108
5.5 Principais aspectos geológicos	114
5.6 Caracterização geomecânica do maciço rochoso	127
5.7 Modelos físicos	133
5.8 Reforço da fundação com chavetas	136
6. DESVIO DO RIO	143
6.1 Aspectos gerais	143
6.2 Processo construtivo	147
7. ENCHIMENTO DO RESERVATÓRIO	157
7.1 Premissas	157
7.2 Etapas de enchimento	159
8. MONITORAMENTO E COMPORTAMENTO DA BARRAGEM	171
8.1 Principais aspectos comportamentais	171
8.2 Oscilações sazonais	174
8.3 Monitoramento geodésico	176
8.4 Monitoramento sísmico	178
8.5 Erosões a jusante do vertedouro	179
CONSIDERAÇÕES FINAIS	185
MATERIAL CONSULTADO	187



APRESENTAÇÃO

O livro lida com a evolução do conceito inicial de implantação de uma usina hidrelétrica nas próprias vizinhanças do acidente fisiográfico das Sete Quedas, no rio Paraná, ideia que se revelou impraticável em sua concepção original, passando para a proposição de conduzir o caudal do rio Paraná por um extenso canal pela margem esquerda, até conseguir condições favoráveis de geração nas vizinhanças das localidades de Porto Mendes ou Porto Britânia, finalizando com a histórica decisão de uma única usina, sob controle binacional, no sítio de Tapuyetê, a pedra que canta, 150 km a jusante dos saltos.

A crônica do aproveitamento do potencial hidroenergético das Sete Quedas tem base no tripé formado pela ação histórica de ocupação do espaço e exploração dos recursos naturais, em conjunto com a acelerada evolução do conhecimento técnico-científico da época nos campos de hidrologia, hidráulica, cartografia, geologia, meteorologia, engenharia estrutural, mecânica e elétrica, no contexto das delicadas relações diplomáticas em uma região de interface entre três nações soberanas, cada qual zelosa de seus próprios interesses.

Cada uma das etapas do histórico de evolução do projeto é abordada ao longo do presente texto, sob a ênfase dos aspectos geológicos que lastrearam as diversas e sucessivas concepções de arranjos dos empreendimentos, de início com níveis de conhecimento escassos, baseados apenas em observações de superfície, progredindo à medida que novas técnicas de investigação aplicadas acrescentavam resultados, contribuindo para a montagem do quadro geológico-estratigráfico regional e local, dentre outros aspectos relacionados ao projeto.

O projeto da Usina Hidrelétrica de Itaipu, desenvolvido e detalhado na década de 1970, representou um campo fértil de utilização dos conhecimentos da Geologia de Engenharia e da Mecânica dos Solos e das Rochas, cujas regras, definições e técnicas de investigação já se encontravam amadurecidas. Neste sentido, Itaipu

foi o grande campo de aplicação dos princípios das referidas áreas tecnológicas, sinalizando a maturidade da Engenharia de barragens no Brasil.

Na primeira metade do texto, o livro procura fornecer, de forma simplificada, o quadro de evolução histórica das ideias iniciais de aproveitamento do potencial hidrelétrico das Sete Quedas até culminar, na segunda metade, com o projeto da UHE Itaipu em suas sucessivas etapas de desenvolvimento, construção e monitoramento após o enchimento do reservatório. O livro se inicia com uma “linha do tempo”, que sintetiza os principais eventos e serve de referência para a leitura do texto.

É preciso, finalmente, fazer especial referência ao Relatório “Problemas relacionados com a fundação dos blocos mais altos da Barragem de Itaipu” da Divisão de Geologia, Mecânica de Rochas e Instrumentação – Divisão de Escavação e Aterros (DGMRI – 00 – 065 – 82, de Abril/1982), elaborado pelos técnicos da Itaipu Binacional: Geól. Adilson Luiz Barbi, Eng. Gilson Henriques Siqueira, Geól. Zsolt Miklos Gombossy, Eng. Evangelista Caetano Porto (Divisão de Escavação e Aterro: Eng. Rone Amorin). A referência se justifica pelo fato de o relatório abordar os pormenores dos aspectos construtivos mais relevantes de toda a obra de Itaipu e se constituir em fonte fundamental para a memória técnica da obra, pela profusão de informações geológico-geotécnicas únicas e inéditas.



PREFÁCIO ABGE E AGEPAR

Os amigos Guido Guidicini e Andrea Bartorelli apresentam nesta publicação conhecimentos instigantes sobre o fascinante contexto geológico que conecta a usina de Itaipu ao antigo complexo geomorfológico de Sete Quedas — um local que sempre despertou admiração pelas belezas naturais.

Com dedicação e tenacidade, os autores compartilham conosco todo o saber construído ao longo de uma trajetória rica em experiências e estudos, sempre enaltecendo nossa Associação.

Esperamos que esta valiosa contribuição à ciência nacional continue promovendo o bem e fortalecendo nossa comunidade.

Agradecemos, com carinho e reconhecimento, a dedicação de nossas colaboradoras Luciana Marques, Denise Amaral, Emily Mendes, Gabrielle Lima, Kauany Santos e Vanessa Oliveira — sem as quais este trabalho não teria sido possível.

Abdel M. H. Hach

Presidente AGEPAR

Erik Wunder

Presidente do Conselho
Deliberativo ABGE



PREFÁCIO DOS AUTORES

Este livro integra os esforços da ABGE em promover e disseminar o conhecimento técnico-científico nas diversas áreas em que atua, especialmente na Geologia de Engenharia e Ambiental. Como ex-presidente desta associação, é motivo de grande satisfação constatar que a ABGE se mantém como uma das entidades mais ativas na divulgação e no registro do conhecimento técnico no Brasil e, sem dúvida, em toda a América Latina.

Eu e o colega Bartorelli concebemos esta obra com o intuito de destacar uma das regiões mais emblemáticas do país no que se refere à aplicação integrada da Geologia e das Engenharias Civil, Mecânica e Elétrica: o aproveitamento hidroenergético das Sete Quedas e a monumental realização que foi o projeto da Usina Hidrelétrica de Itaipu.

Mas o caminho entre as primeiras ideias de aproveitamento e sua efetiva materialização foi árduo e longo, e o propósito deste livro é justamente o de oferecer uma visão da sucessão de concepções e eventos que lastrearam esse percurso.

A publicação deste livro só foi possível graças ao comprometimento, ao empenho e à perseverança da ABGE e de sua dedicada equipe, a quem registro meu mais sincero agradecimento.

Guido Guidicini

Autor



PREFÁCIO DO CONFEA

O Confea, em parceria com entidades como a Agepar, reforça seu compromisso com o fortalecimento da engenharia, agronomia e geociências, promovendo o desenvolvimento sustentável e a proteção da sociedade.

Por meio de apoio financeiro a projetos científicos e técnicos, o Conselho incentiva a produção de publicações que impulsionam a inovação, a pesquisa e a qualificação profissional. Exemplo desse esforço é o livro *Sete Quedas a Itaipu: Historiografia de um Projeto, com Ênfase nos Aspectos Geológicos*, voltado a profissionais, estudantes e instituições públicas e privadas. A obra oferece suporte técnico fundamental à geologia aplicada, contribuindo para uma atuação mais eficiente, ética e responsável.

Ao patrocinar iniciativas como essa, o Confea estimula a valorização profissional, o aprendizado contínuo e o exercício qualificado das profissões, fortalecendo a rede que protege a população e impulsiona o progresso do Brasil.

Eng. telecom. Vinicius Marchese

Presidente do Confea



CURRÍCULO DOS AUTORES



Andrea Bartorelli

Graduação em Geologia: Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras da Universidade de São Paulo-USP (1965). Pós-graduação em Geologia e Petrologia de rochas básicas e ultrabásicas, Geocronologia e Geologia Geral: Departamento de Geologia e Petrologia da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras da Universidade de São Paulo-USP (1967). Mestrado em Geologia: Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras da Universidade de São Paulo-USP (1969). Doutorado em Geociências: Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual de São Paulo-UNESP (1997). É consultor independente, desde 1995, nas áreas de Geologia de Engenharia e mapeamento geológico para projetos de engenharia, mineração, água subterrânea e meio ambiente. É autor e co-autor de mais de 40 artigos técnico-científicos e foi coorganizador de livros sobre as obras dos professores Fernando Flávio Marques de Almeida, Aziz Nacib Ab'Sáber e Paulo Emilio Vanzolini. Co-editou ainda livro sobre a construção da Hidrelétrica de Estreito, no Rio Tocantins, livro sobre Minerais e Pedras Preciosas do Brasil e foi organizador de livro sobre a contribuição do engenheiro Murillo Dondici Ruiz para a Geologia de Engenharia e Mecânica de Rochas no Brasil. Atuou em prospecção sísmica e mapeamentos geológicos-geotécnicos e ambientais para a Ferrovia do Aço, Rodovia dos Imigrantes, Rodovia dos Bandeirantes, Sistema de Transmissão associado à Usina de Hidrelétrica Tucuruí, Gasoduto Brasil-Bolívia, estudos de inventário hidrelétrico e de viabilidade de barragens nas bacias dos rios Tocantins, Tapajós, Madeira, Trombetas, Jarí e Branco. Nos anos de 1966 e 1969 foi professor assistente do Departamento de Geologia e Paleontologia da FFCL-USP e, até 1994, foi geólogo do IPT, Mineração Araçazeiro, Engevix, E.T.J.C. Figueiredo Ferraz e Themag Engenharia.



Guido Guidicini

Geólogo formado em 1963 pela USP dedicou-se desde o início a atividades no campo da Geologia de Engenharia, então denominada Geologia Aplicada. Participou em 1968 da criação da APGA – Associação Paulista de Geologia Aplicada, precursora da atual ABGE – Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental e da qual foi presidente no biênio 1970-1971.

Ao longo de sua vida profissional participou de cerca de 200 projetos de barragens destinadas aos mais variados fins, dentre elas as hidrelétricas de Jupia, Ilha Solteira, Itaipu, Tucuruí e Belo Monte. Integrou duas renomadas equipes de projeto (Themag e Engevix) e trabalhou por sete anos no IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo. Desde 1994 atua na área de Geologia de Engenharia como consultor.

Autor de cerca de 60 trabalhos técnicos, apresentados em foros nacionais e internacionais.

Autor do livro “Estabilidade de taludes naturais e de escavação”, em parceria com Carlos Manoel Nieble, editado em 1976 e ainda à venda em livrarias, decorridos 49 anos. No mesmo ano publicou o livro “Levantamento bibliográfico em Geotecnia e Engenharia geotécnica no Brasil e sua indexação com palavras-chave”, editado pelo IPT em parceria com a ABGE. Em 1994 publicou “Bibliografia brasileira sobre fundações de barragens e temas correlatos”, tendo Sílvia Martins e Fátima Gouveia como coautoras, editado pela Engevix.

Autor também de um livro de título “Lições aprendidas em acidentes e incidentes em barragens e obras anexas no Brasil”, em coautoria com Sandro Salvador Sandroni e Flávio Miguez de Mello, editado em fins de 2021 pelo CBDB - Comitê Brasileiro de Barragens em parceria com a ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico.

Desde 1990 passou a atuar em barragens no Nordeste, sendo autor de um livro de título “Evolução da seção de barragens de açudes no Nordeste, desde os primórdios até Orós”, em coautoria com Walmir Duarte Jardim, editado pela ABGE em 2021. Ainda em 2021 foi coautor do livro “Barragens em arenitos brandos no Brasil”, editado pela ABGE, em parceria com Carlos Manoel Nieble e Luiz Guilherme de Mello, também editado pela ABGE. Em 2021 foi coautor do livro “Barragens de terra e enrocamento”, cujo primeiro autor foi Sandro Salvador Sandroni, tendo sido o livro editado pela Oficina de Textos.

Em 2022 publicou o livro de título “Patologia de túneis hidráulicos – Acidentes e incidentes no Brasil”, tendo como coautores Flávio Miguez de Mello e Newton dos Santos Carvalho, editado pela Oficina de Textos.

Em 2023 publicou o livro de título “Barragens na região amazônica: condicionantes fisiográficos, geológicos e paleoclimáticos”, em coautoria com Andrea Bartorelli, editado pela ABGE.



LINHA DO TEMPO

DATA	EVENTO	TEOR
09/01/1872	Tratado de Limites entre Brasil e Paraguai	O tratado definiu a fronteira entre os dois países, desde a foz do Rio Apa, afluente do Rio Paraguai pela margem esquerda, até a foz do Rio Iguaçu.
10/1908	Primeira referência ao aproveitamento da energia hidráulica dos saltos	A referência foi apresentada na Câmara dos Deputados em emenda (Nº149) a um projeto de despesas do MIVOP - Ministério da Indústria, Viação e Obras Públicas, mas foi retirada pela Comissão de Finanças da Câmara.
12/1927	Manifestação de Eusébio de Oliveira, do Serviço Geológico e Mineralógico do Ministério da Agricultura	O Diretor do Serviço Geológico e Mineralógico do Ministério da Agricultura (SGM) tratou do aproveitamento hidrelétrico das Sete Quedas em manifestação ao Ministério das Relações Exteriores, contendo planta e ilustrações fotográficas.
08/1928	Relatório técnico do SGM	Relatório do SGM detalhou as atividades de medição de descargas, da altura das quedas e da potência, bem como das condições necessárias para a realização do aproveitamento hidroenergético.
09/05/1930	Protocolo de Instruções entre Brasil e Paraguai	O protocolo definiu o procedimento para a demarcação e caracterização da fronteira entre os dois países.
03/1935	Ministério das Relações Exteriores solicitou parecer técnico-jurídico	O MRE solicitou parecer ao advogado Eurico Sodré e ao engenheiro Asa W.K. Billings. Este último apresentou relatório com considerações sobre potencial hidráulico, realização de medições, derivação das vazões para a margem esquerda do rio e participação do Paraguai.
23/12/1952	Criação da CIBPU pela Lei nº 2018 do Governo do Estado de São Paulo	A CIBPU - Comissão Interestadual da Bacia Paraná-Uruguai foi criada com a função de promover o desenvolvimento regional da bacia.



DATA	EVENTO	TEOR
31/07/1953	Solicitação da São Paulo Light	A São Paulo Light, Serviços de Eletricidade SA requereu concessão para o aproveitamento do potencial das Sete Quedas, que não lhe foi concedida, tendo mudado, em seguida, sua solicitação para autorização de estudos sem, contudo, tê-la conseguido.
26/01/1956	Decreto nº 36.649 do Governo Federal	O decreto autorizou a CIBPU a estudar o potencial hidrelétrico das Sete Quedas. O relatório contendo os resultados foi apresentado em fins de 1956.
31/12/1957	Decreto nº 42.957 do Governo Federal	Pelo decreto, a CIBPU obteve nova autorização federal para prosseguir os estudos, mas não conseguiu apresentar um anteprojeto no prazo que lhe foi concedido.
1958	Atuação do Serviço Regional de Obras da 5ª Região Militar	Com a colaboração do Cap. Engº Pedro Henrique Rupp, o Serviço Regional de Obras realizou estudos na região das Sete Quedas, visando implantar uma usina hidrelétrica para suprimento de energia à 5ª Companhia de Fronteiras, sediada em Guaíra.
01/1959	Convênio entre a 5ª Região Militar e o SNBP	Pelo convênio, o Exército se incumbiu da parte técnica e o SNBP – Serviço de Navegação da Bacia do Paraná assumiu o encargo financeiro da construção de uma usina hidrelétrica piloto em Guaíra.
22/10/1959	Decreto nº 47.087 do Governo Federal	O Governo Federal incumbiu o Serviço de Navegação da Bacia do Prata (SNBP) de promover o aproveitamento hidrelétrico dos Saltos das Sete Quedas.
20/08/1960	Inauguração da usina- piloto em Guaíra	Quando da inauguração da primeira máquina da usina-piloto (600 KW), realizou-se o 1º Congresso de Energia Elétrica de Guaíra.
1960/1961	Atuação do Engº Sylvestre Souza	O Engº Sylvestre Souza publicou um folheto propondo o aproveitamento do potencial de Sete Quedas através da derivação das águas por canal na margem esquerda do rio Paraná e implantação de casa de força em Porto Britânia, com potência instalada de 25 milhões de KW. Em seguida, ainda em 1961, o Engº Silvestre apresentou ao Ministério das Minas e Energia nova concepção para o aproveitamento das quedas.



DATA	EVENTO	TEOR
1960/1961	Estudo da Overseas Electrical Industry Survey Institute (Japão), a convite do SNBP e da Federação das Indústrias do Estado do Paraná.	O estudo, resumido no relatório "The Guaira Power Project", propôs a construção de uma usina no local denominado Prainha, a 5 km do centro de Guaíra, com potência de 1.000 MW, como estágio preliminar para o aproveitamento do potencial das Sete Quedas.
31/05/1961	O Ministério das Minas e Energia constituiu um Grupo de Trabalho	O Grupo de Trabalho do MME teve a incumbência de reunir a documentação técnica existente sobre o aproveitamento do potencial energético de Sete Quedas e apresentar conclusões, o que ocorreu em 20/07/1961.
12/03/1962	Ofício do Ministério das Relações Exteriores do Paraguai para o Itamarati	No ofício, o governo paraguaio questionou as atividades brasileiras em Sete Quedas, para aproveitamento do potencial hidroenergético sem a participação do Paraguai, que compartilhava a soberania sobre aquele trecho do rio Paraná.
1962	Contratação do estudo das Sete Quedas pelo MME	O Ministério das Minas e Energia contratou o escritório Técnico OMF, liderado pelo Eng ^o Otávio Marcondes Ferraz, para elaboração de estudo preliminar do aproveitamento hidroenergético das Sete Quedas.
11/06/1962	Criação da Eletrobrás	A Centrais Elétricas Brasileiras S.A. (Eletrobrás) foi criada como Estatal, para assumir a função de planejamento do setor de energia elétrica nacional.
03/12/1962	Relatório Preliminar do Escritório Técnico OMF	O Relatório Preliminar apresentou o anteprojeto que previa o desvio das águas para canal de 60 km de extensão na margem esquerda e implantação de três casas de força subterrâneas, pouco a jusante de Porto Mendes, contendo 21 grupos geradores e totalizando 10.000 MW.
1963	Reportagem de Luciano Zadj	Em reportagem, Luciano Zadj (Rev. Bras. Energia Elétrica, 1963), resgatou questões quanto à navegabilidade do Rio Paraná e mencionou diferentes estudos para o aproveitamento do potencial hidrelétrico de Sete Quedas.
Data presumível, 1963	Atuação do Eng ^o Luiz Antônio Souza Leão, da Divisão de Águas do MME.	Com base no relatório do Escritório OMF, o Eng ^o Luiz Antônio Souza Leão desenvolveu e apresentou quatro propostas alternativas para prosseguimento dos estudos e fez outras recomendações.



DATA	EVENTO	TEOR
14/06/1963	Ofício MRB nº 115 da Embaixada Paraguaia no Brasil para o Itamaraty	O ofício reiterou os direitos do Paraguai a respeito do aproveitamento do potencial das Sete Quedas, que não pertencia exclusivamente a qualquer um dos dois estados e propôs um acordo para estudar conjuntamente a utilização da energia hidráulica do sítio.
19/01/1964	Reunião dos presidentes	Em reunião dos presidentes Alfredo Stroessner e João Goulart foi assinado um acordo de aproveitamento conjunto do potencial hidroenergético das Sete Quedas.
27/03/1965	Inauguração da Ponte da Amizade	A Ponte da Amizade sobre o Rio Paraná ligou as cidades de Foz do Iguaçu (Brasil) a Puerto Stroessner, hoje Ciudad del Est (Paraguai).
22/06/1966	Ata de Iguaçu	Assinada pelo Brasil e Paraguai, reafirmou, entre outras coisas, a disposição de realizar estudos sobre a possibilidade de aproveitamento do potencial hidrelétrico no trecho do rio Paraná compreendido entre as Sete Quedas e a foz do rio Iguaçu.
12/02/1967	Criação da Comissão Mista Técnica Brasileiro-Paraguaia	Finalidade da Comissão foi implementar a Ata de Iguaçu na parte relativa ao estudo do aproveitamento.
23/04/1969	Tratado da Bacia do Prata	Brasil, Paraguai e Argentina assinaram o tratado, que se destinava a promover o desenvolvimento e integração física da bacia, além de outras providências.
18/11/1970	Contratação de consórcio de consultoria internacional (IECO-ELC)	Através de concorrência internacional, a Comissão Mista determinou a contratação do consórcio formado pela firma norte-americana International Engineering Company (IECO) e pela italiana Electroconsult Spa (ELC), que iniciaram os trabalhos em janeiro de 1971.
03/06/1971	Declaração de Assunção	A declaração determinou que, nos rios internacionais contíguos, sendo compartilhada a soberania, qualquer aproveitamento de suas águas deveria ser precedido de um acordo bilateral entre os ribeirinhos.
31/12/1972	Apresentação do relatório preliminar de consultoria (IECO-ELC)	O relatório preliminar apresentou as alternativas de locais para o empreendimento e seus arranjos, apontando a construção de uma grande barragem no local denominado Itaipu como sendo a melhor alternativa econômica para o empreendimento.



DATA	EVENTO	TEOR
26/04/1973	Tratado de Itaipu	Celebrado entre Brasil e Paraguai, o tratado foi o instrumento legal para a implantação de aproveitamento hidrelétrico no sítio de Itaipu, 14 km a montante da ponte internacional e previu a criação da Itaipu Binacional, entidade incumbida da execução das obras. A capacidade da usina foi estipulada em 12.600MW.
05/07/1973	Sancionada a Lei nº 5.899.	A Lei nº 5.899 dispôs sobre a aquisição dos serviços de eletricidade de Itaipu, além de outras providências. Definiu as subsidiárias de âmbito regional da ELETROBRÁS: ELETROSUL, FURNAS, CHESF E ELETRONORTE. Definiu também as empresas concessionárias: CESP, CPFL, CEMIG, LIGHT, ESCELSA, CBEE, CELF, CEB, CELG, CEMAT, CEEE, COPEL e CELESC.
17/05/1974	Constituição da Itaipu Binacional	A empresa foi criada para gerir a construção da usina.
02/05/1975	Início da construção das obras civis	A Usina de Itaipu foi construída por consórcios de empresas brasileiras e paraguaias. O projeto e estudos de viabilidade foram realizados pelo consórcio entre IECO e ELC. As obras de construção civil foram executadas por consórcios UNICON (brasileiro) e CONEMPA (paraguaio), enquanto as obras de montagem eletromecânica ficaram a cargo dos consórcios ITAMON (brasileiro) e CIE (paraguaio).
20/10/1978	Desvio do rio Paraná	Após três anos de trabalhos efetivou-se o desvio do rio por canal de dimensões gigantescas, escavado em rocha na margem esquerda.
19/10/1979	Acordo Tripartite entre os aproveitamentos de Itaipu e Corpus	O acordo celebrado entre Brasil, Argentina e Paraguai sobre cooperação técnico-operativa entre os aproveitamentos de Itaipu e Corpus estabeleceu o nível d'água operacional de Itaipu, que viabilizaria o futuro aproveitamento argentino-paraguaio e determinou outras providências.
13/10/1982	Fechamento das comportas do desvio	Deu-se início à formação do reservatório.
05/05/1984	Entrada em operação da primeira unidade	A partir dessa data, as 20 unidades geradoras foram sendo paulatinamente instaladas.
Março/2007	Entrada em operação da última unidade	A usina atingiu sua capacidade total de 14.000 MW.



CONTEXTO GEOLÓGICO DO RIO PARANÁ

A Bacia do Paraná é uma das 11 bacias hidrográficas de primeira ordem do Brasil, as quais foram classificadas não só com base exclusivamente hidrográfica, mas levando-se em conta também o contexto geológico-geotectônico dos terrenos banhados por elas (Bartorelli, 2012). Em associação com as bacias dos altos rios Paraguai e Uruguai, a Bacia do Paraná faz parte da grande Bacia do Prata. A área da bacia em território brasileiro é da ordem de 1,5 milhões km² e sua vazão média corresponde a 11.453 m³/s, enquanto a vazão de estiagem cai para 4.647 m³/s (Matos & outros, 2007, apud Bartorelli, 2012).

A Bacia do Paraná é provavelmente única no mundo com relação à existência de inúmeras grandes cachoeiras e volumosas quedas d'água dispersas pelos cerca de um milhão de km² do Planalto Basáltico da Formação Serra Geral. Foram contabilizadas algo como 50 cachoeiras distribuídas, sobretudo, ao longo do percurso dos rios Paraná, Uruguai, Iguaçu, Piquiri, Ivaí, Paranapanema, Tietê, Grande e Paranaíba. Existem ainda dezenas de saltos, com consideráveis alturas de queda e grandes volumes de água, na ampla rede de drenagem afluente dos rios principais acima mencionados. A morfologia das grandes quedas é diversificada de

acordo com os diferentes mecanismos de origem e, principalmente, dos condicionantes lito-estruturais do substrato basáltico.

Desde a segunda metade do século XIX foram constatados os significativos desníveis em áreas de cachoeiras que despertaram, nos pioneiros visitantes da época, a possibilidade de aproveitamento de poderosas fontes de energia hidrelétrica. A grandiosidade dessas colossais catadupas acabou custando o desaparecimento de muitas delas, a exemplo da mais espetacular de todas, as Cachoeiras das Sete Quedas, no Rio Paraná e outras, igualmente imponentes, como Urubupungá, também no Rio Paraná, Salto Santiago e Salto Caxias, no Rio Iguaçu, Capivara, no Rio Paranapanema, Itapura e Avanhandava, no Rio Tietê, Marimbondó e Água Vermelha, no Rio Grande, além de São Simão e Cachoeira Dourada, no Rio Paranaíba.

A Bacia Hidrográfica do Paraná, em território brasileiro, engloba as sub-bacias dos rios Grande e Paranaíba, que são seus formadores. A partir do ponto de encontro desses dois rios, o Rio Paraná recebe, na vertente oriental, os rios São José dos Dourados, Tietê, Aguapeí, Peixe, Paranapanema, Ivaí, Piquiri e Iguaçu. Pelo lado ocidental, são seus principais afluentes os rios Sucuriú, Verde, Pardo, Ivinhema, Amambá, Mondaí e Acaraí.

A bacia mostra clara assimetria, com maior extensão das drenagens providas da vertente esquerda do Paraná, quando comparada ao percurso dos rios da vertente oposta. Essa assimetria foi imposta pelo soerguimento pleistocênico das serras de Maracajú e Amambá, divisoras da bacia a oeste, em grande parte com a Bacia do Pantanal, delimitada pela grande descontinuidade crustal do Lineamento Transbrasiliano (Chamani, 2020).

O Planalto Basáltico da Bacia do Paraná se divide em duas grandes províncias geomorfológicas, em função da geografia e do arcabouço tectônico da bacia. Almeida (1956) reconheceu um limite natural entre essas duas províncias ou setores, o qual coincide com a estruturação regional de direção E-W e WNW, que passa pelas cachoeiras de Sete Quedas. À porção ao norte das cachoeiras (montante), com preenchimento de depósitos do Grupo Bauru, Almeida deu a denominação de Bacia do Alto Paraná, enquanto o setor ao sul (a jusante das cachoeiras) foi subdividido em Zona das Missões e Planalto das Araucárias (**Figura 1.1**) (Almeida 1956).

FIGURA 1.1

Compartimentação geomorfológica da Bacia do Paraná, com a linha divisória entre as bacias do Alto e Médio Paraná, passando pelas cachoeiras das Sete Quedas.

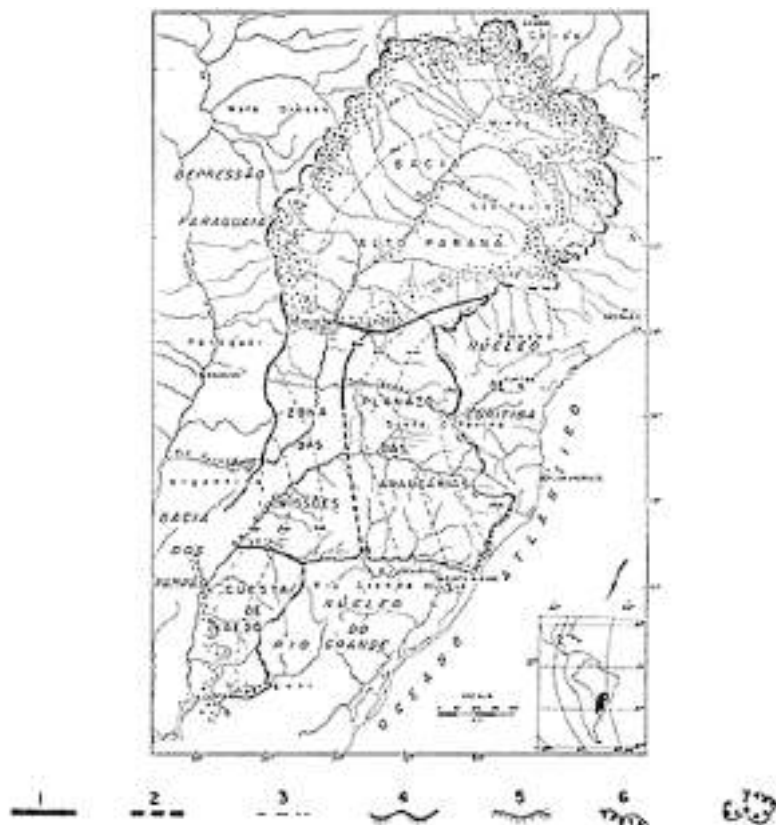


Fig. 1 — O planalto basáltico da bacia do Paraná.

1 — Limites propostos para a subdivisão do planalto basáltico. 2 — Limites imprecisos. 3 — Conformação aproximada da superfície de erosão pré-basáltica. 4 — "Cuestas" terminais. 5 — Interrupções das "cuestas" terminais, onde a cobertura eretácea transgride sobre os sedimentos pré-basálticos. 6 — Escarpas de linha de falha. 7 — Limite da cobertura mesozóica dos basaltos.

Fonte: Almeida, 1956.

A UHE de Itaipu situa-se a jusante das cachoeiras de Sete Quedas e destina-se ao aproveitamento de todo o potencial hidrelétrico da Bacia do Alto Paraná, concentrado em Guaíra, na divisa dos estados do Paraná e Mato Grosso do Sul, na região de fronteira com a República do Paraguai.

Na vista aérea da **Figura 1.2** é marcante a concentração das águas da Bacia do Alto Paraná no estreito "canyon" de Guaíra, onde o rio passa bruscamente de uma

largura próxima a 4.000 m para um canalão com menos de 100 m de largura, despencando sob a forma de numerosos saltos e quedas d'água.

FIGURA 1.2

Salto das Sete Quedas, onde a ampla planície aluvial do Rio Paraná é barrada pelo alto estrutural do Alinhamento do Rio Piquiri, dando origem, a jusante, ao estreito e profundo canalão, delimitando ao norte a Bacia do Alto Paraná.



Fonte: Acervo dos autores, 1979.

A fisiografia atual da Bacia do Paraná é resultado da evolução quaternária, que deu origem à vasta drenagem e às dezenas de quedas d'água no curso dos rios, tanto acima como a jusante das Sete Quedas, com idade ao redor de 1,8-1,5 milhões de anos.



PRIMEIRAS REFERÊNCIAS ÀS SETE QUEDAS

Em arquivos do Centro de Memória da Eletricidade no Brasil constam as primeiras observações sobre as Sete Quedas, que impressionaram os visitantes da época. De Brunetto & Muraski (1983):

O rio Paraná, no seu caminho para o sul e para vencer a barreira natural constituída pelo prolongamento da serra de Maracajú, formou uma imensa baía, que após, dividiu-se em inúmeros braços. Uma depressão vulcânica que rompeu a crosta terrestre abrindo grandes fendas no basalto, permitiu a formação de um arquipélago e de inúmeros saltos e cataratas. As águas, contorcidas e efervescentes, precipitaram-se então, de alturas variáveis entre 10 e 60 metros num percurso de 4 km, até atingir o canal principal, com uma largura de 100 metros e profundidades entre 140 e 160 metros. Dalí, seguiu sua trajetória, para chegar lento e caudaloso na Bacia do Prata, encontrando-se com as águas do Oceano Atlântico. Estava formado um espetáculo místico, singular e indescritível, cuja origem perdeu-se no tempo. Foram milhares, ou talvez milhões de anos. Um enigma.

Em 1525, Aleixo Garcia, sertanista português, indo para o Peru em busca de ouro, prata e pedras preciosas, para a Coroa Espanhola, descobre o lugar batizando-o de “Cataratas do Rio Paraná”. Os espanhóis, até 1552, chamavam o local de “Saltos del Canandiyu” em homenagem ao valente cacique Canandiyu, que comandava as aldeias guaraní da margem direita do rio, nas imediações das quedas. Neste ano, Domingos Martínéz Irala, governador de Assunción, é chamado pelos índios guaraní da margem esquerda, afim de expulsar os tupis, invasores de suas terras. Atravessou o rio e com a ajuda de Guayrá, brioso cacique, venceu os tupis, expulsando-os e firmando um tratado de “não agressão” com eles.

Na sua volta para Assunción, em 1554, passando pela região das quedas, Irala encarregou o capitão Garcia Rodrigues de Vergara, de fundar o “pueblo” Ontiveros, uma légua acima dos saltos, na margem direita do Rio Paraná e modificou o nome de Saltos del Canandiyu para “Saltos de Guayrá” em homenagem ao cacique, pela ajuda na luta contra os tupis. Dois anos após, o “pueblo” é abandonado e o contingente de 60 soldados espanhóis, transferido para a confluência dos rios Paraná e Piquiri, onde o capitão Ruy Dias Melgarejo havia fundado a “Ciudad Real del Guayrá”.

Os “Saltos del Guayrá” permaneceram conhecidos com este nome até nossos dias, na maioria dos países de origem espanhola. O nome “Sete Quedas” apareceu pela primeira vez em 1872 no “Tratado de Limites” assinado após a Guerra do Paraguai, pelo Barão de Cotegipe (Brasil) e Carlos Loisaga (Paraguai).

Até 1900 somente tribos nômades (os gês) vagueavam pelas terras abandonadas pelos guaraní, formando povoações isoladas, de curto tempo e levantando acampamento quando terminavam a caça e as frutas das matas. Neste ano, Telêmaco Borba visitando as ruínas da Ciudad Real del Guayrá, desce navegando pelo rio Paraná até a região das quedas, comprovando que as mesmas podem ser conhecidas também por via fluvial. Por esse motivo ele pode ser considerado como o primeiro turista que visitou Sete Quedas.

Em 1902, a Companhia Mate Laranjeira, fundada por Joaquim Murtino, um grande estadista, recebe do governo brasileiro, conforme Decreto Imperial N.º 8799 de 9.12.1882, a concessão de explorar a erva-mate do sul do Mato Grosso. Esta companhia constrói na margem esquerda do rio, 5 km acima das quedas, o porto Monjoli, que mais tarde passou a ser chamado de Porto Guaíra. Implanta a partir dali uma estrada de ferro com 60 km ligando porto Guaíra a Porto Mendes, transpondo desta maneira, a obstrução da navegação causada pelos saltos. De Porto Mendes, a erva-mate era transportada em navios até a Argentina, país consumidor do produto.

*Desbravadora e colonizadora do sertão de Guaíra, a Companhia Mate Laranjeira foi responsável pelo levantamento da área das quedas, demarcando 7 grupos com 19 saltos assim identificados na época (**Figura 2.1**).*

FIGURA 2.1

Mapa pioneiro de Sete Quedas executado pela Companhia Mate Laranjeira.



Legenda: 1 - Salto Marechal Lopes; 2 - Salto General Estigaribia; 3 - Salto Presidente Franco; 4 - Salto Diretor Francis; 5 - Salto do Limite; 6 - Salto do Caxias; 7 - Salto Tamandaré; 8 - Salto Deodoro; 9 - Salto Osório; 10 - Salto Benjamim Constant; 11 - Salto Saldanha Gama; 12 - Salto Dom Pedro; 13 - Salto Barão de Mauá; 14 - Salto Rabisco Mendes; 15 - Salto Ruy Barbosa; 16 - Salto Maria Barreto; 17 - Salto Thomás Laranjeira; 18 - Salto Floriano; 19 - Saltinho.

Fonte: Brunetto & Muraski, 1983.

A companhia foi também pioneira na implantação da infraestrutura para a visitação da área, construindo pontes que permitiram acesso aos saltos 16, 17, 18 e 19 (**Figura 2.2**).

Pouco antes do enchimento do reservatório de Itaipu, iniciado em outubro de 1982, todas as pontes e benfeitorias construídas para acesso aos saltos de Sete Quedas foram desmontadas (**Figura 2.3**).

FIGURA 2.2

6ª e 7ª quedas - Travessias construídas pela Companhia Mate Laranjeira.



Fonte: Brunetto & Muraski, 1983.

FIGURA 2.3

Desmontagem das pontes de acesso e visita às Sete Quedas, implantadas pela Companhia Mate Laranjeira, tendo em vista o iminente alagamento pelo reservatório de Itaipu.



Fonte: Acervo dos autores, 1982.

Em 1944, o SNBP – Serviço de Navegação da Bacia do Prata pediu a encampação das terras da Cia. Mate Laranjeira, fato concretizado em 1951 e que permitiu, pela Lei Nº 790 de 14 de novembro, criar o município de Guaíra, que viveu até 1982 intimamente ligado a Sete Quedas.

Nas **Figuras 2.4 e 2.5** são ilustrados aspectos das ruínas das instalações da Companhia Mate Laranjeira, na área de Porto Mendes, que era o destino da ferrovia para transporte de erva-mate a partir de Guaíra.

FIGURA 2.4 E 2.5

Vista aérea das instalações da Companhia Mate Laranjeira em Porto Mendes, na margem esquerda do canalão do Rio Paraná e, à direita, ruínas da sede do empreendimento, antes do início da formação do reservatório de Itaipu, em outubro de 1982.

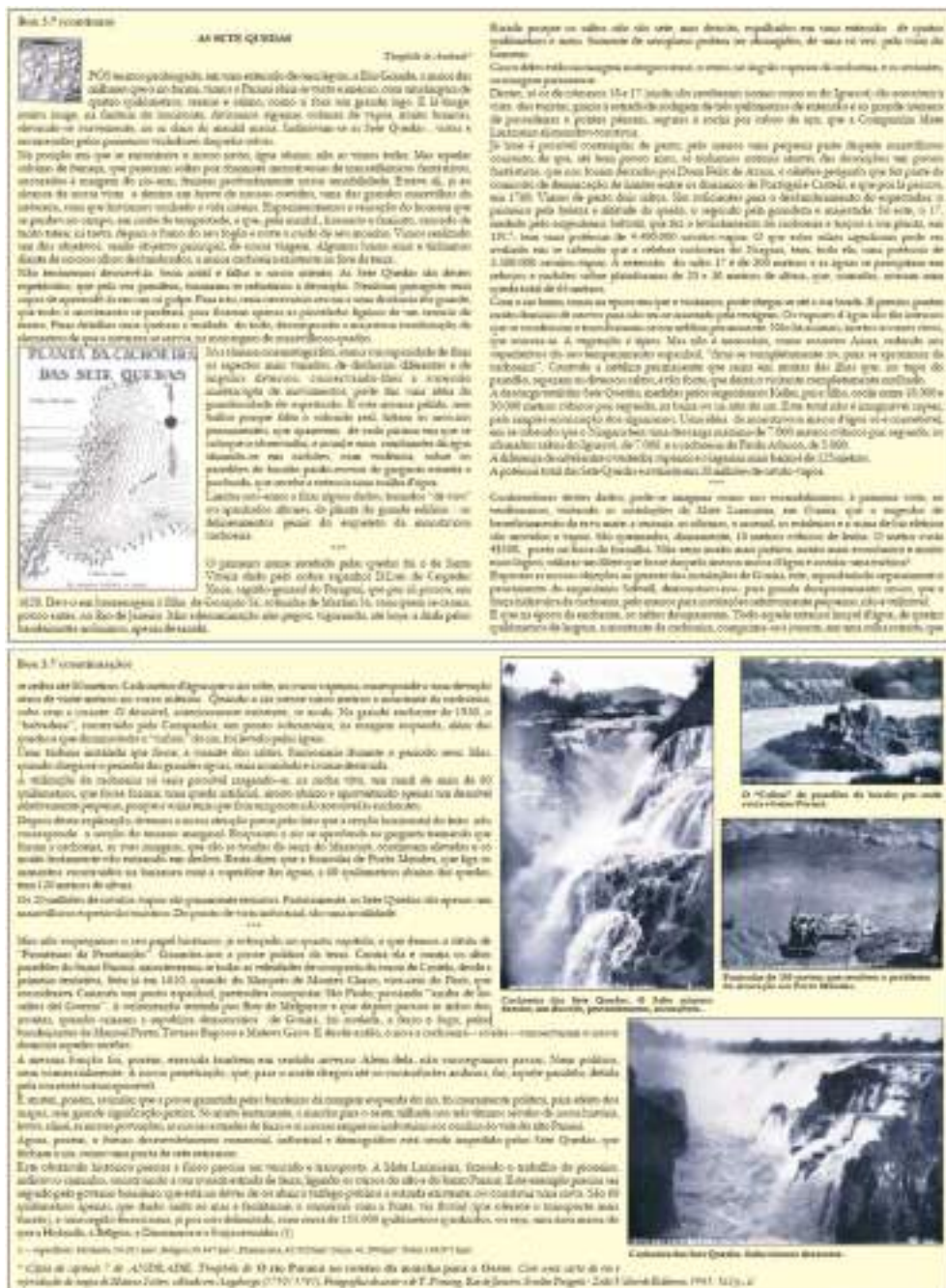


Fonte: Acervo dos autores.

Pouco antes disso, em 1941, Teophilo de Andrade realizou uma demorada viagem ao longo do rio Paraná e descreveu as Sete Quedas, registrando as dificuldades de um eventual aproveitamento da força hidráulica dos saltos (**Figura 2.6**). Na época, as alternativas de arranjo que permitiriam tal aproveitamento estavam nos primórdios e, em seu registro, a seguir reproduzido, Teophilo de Andrade comenta, desapontado, que: *“Os 20 milhões de cavalos-vapor são puramente teóricos. Praticamente, as Sete Quedas são apenas um maravilhoso espetáculo turístico. Do ponto de vista industrial, são uma inutilidade”*.

FIGURA 2.6

Reprodução de texto de Teophilo de Andrade (1941).



Fonte: Brunetto & Muraski, 1983.



ANTECEDENTES SOBRE O POTENCIAL ENERGÉTICO DE SETE QUEDAS

3.1 Breve histórico

Já no século XIX visitantes vislumbravam a colossal energia que poderia ser aproveitada nas fabulosas cachoeiras de Sete Quedas. A referência mais remota data de outubro de 1908 (Cotrim, 1999), consubstanciada na Emenda nº 149 ao projeto de despesa do MIVOP – Ministério da Indústria, Viação e Obras Públicas de 1908, intitulada *“Aproveitamento da força hidráulica de Sete Quedas e Urubupungá”*, de autoria dos deputados Vitor Ferreira do Amaral (PR) e Manuel Bonfim (SE). A emenda tinha o seguinte enunciado: *“Autoriza o governo a contratar a navegação a vapor no rio Paraná entre o Salto de Sete Quedas e o de Urubupungá, e daí até a Cachoeira Dourada (...) e mais o direito do aproveitamento da força hidráulica dos respectivos saltos, sem prejuízo de terceiros”*. Os referidos aproveitamentos foram, entretanto, retirados da emenda, por entendimento de que o Governo não deveria

alienar as forças hidráulicas sem que fossem especificadas as condições e cautelas necessárias.

O aproveitamento hidrelétrico de Sete Quedas foi ponderado em dezembro de 1927, em manifestação de Eusébio de Oliveira, Diretor do Serviço Geológico e Mineralógico do Ministério da Agricultura (SGM), Indústria e Comércio, ao Ministério das Relações Exteriores, contendo planta e ilustrações fotográficas. Na sequência, em agosto de 1928, um relatório do SGM continha considerações sobre as atividades de medição de descargas, determinação da altura das quedas e potência, bem como das condições necessárias à realização do referido aproveitamento.

Sempre segundo Cotrim (1999), Hildebrando Accioly, do Ministério das Relações Exteriores, apresentou uma informação (sem data conhecida) intitulada “*O Salto das Sete Quedas e a fronteira Brasil-Paraguai*” sobre a demarcação da linha de fronteira na área de interesse, indicando a necessidade de se investigar se o potencial deveria ou não ser partilhado com o Paraguai.

Em fevereiro de 1935, o Ministério das Relações Exteriores solicitou o parecer do advogado Eurico Sodré e do engenheiro Asa W.K. Billings a respeito do aproveitamento da energia hidráulica do Salto de Sete Quedas. Billings foi um engenheiro americano, considerado um dos pioneiros no desenvolvimento dos sistemas de energia elétrica no Brasil, onde ele viveu durante os últimos 27 anos de sua vida. Em março de 1935, Billings emitiu um relatório preliminar, contendo considerações sobre o potencial hidráulico dos saltos, a realização de medições no rio Paraná, a necessidade de derivação das vazões do rio para a margem esquerda e a concordância com a participação do Paraguai no aproveitamento do potencial hidráulico.

Passados pouco menos de 15 anos desde a manifestação acima, em dezembro de 1949, o equilíbrio nas relações entre Brasil, Paraguai e Argentina, no contexto do aproveitamento hidroenergético dos Saltos das Sete Quedas, foi objeto de memorando de autoria de Álvaro Teixeira Soares, ex-chefe da Divisão de Fronteiras do Ministério das Relações Exteriores. Após o memorando transitar em diversos órgãos do governo, a Secretaria da Presidência da República, em seu Processo 693/56, expressou parecer favorável à constituição de uma comissão para tratar do referido aproveitamento.

3.2 Alternativas para aproveitamento da energia hidráulica de Sete Quedas

Em reportagem de Luciano Zadj (Rev. Bras. Energia Elétrica, 1963), foram resgatadas questões quanto à navegabilidade do Rio Paraná e mencionados diferentes estudos para o aproveitamento do potencial hidrelétrico de Sete Quedas.

Os primeiros estudos para exploração do Rio Paraná datam de 1952 e, até 1966, envolviam apenas o Brasil, onde os estudos eram elaborados pela CIBPU – Comissão Interestadual das Bacias dos Rios Paraná e Uruguai (Maggi, 2015). A Comissão foi criada em 1952 e era composta pelos governadores dos estados de Mato Grosso, Paraná, São Paulo, Goiás, Minas Gerais, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Sua função era a de projetar o conjunto das grandes obras para as duas bacias.

A reportagem de Luciano Zadj (1963) reúne resultados de pesquisas pioneiras quanto à navegabilidade do Rio Paraná, bem como diversos estudos sobre o aproveitamento do potencial hidrelétrico das Sete Quedas. Nesse relatório não aparece, ainda, qualquer referência à idealização ou concepção do aproveitamento de Itaipu.

3.2.1 Navegação no Rio Paraná

As Sete Quedas e o *canyon*, ao mesmo tempo em que representam importante riqueza energética, constituem obstáculo à navegação no Rio Paraná, interrompida pela presença das quedas, sendo navegável somente mais além, em Porto Mendes Gonçalves. O resultado é a impossibilidade de uma navegação internacional em toda a extensão da grande via. Enquanto abaixo de Porto Mendes a navegação se desenvolveu intensamente, acima das Sete Quedas ficou estagnada.

O aproveitamento do potencial energético das Sete Quedas estava ligado intimamente a problemas de navegação. Não só era interessante ter à disposição uma via livre no Paraná Superior, de Guaíra até a confluência dos rios Grande e Paranaíba, como no Médio e Baixo Paraná, de Porto Mendes ao Rio da Prata. O Alto Paraná possui 600 km navegáveis, dos quais 400 de Guaíra a Porto Eitácio, para navios de 4 pés na cheia, e 2,5 na vazante. O Médio Paraná se estende de Porto Mendes (60 km a jusante de Sete Quedas), até sua confluência com o Rio Paraguai, que serve de fronteira entre Brasil, Paraguai e Argentina. Esse trecho é

navegável em toda sua extensão, durante grande parte do ano, por embarcações de 5 pés. Contudo, na época das secas, nas Corredeiras de lapê-pê, próximas de Encarnación, encontram-se, às vezes, menos de quatro pés de fundo.

Lembrando que o Alto e Baixo Paraná podem ser considerados como sistemas independentes de transporte fluvial, com extensão de milhares de quilômetros cada um, é incontestável que, mesmo antes da construção de um eventual barramento nas Sete Quedas, que permitiria a continuidade do tráfego desde Cachoeira Dourada, no Rio Paranaíba e a Usina de Peixoto, no Rio Grande, os dois sistemas, interrompidos pelo *canyon* entre Sete Quedas e Porto Mendes Gonçalves, poderiam ser considerados independentes, com características econômicas superiores às da maior parte dos sistemas fluviais do mundo (Zadj, 1963).

Os estudos que vinham sendo procedidos pela Comissão Interestadual da Bacia Paraná-Uruguai (CIBPU), tendo em vista a criação de uma grande rede de navegação interior, compreendendo o Rio Paraná e seus principais tributários, tinham por finalidade a interligação dos afluentes da margem de Mato Grosso com os dos estados do Paraná e São Paulo, de forma a ligar o centro do Mato Grosso através do sistema Ivinhema-Paranapanema, com o centro ferroviário de Ourinhos, ou ligar as regiões riquíssimas de Maracaju, pelo Rio Pardo, com o terminal ferroviário da Sorocabana em Presidente Prudente. Havia necessidade premente de melhoria de transportes fluviais no Alto Paraná e, para isso, era imprescindível um estudo completo do rio, seu balizamento, serviços de dragagem e melhoramentos do leito e da margem, de modo a possibilitar uma navegação franca para navios de até 1,50 m de calado.

3.2.2 Grupo de trabalho das Sete Quedas

Para estudar as diversas sugestões e concepções existentes, desenvolver estudos hidrológicos e geológicos complementares e definir, do ponto de vista técnico e econômico, o anteprojeto a ser desenvolvido para a construção de uma hidrelétrica em Sete Quedas, a ELETROBRAS, criada em 1962 para coordenar as ações do setor elétrico, instituiu, com a aprovação do Ministério das Minas e Energia, um Grupo de Trabalho especial para o exame do aproveitamento do potencial energético na região das Sete Quedas. Instalado na capital paulista, o Grupo de Trabalho tinha como coordenador o Eng. Mário Lopes Leão, ex-diretor da Central Hidrelétrica de Furnas, ex-presidente da USELPA e da CHERP, ex-conselheiro do BNDE, e professor da Escola Politécnica de São Paulo. Ocupou, ainda, cargos em

órgãos estaduais de energia elétrica. Participaram, ainda, do Grupo de Trabalho os engenheiros Hiram Rolim Lamas, Diretor da Companhia Paranaense de Energia Elétrica, José Duarte Magalhães, da Divisão de Águas do Ministério das Minas e Energia e o Prof. Paulo Mendes da Rocha, Diretor do Departamento de Estudos e Projetos da Comissão Interestadual da Bacia Paraná-Uruguai.

A CIBPU já vinha desde algum tempo realizando estudos hidrológicos e topográfico-hidrográficos que poderiam servir de subsídio aos estudos do aproveitamento do potencial energético das Sete Quedas. Este aproveitamento já havia sido objeto também, entre outros, de estudos preliminares realizados pela São Paulo Light, Serviços de Eletricidade SA (que requereu concessão em 1953), pelo Serviço de Navegação do Rio da Prata (SNRP), pelo “Overseas Electrical Industry Survey Institute” (Guaíra Power Project), pelo Eng. Sylvestre Souza (Guaíra 25 milhões), pela Divisão de Águas do Ministério de Minas e Energia, e pelo “Escritório Técnico O.M.F.” de São Paulo, que foi contratado pelo mesmo Ministério para a elaboração de um relatório sobre o aproveitamento (Zadj, 1963).

Por sua vez, o Comitê Energético da Região Centro-Sul, organizado sob o patrocínio da ONU, realizou estudos minuciosos visando o levantamento do mercado de energia para os vinte anos seguintes, e investigou as possibilidades efetivas da oferta de energia elétrica das usinas existentes e daquelas que estavam sendo projetadas e construídas. O confronto desses trabalhos permitiria realizar “um balanço” das reais necessidades de energia na Região Centro-Sul. Então, o estudo da economicidade dos projetos conhecidos e daqueles que estariam sendo estudados, como era o caso das Sete Quedas, poderia permitir um confronto bastante útil, possibilitando à ELETROBRAS se fixar num programa de prioridade de obras, visando a atender às referidas necessidades, com o melhor aproveitamento dos recursos financeiros disponíveis.

3.2.3 Estudos da Companhia Light

A São Paulo Light, tendo em vista sua responsabilidade no fornecimento de energia elétrica à cidade de São Paulo e áreas circunvizinhas, requereu ao Governo Federal em 1953 uma concessão para realizar o aproveitamento do potencial de energia hidráulica dos Saltos das Sete Quedas. O pedido somente foi deferido em 1956, ao mesmo tempo em que a Comissão Interestadual da Bacia do Paraná Uruguai era autorizada a proceder aos referidos estudos, de modo que a São Paulo Light procurou se concentrar na perspectiva de aproveitamento progressivo do

Rio Paraná, desde a confluência dos rios Paranaíba e Grande, até os Saltos das Sete Quedas. Foi essa concessionária quem primeiro indicou a possibilidade e a conveniência do barramento do rio na altura de Ilha Solteira e do Rebojo de Jupia, aproveitamentos que foram melhor estudados pela CIBPU, e que à época estavam sendo conduzidos pela CELUSA-Centrais Elétricas de Urubupungá SA, empresa de âmbito estadual.

Entre os desníveis naturais provocados pelos Saltos de Urubupungá e das Sete Quedas, os técnicos da São Paulo Light realizaram, também, uma série de estudos e observações, que à época não foram divulgados. As informações colhidas revelaram que os estudos para o aproveitamento do potencial energético das Sete Quedas não chegaram a ser desenvolvidos a ponto de permitir a elaboração, nem mesmo, de um projeto preliminar. Os técnicos da Companhia consideravam possível realizar, a montante dos Saltos das Sete Quedas, três reservatórios de acumulação, com a instalação de usinas geradoras ao pé de cada uma das três barragens. Dessa forma, conseguiriam obter uma melhor vazão regularizada nas Sete Quedas, favorecendo as condições energéticas e técnicas do aproveitamento do desnível natural dos saltos.

3.2.4 Estudos do Serviço de Navegação da Bacia do Prata – SNBP

Em 1958, o Serviço Regional de Obras da 5ª Região Militar, através da atuação do então Cap. Engº Pedro Henrique Rupp, procurou realizar estudos hidrológicos e levantamentos na região das Sete Quedas, visando o conhecimento do regime do rio e a construção de uma usina hidrelétrica, para suprimento de energia à 5ª Companhia de Fronteiras, sediada em Guaíra. Os trabalhos realizados, focando um programa mais amplo, tiveram apoio financeiro do SNBP – Serviço de Navegação da Bacia do Prata, autarquia federal que tinha a tutela do Ministério da Viação e Obras Públicas.

Em janeiro de 1959 foi celebrado convênio entre a 5ª Região Militar e o SNBP, através do qual o Exército se incumbiria da parte técnica e o SNBP ficaria com o encargo financeiro, para construção de uma usina-piloto junto à cidade de Guaíra. Pelo Decreto nº 47.087 de 22 de outubro de 1959, foi o SNBP incumbido pelo Governo Federal de promover o aproveitamento hidrelétrico dos Saltos das Sete Quedas. Essa autarquia, contando com a assistência técnica do Cap. Engº Pedro Henrique Rupp, realizou estudos e observações locais sobre o regime do Rio Paraná, projetou uma usina-piloto com a potência de 4.500 HP e construiu a primeira

etapa dessa obra, com 1.200 KW, em duas unidades geradoras, no local chamado Pedreira, aproveitando uma queda natural de 16 m.

A usina era do tipo a fio d'água, alimentada com águas desviadas do rio Paraná, através de uma barragem vertedora e outra defletora, com extensão de 50 m e 150 m, respectivamente. Essas barragens permitiam que as águas fossem desviadas para um canal de 220 m de extensão, sendo lançadas, através de comportas, diretamente à câmara das turbinas, estas de tipo Francis, com eixo horizontal. O aproveitamento foi realizado sem tubulações, do tipo normalmente chamado "poço", ficando as turbinas totalmente cobertas pelas águas. Foram também construídas as obras de adução para a segunda etapa de motorização (Zadj, 1963).

A energia produzida nessa usina era transmitida na tensão de 13.200 volts até a cidade de Guaíra, onde era distribuída sob a tensão de 220 volts. Esta usina, mesmo que tivesse sido executada a segunda etapa das obras, seria insuficiente para atender as necessidades de energia elétrica no canteiro de obras da usina das Sete Quedas, motivo pelo qual se cogitou a construção de uma usina-piloto com capacidade bem mais elevada, da ordem de 50.000 HP.

Em 20 de agosto de 1960, quando foi inaugurada a primeira máquina (600 KW) da usina-piloto, realizou-se o 1º Congresso de Energia Elétrica de Guaíra, para debater problemas relacionados com os estudos do grande aproveitamento das Sete Quedas. Os anais do Congresso foram publicados no mesmo ano pelo SNBP e aí se encontram algumas considerações e observações de maior interesse, expedidas pelos congressistas. A tese apresentada pelo Cap. Engº Rupp, contém pormenores técnicos sobre a usina-piloto e um relato da posição dos estudos do grande aproveitamento. Verifica-se, por esse trabalho, que até então não se conheciam com precisão as descargas máximas e mínimas do Rio Paraná que, porém, estimava-se *"num mínimo de 15.000 m³/s, considerando os débitos de seus principais afluentes, sem levar em conta as regularizações de montante"*.

Os estudos que foram realizados ao longo das margens do Rio Paraná, de Guaíra a Porto Mendes, indicaram que, à medida que se seguia para jusante de Guaíra, ia aumentando a altura das quedas desde uma altura útil de 30 m na Prainha, até uma altura útil de 100 m, no Arroio Guaçu, a 32 km de Guaíra. Levando em conta, ainda, as condições da margem esquerda, segundo o Cap. Engº. Rupp, *"é perfeitamente plausível considerar que se pode construir um canal, inclusive com ideias de navegação até Porto Mendes, e lá um sistema de eclusas, para que se façam sangrias ou derivações nos pontos mais favoráveis, a fim de criar-se um sistema completo de usinas"*.

hidrelétricas sem que o projeto de uma interfira no da outra. A escolha do Arroio Guaçu para a construção de uma grande usina prende-se ao fato de que as condições topográficas de formação da bacia são extremamente favoráveis". A consideração dessa hipótese mostrava, no entender desse técnico, a possibilidade de instalação de 15.000.000 de cavalos vapor, sem a regularização das vazões do rio. Como conclusão, a tese propunha fosse considerada, como primeiro passo, a construção da usina da Prainha, com 150.000 KW, e a recomendação para que fosse contratado, pelo SNBP, "estudo total do aproveitamento das Sete Quedas, incluindo a parte de navegação".

Mais tarde, em abril de 1961, encaminhando seus estudos por solicitação da Presidência da República, o Cap. Engº. Rupp resumiu em relatório sucinto as linhas gerais dos seus trabalhos sobre o grande aproveitamento de Sete Quedas. A solução proposta considerava que na margem esquerda do Rio Paraná se encontrava um verdadeiro canal natural, canal antigo do rio, que passaria a servir como escoadouro das enchentes, sendo que no atual *canyon* circulariam quase exclusivamente as águas provenientes das turbinas dos diversos aproveitamentos. Entretanto, a proposta do Cap. Engº. Rupp não levava em consideração o parecer do Engº Ernesto Pichler, do IPT de São Paulo que, em relatório elaborado em 1958, havia afirmado a inexistência desse canal natural, conforme exposto no **item 3.2.11 (BOX)**.

3.2.5 Posição dos estudos em meados de 1961

Durante a presidência de Jânio Quadros, o Ministro das Minas e Energia, João Agripino, constituiu em 31 de maio de 1961 um grupo de trabalho para reunir os documentos técnicos até então existentes sobre o aproveitamento do potencial hidrelétrico dos Saltos das Sete Quedas e apresentar conclusões atualizadas a respeito do assunto. Em 20 de julho de 1961 foram apresentadas ao Ministro as conclusões obtidas, que reuniam os estudos realizados. A potência aproveitável em Sete Quedas poderia ser estimada, conservadoramente, em 7 milhões de KW, com base nos dados até então conhecidos. Não havia indicações de que o aproveitamento pudesse ser economicamente justificável. Todo o material colhido não era suficiente para permitir uma decisão quanto à execução imediata do aproveitamento.

3.2.6 Estudos da Comissão Interestadual da Bacia do Paraná Uruguai – CIBPU

A CIBPU, que vinha estudando desde 1953 os recursos econômicos da região, solicitou e obteve do Governo Federal, em 1956, autorização para estudo do potencial hidrelétrico das Sete Quedas (Decreto nº 36.649, de 26 de janeiro de 1956). O relatório da Comissão, relativo ao ano de 1956, contém as observações a seguir: “As variações de nível, que não ultrapassam 3,00 m entre as águas mais baixas e as maiores enchentes, em Guaíra, refletem-se a jusante em variações da ordem de 42,00 m chegando, nas grandes enchentes, calculadas em mais de 30.000 m³/s, a nivelar completamente os dois estirões do rio, mascarando as imponentes cataratas. Esse é o fenômeno que impede qualquer tentativa, atual, de aproveitamento das imensas reservas de energia.

Considerando o relevo dos terrenos marginais ao rio, desde muito acima de Guaíra até o extremo jusante do “canyon”, em Porto Mendes, seria impraticável qualquer tentativa nos moldes de Assuan, no Egito, em que as quedas foram criadas por um represamento artificial, dependendo, portanto, qualquer tentativa de recuperação desse inestimável patrimônio, de uma regularização das descargas do rio, que se deverá obter, naturalmente, das próprias obras que se forem construindo na Bacia do Paraná, dentro dos projetos de eletrificação em marcha acelerada nos estados do Paraná, São Paulo, Minas Gerais e Goiás, principalmente dos projetos de Jurumirim, no Rio Paranapanema, da recuperação integral do Tietê, pelas barragens de Barra Bonita, Bariri, Ibitinga, Lajes e Itapura, do projeto grandioso de Furnas e da sequência de usinas projetadas no Rio Grande, possibilitando obtenção de energia da ordem de 10.000.000 de KW e, finalmente, da construção de Urubupungá. De todo esse sistema depende a possibilidade de solução do problema de Sete Quedas, que exorbita do âmbito dos interesses nacionais para a esfera continental, uma vez que representa uma disponibilidade há muito cobiçada pelos países do Sul do Continente”.

O relatório da CIBPU prossegue com as conclusões e recomendações a seguir: “Do exposto se conclui que os estudos deveriam ser conduzidos no sentido de uma pesquisa sobre os recursos hidráulicos da bacia superior do Paraná, tendo em vista a influência dos diferentes projetos em andamento sobre a regularização das descargas em Guaíra, pesquisa da qual poderia resultar um plano de prioridade e uma previsão do aproveitamento das Sete Quedas, por etapas sucessivas, correspondentes aos estágios progressivos de regularização. Os dados hidrológicos existentes, complementados necessariamente pela instalação de alguns postos fluviométricos e, principalmente, por um trabalho permanente de medição de descargas, em postos-chave da bacia, permitiriam,

dentro de um ou dois anos, através do estabelecimento de possíveis correlações, um estudo bastante preciso do problema” (Zadj, 1963).

Este relato mostrava a posição exata do problema em fins de 1956. A CIBPU prosseguiu na realização dos estudos da Bacia do Rio Paraná, procurando reunir dados pluviométricos e fluviométricos existentes, instalando novas réguas limní-métricas nos pontos-chave e realizando medidas de vazão do rio nos locais de interesse. Instalou no *canyon* a jusante das Sete Quedas limnígrafos registradores, especialmente construídos, com o objetivo de coletar elementos que permitissem melhor conhecer a variação dos níveis d’água abaixo dos saltos. Procurou, também, realizar levantamentos topográficos na área objeto de estudo e solicitou a colaboração do Eng^o Ernesto Pichler, do IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo), que visitou a região (**BOX** no **item 3.2.11**).

Em 1957 a CIBPU obteve nova autorização federal para prosseguir seus estudos (Decreto nº 42.957, de 31 de dezembro de 1957), mas não pôde apresentar ao Governo, no prazo que lhe foi concedido, um anteprojeto para o aproveitamento do potencial hidrelétrico dos Saltos das Sete Quedas.

3.2.7 Estudos do Eng. Sylvestre Souza

Nas comemorações do centenário do Paraná (1953), o naturalista e geólogo Reinhard Maack publicou o Mapa Geológico do Estado do Paraná, na escala 1:750.000. Produzido pelo Serviço de Geologia do Instituto de Biologia e Pesquisas Tecnológicas, o mapa foi um marco pelo seu grau de detalhe, resultado de anos de expedições de reconhecimento e perfilagens no território paranaense.

Um suposto leito antigo, sugerido por Reinhard Maack na margem esquerda do Paraná, indo desde Guaíra até sul do Rio São Francisco, se estabeleceu na época como fator condicionante da viabilização de empreendimentos hidrelétricos para o aproveitamento do caudal das Sete Quedas, uma vez que poderia ser aproveitado para a abertura do canal adutor e construção de uma usina desde Guaíra, onde as condições de vazão do rio poderiam provocar refluxo capaz de afogar as máquinas, até Porto Britânia.

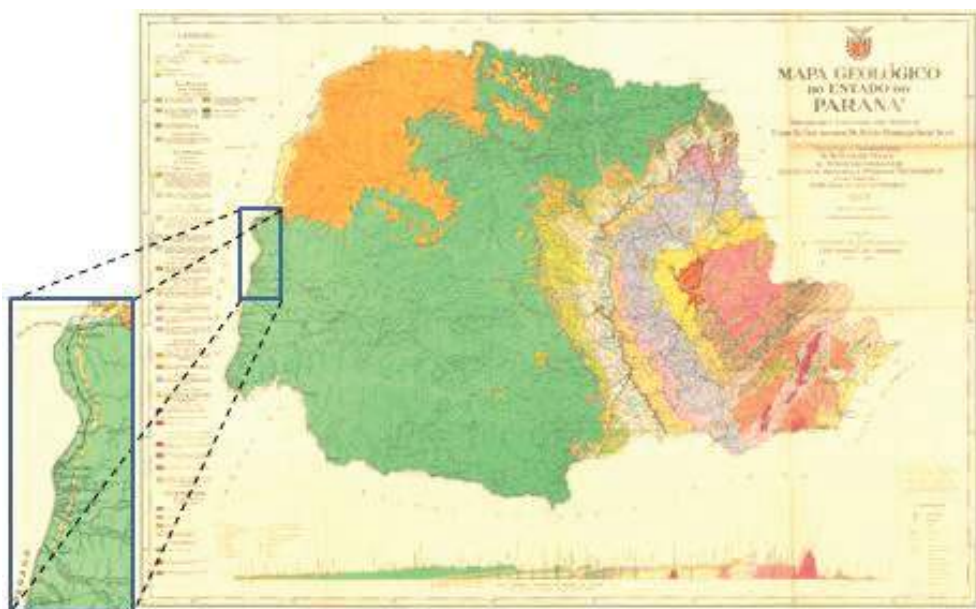
Na área pontilhada do mapa da **Figura 3.1**, no extremo oeste do Estado do Paraná, ao longo da margem esquerda (brasileira) do rio Paraná, foi assinalada a existência de um cordão de sedimentos (em cor amarela), paralelo ao curso do rio, que foi interpretado, na época, como indicativo da existência de um antigo

leito de sedimentos. Os sedimentos seriam, portanto, de origem fluvial. Com base nesse pressuposto, desenvolveu-se a ideia, adotada em projetos das décadas de 50 (Rupp) e 60 (Sylvestre Souza), de implantação de um extenso canal de adução ao longo da margem esquerda do rio Paraná, a jusante de Sete Quedas.

O Eng. Sylvestre Souza, em folheto publicado em 1960, resumindo “sugestões” sobre o aproveitamento do Rio Paraná, na zona de Guaíra, declarou que “*não sendo possível a utilização direta do Salto de Sete Quedas, pensamos em desviar parte do rio, canalizando-o pela margem esquerda até um ponto mais favorável a jusante do estreito, onde as descargas não viessem a ser prejudicadas pelas cheias. Nesse propósito, estudando no mapa aquele trecho, desde a Ilha Grande ou das Sete Quedas, até Porto Britânia, concluímos que há possibilidade de ser feito um canal, conduzindo as águas até Porto Britânia, se o quisermos, pois verificamos que a curva de nível 200 acompanha a barranca do rio desde Porto Britânia até Guaíra. Sendo, logo a jusante de Guaíra, acima das quedas, a cota dentro do rio, de 203 m, presumimos que os estudos topográficos a serem feitos nessa zona, nos conduzirão a uma solução muito pouco dispendiosa para a construção do canal*”.

FIGURA 3.1

Mapa Geológico do Estado do Paraná, na escala 1:750.000. Assinalada a área de interesse, onde aparece o cordão de “sedimentos”.



Fonte: Reinhard Maack, 1953, modificado.

Na concepção do Eng^o Sylvestre Souza, a localização da usina deveria ser cuidadosamente estudada, levando-se em consideração: 1^o) as condições de vazão do rio a jusante, pela razão exposta acima; 2^o) a possibilidade de tornar-se a navegação ininterrupta, com o canal e as eclusas para transposição dos saltos. A potência a ser instalada foi pelo Eng. Sylvestre Souza avaliada na ocasião em 13.860.000 KW, admitindo uma vazão mínima de 18.000 m³/s e um desnível aproveitável, livre de enchentes, de 77 metros.

O Eng. Sylvestre Souza declarou, no entanto, que, uma vez regularizada a vazão do rio, seria possível instalar no conjunto Guaíra-Porto Mendes uma potência de 25 milhões de KW. Sugeriu, contudo, que fossem instalados inicialmente 600 mil KW para atender ao Estado do Paraná e, numa segunda etapa, mais 600 mil para atender à demanda do Sul do País. Concluiu sugerindo: a) a construção de um canal de Guaíra a Porto Mendes ou Porto Britânia; b) a construção de barragens necessárias em todos os tributários do Rio Paraná, desde Guaíra; c) que as comportas de alimentação do canal deveriam ser localizadas em Guaíra, uma vez que o canal deveria partir daquela cidade; d) que o desnível a ser aproveitado, livre de enchentes, seria superior a 70 m; e) que os estudos deveriam abranger o potencial total possível de ser aproveitado, embora só fossem instalados 600 mil KW na primeira etapa.

Essas sugestões do Eng. Sylvestre Souza, embora publicadas em 1960, parecem ter sido apresentadas ao “Grupo de Energia Elétrica” da Federação das Indústrias do Estado do Paraná já em 1956. Estimava, na ocasião, em Cr\$ 6 bilhões a instalação dos primeiros 600 mil KW, adotando, para base de cálculo, o preço de Cr\$ 10 mil por KW instalado. E, como o dólar oscilava, na ocasião, em torno de Cr\$ 60,00, o custo orçado poderia ser expresso por 120 milhões de dólares. Chegou, então, a ter entendimentos iniciais com um grupo financiador japonês e encaminhou o resultado desses estudos à Presidência da República.

Um pouco mais tarde, em 1961, ainda o Eng. Sylvestre Souza, em memorial apresentado ao Ministro Gabriel Passos, apresentava outra sugestão para realizar o aproveitamento das quedas, agora com uma nova concepção para as obras. Declarou então que o potencial do Rio Paraná na zona de Guaíra, estimado em, no mínimo, 25 milhões de KW para a etapa final (completo aproveitamento), apresentava a vantagem de oferecer um grande número de soluções parciais para o aproveitamento progressivo. Dentre as soluções já sugeridas destacaram-se as três a seguir:

1ª) Aproveitamento parcial, como primeira meta de 1.000.000 KW, com obras civis até 4.500.000 KW, logo abaixo da cidade de Guaíra, num local denominado Prainha, com possível aproveitamento de desníveis maiores, prolongando-se a barragem na margem esquerda do “canyon”, a jusante.

2ª) Construção da barragem em Prainha, nos moldes do exposto acima. Com o Rio Paraná represado em Guaíra até a cota 224,5 m, estudar a possibilidade de inversão do seu curso, da barragem à foz do Rio Piquiri, inversão do Piquiri até seu primeiro afluente da margem esquerda, por meio da construção de um canal ligando o tributário do Rio Piquiri a um tributário do Rio São Francisco. A construção desse canal viabilizaria aproveitamentos sucessivos dos desníveis do Rio São Francisco, até a completa diversão do Rio Paraná, de modo a possibilitar elevar-se a grande barragem em Porto Mendes, que permitiria implantar o potencial mínimo de 25 milhões de KW. Essa barragem, com o vertedouro na cota 254 m (descarga da Usina de Jupia, do Sistema Urubupungá), criaria um mar interior com cerca de 650 km de extensão e largura média de 35 km. Sendo a tomada d’água na cota 244 m, essa altura facultaria um armazenamento de 200 bilhões de m³ de água, o que possibilitaria a regularização anual da vazão do rio.

3ª) Construção em Porto Mendes da primeira parte da barragem definitiva, com vertedouro provisório na cota 212 m, permitindo o aproveitamento do desnível de cerca de 100 m, com o potencial inicial de 10 milhões de KW. Seria construída a parte central da barragem à altura definitiva, ficando as laterais, de menor altura, sobre as margens do *canyon*, para serem levantadas após superada a demanda de 10 milhões de KW, para, no final, atingir, com vertedouro na cota 254 m, o potencial mínimo de 25 milhões de KW.

Foi indicado, assim, pelo Eng. Sylvestre Souza, que o local da barragem se localizaria 1,5 km a jusante de Porto Mendes. Deveria ser uma barragem do tipo de gravidade, constituída em concreto, com uma altura variável, que deveria alcançar 200 m no eixo do rio. Teria 220 m de extensão no *canyon* e 2.280 m sobre as margens. O vertedouro deveria ficar na cota 254 m. O reservatório formado pela barragem assim construída provocaria a inundação de 22.750 km², permitindo regularizar a vazão do rio para assegurar uma descarga turbinável de 20.000 m³/s. A produção anual da usina seria da ordem de 70 bilhões de KWh.

A barragem construída em Porto Mendes, além de fornecer o KW a baixo custo, traria real vantagem ao transporte, pois que, regularizando a navegação do rio, acima de Guaíra, permitindo-a de Guaíra a Porto Mendes, pela represa,

possibilitaria a construção de eclusas para a transposição da diferença de nível por navios de grande calado, tornando praticável a navegação, por aquavia, do *hinterland* brasileiro ao Oceano Atlântico.

Para atingir um fator de carga econômico, era sugerida a construção da usina de Guaíra para suprir até 4.500.000 KW, como etapa básica para o desenvolvimento da absorção de energia. O desvio do rio, diante do grande volume das águas, que impedia a construção da barragem pelos processos normais, seria quase uma exigência técnica. Assim sendo, a construção da primeira etapa até 4.500.000 KW em Guaíra, facilitaria a inversão da parte do curso do Rio Piquiri a fim de conseguir-se um canal que, jogando as águas do Piquiri no Rio São Francisco, permitiria a diversão do Rio Paraná, possibilitando a construção da barragem de Porto Mendes (Zadj, 1963).

3.2.8 Relatório do Overseas Electrical Industry Survey Institute - OEISI

O estudo realizado por um grupo de técnicos japoneses, resumido no relatório denominado “The Guaíra Power Project”, objetivava a construção de uma usina hidrelétrica com a potência inicial de um milhão de KW, como estágio preliminar do desenvolvimento do potencial dos Saltos das Sete Quedas. Os entendimentos iniciais com o OEISI para realização desse trabalho datam de setembro de 1960 e devem-se à Federação das Indústrias do Estado do Paraná e ao Serviço de Navegação da Bacia do Prata, que, animados com os trabalhos apresentados pelo Eng. Sylvestre Souza, desejavam construir uma usina hidrelétrica de 600.000 KW em Guaíra.

Recebendo um convite para realizar os estudos necessários, com apoio do Governo Japonês, o OEISI organizou um grupo de trabalho liderado pelo Eng. Tomisaburo Yokozawa, especialista em projetos hidrelétricos. Os técnicos japoneses estiveram em nosso país de 1º de abril a 1º de maio de 1961 e parte desse tempo se alojaram em Guaíra, onde procuraram coletar elementos de campo e realizar as investigações relacionadas ao estudo da usina. O projeto por eles elaborado foi considerado de caráter preliminar.

O esquema básico do estudo apresentado consta de uma barragem mista, parte em terra compactada e parte em concreto, com extensão aproximada de 4.700 m, ligando várias ilhas que entremeiam as quedas. A altura da barragem de concreto, praticamente uniforme, de 7,5 m, foi adotada para conservar o nível

das águas na cota 219,5 m para assegurar profundidade suficiente para a navegação a montante de Guaíra. A barragem de concreto teria 3.500 m de extensão e exigiria cerca de 320.000 m³ de concreto. A barragem de terra, com extensão de 1.200 m e altura média de 17 m, consumiria 324.000 m³ de terra compactada. A usina seria construída no local denominado Prainha, situado a cinco km do centro de Guaíra, na margem esquerda do Rio Paraná, num grotão que dista 1.000 m do *canyon*. Seria uma usina a fio d'água, utilizando apenas o desnível natural de 43 m, com uma vazão de 3.000 m³/s. Na vazante, seria mantida uma descarga mínima de 262 m³/s para alimentar as quedas, permitindo conservar o principal atrativo para os turistas, que são os saltos.

A usina teria 10 unidades geradoras de 100.000 KW cada uma, totalizando a potência de um milhão de KW em sua primeira etapa, produzindo, anualmente, 8.200.000.000 KWh de energia. Numa segunda etapa essa potência poderia ser duplicada pela regularização das vazões do rio. Indica o relatório que uma parte substancial da energia gerada na Usina de Guaíra deveria ser enviada para São Paulo, em uma linha de transmissão de 380.000 volts, com dois circuitos e 750 km de comprimento. A energia restante supriria o Estado do Paraná, particularmente o norte do estado, através de linha de transmissão com 230.000 volts, com dois circuitos e 300 km de extensão. O custo total do projeto apresentado, inclusive as linhas de transmissão, foi orçado em Cr\$ 84.037.500.000,00 ou 336.150.000 dólares, ao câmbio vigente na época. O custo do KWh de energia foi estimado em Cr\$ 1,24 (ou US\$ 0,496), considerado suficientemente baixo para quase todo o consumo industrial (Zadj, 1963).

3.2.9 Relatório OMF (Octávio Marcondes Ferraz)

Segundo a reportagem de Luciano Zadj (1963), em março de 1962 o Ministério das Minas e Energia, na gestão de Gabriel Passos, contratou com o Escritório Técnico OMF, engenheiros consultores de São Paulo, liderados pelo Eng. Otávio Marcondes Ferraz, a elaboração de *“um estudo sucinto sobre o aproveitamento hidráulico do desnível existente no Rio Paraná, denominado Sete Quedas, junto à cidade de Guaíra, no Paraná, coletando dados e procedendo levantamentos expeditos que se fizessem necessários, de sorte a permitir a elaboração do Relatório Preliminar (Preliminary Report), cujo conteúdo permita ao Governo tomar um conhecimento de causa, decidindo sobre a elaboração do anteprojeto, projeto e execução das obras”*.

FIGURA 3.2

Capa do relatório preliminar do Escritório Técnico.



Fonte: OMF (1963)

Esse relatório, elaborado no curto prazo, reuniu um grande acervo de dados hidrológicos e topográficos, analisou objetivamente as possibilidades do aproveitamento do desnível existente entre Guaíra e Porto Britânia e apresentou uma solução técnica para o aproveitamento, indicando suas vantagens físicas e econômicas, abordando também o problema da continuidade da navegação, contornando os Saltos.

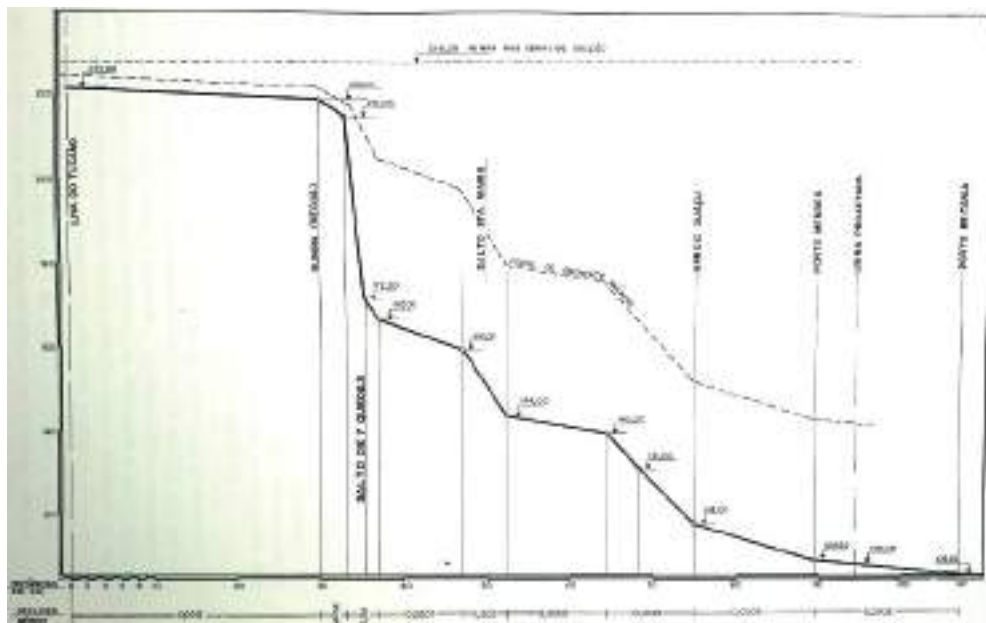
Foi considerado o mais completo trabalho até à época realizado sobre Sete Quedas, embora o próprio Eng^o Marcondes Ferraz e seus colaboradores fizessem questão de frisar que se tratava de estudo preliminar. Em resumo, transcrito dos originais do relatório, informava-se que havia sido estudado, embora de modo expedito, o comportamento da variação das descargas do Rio Paraná e das conseqüentes variações de desnível, procurando-se, após análise, as melhores condições de rendimento energético possível, em bases econômicas. Uma vez fixadas

as características consideradas ótimas, havia sido selecionada uma localização possível e aparentemente vantajosa para a usina geradora.

Segundo consta do relatório: “O exame do perfil longitudinal do rio Paraná entre Guaíra e Porto Britânia (**Figura 3.3**) mostra imediatamente que o rio apresenta um patamar com muito pequeno declive a montante do Salto, os rápidos que constituem o Salto e que têm uma extensão aproximada de 5,5 km e finalmente um trecho de 54 km até Porto Mendes com declive médio de 0.0012 e finalmente o trecho entre este e o Porto Britânia com um declive médio de 0.00023. Nas águas baixas (estiagem normal), as cotas são: A montante de Guaíra, 219; A jusante do Salto, 167; Em Porto Mendes, 109,5; Em Porto Britânia, 105,5”. Nas cheias, o NA sobe de cerca de 2,6 m, a montante do Salto e 37,4 m a jusante do Salto, vale dizer que o desnível do Salto se reduz de 34,8 m, ou seja 67%. (...) Do exposto conclui-se que não é nem tecnicamente nem economicamente, nem socialmente aconselhável a adoção da solução do primeiro desnível”.

FIGURA 3.3

Perfil longitudinal do rio Paraná entre Guaíra e Porto Britânia. Em linha tracejada, o perfil de enchente máxima.



Fonte: OMF (1963)

“É portanto aconselhável que se localize a usina um pouco a jusante de Porto Mendes em sítio convenientemente escolhido. Não parece que a localização em Porto Britânia seja vantajosa, pois o aumento do comprimento do canal não é compensado pelo pequeno aumento de queda”.

Afirmava o relatório que uma investigação geológica superficial e sumária havia confirmado a presença de uma formação basáltica própria para a implantação de estruturas importantes ou escavações de grande porte para obras subterrâneas. Considerando o problema da escavação, foi examinado um modo de se ligar o patamar formado pelo Rio Paraná, a jusante de Porto Mendes, com aquele que termina em Guaíra, a montante desta localidade. Esclarecia, a respeito, que a questão não estava incluída no estudo, mas que havia sido examinada uma solução, o que não excluiria outras também possíveis.

Foi idealizada a construção de uma barragem mista, vertedouro e comportas para controlar a descarga e evacuar excessos até 75.000 m³/s, sem causar perturbações na área montante. Uma estrutura adequada controlaria a admissão de água para um canal paralelo ao rio, constituído, tanto quanto possível, de um dique com cerca de 60 km de extensão, localizado na margem esquerda do Paraná, em território brasileiro e tendo como outra parede o terreno natural. Na estrutura das obras de admissão seria construída uma eclusa para navegação. O canal, cuja parede teria nível constante, comportaria na sua parte final um reservatório, ou câmara de compensação, seguida de um dispositivo de tomada d'água com os competentes aparelhos para o controle de descarga. Aliás, todo o canal, pela sua secção excessiva, constituiria uma verdadeira câmara de compensação. Da tomada d'água partiriam os condutos adutores, cujo diâmetro seria de cerca 12 m. Esses alimentariam 21 grupos turbogeradores (2 de 250 MW e 19 de 500 MW), totalizando a considerável potência de 10 milhões de KW e produzindo uma quantidade de energia quase igual a 67 bilhões de KWh por ano, ou seja, cerca de três vezes o consumo do Brasil na época. O valor venal da produção seria de cerca 116 milhões de dólares, quando completada a usina.

Na extremidade do canal, isto é, nas proximidades da usina, seria rasgado um corte de rocha onde seriam instalados os diversos degraus de eclusas que permitiriam aos navios vencer o desnível de 120 m e penetrar na parte superior do Rio Paraná, através do canal e da eclusa construída nas obras de admissão. Desta maneira seria possível a um navio ir desde Goiás e Minas Gerais até Buenos Aires e Cuiabá. A obra de maior vulto seria o dique formador do canal, que exigiria um

movimento de terra de cerca de 120 milhões de m^3 . Para ter uma ideia do significado do algarismo, basta lembrar que para uma usina de apenas 300 mil KW (em Donzère-Medragon, na França) o canal exigiu a movimentação de 52 milhões de m^3 de terra.

Um dos aspectos mais interessantes do Estudo Preliminar do Eng^o Marcondes Ferraz era a perspectiva que abriu no que dizia respeito à navegação do Rio Paraná. Apresentava uma solução baseada na construção de uma escada de eclusas na extremidade sul do canal, nas proximidades da usina, e outra nas obras de admissão. O desnível a vencer ia da cota 105 m à cota 228 m, ou seja, 123 m, que seriam vencidos em sete degraus de 17,60 m. As eclusas seriam instaladas em um corte praticado na margem esquerda do Rio Paraná, com extensão de cerca de 1.540 m. A largura do corte seria de 23 m, de modo a proporcionar duas passagens laterais para inspeção e custeio. Se o tráfego viesse a se desenvolver grandemente, poderia ser prevista uma segunda escada de eclusas (uma ascendente e outra descendente) para acelerar a operação de passagem.

Abordando os aspectos hidrológicos e geológicos e, após uma série de considerações, o relatório da OMF chegava à análise das descargas de possível utilização. Para isso, examinava o comportamento das descargas naturais que estariam disponíveis quando se verificasse uma relativa regularização em virtude das grandes obras que se estavam realizando a montante de Sete Quedas. Quanto às descargas naturais, observava que a mínima verificada em Guaíra seria de $2.249 \text{ m}^3/\text{s}$ e que o mínimo valor da estatística de 1933 a 1961 havia ocorrido em novembro de 1934, com $2.427 \text{ m}^3/\text{s}$. O máximo valor observado, em 1929, alcançou $64.996 \text{ m}^3/\text{s}$. Na estatística de 29 anos (1933-1961), o máximo observado foi em 1947, com $45.965 \text{ m}^3/\text{s}$. O valor básico para as áreas de evacuação das cheias foi fixado em $75.000 \text{ m}^3/\text{s}$.

Em relação à geologia, o relatório da OMF citou o relatório do Eng^o Ernesto Pichler, executado por solicitação da Comissão Interestadual da Bacia do Paraná-Uruguai, frisando que este informava ser a geologia geral da região representada ao longo do Rio Paraná, no trecho correspondente à Ilha Grande ou Sete Quedas, por formações quaternárias fluviais. Para o sul de Guaíra, estende-se vasto lençol de derrames basálticos representados pelo *trapp* do Paraná, constituído por diabásios, basaltos, meláfiros (basaltos vesiculares) e arenitos intertrapeanos (Botucatu). O referido relatório, datado de 1958, é apresentado no BOX do **item 3.2.11**.

O relatório OMF acrescentou ainda que, depois de uma primeira apreciação do estudo preliminar, caberia iniciar, quanto antes, um trabalho minucioso de pesquisa geológica, estabelecendo um plano de sondagens, amostragens, ensaios físicos e mecânicos, tanto do material rochoso ou granular de qualquer espécie. Particular atenção merecia o exame do fissuramento da rocha acompanhado de provas do comportamento da água sob pressão, para orientar processos de controle da percolação, especialmente no sistema de barragem e dique formados no lago-canal adutor.

Descrevendo a obra, diz o relatório OMF:

“Uma barragem mista, parte em vertedouro e parte em comporta, localizada no topo dos Saltos, força as águas a se dirigirem para a margem esquerda do rio. Aí, um dispositivo permite o controle da admissão das águas no canal adutor. Este é formado por um dique de terra, com altura média de 28 m, que constitui uma de suas paredes, sendo a outra constituída pelo terreno natural. O canal, portanto, cuja margem esquerda segue a curva de nível do terreno, forma, de algum modo, lago alongado que é a um tempo canal adutor e câmara de regulação e de carga da usina, que será localizada em sua extremidade inferior (Figuras 3.4 a 3.6).

Neste ponto, situado nas proximidades de Porto Mendes Gonçalves, será construída a tomada d’água de onde saem poços adutores que alimentam as turbinas instaladas em três casas-de-máquinas subterrâneas com sete grupos geradores em cada uma. Os transformadores elevadores serão colocados entre a tomada d’água e a margem do rio.

Nas obras de admissão e na extremidade sul do canal serão construídas eclusas que permitirão a navegação no trecho Porto Mendes-Guaíra, ligando assim o alto e baixo Paraná. A barragem prevista terá direção NW-SE. A ombreira NW na margem direita do rio estará em território de Mato Grosso. A extremidade SE ficará na margem esquerda do rio. A sua crista será na cota 231 para um plano d’água de cota máxima de 228,25 m. Uma parte da barragem será em vertedouro cuja crista estará na cota 228. Uma outra parte da barragem, constituída por pilares e comportas, permitirá a evacuação das cheias, previstas para o máximo de 75.000 m³/s”.

FIGURA 3.4

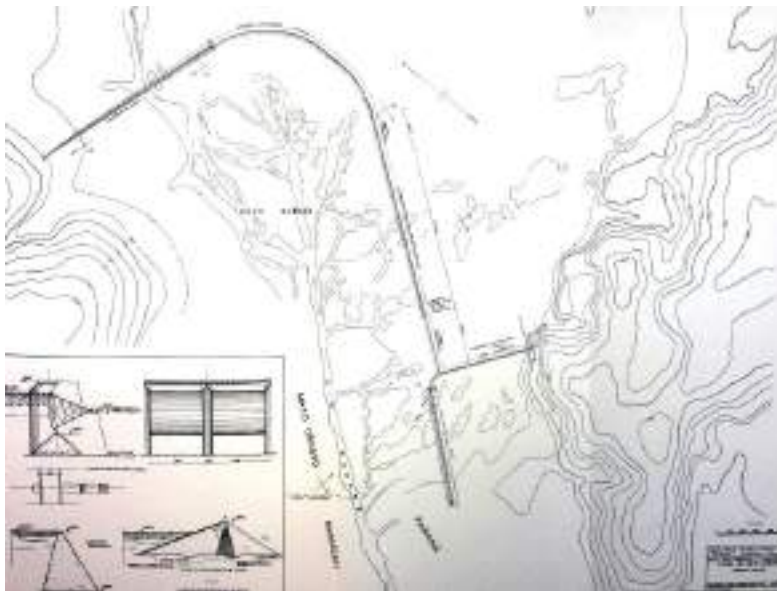
Aproveitamento dos Saltos de Sete Quedas – Esquema geral do aproveitamento proposto pelo estudo da OMF.



Fonte: OMF (1963)

FIGURA 3.5

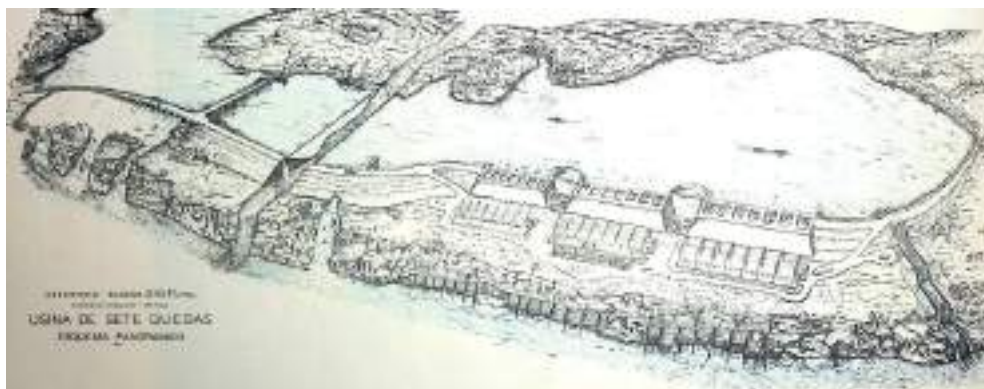
Aproveitamento dos Saltos de Sete Quedas - Arranjo do barramento proposto pelo estudo da OMF.



Fonte: OMF (1963)

FIGURA 3.6

Aproveitamento dos Saltos de Sete Quedas – Esquema panorâmico do aproveitamento.



Fonte: OMF (1963)

“A extensão da barragem será de cerca de 3.200 m. O canal será constituído por um dique em terra, a meia encosta, por assim dizer, e se estenderá por 60 km; terá mais o aspecto de um lago alongado com sua margem esquerda de linha irregular seguindo a curva de nível do terreno. A massa d’água no canal é de aproximadamente 1 bilhão de m³. O dique formando a parede do canal é constituído de terra. Terá a largura de 10 m na crista e sua seção média será de 2 mil m². Nas grotas atravessadas (Guaçu, Taturi, Salamanca, Zororó, Bandeiras) serão organizadas descargas de fundo não só para limpeza como também para o esvaziamento total do canal em caso de necessidade. O dique terá, em sua constituição, um núcleo impermeável e toda a terraplenagem será perfeitamente compactada”.

“Quanto à casa de força,” afirma o relatório que “dadas as circunstâncias locais (geologia, grandes variações de nível, etc), a solução de usina subterrânea aparece como natural. Embora maiores investigações sejam necessárias, tudo indica que esta solução não encontrará dificuldades e permitirá resolver vários problemas. Com relação ao desnível, ficou a cota de montante fixada em 228,25 e a jusante em 108,00, ou seja, uma queda bruta de cerca de 120 metros. Sendo as perdas de carga, no canal, adução e descarga, de 1,41 m, ela foi fixada em 3 m e a queda líquida será portanto de 117 m. Adotando-se um fator de carga de 0,5 mínimo, a potência disponível será de 10 milhões de KW. Os grupos geradores serão distribuídos por 3 casas-de-máquinas, subterrâneas, com tomadas d’água independentes. A tomada d’água se constitui por uma série de 7 câmaras, controladas por 2 comportas-setor que obturam a entrada d’água nos tubos adutores.

Cada uma das casas-de-máquinas ocupará uma galeria em forma oval, com 68 m de altura, 39 m na sua maior largura e 326 m de comprimento. A turbina e o gerador estão embutidos. Os tubos adutores, em número de 7, têm um diâmetro de 12 m. Cada tubo alimenta uma turbina de 680 mil HP, com uma velocidade de 81,8 r.p.m., conjugada a um gerador de 500 mil KW. A descarga seria feita através de um túnel de 15 m de diâmetro com cerca de 500 m de extensão. A produção média da usina foi estimada em 67 bilhões de KWh por ano, ou seja, cerca de três vezes o atual consumo do Brasil. O principal mercado consumidor, conforme esclarece o Relatório, capaz de absorver as quantidades maciças de energia gerada na usina de Sete Quedas, situa-se na região servida pelo Grupo Light; trazendo as linhas de transmissão até São Paulo, a energia de Sete Quedas poderá atingir (por transferência de carga de Furnas, Peixoto, Cubatão) Guanabara e Belo Horizonte; também, por transferência de carga de Urubupungá, a energia das Sete Quedas poderá atingir Mato Grosso, o Triângulo Mineiro e o sul de Goiás.

O Relatório prossegue lembrando que “no atual estágio dos conhecimentos técnicos e das realizações práticas, parece não ser aconselhável o emprego de corrente contínua, a não ser em linhas de extensão superior a mil km. No campo da transmissão em corrente alternada, tanto na Europa como nos Estados Unidos, já existem em planejamento linhas em extra-alta tensão; na URSS, já operam linhas de 500 KV; nesse mesmo país e nos EUA, estudam-se em rede experimental, transporte em tensões ainda mais elevadas (650 e 750 KV”.

Assim, no estudo preliminar do Escritório O.M.F. “foi adotado como valor linha de 500 KV, usando da experiência de linhas dessa classe, adquirida nos EUA, Suécia e União Soviética. As linhas tronco poderão atingir os dois grandes centros distribuidores: Botucatu (SP) e Porto União (PR). Do centro de Porto União irradiariam 3 linhas, sendo 1 para Curitiba, 1 para Porto Alegre e 1 para Florianópolis. Após a elaboração do projeto, as obras – recomenda o Relatório – deveriam ser iniciadas para equipar a totalidade da potência em regime de aproveitamento progressivo rápido que antecipasse o crescimento das necessidades energéticas do País. Com um programa de 3.250 MW a serem instalados inicialmente (primeira etapa), isto é, 32,5% do total possível, as despesas seriam de 516 milhões de dólares, para uma receita de 53 milhões provenientes da venda de 21,2 bilhões de KWh, o que conduz a um custo médio de 0,25 centavos de dólar por KWh nos bornes da usina.

A eclusagem inferior e superior custaria 6 milhões de dólares. Ela permitiria, se bem operada, movimentar quantidades de carga tais que a obra se justificaria amplamente. Da soma necessária para execução das obras completas (900 milhões de dólares),

metade seria em moeda forte. Neste custo não estão incluídas as linhas de transmissão. Considerando o fator de carga e suas variações até a produção total de 66.760 milhões de KWh, o custo real do KWh seria de 0,00148 de dólar, ou seja, valor extremamente baixo que será capaz de transformar o panorama econômico da região Centro-Sul o País, com as mais intensas consequências políticas e sociais”.

3.2.10 Estudos do Eng. Souza Leão

O Eng^o Luiz Antônio de Souza Leão, da Divisão de Águas do Ministério das Minas e Energia, estudando o mesmo assunto, apresentou seu parecer, reproduzido a seguir.

“A fim de aproveitar racionalmente o potencial das Sete Quedas, é de toda conveniência a criação de um reservatório de acumulação que garanta uma regularização para até 8.000 m³/s, em lugar dos 2.249 m³/s a que tem descido o Rio Paraná. E, também, a barragem que criar esse reservatório facultará um aumento da queda, que será de dupla utilidade nos períodos de enchentes. Pois compensará o empolamento (elevação de jusante) e, assim, atenuará consideravelmente a redução da queda, característica desses períodos de águas altas. Para facilitar o aproveitamento do desnível global entre Guaíra e Porto Mendes Gonçalves, será aconselhável subordiná-lo em dois degraus, executando o segundo próximo a Porto Mendes Gonçalves”.

Tendo por base os elementos hidrológicos e topográficos reunidos no Relatório OMF, o Eng^o Souza Leão apresentou 4 sugestões para o encaminhamento dos anteprojetos do aproveitamento hidrelétrico das Sete Quedas:

“O primeiro (Esquema A), propõe a construção de 6.100 m de barragens. O represamento do rio até a cota 250 inundaria uma área da ordem de 7.600 km², com um armazenamento de cerca 60 bilhões de m³ utilizáveis. A casa-de-força ficaria situada ao pé da barragem e teria o comprimento de 1.500 m, abrigando máquinas que totalizariam 8.200.000 KW de potência instalada, para um fator de carga de 0,5. O desnível aproveitável seria de 71 m. O segundo degrau em Porto Mendes Gonçalves, seria realizado através o barramento do “canyon”, de modo a manter o nível d’água de montante na cota máxima de 180 e o de jusante na cota 117. O desnível normal seria de 45 m, aproveitando a mesma descarga regularizada de 8.000 m³/s. Assim, a potência instalada poderia ser de 5.700.000 KW”.

As três outras sugestões propostas pelo Eng^o Souza Leão mantêm a usina indicada para Porto Mendes Gonçalves e resumem-se, assim, em “variantes” para a Usina de Guaíra. Em duas das variantes a altura da barragem parece reduzida para manter o nível d’água na cota 240 m, diminuindo assim a área inundada, o desnível aproveitável e a vazão. Consequentemente fica reduzida a potência instalada.

Na primeira dessas três variantes (Esquema B) a barragem, com um desenvolvimento de mais de 2.200 m, seria mantida na cota 250 m, permitindo aproveitar um desnível de 51 m, com uma potência instalada de 9.000.000 KW. Na segunda variante (Esquema C), a barragem permitiria a retenção na cota 240 m, para aproveitar um desnível de 35,4 m, com uma potência instalada de 4.640.000 KW. Na última variante (Esquema D), a barragem, com o mesmo desenvolvimento do Esquema B, permitiria o represamento na cota 240 m, aproveitando o desnível de 41 m, para garantir uma potência instalada de 5.040.000 KW.

Os sangradouros ou vertedouros da barragem de Porto Mendes, adverte o Eng^o Souza Leão, deveriam ser estabelecidos de maneira que em nenhum período interferissem com o nível de aproveitamento da Usina Superior de Guaíra. Tendo em conta os problemas de desvio do rio, para a construção da barragem e as possibilidades de navegação, declara o Eng^o Souza Leão que, devido à largura da crista da cachoeira, semelhante à da Cachoeira Dourada, as ensecadeiras seriam muito facilitadas pela pouca profundidade, o que contribuiria consideravelmente para a rapidez de sua execução. O canal de navegação, com cerca 30 m de largura, poderia ser rasgado na ombreira esquerda da barragem, ou em garganta lateral, contornando o trecho em cachoeira até a jusante de Porto Mendes.

3.2.11 BOX – Relatório do Eng^o Ernesto Pichler

Em janeiro de 1958, a CIBPU – Comissão Interestadual da Bacia Paraná-Uruguaí solicitou a colaboração do IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, para realização de uma apreciação geológica na região dos Saltos de Sete Quedas, entre Guaíra e Porto Britânia, onde se supunha existir um antigo leito do rio Paraná, correndo paralelamente ao curso atual do rio, em cota mais elevada, ao longo da margem esquerda.

A hipótese da existência de um paleocanal se baseava no mapa geológico do Estado do Paraná, de autoria de Reinhard Maack, editado em 1953 na escala 1:750.000, que assinalava naquela região adjacente ao rio Paraná a existência de

um cordão de sedimentos, possivelmente de origem aluvionar, paralelo ao curso do rio (**Figura 3.1**). Com base nesse pressuposto, diversas alternativas de aproveitamento hidrelétrico haviam sido elaboradas, na época, baseadas na ideia de conduzir as águas desde as Sete Quedas até a área de Porto Mendes ou Pôrto Britânia, aproveitando o suposto canal existente e viabilizando, assim, um aproveitamento hidrelétrico de grande potência, totalmente desenvolvido em território brasileiro.

Coube ao Eng^o Ernesto Pichler, chefe da seção de Geologia Aplicada do IPT, a tarefa de averiguar a validade da hipótese, inspecionando a área, percorrida por terra e também por sobrevoo (**Figura 3.7**).

FIGURA 3.7

Sobrevoo de Porto Britânia.



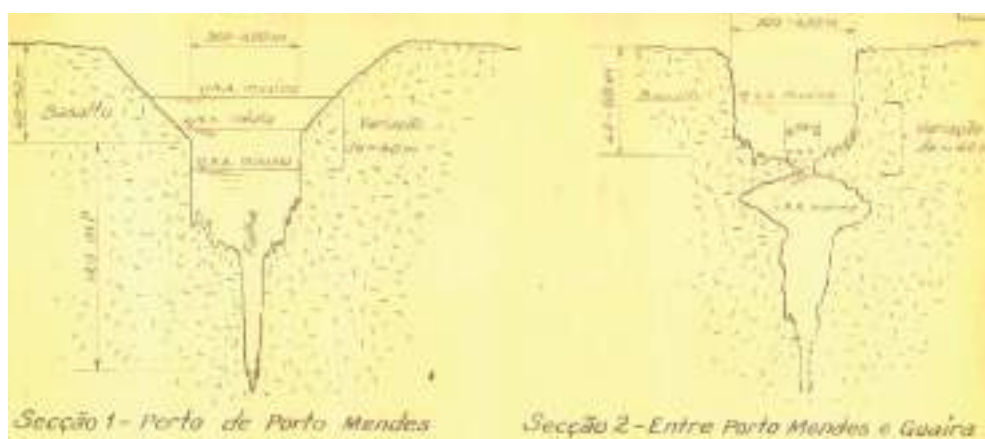
Fonte: Pichler, 1958.

Em seu relatório, emitido em abril de 1958, o Eng^o Pichler registrou as observações realizadas em sua viagem à região, informando não ter observado indícios que comprovassem a existência de um antigo leito na área referida. Pichler teve a atenção chamada pela ocorrência generalizada das rochas basálticas, por suas diferenciações litológicas entre variedades holocristalinas (basalto compacto), vesiculares (meláfiro), além de um contato entre derrames assinalado por delgada camada de arenito “recozido” e alguns diques de arenito grosso. Descreveu os solos de capeamento e o sistema de diaclasamento típico do basalto denso, ausente nos corpos de basalto vesicular.

Em Porto Mendes, descreveu a configuração do profundo canal do rio Paraná e elaborou uma seção hipotética do *canyon*, estimando a profundidade da lâmina d'água em 120 metros, com oscilação de 40 metros do nível d'água entre enchente e vazante. Entre Porto Mendes e Guaíra, descreveu uma seção do rio com somente 50 metros de largura, tendo apresentado uma seção hipotética correspondente a esse trecho de estrangulamento (**Figura 3.8**).

FIGURA 3.8

Seções esquemáticas e hipotéticas pelo rio Paraná, entre Guaíra e Porto Britânia.



Fonte: Pichler, 1958.

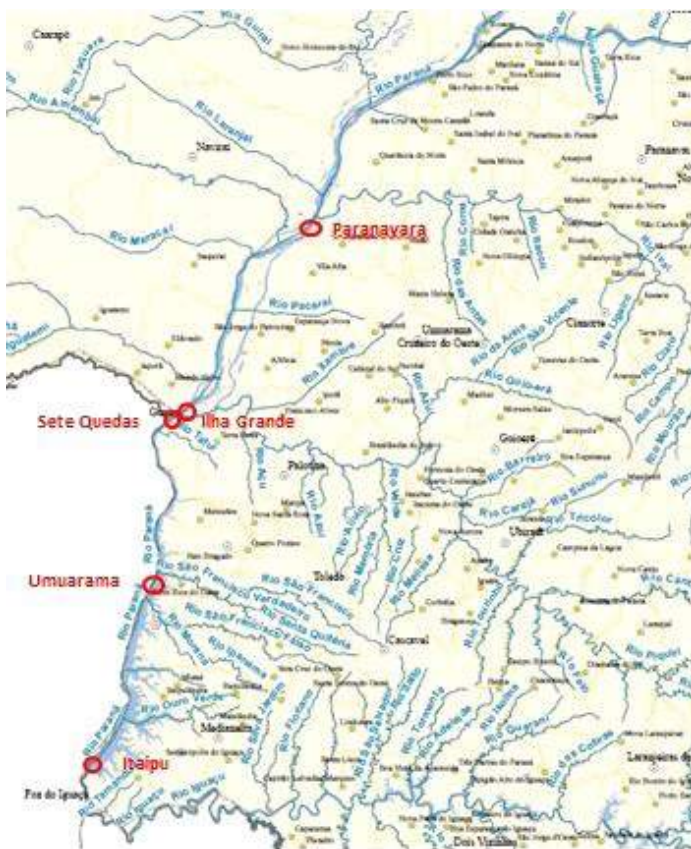
Apesar de ter descartado a existência de um canal fluvial pretérito acompanhando o traçado do rio Paraná ao longo da margem esquerda, Pichler não excluiu a possibilidade de desviar o rio por essa margem, chamando a atenção para a necessidade de coletar dados hidrográficos precisos, realizar um levantamento topográfico de maior precisão do que o existente, executar seções batimétricas, por geofísica, ao longo do trecho de interesse, melhorar o conhecimento geológico e estender os estudos a uma faixa equivalente do lado do Paraguai.

3.2.12 Resumo das alternativas históricas

Permanecendo somente no principal eixo de drenagem da bacia, representado pelo Rio Paraná, foram concebidos em seu médio curso, nas décadas de 50 e 60, cinco empreendimentos hidrelétricos de porte, a seguir apresentados de forma

A localização aproximada dos cinco aproveitamentos, no médio curso do rio Paraná, entre a foz do rio Paranapanema e a foz do rio Iguaçu, num percurso de aproximadamente 400 km, consta da **Figura 3.9**, a seguir.

Localização aproximada dos aproveitamentos hidrelétricos concebidos ao longo do médio curso do rio Paraná nos anos 1950-1960.



GUIDO GUIDICINI | ANDREA BARTORELLI

■ Sete Quedas

Em 1955, a CIBPU solicitou e obteve (1956) do governo federal a concessão para o estudo do potencial hidrelétrico do salto de Sete Quedas, tendo chegado à conclusão de que o aproveitamento naquele sítio restrito era inviável, devido à submersão das cataratas por ocasião das enchentes.

Logo em seguida apareceram vários projetos e concepções diversas a respeito do aproveitamento hidroenergético dos saltos de Sete Quedas. Já se fez referência aos estudos do Serviço Regional de Obras da 5ª Região Militar, através do então Cap. Engº Pedro Henrique Rupp, responsável por sucessivas propostas nos anos de 1958 a 1961.

Outra concepção avaliada foi de autoria do Engº Sylvestre de Souza, que propunha o desvio das águas em Sete Quedas para a faixa de terreno que margeia o estreito canal do rio entre Guaíra e Foz do Iguaçu, pelo lado brasileiro, de modo a aproveitar a queda disponível, cerca de 70 m, na altura de Porto Mendes, onde seriam implantados os grupos geradores. O canal aproveitaria um hipotético antigo leito do rio, que correria ao longo da margem paranaense, hipótese que acabou se mostrando inverídica. Esta ideia de aproveitamento foi aqui brevemente descrita em item anterior.

■ Paranayara

Dando prosseguimento aos levantamentos realizados na bacia do alto curso do rio Paraná, até Guaira e em seus principais afluentes, a CIBPU desenvolveu a ideia de implantar uma usina hidrelétrica denominada Paranayara na altura da foz dos rios Amambai (MT) e Ivaí (PR), nas proximidades de Porto Camargo, cerca de 90 km a montante de Guaíra, com capacidade de geração de 5.000 MW. Foram realizadas na área investigações geológicas e geotécnicas, incluindo sondagens e estudos geofísicos, além de levantamentos topográficos e hidrológicos. Os trabalhos resultaram na emissão de um anteprojeto, em 1963, resumidamente apresentado em BOX logo adiante.

Os estudos foram interrompidos em fins de 1963, quando o Ministério de Minas e Energia e o governo dos estados da região criaram o Comitê Coordenador dos Estudos Energéticos da Região Centro-Sul.

■ Umuarama

A CIBPU elaborou o anteprojeto de uma usina hidrelétrica no rio Paraná, cerca de 70 km a jusante de Sete Quedas, no trecho internacional do rio, entre Porto Mendes e Porto Britânia, a que denominou de Umuarama, em convênio com o Paraguai (DEP/CIBPU, 1967). Não se tem conhecimento de documentação a respeito desse projeto.

À semelhança dos demais empreendimentos, a ideia foi abandonada quando Itaipu prevaleceu sobre os demais projetos.

■ Ilha Grande

Em 1963 o BIRD (Banco Internacional para a Reconstrução e Desenvolvimento), instituição financeira ligada à ONU, atuando como agência executora dos estudos contratou a CANAMBRA, consórcio norte-americano e canadense de engenharia consultiva, para avaliar o potencial hidroenergético da bacia do Rio Paraná, entre outras regiões.

A CANAMBRA inventariou o potencial do Rio Paraná e de seus principais tributários, a montante de Sete Quedas, tendo selecionado o sítio de Ilha Grande como sendo a maior usina hidrelétrica passível de ser implantada em território exclusivamente brasileiro, com potência instalada de 3.423 MW e grande capacidade de armazenamento e regularização. Com queda bruta de 38 m e NA máximo normal na el. 258 m, o remanso de seu reservatório alcançaria o canal de fuga da usina de Jupia.

Após a apresentação dos resultados de seus trabalhos em julho/1966, o estudo de Ilha Grande foi descontinuado, a favor do projeto binacional de Itaipu, tendo sido retomado pela ELETROSUL no início da década de 1980. Os estudos de Ilha Grande são apresentados de maneira um pouco mais desenvolvida no BOX a seguir.

■ Itaipu

Entre 1964 e 1965, os governos do Brasil e do Paraguai fecharam acordo de princípios para a construção de uma usina hidrelétrica de porte na fronteira entre os dois países, tendo assinado a Ata de Itaipu, documento que deu início aos entendimentos para desenvolvimento do projeto. Em 1967 foi proposto pela Comissão Mista Brasil-Paraguai o projeto da usina hidrelétrica de Itaipu, localizada cerca de 14 km a montante de Foz do Iguaçu, com potência a ser instalada de 15.000 MW.

Amparado pela preferência dos governos de Brasil e Paraguai, o projeto de Itaipu evoluiu rapidamente. Em abril de 1973 foi assinado o Tratado de Itaipu e em 1975 teve início a construção da obra, completada em outubro de 1982, com o fechamento das comportas e formação do lago.

3.2.13 BOX – O projeto Paranayara

Dentro do plano de aproveitamento integral dos recursos hidroenergéticos da Baía do Paraná, a CIBPU desenvolveu, em 1963, o anteprojeto da usina hidrelétrica de Paranayara, localizada cerca de 90 km a montante das Sete Quedas, nas proximidades de Porto Camargo (PR), pouco a jusante da ponte da rodovia BR-437 sobre o rio Paraná. O relatório da CIBPU, de título “Aproveitamento Integral do Rio Paraná – Usina Hidrelétrica Paranayara” possui 45 páginas e é ilustrado com plantas, mapas e tabelas (**Figura 3.10**).

FIGURA 3.10

Capa do relatório de projeto de Paranayara.

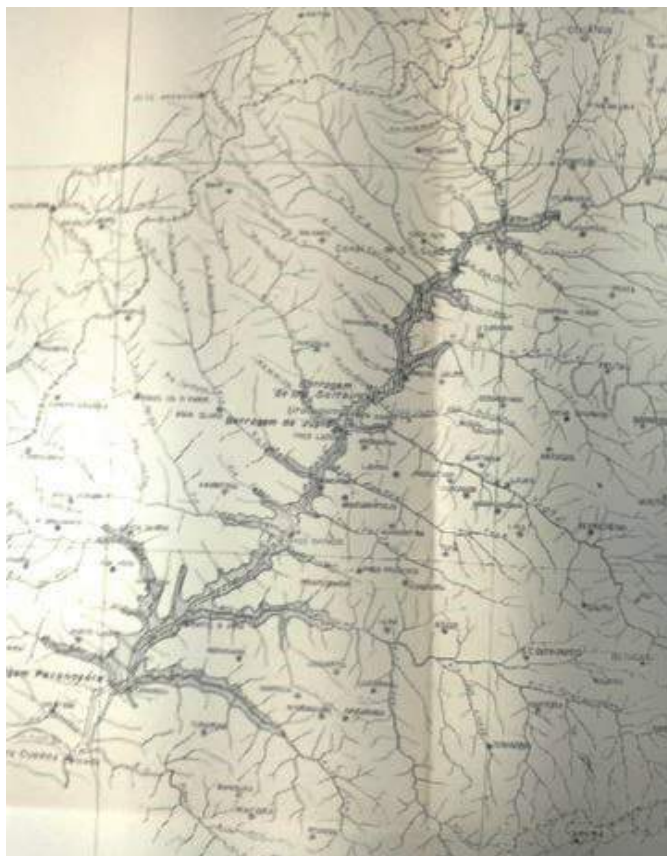


Fonte: CIBPU, 1963.

Situando-se o NA de montante na el. 256,50 m, o reservatório teria uma extensão aproximada de 425 km, alcançando o sítio da UHE Jupia (Figura 3.11). A crista da barragem se situaria na el. 261,00 m.

FIGURA 3.11

Desenvolvimento do reservatório de Paranayara.



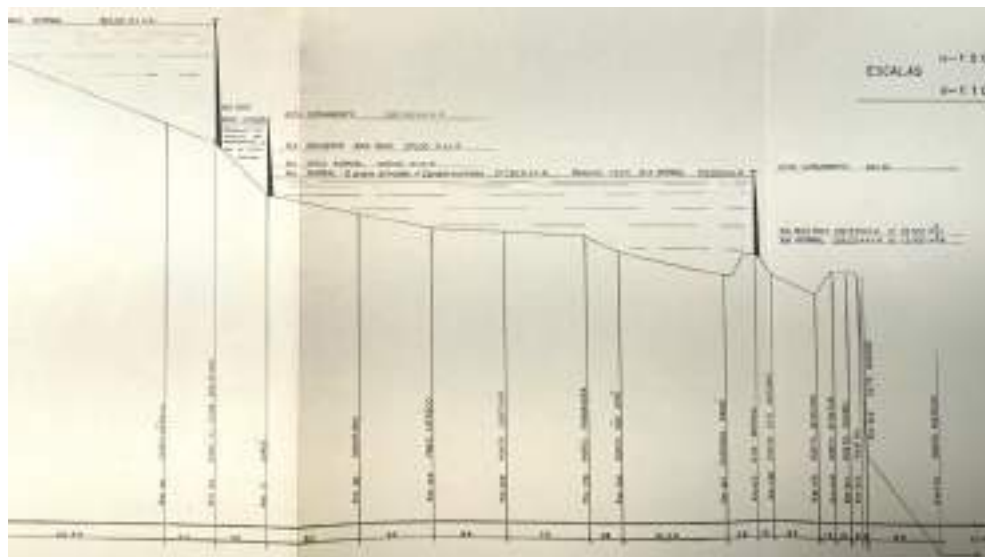
Fonte: CIBPU, 1963.

A Figura 3.12 mostra o perfil longitudinal do rio Paraná no trecho entre Ilha Solteira e Paranayara.

No sítio de barramento a margem direita, correspondente ao estado de Mato Grosso do Sul, é topograficamente aplainada e o leito do rio apresenta largura de 6 km, sendo que mais da metade dessa extensão se deve à presença da Ilha Jacaré, uma das mais extensas do rio Paraná, além de outras ilhas menores (Figura 3.13).

FIGURA 3.12

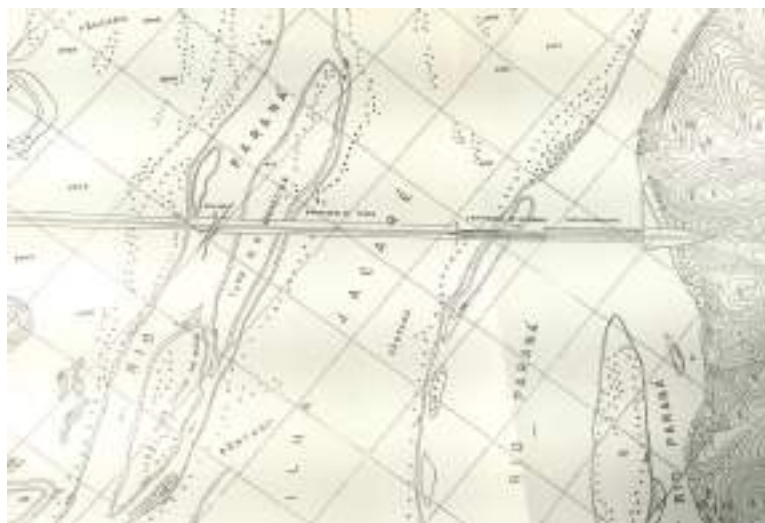
Perfil longitudinal do rio Paraná, entre Ilha Solteira e Paranayara.



Fonte: CIBPU, 1963.

FIGURA 3.13

Paranayara - Trecho central do barramento - Variante B - Alternativa com barragens de terra nas margens.



Fonte: CIBPU, 1963.

No arranjo preliminar, o eixo do barramento é retilíneo, com as estruturas de concreto ocupando o braço esquerdo do rio, enquanto uma extensa barragem de terra se desenvolve sobre a referida ilha, cruza o braço direito e atravessa a extensa margem direita, topograficamente aplainada e de natureza sedimentar, coberta por turfas e pantanosa.

A **Figura 3.14** permite que se visualize o eixo de Paranayara em recente imagem do Google Earth, o que facilita o entendimento de sua localização.

FIGURA 3.14

Localização aproximada do sítio de Paranayara em imagem atual.



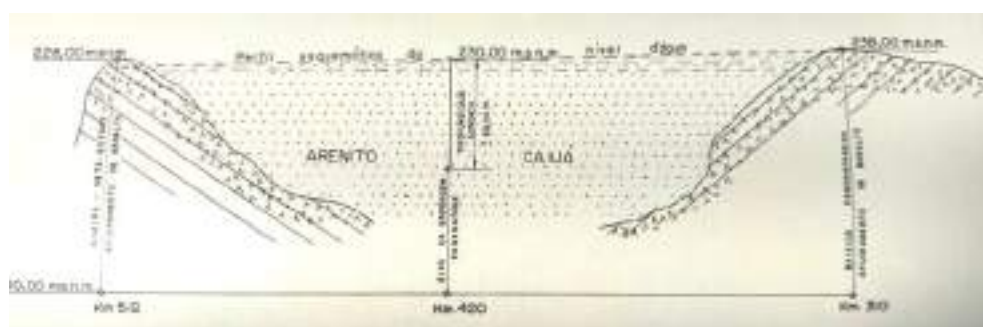
Google Earth, 04/06/2021.

A usina de Paranayara permitiria o aproveitamento de cerca de 5.000 MW e resolveria os problemas fundamentais de navegação do Alto Paraná, afogando os obstáculos naturais nas embocaduras dos rios tributários, como nos baixios do rio Paranapanema, onde uma extensa e larga soleira de rocha basáltica representava um obstáculo maior à navegação. O volume da água armazenado pelo reservatório seria da ordem de $90 \times 10^9 \text{ m}^3$, proporcionando uma substancial regularização do regime de descargas do rio Paraná em Sete Quedas, uma vez que permitiria reduzir consideravelmente as oscilações de nível d'água no *canyon*, reduzindo a dificuldade do efetivo aproveitamento hidroenergético das cataratas.

No sítio, predomina a ocorrência de arenitos do Grupo Caiuá, que fazem parte da cobertura neocretácea suprabasáltica, com espessura que pode atingir algumas centenas de metros. Trata-se de arenitos quartzosos, de origem continental eólica, finos a muito finos, maciços, ferruginosos, com estratificação plano paralela ou cruzada e frequente cimentação argilosa ou carbonática. A **Figura 3.15** traz uma seção geológica esquemática entre a foz do rio Paranapanema e os Saltos de Sete Quedas, mostrando que neste trecho de cerca de 200 km os afloramentos de rocha basáltica desaparecem e cedem lugar aos sedimentos arenosos neocretáceos.

FIGURA 3.15

Seção geológica esquemática longitudinal entre a foz do rio Paranapanema e os saltos de Sete Quedas. No centro da seção, o sítio de Paranayara.



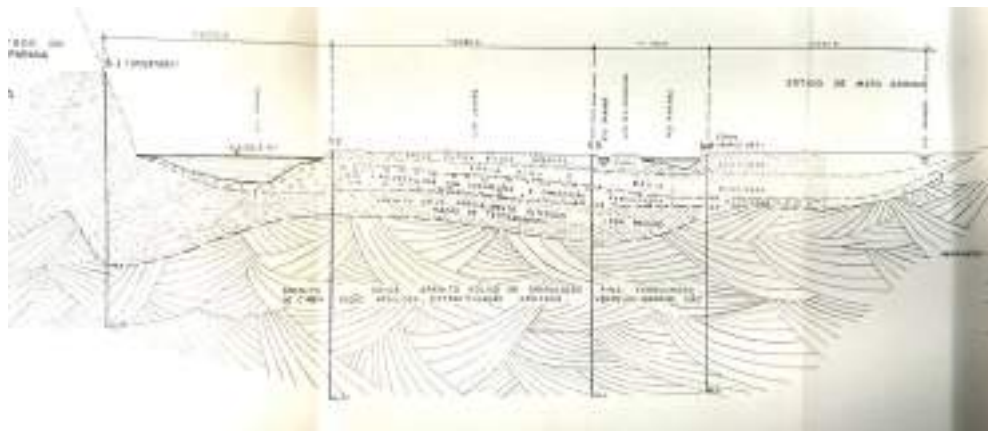
Fonte: CIBPU, 1963.

Os estudos geológicos preliminares incluíram a execução de quatro sondagens rotativas, diâmetro AX, bem como de levantamentos geofísicos, que confirmaram a presença de espesso pacote de arenitos brandos da Formação Caiuá, capeado por sedimentação recente. As sondagens mecânicas alcançaram cerca de 63 m de profundidade máxima (**Figura 3.16**).

O arenito são e coerente, encontrado a partir de certa profundidade, mostrou-se suficientemente resistente para suportar o maciço de concreto, adequadamente dimensionado. A **Figura 3.17** exibe um corte vertical pelas principais estruturas da barragem e indica que a altura da barragem seria da ordem de 40 m, devido à necessidade de remoção dos materiais com menor capacidade de suporte (aluviões e arenito alterado).

FIGURA 3.16

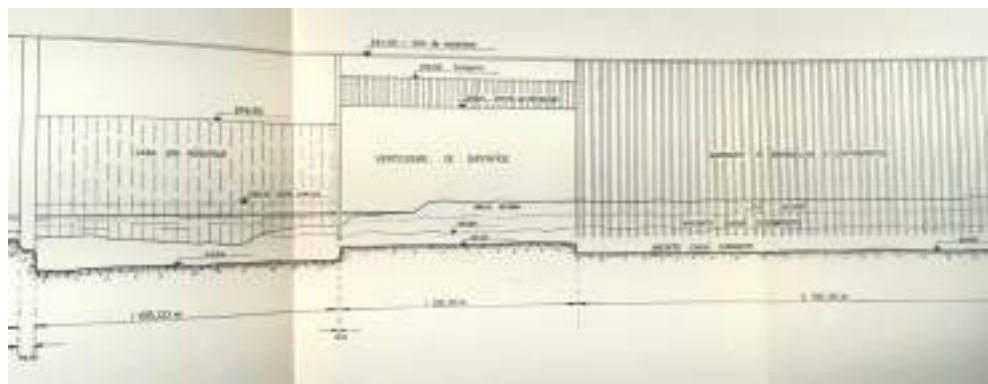
Seção geológica a partir das sondagens.



Fonte: CIBPU, 1963.

FIGURA 3.17

Corte vertical pelas principais estruturas de Paranayara.



Fonte: CIBPU, 1963.

O projeto de Paranayara não teve continuidade, preterido pelo estudo de alternativas de aproveitamento do caudal do rio Paraná em Sete Quedas e adjacências, que culminou, na década de 1970, com a eleição de Itaipu como solução mais vantajosa.

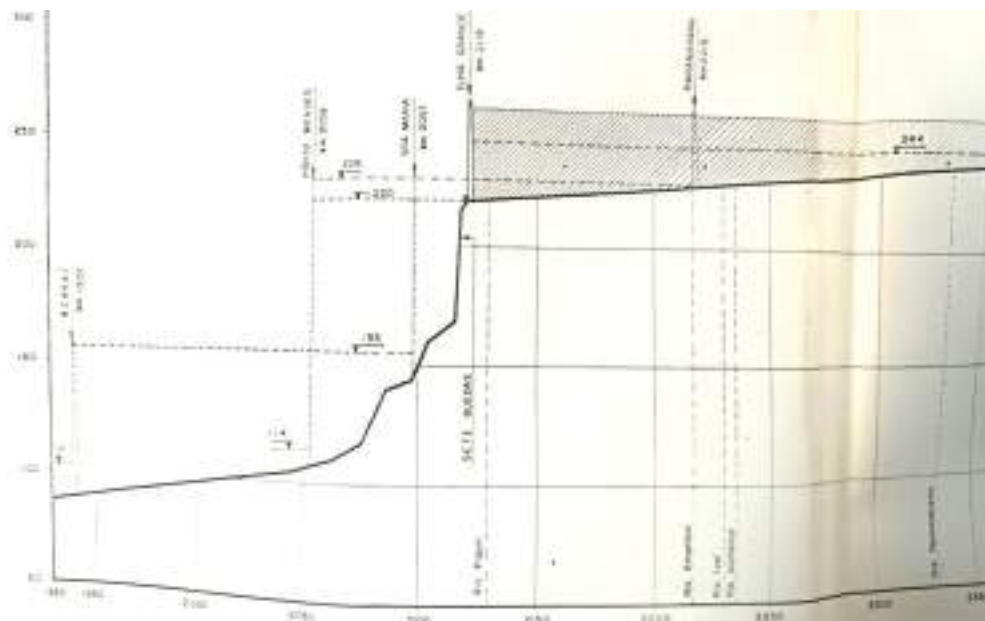
3.2.14 BOX – O projeto Ilha Grande

O projeto de Ilha Grande foi considerado pela Canambra como sendo não apenas o maior dentro da área de estudo, como o de menor custo unitário, além de, no futuro, beneficiar o aproveitamento de Sete Quedas pela capacidade de regularização das vazões, tendo sido selecionado para ulterior desenvolvimento dos estudos de viabilidade (Canambra, 1966).

Situado pouco a montante das Sete Quedas e do núcleo urbano de Guaíra, representaria o aproveitamento do rio Paraná situado mais a jusante em território exclusivamente brasileiro, tendo capacidade instalada de 3.423 MW. Localizado a 2.118 km de distância da foz do rio da Prata, com queda bruta de 38 m, seu nível d'água máximo normal na el. 258 m se estenderia até alcançar o canal de fuga da usina de Jupuí, situada a cerca de 430 km de distância em linha reta. Sua capacidade de armazenamento seria de $82,2 \times 10^9 \text{ m}^3$ (Figura 3.18).

FIGURA 3.18

Perfil esquemático do Rio Paraná em Sete Quedas e indicação do eixo da Ilha Grande.

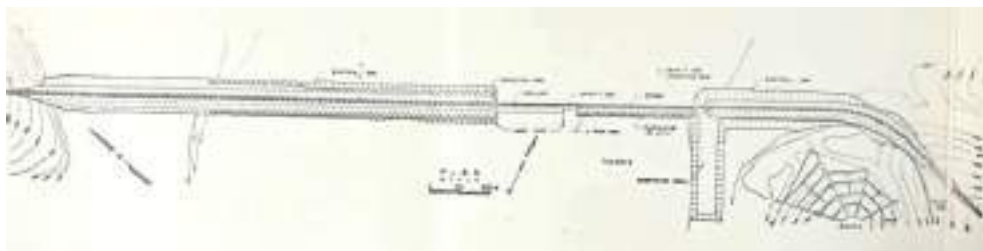


Fonte: Canambra, 1966.

O eixo da barragem, localizada nas imediações do núcleo urbano de Guaíra, seria em grande parte retilíneo e teria a extensão aproximada de 10 km. Destes, cerca de quatro km seriam representados pela travessia do rio. A barragem da margem esquerda contornaria o núcleo urbano de Guaíra, até alcançar um ponto de fechamento nesta ombreira. A barragem da margem direita enfrentaria um trecho de planície aluvionar com 1,5 km de extensão antes de alcançar a ombreira (**Figura 3.19**).

FIGURA 3.19

Eixo de Ilha Grande e arranjo geral.

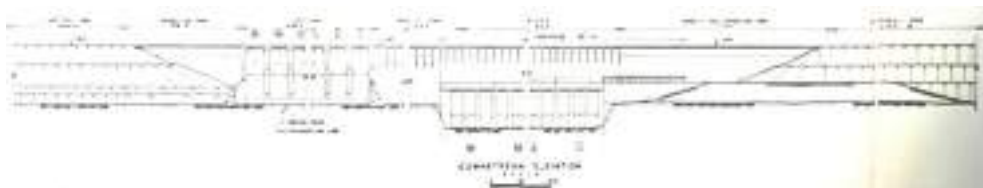


Fonte: Canambra, 1966.

As estruturas de concreto seriam posicionadas no leito do rio, próximas à margem esquerda. A **Figura 3.20** traz uma seção vertical da porção central do barramento.

FIGURA 3.20

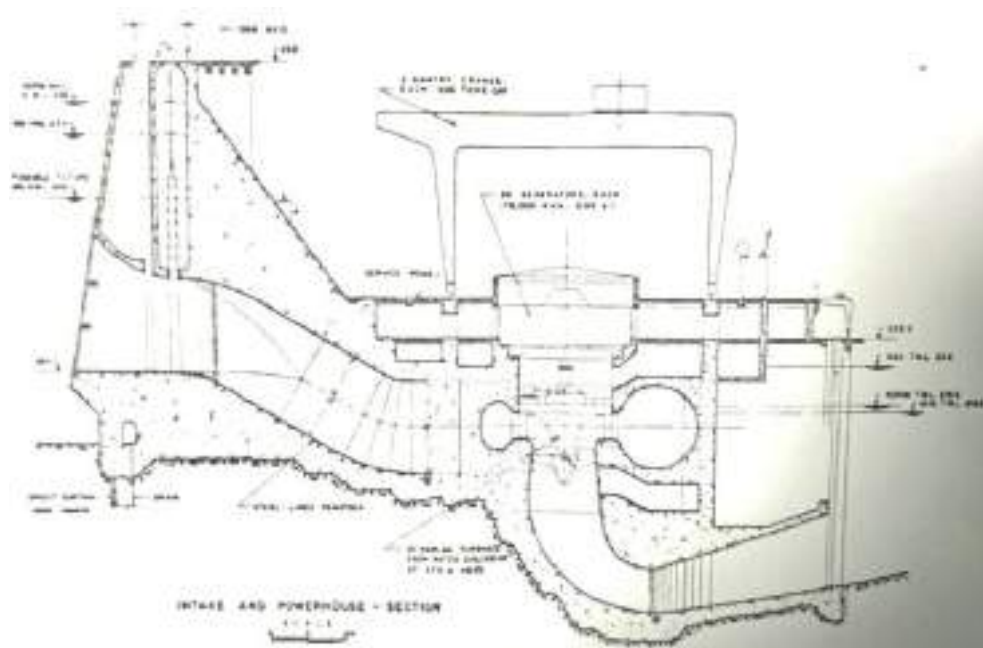
Porção central do barramento de Ilha Grande, vista de jusante.



Fonte: Canambra, 1966.

FIGURA 3.21

Seção da casa de força de Ilha Grande.



Fonte: Canambra, 1966.

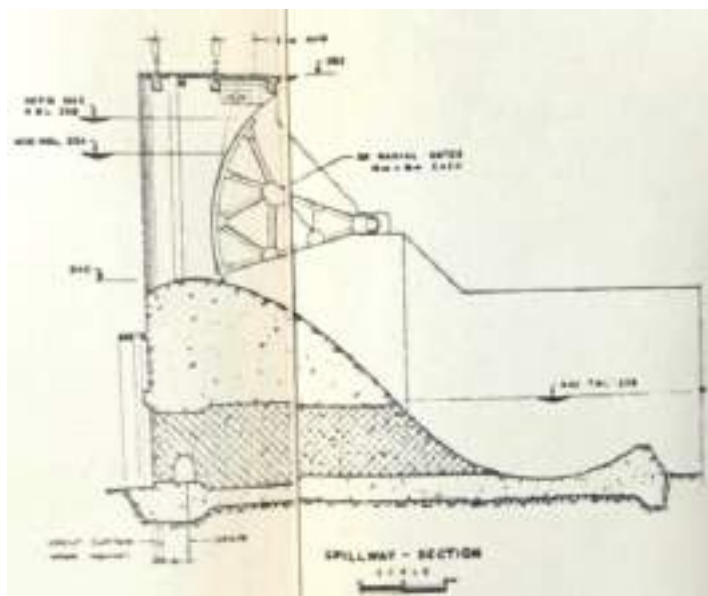
As barragens de terra em ambas as margens e no leito do rio teriam seção diferenciada, devido à presença de espessa camada de sedimentos de baixa resistência mecânica (argilas e turfas) em ambas as margens. A **Figura 3.23** mostra a seção para o leito do rio, com ensecadeiras incorporadas e aterro homogêneo.

Após a apresentação dos resultados do trabalho pela CANAMBRA em julho/1966, o estudo de Ilha Grande foi descontinuado, a favor do projeto binacional de Itaipu, tendo sido retomado pelas Centrais Elétricas do Sul do Brasil – ELETROSUL, no início da década de 1980.

A ELETROSUL adotou o mesmo sítio anteriormente selecionado e levou adiante os estudos para desenvolvimento do projeto. A barragem, entretanto, seria rebaixada em relação ao estudo da CANAMBRA e teria altura máxima da ordem de 30 metros, sendo que a casa de força abrigaria 24 unidades geradoras com 100 MW cada, perfazendo uma capacidade total de 2.400 MW instalados. Nessa nova concepção, a AHE Ilha Grande ocuparia o trecho do rio Paraná situado entre as UHEs Itaipu, a jusante e Porto Primavera, a montante.

FIGURA 3.22

Ilha Grande – Seção do vertedouro com indicação de adufas para desvio.



Fonte: Canambra, 1966.

FIGURA 3.23

Ilha Grande – Seção da barragem de terra na margem direita.



Fonte: Luz, 2017.

A barragem, com extensão de crista de 8.170 m, serviria de apoio para a implantação de uma rodovia e uma estrada de ferro, ligando os estados do Paraná e Mato Grosso do Sul. O arranjo geral seria levemente diferente daquele proposto pela CANAMBRA, mas as estruturas de concreto ocupariam posição similar no leito do rio (**Figura 3.24**). Uma eclusa de navegação seria inserida junto à margem esquerda.

FIGURA 3.24

Arranjo da Usina Hidrelétrica Ilha Grande no rio Paraná.



Fonte: Dijkstra & Antunes, 1981.

Trabalhos iniciais chegaram a ser levados a termo, como um aterro e uma escavação experimental sobre aluviões moles na margem direita (Komesu & outros, 1987), mas a construção do empreendimento foi descontinuada. Em 1991 a ELETROSUL anunciou o cancelamento do projeto. Somente a ponte interestadual Ayrton Sena foi concluída, em 1998, no local previsto para o empreendimento hidrelétrico.

A área da barragem se situa no domínio dos derrames basálticos da Formação Serra Geral, que apresentam condições via de regra favoráveis para a implantação das estruturas de concreto. Nas margens e leito do rio, o substrato basáltico é recoberto por sedimentação recente aluvionar. Na margem direita, no limite da planície aluvionar e início da ombreira, encontram-se os arenitos do Grupo Caiuá (**Figura 3.25**).

A boa qualidade do arenito Caiuá é documentada na **Figura 3.26**, que mostra o contato entre basalto são e arenito Caiuá coerente, pouco fraturado e de coloração acastanhada, em uma das sondagens realizadas.

O empreendimento da Ilha Grande não foi implantado por razões ambientais e econômicas, uma vez que iria inundar uma grande área aplainada de várzea na margem direita, de relevante interesse para a agricultura.

FIGURA 3.25

Seção geológica esquemática na margem direita em Ilha Grande.



Fonte: Luz, 2017.

FIGURA 3.26

Caixa de testemunhos de sondagem, mostrando o contato entre arenito Caiuá e o basalto sotoposto em Ilha Grande.



Fonte: Acervo dos autores, 1979.

3.3 Estudos do Consórcio IECO-ELC e as primeiras referências ao projeto Itaipu

O entendimento diplomático sacramentado pela Ata de Iguaçu ou das Cataratas, em 1966, abriu caminho para início dos estudos técnicos. Em 1967 uma comissão mista foi criada para implantar os termos do acordo. O consórcio formado pela empresa norte-americana International Engineering Company (IECO) e pela italiana Electroconsult Spa (ELC) venceu a concorrência internacional para a elaboração dos estudos de viabilidade e do projeto da obra.

Dentre os inúmeros projetos considerados pela IECO-ELC por ocasião da fase de inventário do estudo do Rio Paraná, no trecho Sete Quedas-Foz do Iguaçu, inclui-se o Projeto Marcondes Ferraz, elaborado alguns anos antes da contratação desses estudos. Todavia, na abordagem desse projeto, a IECO-ELC desenvolveu uma alternativa própria do Projeto Marcondes Ferraz, levando em conta elementos novos de informação hidrológica e de características do local, ainda não disponíveis no tempo de Marcondes Ferraz. Essas alterações não mudaram substancialmente o projeto original Marcondes Ferraz do ponto de vista energético e custos. Por outro lado, nos estudos do Consórcio IECO/ELC encontram-se referências pioneiras quanto ao aproveitamento do potencial de Sete Quedas por meio de uma única barragem em Itaipu.

3.3.1 Localização

Tal como no projeto original Marcondes Ferraz, a variante IECO-ELC, do mesmo porte de uma barragem de desvio em Guaíra, onde o rio é desviado para um canal adutor na margem esquerda com cerca de 60 km de extensão, termina numa tomada d'água de onde derivam os tubos forçados para uma casa de força situada próxima a Porto Mendes. A partir desse local o declive do Rio Paraná começa a suavizar-se, atingindo a cota 100 m em Foz do Iguaçu, a 100 km de distância de Porto Mendes, com um desnível de apenas 25 m em todo esse trecho.

3.3.2 Canal adutor

O Projeto Marcondes Ferraz previa um sistema de adução baseado num dique ao longo do coroamento da encosta, que guiaria as águas até a tomada d'água, desenhando-se, conforme a variação topográfica, um canal de largura variável ou

uma espécie de reservatório alongado entre a barragem e a tomada d'água, com perda de carga mínima. Já o projeto estudado pela IECO-ELC optou por um canal convencional que, embora resultasse numa perda de carga um pouco maior, envolveria menor volume de águas.

3.3.3 Queda aproveitada

Marcondes Ferraz imaginou a cota de montante do reservatório da barragem de Guaíra no nível de 228,25 m, compatível com as possibilidades de inundação da periferia da cidade de Guaíra e a cota de jusante do canal de fuga em Porto Mendes no nível 108,00 m, correspondente a uma vazão regularizada no Rio Paraná, em Guaíra, por ele estimada em cerca de 4.700 m³/s. No projeto IECO-ELC levou-se em conta a existência do projeto da Usina de Ilha Grande, mais tarde a ser incluída em programa da ELETROSUL.

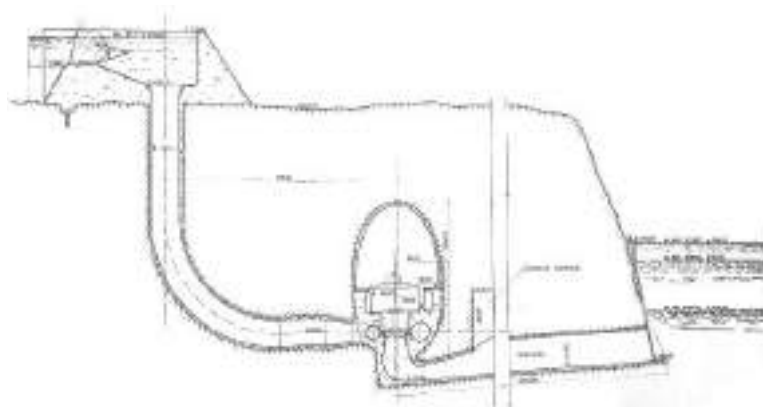
Esse projeto ainda não existia na época dos estudos de Marcondes Ferraz, e consistia de uma barragem situada em frente a Guaíra, com uma usina a seu pé, com canal de fuga na cota 220 m. Para tornar o aproveitamento de Sete Quedas inteiramente independente do de Ilha Grande, essa foi então a cota adotada para o nível de montante da variante IECO-ELC do projeto Marcondes Ferraz. O canal de fuga da variante IECO-ELC estaria na cota 125,00 m, mais elevada em 17 m do que o nível de restituição considerado por Marcondes Ferraz, devido ao fato de que a vazão média agora adotada era de perto de 6.400 m³/s, ao invés de 4.700 m³/s no caso Marcondes Ferraz. Disso tudo resultou, obviamente, diferença de queda de uma variante a outra: de 117,00 m do projeto Marcondes Ferraz para 95,00 m do projeto IECO-ELC, redução essa, entretanto, amplamente compensada pela maior vazão deste último.

3.3.4 Tipo de casa de força

Marcondes Ferraz imaginou fazer uma casa de força subterrânea com condutos forçados em túnel e subdividida em três casas de máquinas, semelhante ao que já havia sido por ele projetado para Paulo Afonso (**Figura 3.27**). Já a IECO-ELC optou por uma casa de força convencional, com condutos forçados externos. São soluções equivalentes, dependendo da escola de projeto de cada um, desde que a geologia local o permita, como seria o caso.

FIGURA 3.27

Seção transversal de uma das 3 casas de força subterrâneas do projeto da OMF.



Fonte: OMF (1963).

3.3.5 Vazão de projeto

Na época em que Marcondes Ferraz fez seus trabalhos, os dados hidrológicos disponíveis sobre a vazão do Rio Paraná em Guaíra eram precários. Ele teve então que estimar a vazão em função das descargas parciais medidas a montante nos grandes formadores do Rio Paraná. Essa estimativa procurou, inclusive, levar em conta os efeitos de reservatórios de regularização que seriam eventualmente construídos nos diferentes rios formadores da bacia. Chegou, assim, a uma estimativa de vazão média regularizada a longo termo de $4.700 \text{ m}^3/\text{s}$, a qual adotou como vazão de projeto.

Já, a IECO-ELC, dispondo de um elenco de informações muito mais amplo, oriundo principalmente dos estudos da CANAMBRA de poucos anos antes, complementado por estudos por ela mesma efetuados, pôde chegar a uma vazão em Guaíra, adotada, em todas as variantes estudadas ao longo do trecho Sete Quedas – Foz do Iguaçu, mais próxima da realidade.

É importante consignar, outrossim, que em todos os seus estudos a IECO-ELC seguiu o critério tradicional adotado nos projetos hidrelétricos da região, de basear as vazões de projetos hidrelétricos nos períodos hidrológicos mais desfavoráveis, que é a sistemática usada em todo planejamento hidrelétrico do setor elétrico

brasileiro. Vale salientar, ainda, que a IECO-ELC, tal como Marcondes Ferraz, também incluiu em suas avaliações os efeitos de regularizações a montante. Lamentavelmente, em nenhum dos dois casos foi computado o efeito específico desses reservatórios no aumento da vazão natural, benefício esse inteiramente oriundo de investimento exclusivamente brasileiro. A IECO-ELC adotou, em consequência, uma vazão de projeto de 6.350 m³/s, 35% maior que a adotada por Marcondes Ferraz, o que, em parte, compensou no cômputo final da energia disponível a diferença de queda bruta por ela considerada.

3.3.6 *Potência instalada*

Marcondes Ferraz, partindo da hipótese de fator de capacidade de 0,50, chegou com a queda e vazão adotadas a uma potência instalável de 10.000 MW, distribuída em 21 geradores, sendo 2 de 250 MW e os 19 restantes, de 500 MW cada, distribuídos em três casas de máquinas. A potência máxima de 500 MW era a maior que a tecnologia da época permitia. Em todas as variantes do projeto estudadas pela IECO-ELC foi adotado o fator de capacidade de 0,62, da mesma ordem do fator de carga do sistema elétrico interligado ao qual o projeto seria integrado. Disso resultou que, apesar da maior vazão disponível, a potência instalada no projeto IECO-ELC era de 8.750 MW, dividida em 18 unidades de 485 MW.

3.3.7 *Conclusão*

Conclui-se do exposto que, essencialmente, o projeto original de Marcondes Ferraz e sua variante considerada pela IECO-ELC, não apresentavam diferenças fundamentais, sendo equivalentes.

O que realmente fez com que, do ponto de vista técnico, esse esquema baseado em uma barragem situada em Guaíra e a usina localizada em Porto Mendes, seguida de uma eventual segunda barragem aproveitando o desnível restante até Foz do Iguaçu, fosse abandonado em favor de um sistema de barragem única executada em Itaipu, foram os custos comparativos das diversas alternativas analisadas. Foi elaborado um quadro que mostra o confronto final de todas as variantes analisadas em bases equiparáveis de custos para todos os casos, tendo a comparação sido feita tão somente na base do que era específico de cada alternativa. Por esse quadro ficou visível que qualquer que fosse o esquema adotado em torno do projeto Marcondes Ferraz, seu índice de custo de projeto apresentava um valor

muito desfavorável em relação a outros projetos alternativos, dentre os quais Itaipu se sobressaiu, tendo sido finalmente escolhido.

Fica claro, pois, que, independentemente de qualquer consideração política resultante das divergências entre Brasil e Paraguai sobre questões de fronteira na região de Guaíra, havia soluções alternativas melhores que aquela originalmente imaginada para o aproveitamento da energia hidráulica disponível, “desde e inclusive o Salto Grande de Sete Quedas até a foz do Rio Iguaçu”, como reza a Ata das Cataratas de 1966, que deu origem aos estudos da IECO-ELC e à criação da Itaipu Binacional.

3.3.8 BOX – As cotas de Itaipu (Eng. Eduardo Celestino Rodrigues)

Dentre os documentos que compõem o volumoso dossiê sobre as alternativas de aproveitamento hidrelétrico das Sete Quedas, encontra-se um curto relatório de autoria de Eng^o Eduardo Celestino Rodrigues, a respeito do potencial disponível no trecho do Rio Paraná objeto dos estudos.

“A potência de um aproveitamento hidrelétrico é função da vazão do rio e da altura que se cria com a construção da barragem. Medindo-se a vazão em m^3/s e a altura em m, a potência bruta de um aproveitamento hidrelétrico, medida em KW, será: $\text{potência} = 9,81 \times \text{vazão} \times \text{altura}$. A altura é a diferença entre a cota média superior do reservatório e a cota média inferior de saída das águas das turbinas. No trecho do Rio Paraná Brasil-Paraguai essas são respectivamente 220 m e 93,4 m, na foz do Rio Iguaçu (Figura 3.28).

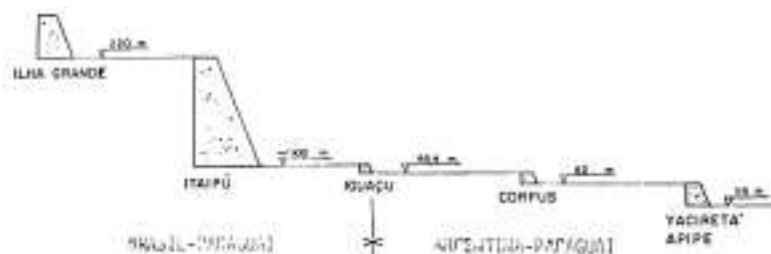
O trecho Brasil-Paraguai tem uma diferença de nível aproveitável de $220 - 93,4 = 126,6$ m numa distância de 180 km, após a qual o Rio Paraná permite um aproveitamento teórico de apenas 93 m numa distância de quase 2.000 km, o que mostra a grande vantagem da construção de Itaipu, permitindo aproveitamento de uma altura de aproximadamente 120 m, enquanto Corpus só pode aproveitar a altura de 11,4 m e Yaciretá-Apipe de 23 m. Afirma Rodrigues que “Cota é soberania nacional e nenhuma autoridade pode ceder nossa cota no Rio Paraná na confluência com o Iguaçu”.

A cota superior de 220 m é a do reservatório formado pela barragem de Itaipu e é, por sua vez, a cota inferior da futura barragem brasileira de Ilha Grande. A cota inferior de Itaipu será pouco superior a 100 m, para não prejudicar a barragem paraguaia de Acaraí. No trecho do Rio Paraná Paraguai-Argentino pretende-se construir duas

barragens, Corpus e Yaciretá-Apipe (já em fase de concorrência). O Rio Paraná, ao deixar em Foz do Iguaçu o território Brasil-Paraguai e entrar no território Paraguai-Argentina, tem nível médio de 93,4 m e, deste modo, Corpus só poderá ter reservatório com nível inferior a 93,4 m, pois qualquer cm a mais corresponde a inundação de terras nossas e diminuição de uma cota que representa potência e, tanto as terras como a potência energética são patrimônio nacional que autoridade nenhuma pode ceder. A existência de nível entre o nível médio inferior de Itaipu (pouco acima de 100 m) e o nível médio de 93,4 m em Foz do Iguaçu, é patrimônio brasileiro-paraguai e pode ser aproveitado com a construção de outra usina em Foz do Iguaçu, pouco acima da divisa Brasil-Argentina, que é o Rio Iguaçu, com potência superior a 1 milhão e 300 mil KW”.

FIGURA 3.28

Divisão de quedas entre a barragem de Ilha Grande e Yaciretá-Apipe, envolvendo um desnível total de 161 m.



Fonte: Rodrigues, s/data.

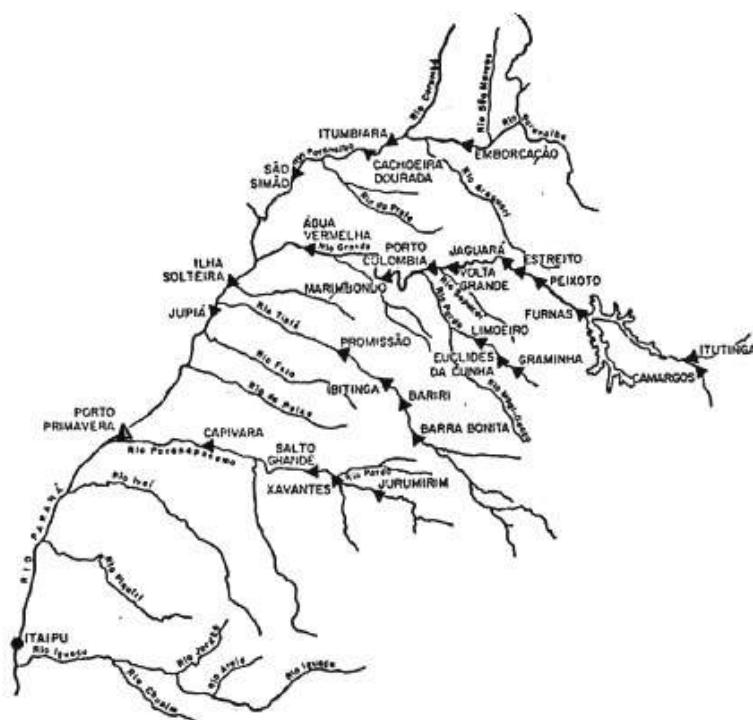
3.3.9 Benefícios pelos reservatórios de regularização

Nas décadas de 1960 e 1970, enquanto o projeto da usina hidrelétrica de Itaipu amadurecia, um intenso processo de construção de hidrelétricas estava em andamento na bacia do rio Paraná, a montante das Sete Quedas. As primeiras grandes usinas surgiram no Rio Grande ainda na década de 1950: a UHE Itutinga foi inaugurada em 1955, seguida pela UHE Peixoto em 1956. Em cerca de 20 anos, 25 novas usinas hidrelétricas foram implantadas ao longo dos principais rios da bacia, a começar pelos rios Paranaíba e Grande, formadores do Rio Paraná. Todos esses empreendimentos se situavam à esquerda hidráulica do eixo do rio Paraná, interessando os estados de Goiás, Minas Gerais, São Paulo e Paraná (**Figura 3.29**).

Levando em consideração o efeito plurianual do conjunto de reservatórios que estavam sendo projetados e implementados, a potência prevista para Itaipu nos estudos de viabilidade, de 10.710 MW, teve um aumento superior a 18%, passando para 12.600 MW, distribuídos em 18 unidades de 700 MW. A regularização assim provida correspondia a 110 bilhões de metros cúbicos de volume útil dos reservatórios localizados a montante.

FIGURA 3.29

Reservatórios de regularização na bacia do Rio Paraná.



Fonte: Cotrim, 1999.

Caso a usina de Itaipu tivesse que ser dimensionada contando somente com a regularização de seu próprio reservatório, cujo volume útil armazenado é de 19 bilhões de metros cúbicos, propiciando apenas regularização anual, a potência instalável seria de 8.823 MW, cerca de 1/3 inferior à provida pela regularização plurianual.



QUESTÕES FRONTEIRIÇAS E ACORDOS ENTRE BRASIL E PARAGUAI

4.1 Os tratados ao longo dos séculos XV a XIX

Sória (2012) resumiu o histórico dos impasses na demarcação de fronteiras na América do Sul, especialmente com referência a Brasil e Paraguai. O Tratado de Limites firmado em Madri em 13 de janeiro de 1750 entre Portugal e Espanha representou, antes de tudo, um acordo de reordenamento das possessões de ambas as coroas, ao dividirem os territórios do Novo Mundo. Tentou-se, por meio desse tratado, dissipar as tensões políticas decorrentes das aspirações de ambos os reinos, que se opunham costumeiramente. Nas negociações para o acordo considerou-se a inexistência de efetiva demarcação pelo Tratado de Tordesilhas, tendo sido constatado que as bandeiras portuguesas se estendiam além da linha original de Tordesilhas e que a existência de Colônia de Sacramento, fundada em 1679 e hoje território uruguaio, indicava efetiva presença portuguesa no Rio da Prata.

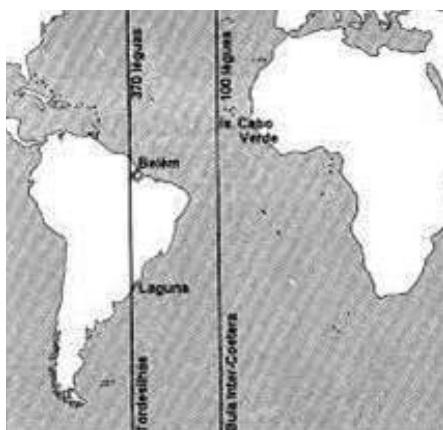
Os novos limites foram então definidos pelos acidentes geográficos naturais (rios e montanhas) e pelos princípios do direito romano (quem possui de fato, deve possuir de direito). Pelo tratado de limites, assim, Portugal cedeu à Espanha a Colônia de Sacramento, no sul, e territórios na Amazônia ao norte. A Espanha, em troca, cedeu a Portugal territórios no sul e a região das Missões Jesuíticas.

Até chegar a esse tratado de limites foram feitos cinco acordos prévios:

1. a Bula *Inter Coetera*, assinada em 04 de maio de 1493 pelo Papa Alexandre VI (**Figura 4.1**);
2. o Tratado de Tordesilhas, celebrado entre Portugal e Espanha em 07 de junho de 1494 (**Figura 4.2**);

FIGURA 4.1

Bula Intercoetera.



Internet: contendo.explicac.com.br/duvida/25216 (acesso em 28/04/2023)

FIGURA 4.2

Tratado de Tordesilhas.



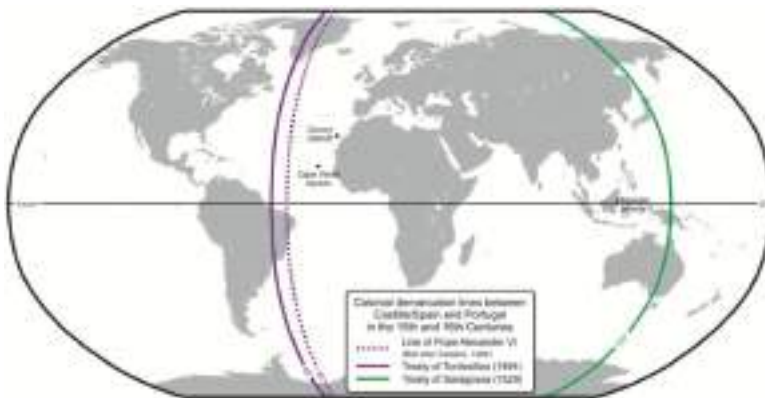
Internet: bonifacio-net-br/tratado-de-tordesilhas/ (acesso em 28/04/2023)

3. o Tratado de Saragoça, assinado entre Portugal e Espanha em 22 de abril de 1529 a respeito das zonas de influência desses dois países na Ásia (**Figura 4.3**);
4. o Tratado Provisional de Lisboa, celebrado em 07 de maio de 1681, em que a Espanha reconheceu a posse portuguesa da Colônia de Sacramento, fundada pelos portugueses em 22 de janeiro de 1680 e que havia sido tomada pelos espanhóis em 08 de agosto daquele ano (**Figura 4.4**);

5. o Segundo Tratado de Utrecht assinado entre o Rei da Espanha, Felipe V, e o Rei de Portugal, Dom João V, em 1715, nessa localidade da Holanda. Por este tratado, a Espanha devolveia a Portugal a Colônia de Sacramento, no Rio da Prata, que havia sido retomada pelos espanhóis em 1705. Por sua vez, Portugal cedia os municípios de Albuquerque e Puebla de Sanabria à Espanha (**Figura 4.5**).

FIGURA 4.3

Tratado de Saragoça de 1529.



Fonte: c/com-assets-production-53.amazonaws.com (acesso em 28/04/2023)

FIGURA 4.4

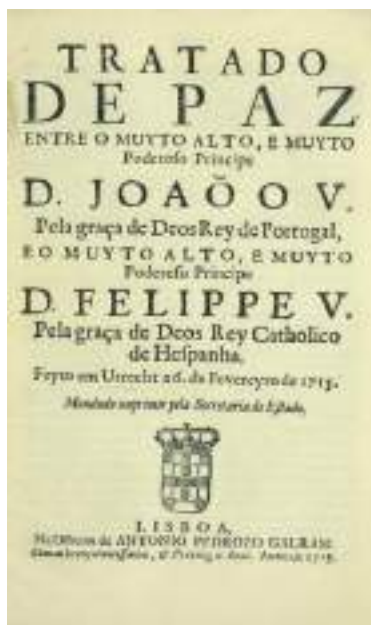
Tratado Provisional de Lisboa.



Fonte: constitutionweb.blogspot.com/2012/02tratado-provisional-de-lisboa-1681.html (acesso em 28/04/2023)

FIGURA 4.5

Capa do Tratado de Utrecht (Biblioteca José Mindlin, atualmente Brasileira).



Fonte: <https://www.todamateria.com.br > tratado-de-utrecht> (acesso em 24/04/2023)

Prossegue o autor do livro “Usina de Itaipu” (2012), Eng^o Sória, constatando que o Tratado de Limites (1750), mais que definir uma nova linha limítrofe entre as posses de Espanha e de Portugal, estabeleceu o delineamento das fronteiras entre o Brasil de seus vizinhos. Os artigos 5º e 6º do Tratado de Limites descrevem uma linha que atualmente corresponde à fronteira entre o Brasil e o Paraguai. A linha começa onde é mencionado “o rio grande de Curitiba ou Iguassu” (atual foz do Rio Iguaçu, na tríplice fronteira entre Brasil, Argentina e Paraguai) e termina no local conhecido à época como “onde a linha deixa o Rio Paraguai em tempo seco”, atualmente Desaguadouro da Baía Negra, na tríplice fronteira da Bolívia com Brasil e Paraguai. Esse Tratado de Limites, por isso, pode ser considerado como o primeiro acordo demarcatório das fronteiras entre Brasil e Paraguai, embora tenha sido acordado entre a Espanha e Portugal.

De especial interesse para a história de Itaipu é um trecho do artigo 6º do Tratado, onde consta: “Desde a boca do Igureí continuará pelo álveo acima até encontrar a sua origem principal e, dali, buscará em linha reta pelo mais alto do terreno a cabeceira principal do rio mais vizinho que deságua no Paraguai pela sua margem oriental”.

Nessa descrição generalizada está implícita a existência de um acidente natural muito importante, que é o Salto Grande das Sete Quedas ou Salto del Guairá.

Em 1750, a energia elétrica não era usada, tampouco conhecida e não se tinha ideia de que pudesse ser obtida pela força das águas. Assim, o acordo sobre os limites foi considerado satisfatório por Portugal e Espanha. Esse fato pode ser explicado pela constatação de que cachoeiras são bastante comuns em todo o território americano, o que fez com que as Sete Quedas não tenham despertado atenção maior do que outros acidentes geográficos conhecidos à época, não tendo, portanto, sido considerada na descrição de fronteiras.

Na época em que estavam sendo desenvolvidos os primeiros estudos sobre eletricidade e suas aplicações, por meios outros que não os hidrelétricos, em 1750, foi assinado o Tratado de Limites, também chamado Tratado de Madrid, por Espanha e Portugal, para definir os limites entre as respectivas colônias sul-americanas, o qual revogava o Tratado de Tordesilhas e os demais tratados correlatos.

A demarcação de fronteiras entre Brasil e Paraguai estipulada nesse Tratado marca, em tese, o começo da história política de Itaipu. Enquanto o conhecimento científico avançava no último quartel do século XIX, terminada a Guerra do Paraguai em 1870, Brasil e Paraguai assinaram em 09 de janeiro de 1872 o Tratado Definitivo de Paz e Amizade Perpétua, que definiu também que os limites de ambos seriam objeto de ato distinto, celebrado simultaneamente. Nascia, assim, o Tratado de Limites, celebrado entre Brasil e Paraguai em janeiro de 1872, assinado respectivamente pelo Senador João Maurício Wanderley (Barão de Cotegipe) e pelo Senador Carlos Loizaga. Definiu-se deste modo a fronteira entre os dois países, desde a foz do Rio Apa até a foz do Rio Iguaçu. Esse foi, então, o segundo acordo demarcatório das fronteiras entre Brasil e Paraguai, dessa vez firmado pelos dois países limítrofes e não mais pelas potências colonialistas, tal como havia acontecido na primeira demarcação de 1750.

O Tratado de Limites de 1872, em linhas gerais, repete a descrição do Tratado de Limites de 1750 no que concerne ao trecho de fronteira entre o Brasil e o Paraguai, incluindo algumas denominações novas, mas não alterando a geometria estabelecida. Novamente, permaneceu o pouco detalhamento da descrição da passagem da linha divisória pela região do Salto Grande de Sete Quedas, já que a evolução da eletricidade ainda não tornava possível vislumbrar uma tecnologia que fosse capaz de transformar em energia elétrica a força das águas caindo de uma altura de mais de 100 metros.

O Tratado de Limites de 1872 foi mais tarde alterado pelo Tratado Complementar, assinado entre Brasil e Paraguai em 21 de maio de 1927, que definiu a fronteira entre os dois países no trecho compreendido entre a foz do Rio Apa e o desaguadouro da Bahia Negra, nele especificando a posse de ilhas e também determinando a criação de uma comissão mista brasileiro-paraguaia para atuar nos trabalhos de demarcação da fronteira.

Pouco depois, em 09 de maio de 1930, foi estabelecido pelos governos do Brasil e do Paraguai um Protocolo de Instruções para a demarcação e caracterização da fronteira entre os dois países. Tendo em vista a semelhança das descrições da linha divisória em ambos os tratados de 1750 e 1872, foi proposto (Sória, 2012) que se fixe o início da história política de Itaipu no evento mais antigo, ou seja, no ano de 1750.

4.2 Brasil e Paraguai rumo ao entendimento

Por volta de 1960, quando já eram conhecidos os grandes benefícios da hidroeletricidade, a posse da região de Sete Quedas passou a ser objeto de extremo interesse por ambos os países e a descrição do segmento da linha de divisa no Salto Grande de Sete Quedas assomou rapidamente na esfera das discussões estratégicas em curso nas respectivas chancelarias.

No parágrafo 1º dos tratados de 1750 e 1872, a linha divisória originou dubiedade de entendimento entre o Brasil e o Paraguai, quanto à geometria da poligonal no trecho de fronteira da área das Sete Quedas. É importante aqui ressaltar que o processo de demarcação fronteiriça considera que os pontos mais altos de elevações topográficas são determinantes para a definição da fronteira, unindo-se uns aos outros por segmentos de linhas retas.

Pelo Tratado de Limites de 1872, partindo da foz do rio Iguaçu, a fronteira entre os dois países segue pelo leito do Rio Paraná até alcançar os Saltos das Sete Quedas. Nas Sete Quedas, havia ficado definido que o ponto mais alto seria a 5ª Queda. Deste ponto, a fronteira se ligava em linha reta com o cume da Serra de Maracaju, ficando o território brasileiro ao norte dessa linha e o paraguaio ao sul. Assim procedendo, as principais quedas seriam brasileiras. A **Figura 4.6** documenta a localização atual da fronteira e assinala o vértice da 5ª Queda.

Na 5ª Queda não foi implantado marco, já que os demarcadores consideraram o acidente geográfico “natural e imutável”. Em relação à demarcação da 5ª Queda,

ponto notável acordado nas Atas de 1874, existem três coordenadas astronômicas: a da 17ª Ata de 02/10/1874 (latitude $24^{\circ}03'51.42''S$ e longitude $54^{\circ}18'W$); a de 1934 (latitude $24^{\circ}03'58.187''S$ e longitude $54^{\circ}17'11.415''W$); e a de 1958 (latitude $24^{\circ}03'59.3''S$ e longitude $54^{\circ}17'10.5''W$) (Yacubian, 2007). Essas coordenadas divergem um pouco em relação à demarcação da **Figura 4.6**, principalmente a primeira.

FIGURA 4.6

Fronteira atual Brasil-Paraguai. Assinalado o vértice do salto nº 5.



Fonte: Google Earth, 15/11/2022.

Um trecho de fronteira com extensão aproximada de 20 km, localizado na Serra de Maracaju, nas proximidades dos Saltos das Sete Quedas, não havia sido materializado no campo, deixando dúvidas sobre a localização do limite entre as duas nações. Segundo o Governo paraguaio, com base no trabalho topográfico altimétrico da serra, o “mais alto da Serra do Maracaju” seria o ramal setentrional do trecho e não o meridional reivindicado pelo Brasil (Yacubian, 2007). Assim sendo, segundo o Brasil, pelo Tratado de Limites de 1872, a linha divisória se situaria mais ao sul da região dos Saltos (linha verde na **Figura 4.7**), enquanto o Paraguai interpretou que ela estaria mais ao norte (linha vermelha). Essa divergência equivalia a uma área de cerca de 1.300 hectares, envolvendo os contrafortes da Serra de Maracaju, área essa reivindicada pelo Paraguai. O mapa da **Figura 4.7** foi produzido por uma Comissão Mista Demarcadora dos Limites Brasil-Paraguai (Johnson, 2021).

FIGURA 4.7

Interpretações divergentes sobre a fronteira Brasil-Paraguai.



Fonte: Johnson, 2021, pág.121.

Nessa pequena diferença, em termos territoriais, reside por outro lado sensível sutileza geopolítica, pois é ela que define a posse da área dos cobiçados saltos que, segundo o Brasil, estaria quase inteiramente em seu território, enquanto na visão do Paraguai, o desnível das cachoeiras deveria ser compartilhado por ambos os países (Sória, 2012).

Uma vez que Brasil e Paraguai são detentores de grande parte da Bacia do Prata, portentoso patrimônio hidrográfico da América do Sul, propuseram alternativas de soluções para o aproveitamento hidroenergético conjunto, de modo a superar o impasse criado pela questão da fronteira na região de Sete Quedas. Em meados de 1966 chegaram a um entendimento fundamental, registrado na Ata do Iguaçu, também conhecida como Ata Final e Ata das Cataratas. Pelo Inciso III da Ata, os governos do Brasil e do Paraguai se propuseram a proceder, de comum acordo, ao estudo das possibilidades econômicas dos Saltos das Sete Quedas, pertencentes em condomínio a ambos os países. O Inciso IV estabelece “que a energia elétrica eventualmente produzida pelos desníveis do Rio Paraná, desde e inclusive o Salto Grande de Sete Quedas ou Salto de Guaíra, até a foz do Rio Iguaçu, será dividida em partes iguais entre os dois países”.

Uma vez que o Rio Paraná é um rio internacional, que nasce no Brasil, serve de fronteira do Paraguai com o Brasil, depois do Paraguai com a Argentina e, por fim, drena parte da Argentina, sua importância na compreensão do acordo sobre a gestão compartilhada dessas águas pelos dois países, e depois dela com a Argentina, culminou na celebração dos tratados internacionais que tornaram possível a construção de Itaipu. Nesse sentido, a Declaração de Assunção (1971), sobre o aproveitamento de rios internacionais da Bacia do Prata, estabelece que: 1) *“Nos rios internacionais contíguos, sendo compartilhada a soberania, qualquer aproveitamento de suas águas deverá ser precedido por um acordo bilateral entre os ribeirinhos”, preceito aplicável no caso de Brasil e Paraguai* e 2) *“Nos rios internacionais de curso sucessivo, não sendo compartilhada a soberania, cada Estado pode aproveitar as águas conforme suas necessidades sempre que não causar prejuízo sensível a outro Estado da Bacia”, preceito aplicável a Brasil e Paraguai com relação à Argentina.*

O chanceler brasileiro Mário Gibson Barboza, que ao final de 1966 assumiu o cargo de Embaixador do Brasil no Paraguai, relata o surgimento da alternativa discutida com o Ministro das Relações Exteriores do Paraguai, Raúl Sapena Pastor, de construção de uma hidrelétrica na fronteira, à luz do espírito de cooperação presente na Ata do Iguaçu, tendo como argumento que *“o território em litígio forçosamente seria coberto pelas águas da represa, eliminando-se, assim, o objeto mesmo da disputa (os saltos)”*. Pelo acolhimento dessa proposta por ambas as altas partes *“nascia Itaipu”,* segundo palavras do próprio Gibson Barboza.

Logo depois, em 1967, foi criada a Comissão Mista Técnica Brasileiro-Paraguai com a finalidade de realizar os estudos sobre o aproveitamento hidrelétrico, de modo a implementar a Ata do Iguaçu. O consórcio formado pelas empresas IECO (International Engineering Company Inc), dos EUA, e a ELC (Eletroconsult Spa), italiana, foi o escolhido para a realização dos estudos de viabilidade e para a elaboração do projeto da obra.

Seis anos mais tarde, em 26 de abril de 1973, Brasil e Paraguai assinaram então o Tratado Tripartite Itaipu-Corpus, tendo em vista as tensões com a Argentina, também signatária do Tratado, com relação aos recursos hídricos da Bacia do Paraná.

Depois de solucionados os impasses territoriais e diplomáticos, podem ser citados alguns episódios políticos internos brasileiros que fazem parte da proto-história de Itaipu e merecem ser relatados (Silva & outros, 2019).

Quando, entre 1960 e 1964, intensificaram-se os estudos para o aproveitamento hidrelétrico do Rio Paraná, existiam alternativas defendidas inicialmente pelo setor privado estrangeiro, entre as quais a construção de uma série de hidrelétricas ao norte de Sete Quedas. A sequência de barragens teria a mesma potência total instalada de uma grande usina, porém não teria a mesma capacidade de armazenamento de água para os períodos de estiagem, diminuindo a quantidade anual de energia produzida. Uma segunda opção era a de uma única grande usina, totalmente nacional, a montante de Guaíra (Paranayara – BOX, no **item 3.2.13**), a qual provocou críticas do Paraguai que não participaria de qualquer uma das alternativas.

Durante o Governo de João Goulart surgiu a opção de uma usina de grande porte com apoio da URSS, cujos engenheiros vieram ao Brasil analisar a região e desenvolver o projeto, em 1963. Eram liderados pelo Eng^o Ivan Komim, projetista da Usina de Assuã, no Egito. O projeto teria turbinas soviéticas para geração entre 10 e 12 GW e contaria com financiamento da URSS a juros baixíssimos e facilitados para pagar a dívida em produtos nacionais (café, açúcar, alimentos industrializados) e outras vantagens, como interconexão hidroviária das bacias Amazônica e Platina, além de fornecimento de petróleo e combustíveis pela Rússia. Essa aproximação, como parte da Política Externa Independente, iniciada no Governo Jânio Quadros e aprofundada por Jango, acabou interrompida com o Golpe Militar de 1964. A partir daí, voltou a ser analisada pelo governo militar, a opção de “Ilha Grande” (BOX no **item 3.2.14**) barragem totalmente nacional que seria construída a montante de Guaíra.

O projeto foi debatido publicamente entre 1964 e 1965 pelo governo militar brasileiro, o que levou a uma séria crise com o Paraguai, que resultaria completamente excluído do projeto. Essa usina, mais ao norte, inviabilizaria a construção de outra na área das Sete Quedas, aí sim de caráter binacional. Esse processo levou à crise diplomática de 1965-1966, quando o Governo Paraguaio do Presidente Stroessner voltou a reivindicar a área objeto de litígio, localizada entre as Sete Quedas e a parte norte da Serra de Maracaju.

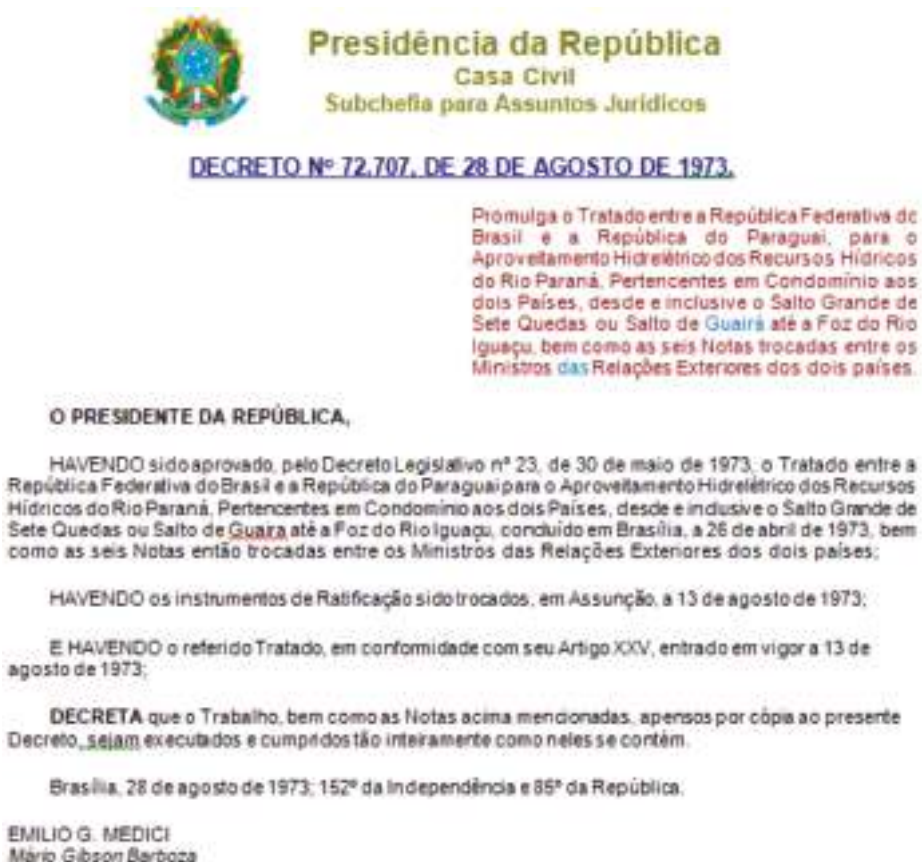
Para evitar um conflito armado entre os regimes militares, os corpos diplomáticos dos dois países empreenderam intensos esforços para viabilizar um acordo diplomático. Em função das pressões paraguaias, o governo brasileiro recuou e mudou sua estratégia, passando a considerar novamente a opção de uma hidrelétrica binacional. O acordo foi, assim, formalizado na Ata das Cataratas em 1966,

a qual previa que qualquer empreendimento hidrelétrico seria binacional e não podia resultar na alteração da fronteira.

A Comissão Mista Técnica Brasileiro-Paraguaia detalhou os acordos nos anos seguintes e finalizou o relatório para construção da usina em 1972. Esses esforços viabilizaram o Tratado de Itaipu, assinado em 26 de abril de 1973, que estabelece: *“As instalações destinadas à produção de energia elétrica e as obras auxiliares não produzirão variação alguma nos limites entre os dois países, estabelecidos nos tratados vigentes”* (Brasil & Paraguai, 1973). A seguir, a folha de rosto do referido tratado (Figura 4.8).

FIGURA 4.8

Folha de rosto do Decreto de assinatura do Tratado de Itaipu, em 1973.



Fonte: file:///G:/ITAIPU/D72707.html.

Com o posterior Tratado Tripartite Argentina-Brasil-Paraguai, em 1979, ficou acordado que a Usina de Itaipu teria seu tamanho máximo limitado, a fim de não inviabilizar a Usina de Corpus Christi, ao sul, em território argentino. Assim, a solução encontrada acabou resultando em um lago menor do que o previsto inicialmente, de modo a não inundar toda a área disputada entre Brasil e Paraguai, como se imaginava nos acordos de 1966 e 1973, sendo que o restante da área disputada acabou transformada no Refúgio Biológico de Maracaju, administrado pela Itaipu Binacional.

Em outubro de 1982, as águas do reservatório de Itaipu alcançaram e cobriram os saltos das Sete Quedas, pondo fim a uma disputa histórica entre os dois países.



PROJETO E CONSTRUÇÃO DE ITAIPU

Cabe aqui uma breve referência aos recursos financeiros para a construção de Itaipu. De 1952 até 1966, os projetos pretendidos para exploração do Rio Paraná eram nacionais apenas, quase todos elaborados no âmbito da Comissão Interestadual da Bacia do Paraná-Uruguai (CIBPU). Em 1964, as políticas nacionais desenvolvimentistas foram substituídas por um novo arranjo político institucional, quando setores conservadores representados pelas Forças Armadas impuseram um golpe de estado. Em nível internacional, o período compreendido entre o Pós-Segunda Guerra Mundial até os anos 1970 representou grande êxito para a acumulação capitalista. Contudo, com o fim da reconstrução da Europa, não havia mais onde aplicar o capital excedente. Havia excesso de liquidez. Uma das saídas encontradas pelo capital rentista mundial foi fazer investimentos em países não desenvolvidos. Sobre esse período, Harvey (in Maggi, 2015) fez a seguinte consideração: *Os bancos de investimento de Nova York, então lotados de excedentes [...] e desesperados por novas oportunidades de investimento num momento em que o potencial de rentabilidade de investimento dentro dos Estados Unidos estava exausto, fizeram*

empréstimos maciços para países em desenvolvimento como México, Brasil, Chile e até mesmo para Polônia.

A política de financiamento externo foi bem recebida pelos países latino americanos, principalmente por aqueles que mantinham o poder político sob o comando das forças armadas. A presença de maciço investimento externo foi uma das primeiras marcas da retomada do crescimento econômico no Brasil e a indústria elétrica foi um dos principais destinos desses recursos. Esse conjunto de investimentos foi incorporado ao Plano Nacional de Desenvolvimento (PND - 1972 a 1974) (Maggi, 2015).

5.1 Estudo de alternativas de eixo

Em 1970, o consórcio formado pela International Engineering Company Inc. (IECO) dos Estados Unidos e pela Eletroconsult Spa. (ELC) da Itália recebeu a incumbência de realizar os estudos de viabilidade para o aproveitamento hidroenergético do Rio Paraná, no trecho compreendido entre os saltos das Sete Quedas e a foz do rio Iguaçu, no Estado do Paraná, tarefa a ser cumprida no prazo de quatro anos. O contrato de consultoria foi assinado em novembro daquele ano e os trabalhos foram iniciados em fevereiro de 1971.

Em curto espaço de tempo foram levadas a termo atividades próprias dos estudos de inventário, uma vez que ainda não havia se decidido se seria implantada uma única usina de grande altura ou seria dada preferência a duas usinas de menor queda e tampouco haviam sido tomadas decisões a respeito do(s) sítio(s) do(s) empreendimento(s).

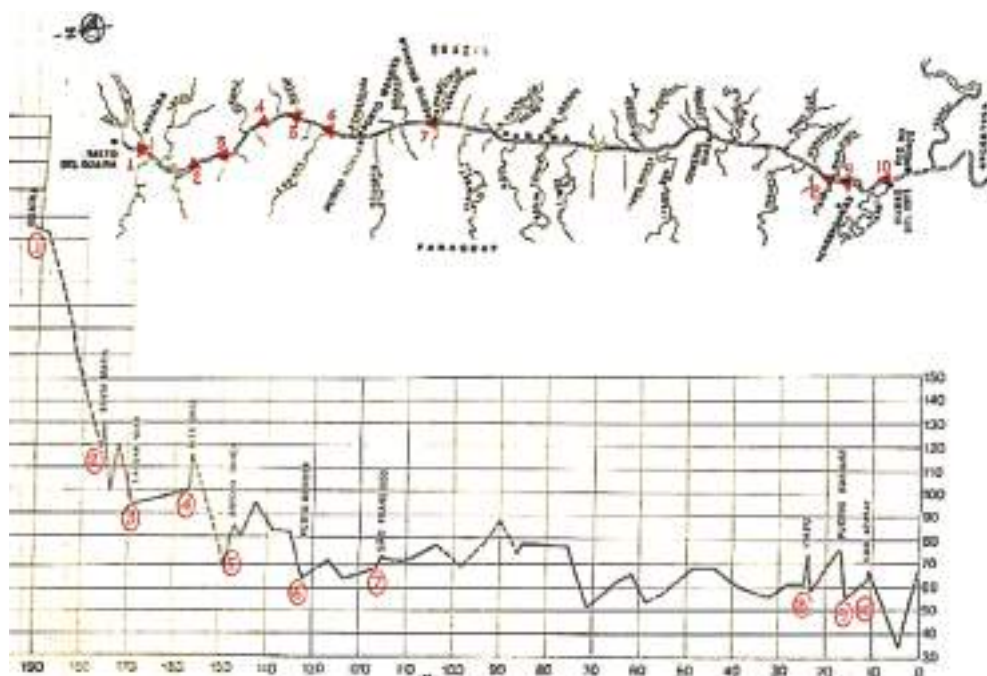
Em cumprimento desse programa, o consórcio apresentou, em fins de 1972, um relatório preliminar contendo os resultados do inventário efetuado sobre as possibilidades de aproveitamento. O inventário abrangeu o estudo de 10 possíveis locais de barramento, ao longo do trecho do Rio Paraná compreendido entre os dois extremos já referidos, numa extensão de aproximadamente 170 km em linha reta.

Para cada sítio foram avaliados diferentes arranjos de posicionamento das principais estruturas de barramento, que totalizaram cerca de 50 esquemas de aproveitamento do potencial hidráulico. A **Figura 5.1**, a seguir, mostra a localização dos sítios analisados.

As comparações técnico-econômicas das diferentes possibilidades levaram à seleção prévia de duas alternativas, a primeira constando de uma barragem única no sítio de Itaipu, cerca de 14 km a montante da foz do Rio Iguaçu, aproveitando integralmente a queda disponível. A segunda alternativa era representada por duas barragens de menor altura, uma em Santa Maria, a 150 km de distância rumo a montante, aproveitando o desnível desde a cota 220 m a montante das Sete Quedas até a cota 170 m; a outra em Itaipu, entre a cota 170 m e a do nível natural do rio nesse local (cota 105 m, aproximadamente). Nas duas alternativas a casa de força se localizaria ao pé de cada barramento.

FIGURA 5.1

Planta e perfil longitudinal do Rio Paraná – Assinaladas as 10 alternativas de sítio estudadas.



Fonte: Itaipu Binacional, 1994, modificado.

O confronto entre as duas alternativas mostrou ser a primeira, consistindo em uma única barragem alta em Itaipu, vantajosa em relação à segunda, tendo sido adotada essa solução. A **Tabela 5.1** apresenta a comparação entre as duas alternativas em termos de custos.

Tabela 5.1 – Comparação entre alternativas de divisão de queda – 1972.

DADOS BASE	UNIDADE	ALTERNATIVAS SELECIONADAS			
		uma barragem	duas barragens		
		Itaipu alta	Itaipu baixa	Santa Maria	Total
Altura da barragem	m	171	131	92	
NA normal de montante	m	220	180	220	
NA normal de jusante	m	100	100	180	
Capacidade de geração	MW	10.710	7.755	2.385	10.140
Área do reservatório	km ²	1.350	140	42	182
Capacidade do reservatório	10 ⁶ m ³	29.000	4.980	440	5.420
Capacidade do vertedouro	m ³ /s	58.000	61.400	61.400	
Estimativa de custo global	10 ⁶ US\$	2.033	1.663	826	2.489
Custo do kW instalado	US\$/kW	190	214	346	245
Custo da subestação de 765-kV e outros*	US\$/kW	14.5		22,9	

*Sem linha de transmissão

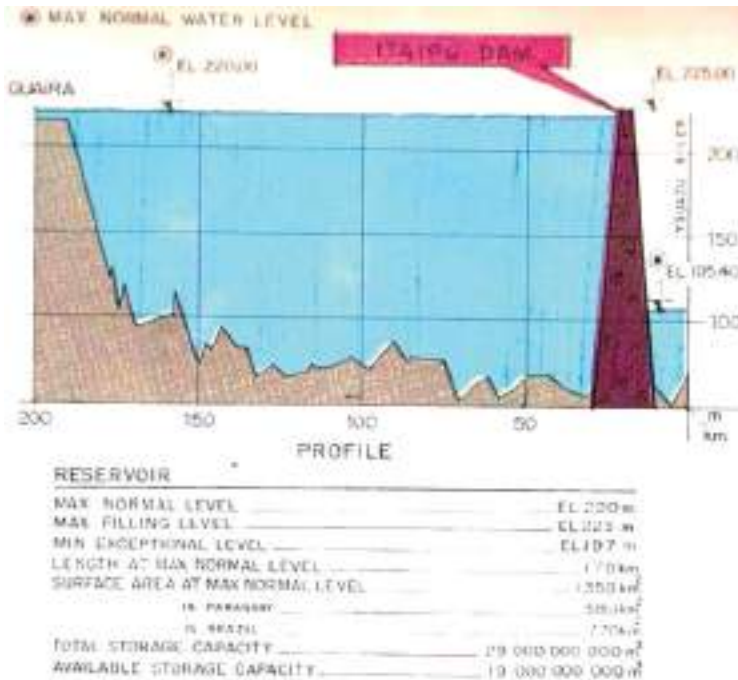
Fonte: Itaipu Binacional, 2000.

A escolha final da alternativa consta do Anexo B do Tratado de Itaipu, assinado em abril de 1973 e possui as características gerais apresentadas na **Figura 5.2**.

Dentre as alternativas de posicionamento da casa da força, na busca de um critério de simetria, foi avaliada a possibilidade de bipartí-la, situando metade da capacidade de geração em cada margem. Esse procedimento tem sido adotado em diversos casos de construção de usinas hidrelétricas em rios de divisa entre países. Em Itaipu, a alternativa de bipartição foi avaliada, tendo-se mostrado mais onerosa do que a finalmente adotada, que posicionou a casa de força no centro do vale, em correspondência ao leito natural do rio (Cotrim, 1999). A solução adotada teve, dentre outros aspectos positivos, o mérito de evitar que a casa de força se localizasse em uma ou outra margem, isto é, em um ou outro país.

FIGURA 5.2

Solução adotada em Itaipu. Seção longitudinal e características gerais.



Fonte: Itaipu Binacional, 2000.

5.2 Primeiras atividades de campo

Para o desenvolvimento dos estudos foram empreendidas investigações de campo e laboratório, cobrindo todas as áreas de projeto. No que diz respeito às condições geológicas que seriam encontradas no leito do rio, lançou-se mão, de início, da presença de um espigão rochoso que aflorava no leito, no sítio de Itaipu, na época denominado Tapuyetê, para realizar uma sondagem mecânica durante as águas baixas (**Figura 5.3**). O afloramento era conhecido como “a pedra que canta”.

O espigão rochoso aparecia na época das águas baixas e serviu de apoio para a plataforma erguida para alojar a sonda, elevada diversos metros acima da rocha, como forma de proteção contra as fortes flutuações do nível d’água, que podiam alcançar vários metros em um único dia, mesmo sem causa aparente, devido à estreiteza do *canyon*. As **Figuras 5.4** e **5.5** mostram aspectos da plataforma, que

teve uma base de concreto apoiada sobre o afloramento e sobre a qual foi erguida a estrutura metálica e de madeira.

FIGURA 5.3

Afloramento rochoso no meio do rio, no sítio de Itaipu (Tapuyetê), conhecido como “a pedra que canta”.



Fonte: Itaipu Binacional, 1994.

FIGURA 5.4

Plataforma para realização de uma sondagem no espigão rochoso de Itaipu.



Fonte: https://www.youtube.com/watch?v=4_SCd2aavB4.

FIGURA 5.5

Outra vista da plataforma de sondagem.



Fonte: Dois países, um acordo: 50 anos do tratado de Itaipu. https://www.youtube.com/watch?v=4_SCd2aavB4.

Mais tarde, em 1974, os trabalhos de prospecção do subsolo passaram a ser feitos por sondagens inclinadas a partir das duas margens, ou utilizando-se um navio, adaptado para este fim e devidamente ancorado. Ainda assim, os trabalhos foram seriamente dificultados pelas bruscas e constantes oscilações do nível d'água. Durante uma das cheias do rio foi registrada uma variação do nível de mais de 25 m, com oscilações diárias de dois a três metros. Tais oscilações acarretaram, por diversas vezes, a ruptura dos cabos de ancoragem, até mesmo a soltura das âncoras, exigindo a adoção de medidas de segurança, com a utilização de até oito pontos de fixação das âncoras.

A velocidade das águas, de até dois a três metros por segundo, causou frequentes quebras da tubulação de revestimento, com perda de furos parcialmente executados. A lâmina d'água, da ordem de 50 metros, tornava difícil a descida

da composição e a própria determinação da cota do topo rochoso. Volumosos acúmulos de blocos rochosos no fundo do rio, com até 25 m de espessura, dificultavam as operações de perfuração, devido à mobilidade do material. Até mesmo os fortes ventos canalizados no *canyon* e as condições climáticas nos meses inverniais, com forte neblina, dificultavam o posicionamento do navio.

5.3 Definição do tipo de barragem

5.3.1 Características gerais

O local de implantação da barragem situa-se 14 km a montante da ponte internacional entre Foz do Iguaçu e Ciudad del Este (**Figura 5.6**).

FIGURA 5.6

A ponte da Amizade em construção (início dos anos 60).



Fonte: <https://g1.globo.com/pr/oeste-sudoeste/noticia/2022/03/18/fotos-confira-registros-historicos-da-ponte-da-amizade-na-fronteira-entre-brasil-e-paraguai.ghtml>.

O barramento tem um desenvolvimento total de 7,7 km, sendo que o eixo apresenta diversas mudanças de direção, em atendimento aos requisitos hidráulicos. As estruturas de geração ocupam o centro do vale, ladeadas por barragens de

concreto, terra e enrocamento. O canal de desvio, parte importante do arranjo geral, se situa na margem esquerda, enquanto o vertedouro ocupa o alto da ombreira direita. A **Figura 5.7** traz o arranjo geral em vista aérea a partir da margem direita.



Fonte: Patias & outros, 2017.

Algumas características das estruturas que integram o aproveitamento constam da **Tabela 5.2**.

Tabela 5.2 – Estruturas constituintes o barramento.

TIPO DE BARRAGEM	LOCALIZAÇÃO	EXTENSÃO (m)	ALTURA MÁXIMA (m)
Terra	Nas duas margens	$872 + 2.294 = 3.166$	30
Enrocamento	Na margem esquerda	1984	80
Vertedouro	Na margem direita	362	44
Contrafortes	Nas duas margens	$986 + 323 = 1.309$	86
Gravidade aliviada	No leito do rio	612	196
Gravidade maciça	No canal de desvio	170	162

Fonte: Szpilman & Piasentin, 1989.

Os quantitativos referentes à construção da obra são ciclólicos, conforme mostra a **Tabela 5.3**, que traz alguns deles.

Tabela 5.3 – Alguns dos quantitativos da obra.

ATIVIDADE	VOLUME (x 10 ⁶ m ³)
Escavação comum	25,4
Escavação em rocha	34,6
Argila	9,8
Enrocamento	18,3
Concreto	11,9

5.3.2 Barragem principal

Nos estudos de viabilidade técnica foram considerados vários tipos de seção de barragem para o trecho correspondente ao leito do rio, a saber: a) concreto gravidade, b) concreto gravidade aliviada, c) arco-gravidade e d) enrocamento, tendo sido selecionada a segunda alternativa, após comparação que levou em conta aspectos estruturais, de logística construtiva, incluindo o cronograma e custos. A barragem principal, que ocupa o leito do rio, é constituída por 18 blocos caracterizados pela estrutura de gravidade aliviada, dos quais 16 correspondem à tomada d'água.

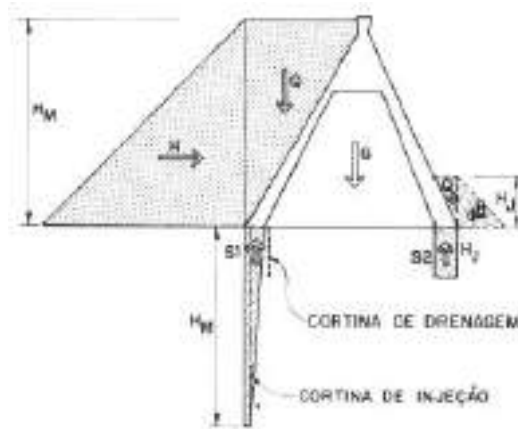
A barragem de gravidade aliviada apresenta espaços vazios em determinadas áreas da seção, o que resulta em economia de concreto, sem prejuízos para as condições de estabilidade global e segurança. A **Figura 5.8** apresenta uma seção típica para esse tipo de barragem, observando-se que o paramento de montante, mais inclinado do que em seções típicas de concreto gravidade, favorece a condição de estabilidade e apresenta outras vantagens, como propiciar uma melhor dissipação térmica na cura do concreto, possibilitar o acesso ao seu interior e favorecer o alívio de subpressões pela menor superfície de contato com o substrato rochoso e pela facilidade de executar drenos na fundação a partir da superfície da rocha.

A **Figura 5.9** mostra a seção de um bloco típico de gravidade aliviada incorporando a estrutura da tomada d'água. Na parte inferior da figura está representada a seção horizontal de uma sucessão de blocos, cada qual com 34 m de largura (paralelamente ao eixo da barragem). A altura máxima da barragem é de 196 m, a partir do ponto mais baixo da fundação, no leito do rio.

Cabe lembrar que na época da construção de Itaipu o recorde de altura para barragens de gravidade aliviada havia sido estabelecido pela barragem de Alcântara, na Espanha, com 130 m de altura máxima, de modo que Itaipu representou um aumento de 50% em altura sobre o recorde anterior.

FIGURA 5.8

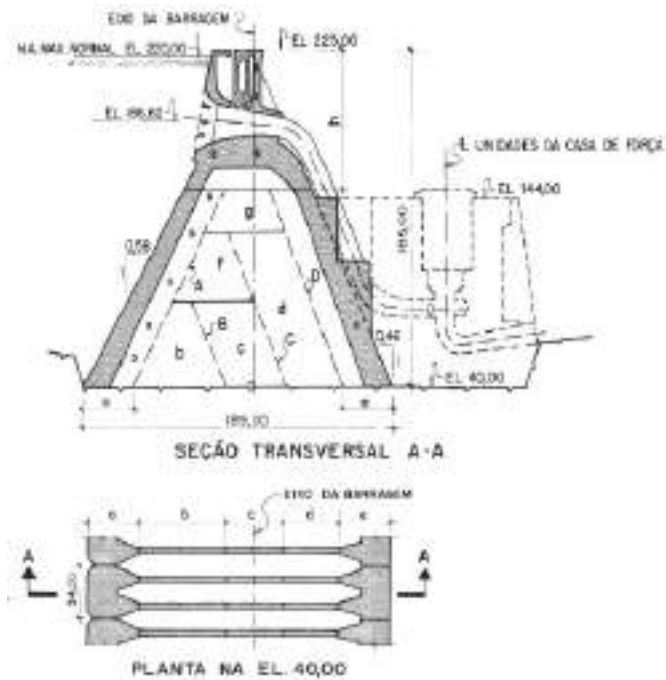
Seção de gravidade aliviada e condições de carregamento.



Fonte: Szpilman & Piasentin, 1989.

FIGURA 5.9

Seções de bloco típico da tomada d'água.



Fonte: Szpilman & Piasentin, 1978.

O concreto empregado na construção da barragem principal possui resistência à compressão simples variável entre o mínimo de 14 MPa para as zonas de tensões baixas e o máximo de 21 MPa para as zonas mais solicitadas.

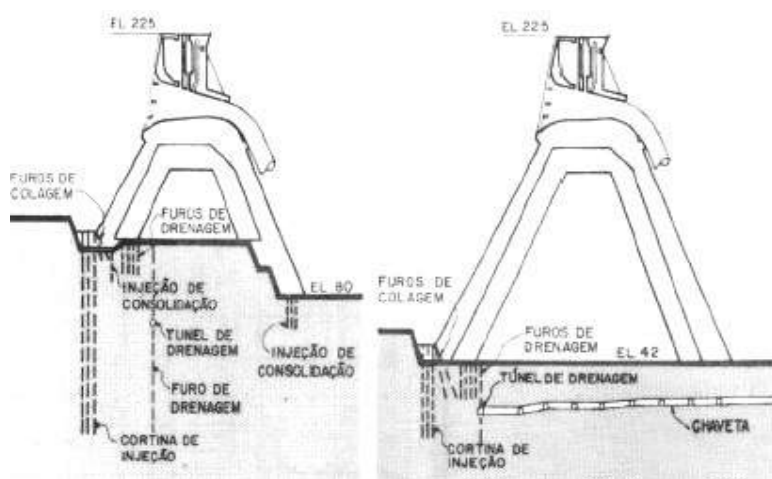
Por razões geológicas, a fundação da barragem principal, em correspondência aos blocos mais altos, exigiu um intenso tratamento por meio de túneis, para implantação de chavetas de concreto, de modo a aumentar a resistência ao cisalhamento em correspondência a extensas juntas sub-horizontais, que representavam planos de fraqueza estrutural. Este assunto será objeto de descrição mais detalhada no **item 5.7**.

A **Figura 5.10** documenta duas seções com altura diferente, a segunda correspondendo a um dos blocos de maior altura, localizado no leito do rio e indica os principais dispositivos implantados na fundação das estruturas, para prover condições de estabilidade, a saber: cortina de injeções de vedação, injeções de consolidação na fundação, rede de drenos verticais ultrapassando em profundidade o túnel de drenagem aberto no maciço rochoso e as chavetas de concreto adotadas já na fase construtiva do empreendimento.

Na fundação dos blocos de maior altura, no leito do rio, foram abertos três túneis de drenagem no maciço rochoso, em ambos os lados, paralelamente ao eixo da barragem.

FIGURA 5.10

Seções da barragem principal.



Fonte: Szpilman, 1981.

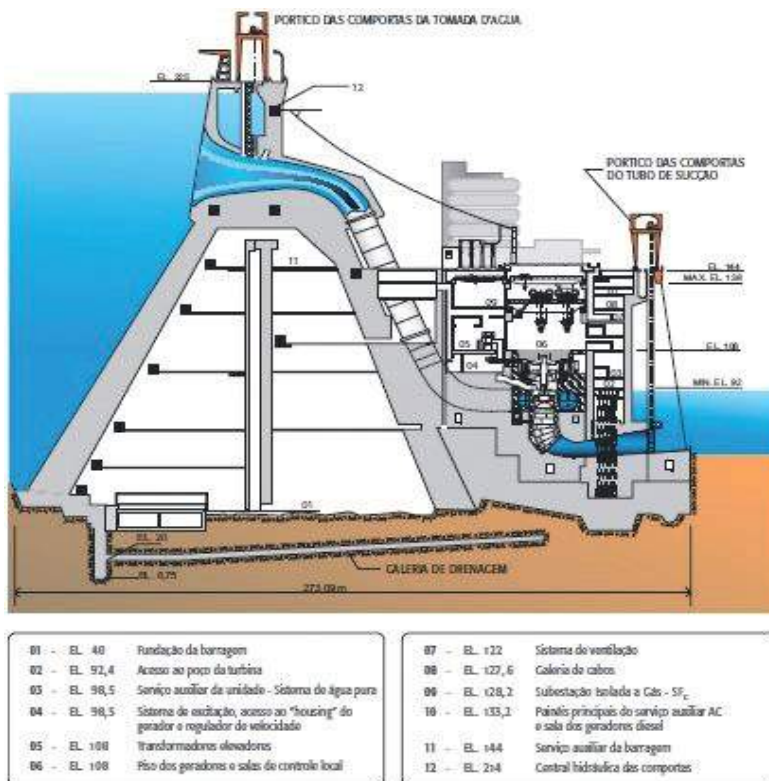
5.3.3 Casa de força

A casa de força é uma estrutura que ocupa o leito original do rio, no pé da barragem, com extensão de 968 m, altura máxima de 112 m e largura máxima de 99 m. A potência nominal da usina é de 12.600 MW, distribuída em 18 unidades geradoras. Cada unidade geradora possui queda líquida de projeto de 118,4 m e engolimento de 660 m³/s, com turbinas tipo Francis com potência nominal de 715 MW.

As 18 unidades se distribuem em intervalos de 34 m, sendo três delas localizadas na estrutura do canal de desvio e 15 no leito do rio. O projeto contemplou espaço suficiente para a eventual implantação de duas unidades complementares, uma no canal de desvio outra no canal do rio. A **Figura 5.11** apresenta uma seção típica.

FIGURA 5.11

Seção do conjunto tomada d'água-casa de força.



Fonte: Itaipu, 2017.

Os condutos forçados possuem diâmetro interno de 10,5 m e são totalmente revestidos com concreto, apoiando-se no paramento jusante da barragem. Cada conduto tem cerca de 142 m de comprimento até a entrada da caixa espiral, sendo que a espessura da chapa varia entre 30 e 65 mm.

5.3.4 Desvio do rio

O desvio do rio Paraná representou uma das mais gigantescas tarefas empreendidas na construção da UHE Itaipu, pela dimensão do rio, pelo tamanho das estruturas, pelo volume das escavações e pelo tempo requerido para sua completação. Este tema é objeto de apreciação no **item 5.6**, devido à abordagem concomitante dos aspectos de projeto e de construção.

5.3.5 Ensecadeiras

Particularmente complexa foi a construção das ensecadeiras principais de montante e jusante no leito do rio, devido à profundidade da lâmina d'água e à presença de espessos acúmulos de blocos rochosos e areias no fundo do rio. Cada ensecadeira foi formada por dois diques de enrocamento lançados dentro da água e por um núcleo de argila, também lançado, em grande parte, dentro da água, totalizando cerca de 90 m de altura. A altura do núcleo de argila lançado na água alcançou 60 metros, sendo que os restantes 30 metros foram lançados a seco, segundo especificações usuais de aterro compactado. As **Figuras 5.12 e 5.13** apresentam as plantas e as seções das referidas estruturas provisórias.

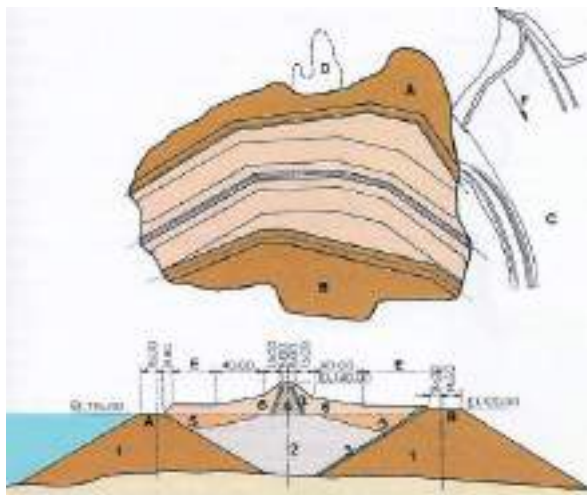
A estanqueidade das ensecadeiras foi conseguida através da dragagem de uma faixa de 40 m de largura, no fundo do rio, em correspondência à fundação do núcleo, tendo sido removidos os depósitos de areia e também os blocos de rocha existentes, controlando-se os resultados através de levantamentos batimétricos com sonar e também por mergulhadores equipados com câmaras de TV. Os taludes adotados para os diques de enrocamento chegaram a ter inclinações de até 1,6H:1,0V.

Para a construção dos diques de enrocamento, foi utilizada a rocha obtida das escavações que não era adequada para emprego como agregado. Essa rocha foi classificada em quatro categorias, conforme o tamanho dos blocos:

- Grau I < 30 cm,
- Grau II = 30-60 cm (*tout venant*),
- Grau III = 60-120 cm - rocha selecionada,
- Grau IV > 120 cm - rocha selecionada.

FIGURA 5.12

Planta e seção da enseadeira de montante.

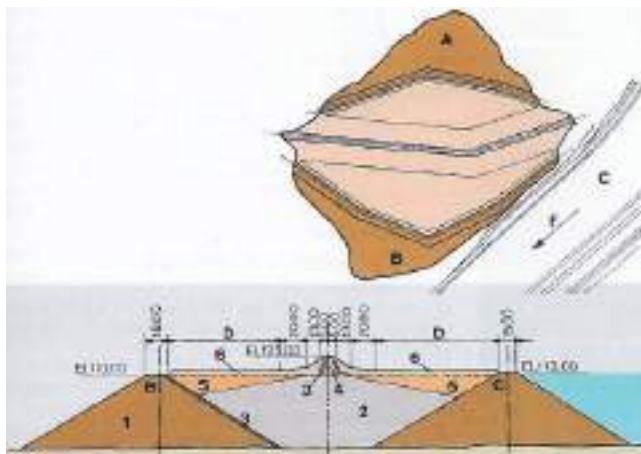


Legenda: A) Dique A; B) Dique B; C) Canal de desvio; D) Rochedo de Itaipu; F) Sentido do fluxo; 1) Enrocamento lançado na água; 2) Solo lançado na água; 3) Transição; 4) Solo argiloso compactado; 5) *Random* lançado na água; 6) *Random* compactado.

Fonte: Fiorini, 2009.

FIGURA 5.13

Planta e seção da enseadeira de jusante.



Legenda: A) Dique C; B) Dique D; C) Canal de desvio; F) Fluxo; 1) Enrocamento lançado na água; 2) Solo lançado na água; 3) Transição; 4) Solo argiloso compactado; 5) *Random* lançado na água; 6) *Random* compactado.

Fonte: Fiorini, 2009.

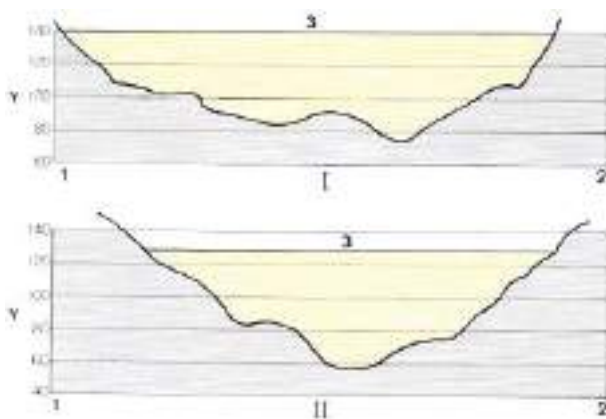
Não houve falta de material de grau II, obtido das escavações das estruturas de desvio. Todavia, para obtenção dos 800.000 m^3 de material de grau III previstos, foi necessário realizar uma detonação especial controlada. Um volume total de 150.000 m^3 de grandes blocos de grau IV foi estocado em ambas as margens.

O vão livre entre as duas ensecadeiras foi de 800 m, de modo a permitir espaço suficiente para a construção da barragem principal, a casa de força e o canal de fuga escavado. Depósitos de aluviões arenosos e matacões soltos no leito do rio foram identificados por levantamentos batimétricos e por furos de sondagem, nos locais das ensecadeiras principais.

Durante a estiagem, de maio a novembro, a descarga média do Paraná era de $6.500 \text{ m}^3/\text{s}$. Para essa vazão, nos locais das ensecadeiras principais, a profundidade do rio variava de 30 a 35 m na ensecadeira de montante e de 40 a 45 m na de jusante. Neste contexto, uma complexa fase na construção das ensecadeiras foi representada pela dragagem dos aluviões arenosos e pela remoção de matacões nas áreas de contato dos dois núcleos de argila com o embasamento rochoso do fundo do rio (**Figura 5.14**).

FIGURA 5.14

Seções batimétricas ao longo das ensecadeiras.



Legenda: I) Ensecadeira de montante; II) Ensecadeira de jusante; Y) Altitude; 1) Margem esquerda; 2) Margem direita; 3) Crista.

Fonte: Fiorini, 2009.

O fechamento das ensecadeiras no leito do rio foi completado em 30/10/1978, quando a vazão do rio Paraná era de $8.100 \text{ m}^3/\text{s}$.

Para prevenção de eventuais problemas, não previstos, para a época de fechamento final do rio, 4.000 tetraedros de concreto de oito toneladas cada um foram moldados e dispostos nas margens do rio (**Figura 5.15**).

FIGURA 5.15

Tetraedros de concreto dimensionados para o fechamento e desvio do rio Paraná de seu leito natural.



Fonte: Acervo dos autores.

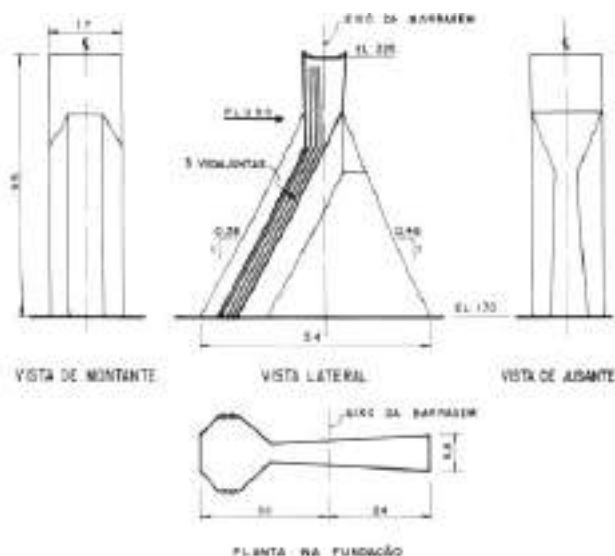
5.3.6 Barragem de contrafortes

A solução em contrafortes foi adotada por coerência com o projeto da barragem principal, considerando que, apesar da maior complexidade executiva, acarretaria um volume de concreto consideravelmente inferior ao de uma seção de gravidade plena. As análises comparativas levaram em conta os aspectos de estabilidade, tensões admissíveis, métodos e cronograma construtivos e custos. Considerou-se, também, que a menor área de incidência sobre a fundação em rocha resultaria em figuras de subpressão menores no contato concreto-rocha e favoreceria a adoção de eventuais medidas de intervenção futuras, pela facilidade de acesso.

Os trechos em contraforte caracterizam a barragem lateral direita e a barragem de ligação esquerda. A barragem lateral direita possui 986 m de extensão, em curvatura suave, constituída por blocos típicos com 17 m de largura, conforme mostra a **Figura 5.16**, a seguir.

FIGURA 5.16

Barragem de contrafortes.



Fonte: Szpilman, 1981.

A barragem lateral direita é formada por 83 blocos, com altura entre 35 e 85 m. Cada bloco típico consome um volume de concreto 30% inferior ao de uma seção gravidade. Um bloco com fundação na El. 170,00 m, portanto com altura de 55 m, consumiu cerca de 14.000 m³ de concreto.

5.3.7 Vertedouro

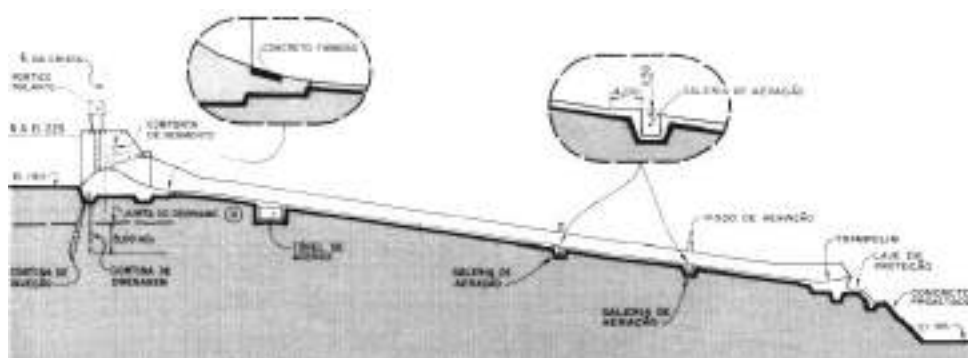
O vertedouro, que tem a função de descarregar as vazões excedentes, se localiza no alto da ombreira direita, suficientemente afastado da casa de força, cerca de um quilômetro, de modo a não causar interferência nos níveis de jusante ou na formação de barra. A **Figura 5.17** apresenta a seção longitudinal do conjunto de estruturas que integram o vertedouro, observando-se que o acesso à usina é feito através do túnel de sob as calhas. São visíveis, ainda, duas galerias de aeração, ligadas a poços, que tem a função de combater a cavitação que poderia decorrer da velocidade do fluxo na superfície da calha.

A estrutura do vertedouro é a de um descarregador de encosta convencional, seguido por longas calhas inclinadas que conduzem as águas para um salto de esquí, onde ocorre o destaque, o fluxo incidindo em seguida sobre um colchão de

água com espessura mínima superior a 30 metros, este com o propósito de atenuar os efeitos erosivos nas paredes rochosas circunvizinhas.

FIGURA 5.17

Vertedouro- Seção longitudinal.



Fonte: Szpilman, 1981.

Optou-se pela definição de três calhas separadas, o que conferiu flexibilidade operacional. A calha esquerda foi dotada de seis comportas e as duas outras de quatro comportas cada, totalizando 14 comportas. Cada calha tem capacidade de descarregar um fluxo d'água equivalente à descarga média anual do Rio Paraná no sítio ($2 \times 8.440 \text{ m}^3/\text{s}$). Com o reservatório na el. 223,00 m, a capacidade máxima de descarga do vertedouro é de $62.230 \text{ m}^3/\text{s}$. A **Figura 5.18** mostra o aspecto geral do vertedouro durante uma cheia, em 1983.

FIGURA 5.18

Vertedouro durante uma cheia, em 1983.



Fonte: CBDB, 2002.

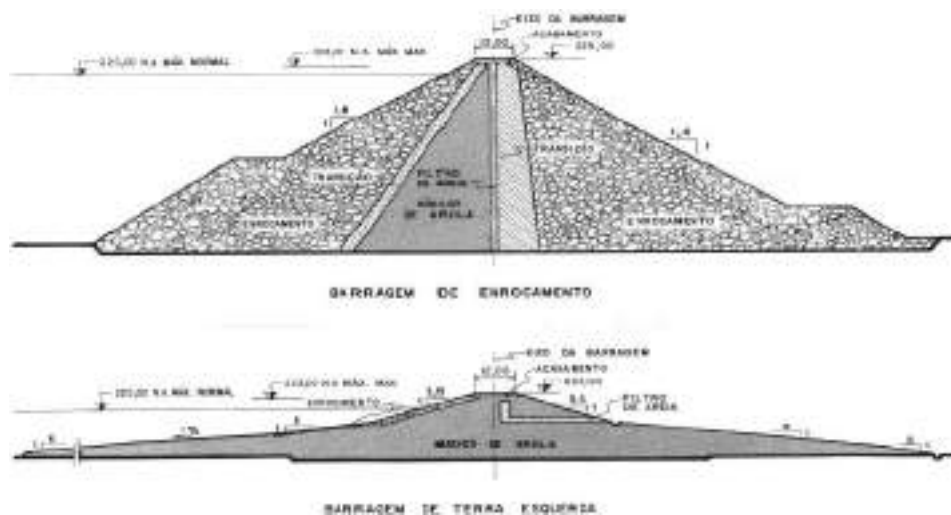
5.3.8 Barragens de terra e enrocamento

Na ombreira direita, para além do vertedouro, um maciço de terra de pequena altura, com 872 m de extensão, completa o barramento. Já, na margem esquerda, uma barragem de enrocamento se conecta com a barragem de concreto de ligação e se estende até transitar para um maciço de terra homogêneo, que fecha o barramento naquela ombreira.

A barragem de enrocamento da margem esquerda possui extensão de 1.984 m e altura variável entre 30 m e 70 m, sendo constituída por um núcleo central impermeável delgado, ladeado por dois espaldares de enrocamento, este proveniente das escavações obrigatórias do canal de desvio. A **Figura 5.19** apresenta a seção dos dois trechos de barragens na margem esquerda.

FIGURA 5.19

Acima: Seção da barragem de enrocamento; Abaixo: Seção da barragem da margem esquerda.



Fonte: Szpilman, 1981.

5.4 Técnicas de investigação

Como já referido, os estudos preliminares foram iniciados em 1972, com o levantamento dos primeiros dados geomecânicos e realização de sondagens pioneiras, uma delas sobre o afloramento de rocha no leito do rio. O levantamento

geológico de superfície foi complementado por trincheiras escavadas em rocha nas ombreiras.

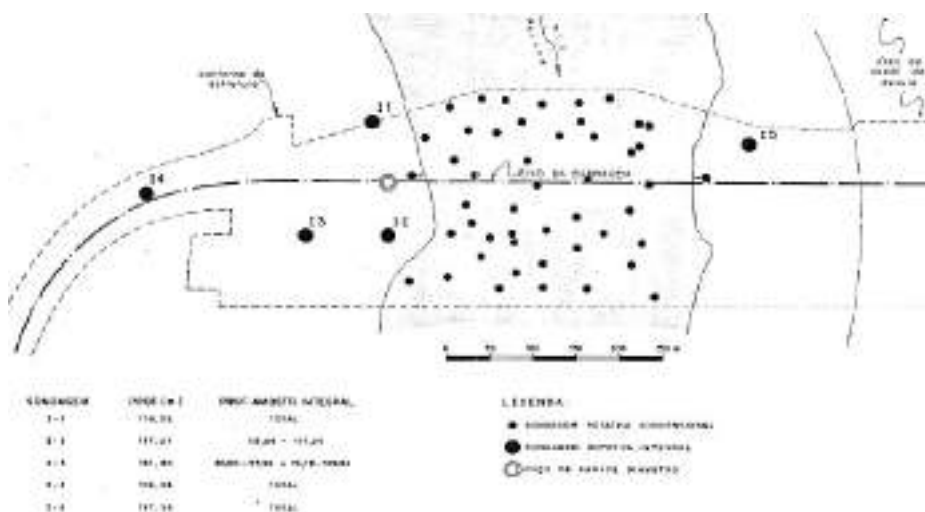
A partir de 1974, para definição e caracterização do quadro geológico local, lançou-se mão de técnicas de investigação direta e indireta. Dentre as técnicas diretas registram-se:

- 50.000 metros lineares de sondagem convencional,
- 720 metros lineares de sondagem integral,
- 400 metros de poços em rocha,
- 1.000 metros de túneis e
- 11 trincheiras.

Conforme exposto no item anterior, a execução de sondagens no leito do rio, a partir do navio-sonda adaptado para essa finalidade, enfrentou dificuldades diversas, decorrentes das severas condições que o Rio Paraná impunha. Sondagens integrais, requeridas para melhor caracterização de aspectos geológicos estruturais, não puderam ser viabilizadas a partir da embarcação e foram transferidas para as margens. A **Figura 5.20** mostra a localização em planta das sondagens integrais, bem como a densidade de sondagens no leito do rio.

FIGURA 5.20

Localização das sondagens feitas antes do desvio do rio.



Fonte: Itaipu Binacional, 1982.

As cinco sondagens integrais indicadas na figura alcançaram profundidade superior à centena de metros cada, sendo que a I-3, na margem direita (indicada como 13 na figura) atingiu 161,80 m. Três das cinco sondagens tiveram amostragem integral em toda sua extensão. A figura indica também a localização do poço de grande diâmetro na margem direita, que alcançou 114 m de profundidade.

Para melhor conhecimento e caracterização das principais descontinuidades do maciço rochoso, representadas por extensas juntas sub-horizontais afetando os diversos derrames, foram abertos diversos poços no maciço rochoso. O poço de grande diâmetro (4,0 m), já referido acima, escavado na margem direita, foi utilizado para a realização de ensaios de caracterização geomecânica das principais descontinuidades, conforme será referido no item a seguir (**Figura 5.21**).

FIGURA 5.21

Poço de grande diâmetro na margem direita. Ao fundo, o navio-sonda.

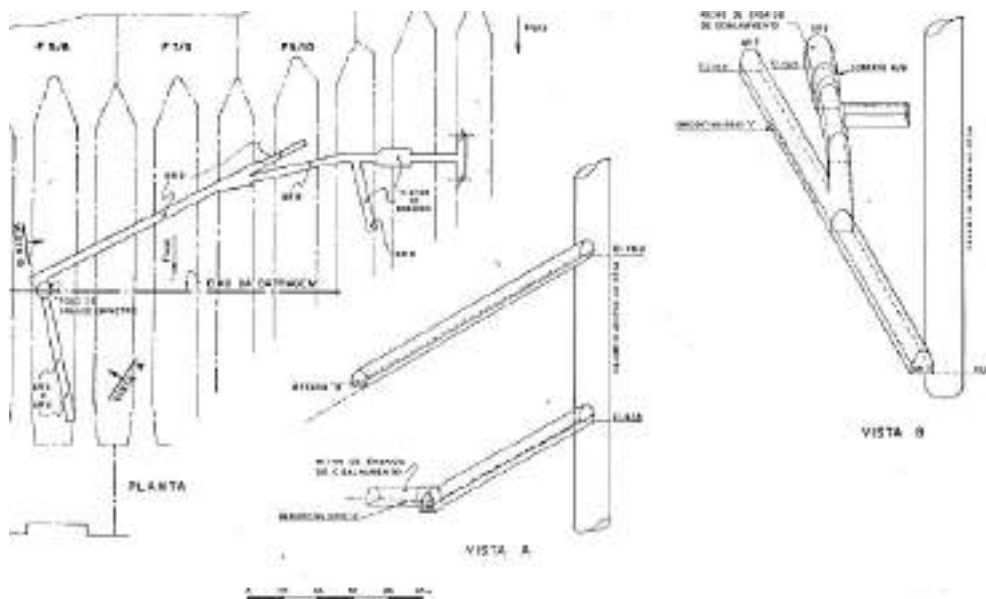


Fonte: Itaipu Binacional, 1982.

A **Figura 5.22** mostra que a partir deste poço foram abertas três galerias, em níveis diversos. A primeira (GR-5) na el. 76,00 m, ao longo do horizonte de brecha do derrame B. A segunda (GR-6), na el. 61,50 m, acompanhando a descontinuidade “B”. A terceira e mais funda (GR-7), a partir da el. 12,00 m, se estendeu por cerca de 150 m, passando sob a fundação dos blocos mais altos da barragem principal no leito do rio e alcançando a margem esquerda. Teve bifurcações, acompanhando a descontinuidade “A” e o contato entre derrames A e B. Nichos foram abertos para a execução de ensaios geomecânicos.

FIGURA 5.22

Poço de grande diâmetro na margem direita e ramificações.



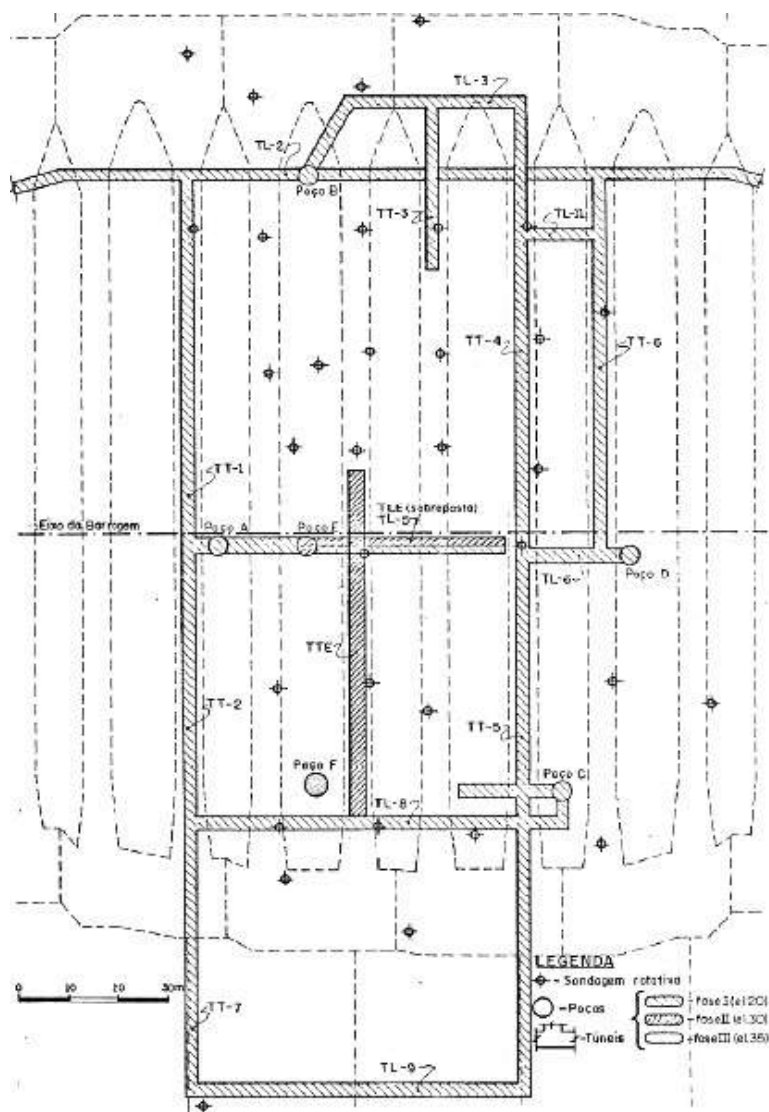
Fonte: Itaipu Binacional, 1982.

Após o ensecamento do rio e desvio pela margem esquerda, as investigações de caráter geológico-geomecânico no leito do rio foram retomadas, em correspondência aos blocos de maior altura da barragem, agora em condições mais propícias de execução. Foram escavados seis poços em rocha, para investigação direta da faixa de contato entre os derrames "B" e "A", atingindo a descontinuidade sub-horizontal presente neste último. Os poços, identificados de A a F, foram abertos a partir de julho de 1979, concomitantemente à realização de novas sondagens mecânicas. A **Figura 5.23** mostra a localização dessas investigações.

Os poços foram abertos com diâmetro nominal de 4,50 m, reduzido para 4,0 m a partir dos 20-25 m de profundidade, por razões executivas. A partir de alguns deles foram escavadas curtas galerias de prospecção acompanhando as descontinuidades de interesse (**Figura 5.24**). As sondagens mecânicas foram dispostas ao longo do alinhamento da alma dos blocos e dos túneis de prospecção posteriormente abertos e se aprofundaram até alcançar o contato A/B ou a descontinuidade "A".

FIGURA 5.23

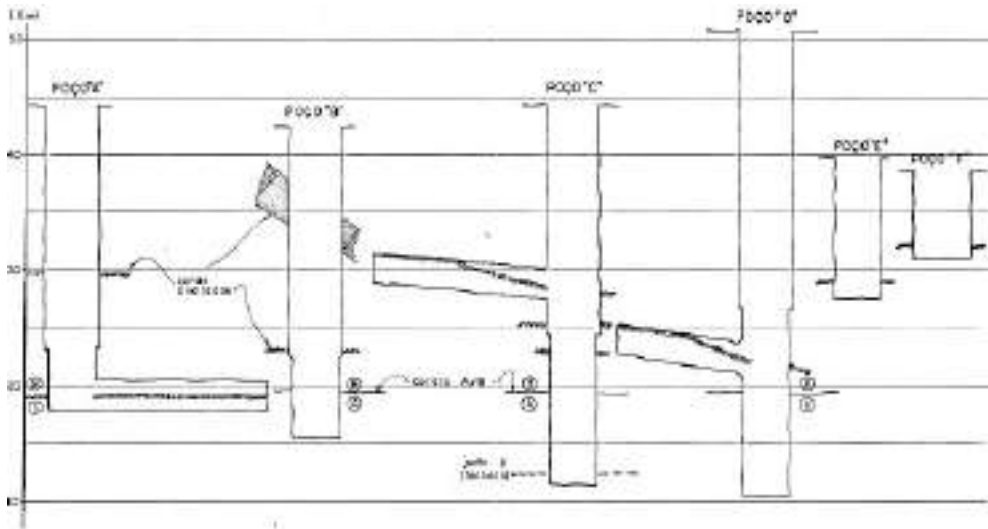
Poços e sondagens na área central após ensecamento.



Fonte: Itaipu Binacional, 1982.

FIGURA 5.24

Poços de prospecção após ensecamento do leito do rio.



Fonte: Itaipu Binacional, 1982.

Os primeiros quatro poços interceptaram zonas do maciço rochoso extremamente alteradas, com abundante preenchimento de material silto-argiloso plástico, amarelo-esverdeado, com espessura superior a algumas dezenas de centímetros. Em particular, o poço "B" cruzou uma faixa de rocha com alguns metros de espessura, muito intemperizada e com elevado teor de argilas plásticas, que exigiu a execução de revestimento anelar com concreto armado, antes de prosseguir seu aprofundamento. Essa estrutura mergulhava fortemente para a ombreira esquerda. Os resultados das investigações adicionais por poços e sondagens levaram à decisão de aprofundar a cota prevista de escavação para a el. 30,00 m, rebaixando-a ulteriormente na região circunvizinha ao poço "B". A descontinuidade em maior profundidade, coincidente com o contato A/B, seria mais tarde tratada através da abertura de túneis posteriormente preenchidos por concreto, configurando as "chavetas", mecanismo de estabilização extensamente empregado nas fundações das estruturas de Itaipu.

Cogitou-se, durante a elaboração do projeto, implantar um sistema de drenagem, passando por baixo de todas as estruturas e ligando o poço de grande diâmetro da margem direita a outro a ser escavado na margem esquerda, por meio de um túnel. A ideia, entretanto, foi abandonada, considerando que o túnel

passaria a pequena distância do fundo do rio, dando margem à possível ocorrência de grandes infiltrações de água, com riscos de desabamentos da seção. Além disso, os inúmeros furos de sondagem que não haviam sido tamponados e que se situavam próximos ao traçado proposto para o túnel contribuíam para a eventualidade de elevadas infiltrações, colocando em risco a segurança das atividades de escavação.

Os dois últimos poços abertos, E e F, conjugadamente às sondagens feitas na área, atestaram a existência de outras descontinuidades de características geomecânicas pobres, pela presença de rocha cataclasada, decomposta e com sinais de movimentação (estrias de fricção e defasagem na juntas), além de materiais silto-argilosos plásticos e elevada permeabilidade em correspondência ao derrame B, que alojaria as estruturas de maior altura, no leito do rio. Tais observações foram determinantes para a tomada de decisão a respeito da adoção de chavetas de concreto, como forma para incrementar a resistência ao escorregamento ao longo das feições de baixa resistência mecânica.

Ao longo das paredes do poço de grande diâmetro na margem direita foram executados ensaios geofísicos para determinação dos módulos dinâmicos dos diversos horizontes rochosos.

Outra forma de investigação diz respeito à determinação do estado de tensão do maciço rochoso, com a utilização de cilindros sensíveis em diversos níveis da fundação, em furos de sondagens propositadamente feitas para este fim.

Dentre as técnicas de investigação ganhou destaque a realização de ensaios *in situ* e em laboratório, para a determinação das características tecnológicas e geomecânicas dos diversos litotipos e estruturas que caracterizam o sítio. Este assunto é tema de item a seguir.

5.5 Principais aspectos geológicos

Rochas basálticas se destacam em função das seguintes características: 1) conformam sequências de derrames horizontais; 2) exibem presença de camadas de brecha entre os derrames, com espessuras variáveis, de até dezenas de metros, heterogêneas, menos resistentes e mais deformáveis que o basalto denso; 3) contêm descontinuidades em planos paralelos aos derrames basálticos, geralmente localizadas no contato entre derrames ou na base da zona de transição; 4) sua permeabilidade horizontal costuma ser várias vezes maior que a vertical.

Os derrames basálticos são bastante uniformes, com cores cinza-escuras, granulação fina na porção central, a qual passa a vesicular-amigdaloidal e brechóide nas zonas de transição. Espessura, litologia e porosidade das camadas de brecha são muito variáveis.

Na área da barragem foram identificados cinco derrames distintos de basalto, que têm inclinação regional de 3° para NE, isto é, para a margem esquerda. Esses derrames foram designados, de baixo para cima, com as letras A, B, C, D e E e possuem espessura entre 30 e 70 m, tendo sido distinguidas três variedades de basalto:

1. basalto denso, com estrutura microcristalina, densidade alta (2,95) e elevado módulo de deformabilidade (>20 GPa); em função de sua alta rigidez, essa camada se apresenta muito fraturada;
2. basalto vesicular-amigdalóide, com textura similar à do denso, porém contendo vesículas e amígdalas, sendo o grau de fraturamento menor que no basalto denso; sua densidade varia de 2,6 a 2,7 e o módulo de deformabilidade entre 10 e 15 GPa; não costuma apresentar zonas permeáveis;
3. brecha, com estrutura aglomerática, originada pela mistura de lava vesicular, blocos de basalto, arenito, siltito etc.; possui cavidades irregulares parcialmente preenchidas por carbonato e quartzo, tanto amorfo e como cristalino; sua densidade varia de 2,1 a 2,4, podendo localmente ser menor que 2,0; o módulo de deformabilidade é da ordem de 7 GPa. Sua permeabilidade é errática.

A **Figura 5.25** exibe um diagrama tridimensional que mostra, de forma simplificada, a sequência de derrames no sítio, caracterizados por um leve mergulho regional de 3° graus rumo a nordeste.

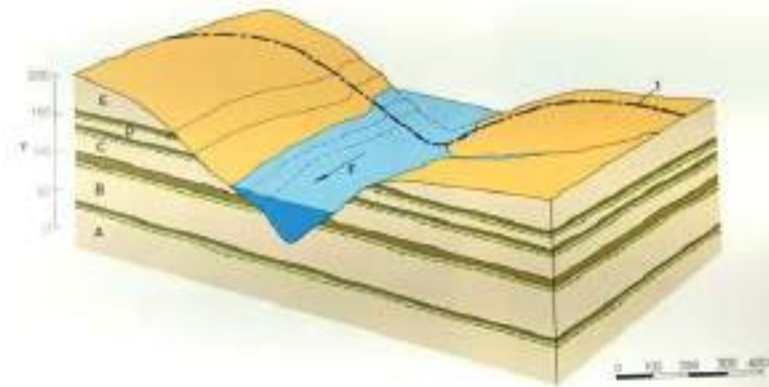
As principais lineações, observadas em imagens aéreas, apresentam direções entre N30° e 50°W, N50° e 70°EW e entre 30° e 50°E, esta última correspondendo ao alinhamento geral do vale do rio Paraná na área do projeto.

Já, a **Figura 5.26** traz uma seção longitudinal pelo eixo da barragem, limitada ao trecho central, que mostra, além da sequência de derrames, a linha de escavação geral.

De relevante importância, o sistema de compartimentação dos derrames basálticos é determinante tanto no que se refere às propriedades geomecânicas do maciço rochoso, quanto às características de condutividade hidráulica. Derrames basálticos são frequentemente percorridos por descontinuidades de grande extensão, que representam os elementos estruturais de mais baixas características de resistência e de mais elevada permeabilidade.

FIGURA 5.25

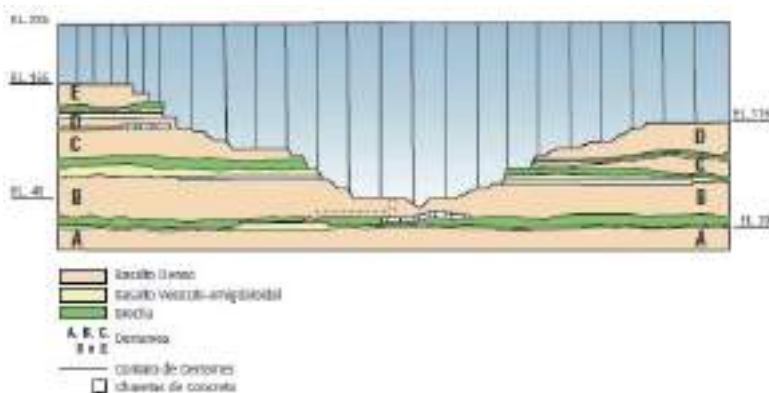
Bloco diagrama geológico no sítio da Barragem de Itaipu.



Fonte: Itaipu, 1994.

FIGURA 5.26

Seção geológica longitudinal ao eixo da barragem principal de Itaipu.



Fonte: Itaipu, 1982.

Em Itaipu, as investigações por sondagens e poços e os trabalhos de mapeamento nas paredes do *canyon* mostraram que a cada derrame está associada uma (ou mais) descontinuidade de andamento sub-horizontal, que de alguma forma teve implicações no projeto das estruturas de barramento e no dimensionamento das escavações.

Suspeitava-se, de início, que o forte encaixe do Rio Paraná ao longo do alinhamento N-S pudesse decorrer da existência de um extenso falhamento, que teria condicionado o traçado do rio. Entretanto, o progressivo avanço das investigações, em particular o ensecamento da área das estruturas centrais, que possibilitou a realização de observações diretas do leito rochoso, permitiu que essa suspeita fosse afastada, tendo-se comprovado a inexistência de qualquer megaestrutura rúptil.

Em Itaipu, não apenas registrou-se um dos mais interessantes problemas geológicos em fundações de barragens, envolvendo uma série de zonas cisalhadas comprometendo diretamente a fundação dos blocos mais altos, como também a solução adotada fugiu amplamente daquelas convencionalmente utilizadas até então (Itaipu Binacional, 1984).

A **Figura 5.27** apresenta uma vista geral da porção central do barramento, em vias de ser ocupada pelas estruturas da tomada d'água e da casa de força.

FIGURA 5.27

Porção central do vale, no início dos trabalhos de concretagem. À direita, vê-se a entrada do canal de desvio na margem esquerda. Vista para montante.



Fonte: Itaipu Binacional, 1982.

O derrame E, de posição superior, exibe um sistema de diaclasamento colunar que afeta a massa de basalto denso. As diaclases verticais e subverticais possuem desenvolvimento senoidal e continuidade espacial de dezenas de metros, articulando-se umas com as outras e formando, assim, planos ondulados praticamente contínuos, com reflexos na qualidade das escavações. Seu índice de qualidade da rocha é superior a 85% na maioria das sondagens. Apesar da intensidade do diaclasamento, a grande maioria dos ensaios de perda d'água deram perda nula ou a perda específica máxima inferior a 0,2 l/min.m.kgf/cm², não tendo sido superado esse valor em nenhum caso. O basalto da fundação da barragem de terra da margem esquerda, assim, foi considerado impermeável.

O derrame B, o mais possante dos cinco, alcançando a espessura de 65 metros, aloja as estruturas da tomada d'água de maior altura e da casa de força e revela a presença de uma rede de descontinuidades de baixo mergulho, com maior ou menor continuidade lateral, mas sempre se articulando umas com as outras. Essas zonas de fraqueza estrutural se restringem ao terço inferior do corpo do derrame, entre a superfície de fundação e o contato A/B.

Cinco planos de fraqueza foram individualizados, distribuídos de uma forma bastante complexa na área do leito do rio. Possuem mergulhos suaves, geralmente inferiores a 20° e suas direções são N-S ou E-W. Os blocos-diagrama da **Figura 5.28** permitem visualizar esse complexo quadro estrutural, bem como a designação de cada uma das feições.

A **Tabela 5.4** fornece informações sobre a atitude das feições, obtida pelo registro dos mergulhos médios ao longo dos túneis, exceto pela feição azul, que não foi alcançada pelos túneis, tendo sido utilizados os resultados das sondagens. Na tabela, a coluna da direita se refere à presença da feição na área tratada pelas chavetas. A tabela fornece, ainda, a magnitude dos deslocamentos relativos medidos ao longo das referidas feições.

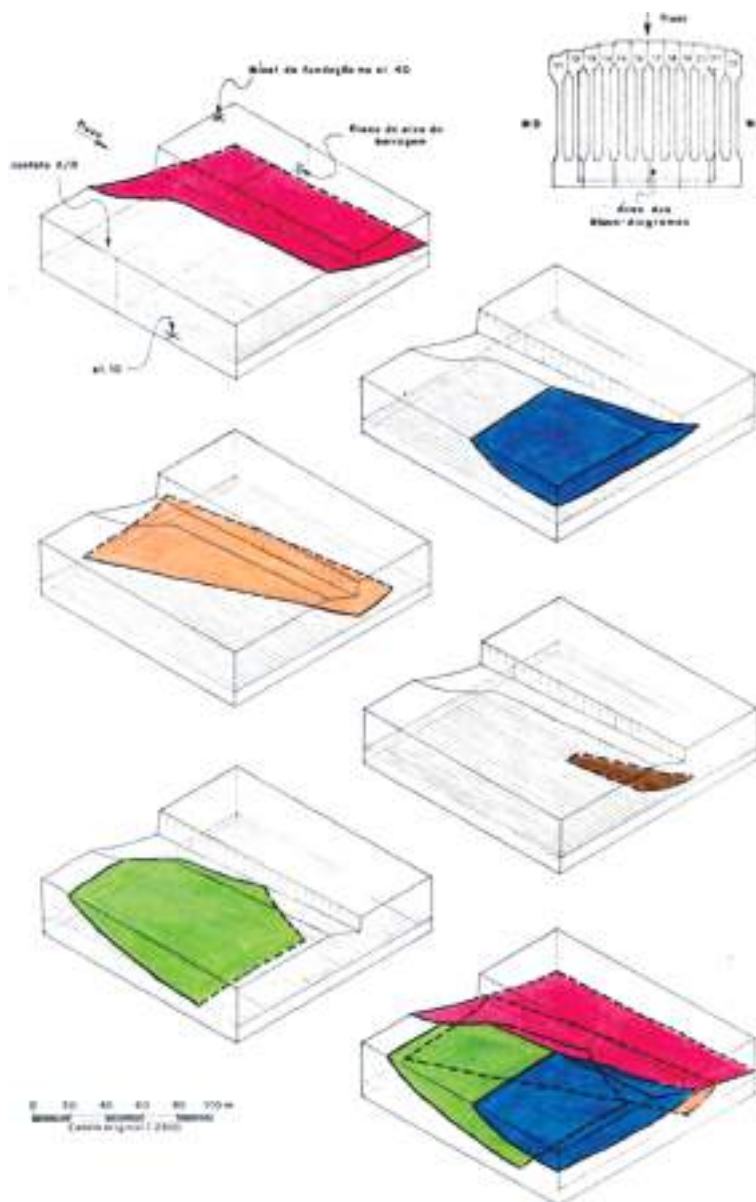
Tabela 5.4 – Atitude das feições.

FEIÇÃO	ATITUDE MÉDIA DO PLANO	REJEITOS (cm)		ÁREA	
		VARIAÇÃO	MÉDIA	m ²	%
Vermelha	N 02 W - 11 NE	5 - 25	12	8.500	37
Amarela	N 17 W - 09 SW	6 - 37	20	17.600	77
Marrom	N 06 W - 17 NE	3 - 12	6	1.300	6
Verde	N 78 W - 06 SW	10 - 20	13	5.000	22
Azul	EW - 10 S (aprox.)	não medidos		2.200	10

Fonte: Itaipu Binacional, 1984.

FIGURA 5.28

Terço inferior do derrame B: blocos-diagrama com a distribuição espacial das feições cisalhadas identificadas.

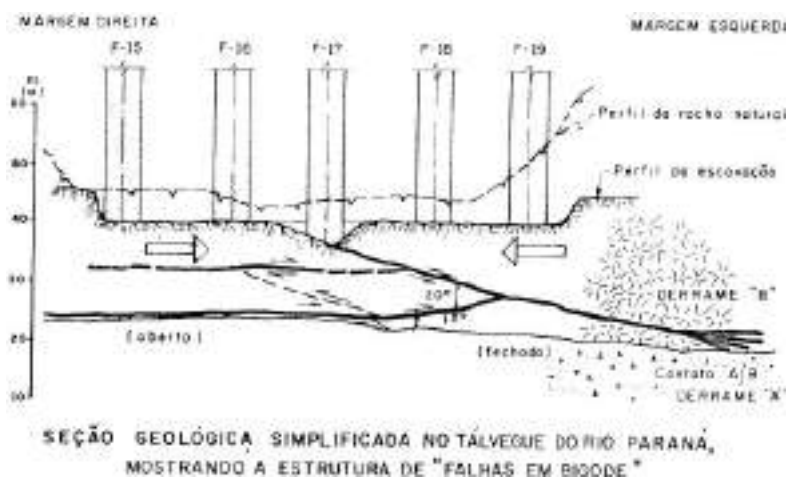


Fonte: Itaipu Binacional, 1982.

No interior deste derrame, as discontinuidades, que procedem de ambas as margens, mantendo-se subparalelas ao contato entre derrames A e B, ou se confundindo com o próprio, ao atingirem a zona central do vale infletem para cima, indo aflorar no fundo do vale. Outras, que provêm da ombreira direita, morrem de encontro àquela que vem da ombreira esquerda. A **Figura 5.29** oferece uma visão esquemática dessas discontinuidades e de sua articulação.

FIGURA 5.29

Seção geológica simplificada no talvegue do rio Paraná, mostrando a estrutura de “falhamento em bigode”.



Fonte: Barros & Guidicini, 1981.

Observações feitas por meio de poços e túneis indicaram que essas discontinuidades podem variar em aspecto desde a simples junta de abertura milimétrica, com contato rocha-rocha, até pacotes de rocha fortemente fraturada e intemperizada, com espessura da ordem de grandeza métrica, até “caixas” de material argiloso contendo fragmentos de rocha, com algumas dezenas de centímetros de espessura. Uma mesma discontinuidade pode apresentar variabilidade de aspecto na distância horizontal de poucos metros.

As diversas formas de ocorrência das zonas cisalhadas foram sistematizadas em cinco classes, definidas em função do tipo de preenchimento, às quais foram atribuídos parâmetros geomecânicos em função de seu aspecto visual e com base em resultados de ensaios sobre feições semelhantes em outras áreas da obra e na

experiência adquirida em outros empreendimentos em basaltos (Itaipu Binacional, 1982). As classes foram assim denominadas:

- **Classe 1** – Zona fraturada com contatos rocha-rocha ($\emptyset$ entre 25 e 30 graus), geralmente limitada aos trechos situados a maiores profundidades ou próximos à região de fechamento da descontinuidade (**Figura 5.30**).
- **Classe 2** – Zona de rocha sub-horizontal muito fraturada com película de argila aderida ou de preenchimento parcial ($\emptyset$ entre 25 e 30 graus) (**Figura 5.31**).
- **Classe 3** – Zona de rocha esmigalhada (cataclasito) com fragmentos rochosos angulares e pequena porcentagem de argila ($\emptyset < 30$ graus) (**Figura 5.32**).
- **Classe 4** – Feição aberta, com preenchimento predominantemente argiloso, contendo também fragmentos angulares de rocha sã ou pouco alterada ($\emptyset \approx 25$ graus) (**Figura 5.33**).
- **Classe 5** – Feição com preenchimento exclusivamente argiloso ($\emptyset < 25$ graus) (**Figura 5.34**).

FIGURA 5.30

Aspecto de descontinuidade Classe 1, inserida em maciço basáltico de rocha sã.



Fonte: Itaipu Binacional, 1982.

FIGURA 5.31

Zona Classe 2, muito fraturada e com preenchimento argiloso parcial.



Fonte: Itaipu Binacional, 1982.

FIGURA 5.32

Zona Classe 3, rocha esmigalhada com fragmentos rochosos angulares e pequena porcentagem de argila.



Fonte: Itaipu Binacional, 1982.

FIGURA 5.33

Zona classe 4, preenchimento predominantemente argiloso, com fragmentos de rocha.



Fonte: Itaipu Binacional, 1982.

FIGURA 5.34

Zona Classe 5, preenchimento exclusivamente argiloso ($\emptyset < 25$ graus).



Fonte: Itaipu Binacional, 1982.

Nos túneis, tais descontinuidades exibiam, com frequência, indícios de movimentação relativa das faces, tendo a porção superior do maciço se deslocado em relação à parte inferior. As observações de campo, principalmente ao longo das paredes dos túneis, revelaram que a movimentação da porção superior se dava, invariavelmente, convergindo para o centro do vale onde o rio corria encaixado. Além dos deslocamentos relativos das partes, outros indícios de movimentação consistiam na orientação de fragmentos de rocha cataclasada contidos na caixa e na presença de estrias de fricção, aspecto documentado pela **Figura 5.35**, a seguir.

FIGURA 5.35

Fragmentos de rocha isorientados, preenchendo a caixa da junta-falha e revelando o sentido de movimentação.

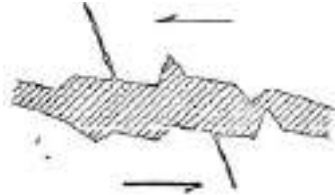


Fonte: Itaipu Binacional, 1982.

Ao longo dos túneis e galerias, abertos acompanhando as principais descontinuidades subhorizontais do maciço, deslocamentos relativos e rejeitos foram registrados praticamente em todos os casos, a menos do contato entre os derrames A e B, que não possuíam feições comuns que servissem de referência. Ao longo dessas descontinuidades, denominadas de juntas-falhas, a medição de rejeitos entre fraturas deslocadas foi o critério mais seguro de documentar a quantidade de deslocamento. A **Figura 5.36** ilustra esse aspecto.

FIGURA 5.36

Medição de deslocamentos ao longo de juntas-falhas.



Fonte: Itaipu Binacional, 1982.

Ao longo das discontinuidades, os deslocamentos relativos foram alvo de levantamento sistemático, tendo-se observado que a direção principal das estrias de fricção era sudoeste-nordeste, sendo, entretanto, a magnitude variável, mesmo ao longo de uma única feição, variando desde poucos centímetros até o máximo de 0,40 m. A **Figura 5.37** documenta parte do levantamento feito ao longo dos túneis na fundação.

FIGURA 5.37

Mapeamento de estrias de fricção, com indicação de sentido e tamanho dos deslocamentos relativos ao longo das juntas-falhas.



Fonte: Itaipu Binacional, 1982.

A tese de que as juntas com preenchimento argiloso apresentavam baixa condutividade hidráulica teve que ser revista, pois a abertura de túneis ao longo das mesmas mostrou que o preenchimento não era total, permitindo a existência de vazios em quase toda sua extensão, ou em suas imediações, com a formação de caminhos preferenciais de fluxo por onde a água fluía francamente e se deslocava facilmente de um ponto para outro, podendo carrear o material de preenchimento. Ficou evidente que, ao longo desses horizontes, as subpressões poderiam se desenvolver e atuar em grandes áreas, sabendo-se, também, que as injeções de cimento teriam baixa eficiência.

A origem dessas feições, denominadas juntas-falhas, decorre, ao que tudo indica, da associação de duas etapas, cronologicamente diferenciadas. Considere-se que o surgimento das juntas de grande continuidade seja intrínseco à morfogênese do derrame, como reflexo do processo de resfriamento e solidificação da lava (origem epi-magmática). Já, a movimentação observada ao longo dessas juntas resulta da atuação de tensões horizontais, que tanto podem ser de origem tectônica, quanto induzidas pelo alívio de tensões verticais decorrente da formação do próprio *canyon* (origem pós-magmática)

No sítio da barragem de Itaipu, a evolução fisiográfica se deu pela remoção, por erosão, de um determinado capeamento de rocha, com o consequente alívio de tensões verticais e pelo entalhe do profundo vale, com o decorrente alívio das tensões horizontais. Deslocamentos do maciço rochoso devem ter se processado em razão do duplo desconfinamento, vertical e lateral, tendo sido provavelmente mais pronunciados na porção superior do vale. No fundo do *canyon*, o alívio de tensões verticais correspondeu à remoção de uma cobertura de, pelo menos, 140 metros de espessura de rocha.

Não se descarta a possível contribuição de esforços de origem tectônica, que seriam liberados à medida que o vale fluvial sofria aprofundamento, dentro do quadro de neotectonismo, como reflexo dos esforços translacionais cujo mecanismo de origem se situa na região mesoatlântica.

A etapa de subsidência da bacia geológica pode ter induzido a acumulação de tensões horizontais, que somente se manifestaram por ocasião do desconfinamento lateral decorrente do entalhe do vale, de forma análoga às folhas de um livro, que se deslocam entre si quando o livro é dobrado.

O intemperismo também deixou seu registro, tendo atuado mais intensamente ao longo das descontinuidades do que na massa rochosa adjacente e propiciando

a intemperização dos fragmentos rochosos, mais intenso quanto mais próximo da superfície do terreno.

Quanto aos contatos entre derrames, mereceram destaque aqueles entre os derrames A e B e entre os derrames C e D, abertos, com argila e francamente permeáveis.

5.6 Caracterização geomecânica do maciço rochoso

As principais feições geológicas foram submetidas a ensaios de caracterização geomecânica, seja através de ensaios *in situ*, seja em laboratório. Os primeiros foram executados em nichos e galerias escavados a partir do poço vertical localizado na margem direita, com 114 metros de profundidade (**Figuras 5.21 e 5.22**). As feições ensaiadas foram o contato A/B, a junta-falha do derrame B e a brecha basáltica, através de ensaios de cisalhamento em blocos moldados e de ensaios de deformabilidade, nestes utilizando rígidas placas de 0,8 m de diâmetro.

5.6.1 Ensaios de cisalhamento

Na galeria da elevação 20 m foram moldados três blocos de 1,0 x 1,0 x 0,5 m, tendo sua base sobre o contato A/B. Esses blocos foram moldados dentro da base fraturada do derrame B, com dificuldades na realização dos trabalhos. As laterais foram cortadas com serra diamantada, enquanto o preparo do topo foi realizado com furos horizontais de sonda rotativa, lado a lado (**Figura 5.38**). Foi necessária uma consolidação superficial através de um banho de argamassa, para fixação de blocos soltos.

Sobre os blocos assim moldados foi montada uma carapaça de concreto e todo o sistema de aplicação de cargas horizontais e verticais. As placas de reação, tanto no teto quanto nas laterais foram executadas com concreto bombeado, obtendo-se uma superfície homogênea e nivelada. A aplicação das cargas normal e tangencial foi feita por pares de macacos hidráulicos com capacidade nominal de 350 t cada e as leituras de deformação feitas com extensômetros mecânicos de sensibilidade de 0,01 mm (**Figura 5.39**).

FIGURA 5.38

Itaipu – Preparo dos blocos de 1,0 x 1,0 x 0,5 m. O topo dos blocos foi obtido por meio de sondagens rotativas horizontais adjacentes umas às outras. As laterais foram moldadas com serra diamantada.



Fonte: Itaipu Binacional, 1982.

FIGURA 5.39

Itaipu – Sistema de carregamento e medição em ensaio de cisalhamento.



Fonte: Itaipu Binacional, 1982.

Os roletes de aço foram substituídos por uma placa de teflon apoiada noutra de aço, esta untada de graxa, de modo a permitir o movimento dos blocos em qualquer direção. A carga normal foi aplicada em incrementos de 10% da máxima e a cisalhante em estágios de cinco toneladas ($0,5 \text{ kg/cm}^2$), mantendo uma velocidade de $30 \text{ kg/cm}^2/\text{hora}$. Além do ensaio de ruptura franca, foram realizados três ensaios após ruptura, em cada bloco. Após as correções devidas a irregularidades da superfície e ao atrito entre as placas de teflon e o aço, foram obtidos os seguintes ângulos de atrito:

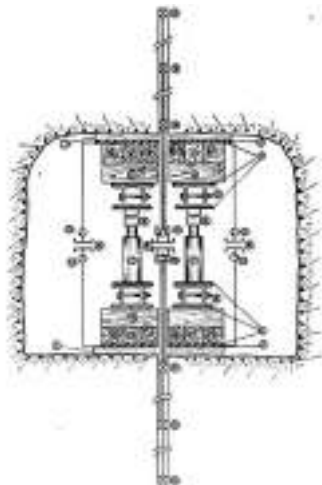
Bloco	Ângulo de atrito (°)
B1	25,1
B2	26,1
B3	29,2

5.6.2 Ensaios de deformabilidade

Os ensaios de deformabilidade foram executados no horizonte extremamente fraturado da base do derrame B, aplicando-se a tensão através de placa rígida. A **Figura 5.40** apresenta o esquema geral dos ensaios.

FIGURA 5.40

Itaipu – Ensaios de deformabilidade em galeria – Esquema de montagem.



Legenda: 1) argamassa; 2) anel de borracha; 3) placa de aço; 4) viga de madeira; 5) perfil I reforçado; 6) rótulas; 7) macacos hidráulicos; 8) vigas de referência; 9) âncoras; 10) pesos; 11) extensômetros; 12) calços de madeira.

Fonte: Itaipu Binacional, 1982.

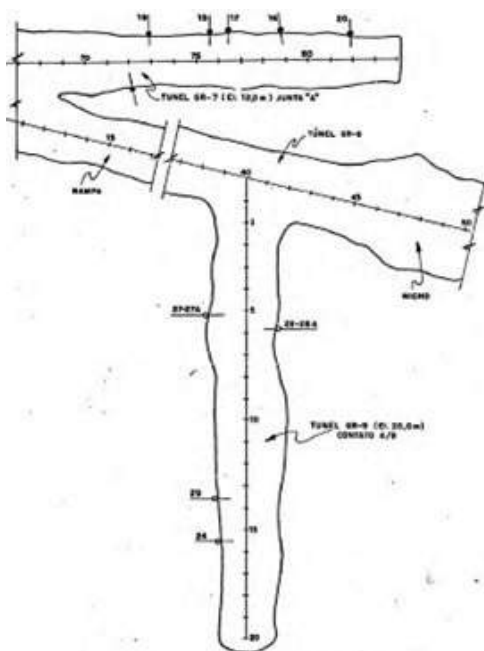
As âncoras foram posicionadas a 0,24, 0,50 e 0,80 m da base da placa, tendo-se aplicado tensões de até 50 kg/cm^2 .

5.6.3 Ensaios em laboratório

Dentre os ensaios de laboratório, constaram os de compressão triaxial, uniaxial, diametral, *creep-tests* e desagregabilidade. Em laboratório, os ensaios de caracterização foram feitos sobre amostras de sondagens executadas com diâmetro de 8", bem como em corpos de prova retirados das galerias, ao longo do contato A/B e da junta A, conforme assinalado na **Figura 5.41**. Do contato A/B foram retiradas cinco amostras, selecionadas de modo a cobrir as possíveis variações da feição em termos de parâmetros geomecânicos.

FIGURA 5.41

Itaipu – Localização dos pontos de retirada de amostras de 8" para ensaios laboratoriais nos túneis GR-7 e GR-9.



Fonte: Itaipu Binacional, 1982.

No laboratório, os corpos de prova foram cortados e colocados em caixa metálica de $0,20 \times 0,20 \text{ m}$ e submetidos a ensaios de cisalhamento direto (**Figura 5.42**).

FIGURA 5.42

Itaipu – Esquema de ensaios de cisalhamento em laboratório.

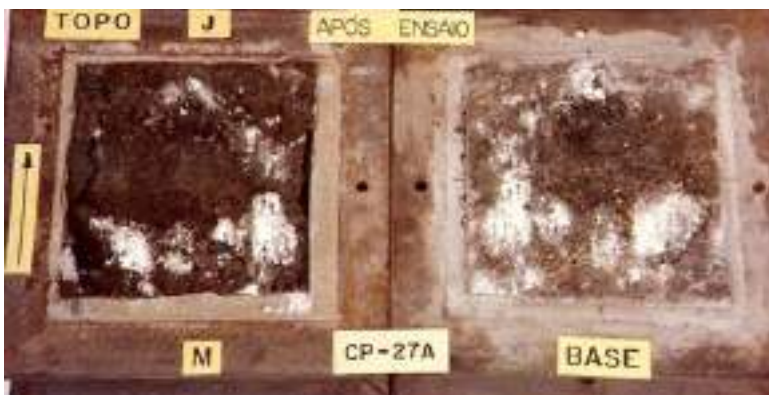


Fonte: Itaipu Binacional, 1982.

A **Figura 5.43** documenta a superfície de ruptura em um dos corpos de prova colhidos ao longo do contato aberto entre derrames.

FIGURA 5.43

Itaipu – Superfície de ruptura em um dos corpos de prova.



Fonte: Itaipu Binacional, 1982.

Na **Tabela 5.5** são apresentados os resultados dos ensaios de cisalhamento em laboratório.

Tabela 5.5 – Itaipu – Resultados dos ensaios de cisalhamento em laboratório.

CS	LOCALIZAÇÃO	PROFUNDIDADE	PESQUISA	1ª SÉRIE			2ª SÉRIE			3ª SÉRIE			4ª SÉRIE		
				S	c	σ_c	S	c	σ_c	S	c	σ_c	S	c	σ_c
18	BR-T	12+0,30m	aproximadamente 10m de profundidade	24,22	9,68	94	17,47	9,72	97	12,94	14,23	82	19,05	18,32	38
22	BR-T	11+0,30m	aproximadamente 10m de profundidade	19,72	9,37	90	16,27	11,81	97	10,14	19,09	49	21,00	21,99	41
19	BR-T	12+0,30m	aproximadamente 10m de profundidade	20,62	11,72	92	17,89	16,05	95	17,17	22,25	56	20,12	22,95	57
12	BR-T	10+0,30m	aproximadamente 10m de profundidade	22,17	17,14	98	13,16	8,89	96	14,21	19,86	48	17,82	18,85	52
15	BR-F	15+0,60m	aproximadamente 10m de profundidade	24,91	17,21	95	17,17	16,51	97	20,94	22,29	56	23,94	23,91	45
11	BR-T	10+0,30m	aproximadamente 10m de profundidade	20,09	16,12	94	18,44	20,97	95	15,39	16,05	49	19,00	20,55	38
CS	LOCALIZAÇÃO	PROFUNDIDADE	PESQUISA	1ª SÉRIE			2ª SÉRIE			3ª SÉRIE			4ª SÉRIE		
				S	c	σ_c	S	c	σ_c	S	c	σ_c	S	c	σ_c
23	BR-B	5+0,30m	BR-B	3,10	8,17	33	6,80	12,20	34	9,16	14,77	39	10,72	18,80	38
27-B	BR-B	5+0,30m	BR-B	5,85	9,21	31	8,22	14,21	32	10,64	18,29	39	14,40	21,29	30
28-B	BR-B	5+0,30m	BR-B	8,15	14,20	32	11,87	19,28	32	16,12	23,13	30	18,84	28,72	32
24	BR-B	13+0,30m	BR-B	BR-B	BR-B	BR-B	BR-B	BR-B	BR-B	BR-B	BR-B	BR-B	BR-B	BR-B	BR-B
25	BR-B	13+0,30m	BR-B	BR-B	BR-B	BR-B	BR-B	BR-B	BR-B	BR-B	BR-B	BR-B	BR-B	BR-B	BR-B

Fonte: Itaipu Binacional, 1982.

Já, a **Tabela 5.6** reúne as principais características dos diversos litotipos e descontinuidades submetidos a ensaios, tanto de campo quanto de laboratório.

Tabela 5.6 – Características tecnológicas in situ e em laboratório.

TIPO DE MATERIAL	CERR	ENSAIOS IN SITU						ENSAIOS EM LABORATÓRIO					
		Deformabilidade			Resistência			Deformabilidade			Resistência		
		$E_d \times 10^3$	$E_d \times 10^3$	μ	Φ	σ_c	σ_t	$E_d \times 10^3$	$E_d \times 10^3$	μ	Φ	σ_c	σ_t
Brecha tipo I	(1)	180-190	184	(1)	0,22	—	35	20	171	196	0,23	—	—
Brecha tipo II	(1)	180-190	185	(1)	0,22	—	35	20	249	253	0,25	—	—
Brecha tipo III	(1)	20-120	48	(1)	0,22	—	—	—	86	86	0,18	—	—
Brecha tipo I	(2)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	35	44
Brecha tipo II	(2)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Brecha tipo III	(2)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Brecha tipo I	(3)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Brecha tipo II	(3)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Brecha tipo III	(3)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Brecha tipo I	(4)	—	—	—	—	—	—	244	213	0,14	—	275	—
Brecha pouco alterada	(4)	—	—	—	—	—	—	255	138	0,11	—	259	—
Brecha alterada	(4)	—	—	—	—	—	—	106	129	0,20	—	111	13
Ensaio viscoso	(5)	200-400	—	—	—	0,3	—	—	—	—	—	—	—
Ensaio viscoso não cisa	(5)	—	67	(3)	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ensaio viscoso cisa	(5)	—	65	(3)	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ensaio viscoso não cisa	(6)	—	—	—	—	—	—	208	236	0,12	—	175	89
Ensaio viscoso pouco alterado	(6)	—	—	—	—	—	—	—	218	0,21	—	289	—
Ensaio viscoso alterado	(6)	—	—	—	—	—	—	246	181	0,20	—	328	48
Ensaio denso	(7)	—	282	(3)	—	—	—	—	808	0,15	—	—	—
Ensaio denso não cisa	(8)	—	174	(3)	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ensaio denso não cisa sobre a junta II	(8)	—	11	(3)	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ensaio denso não cisa	(9)	—	—	—	—	—	—	308	308	0,19	—	338	332
Descontinuidade A cota 125	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	33,65	6,36
Descontinuidade B cota 11	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	15,45	5,18
Contato A/cota 25	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	30	8
Descontinuidade A cota 12	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	30	7,35

Fonte: Uriarte & outros, 1982.

Notas: (1) Valores obtidos dos ensaios com macaco plano; (2) Ensaios com dilatômetro; (3) Ensaios de deformabilidade com placa; (4) Valores médios de vários ensaios durante estudos de viabilidade; E_d (kg/cm²) Módulo de deformabilidade dinâmico; E_s (kg/cm²) Módulo de deformabilidade estático; μ - coeficiente de Poisson; k_t - (kg/cm³) coeficiente de rigidez transversal; Φ (graus) ângulo de atrito; c (kg/cm²) coesão; σ_c (kg/cm²) resistência à compressão axial simples; σ_t (kg/cm²) resistência à tração; Brecha basáltica: tipo I - maciça; tipo II - intermediária; tipo III - cavernosa.

5.7 Modelos físicos

O projeto da barragem de Itaipu apresentou aspectos de pioneirismo no dimensionamento de algumas estruturas que ultrapassaram limites alcançados anteriormente, mesmo em campo internacional. Uma dessas estruturas era representada pela barragem no canal do rio Paraná, formada por blocos de gravidade aliviada, com 190 m de altura máxima, superando em 50% as maiores estruturas já construídas desse tipo. Outra era a estrutura de desvio na margem esquerda, com blocos de gravidade de 160 m de altura contendo os grandes vãos (6,70 x 22,00 m) abertos para o desvio. Finalmente, os blocos de gravidade aliviada em ambas as margens, com altura mínima de 110 m, sendo cada bloco apoiado, na base de jusante, sobre um esteio formado por uma massa de concreto apoiada sobre o talude de escavação inclinado da casa de força. Tais estruturas desconhecidas foram submetidas a investigações por meio de modelos físicos, para avaliação e previsão de seu comportamento e de suas condições de segurança.

Na época, meados da década de 70, apesar da evolução da ciência computacional já ampliar imensamente a utilização dos modelos matemáticos, considerou-se que os modelos físicos ainda traziam forte contribuição ao estudo dos mecanismos de ruptura e aos propósitos do projeto das estruturas. Foram, assim, elaborados e investigados três modelos físicos, um deles denominado de "modelo geomecânico", os dois outros de "modelos estruturais", estes referentes às estruturas de concreto.

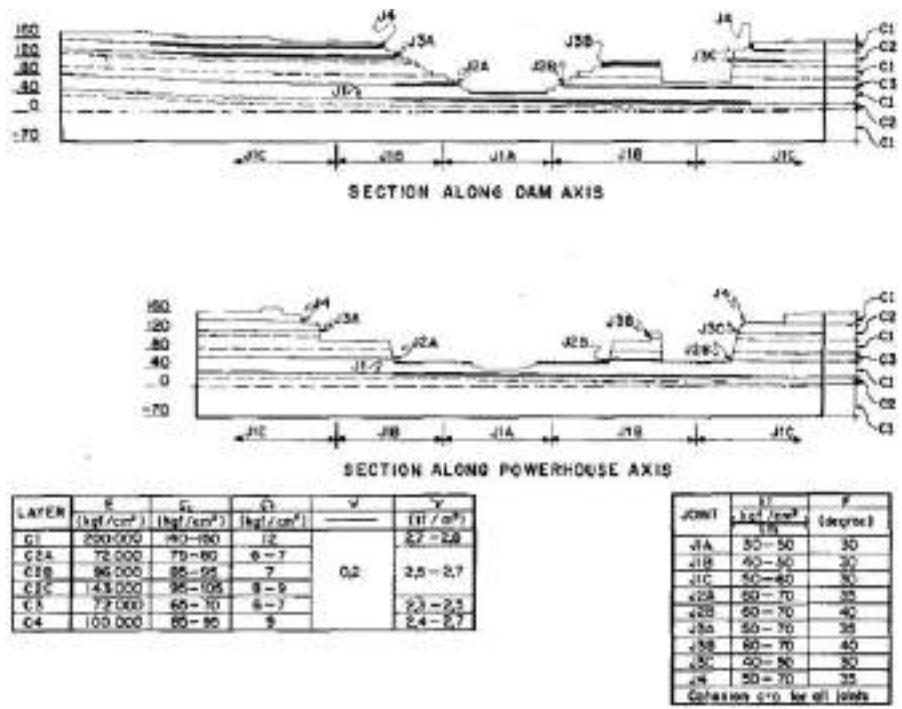
5.7.1 Modelo geomecânico

O modelo geomecânico foi construído e testado no ISMES – Istituto Sperimentale Modelli e Strutture de Bergamo, Itália e representava o maciço rochoso de apoio das principais estruturas do barramento até a profundidade de 110 m abaixo no nível mais baixo de fundação. A **Figura 5.44** traz a representação esquemática de duas seções de escavação, ambas indicando a sequência de camadas e discontinuidades e respectivas características geomecânicas adotadas na modelagem.

Diversas simplificações foram, obviamente, necessárias. As principais discontinuidades foram simuladas desprovidas de coesão. A **Figura 5.45** exemplifica a transposição das características da rocha de fundação para o modelo, sempre definida de forma conservativa.

FIGURA 5.44

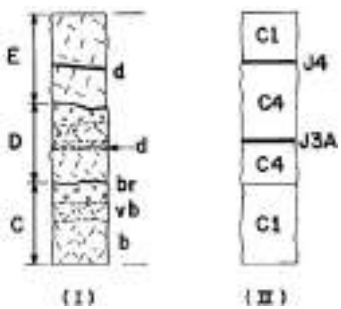
Itaipu – Modelo geomecânico: principais seções, características dos materiais e das descon-
tinuidades.



Legenda: C1, C2, C3 e C4 = camadas da fundação; J1, J2, J3 e J4 = Principais descon-
tinuidades.
Fonte: Barros & outros, 1982 bis.

FIGURA 5.45

Itaipu – Transposição de características da fundação para o modelo.

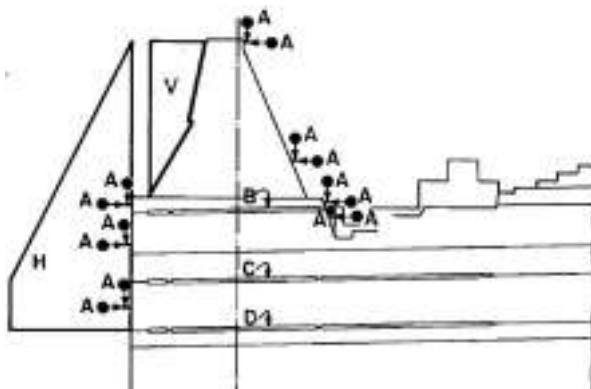


Legenda: I) fundação; II) modelo; C, D, E) derrames basálticos; b) basalto denso; vb) basalto vesicular;
br) brecha; d) descon-
tinuidades.
Fonte: Barros & outros, 1982 bis.

A escala do modelo foi de 1:130, sendo que esse efeito de escala foi aplicado ao módulo de deformabilidade (E) dos materiais envolvidos, bem como às características de resistência à compressão e à tração dos materiais rochosos. Os carregamentos verticais e horizontais foram aplicados utilizando pequenos macacos hidráulicos propositadamente construídos. A **Figura 5.46** mostra uma seção típica com os respectivos diagramas de aplicação de esforços, a simulação de fenda de tração a montante da estrutura e os pontos de medição de deslocamentos.

FIGURA 5.46

Itaipu – Seção a montante da área de montagem – Esquema de ensaio.



Legenda: A) pontos de medição de deslocamentos; B, C, D) descontinuidades na fundação; V) componente vertical do carregamento hidrostático; H) componente horizontal do carregamento
 Fonte: Barros & outros, 1982 bis.

5.7.2 Modelos estruturais

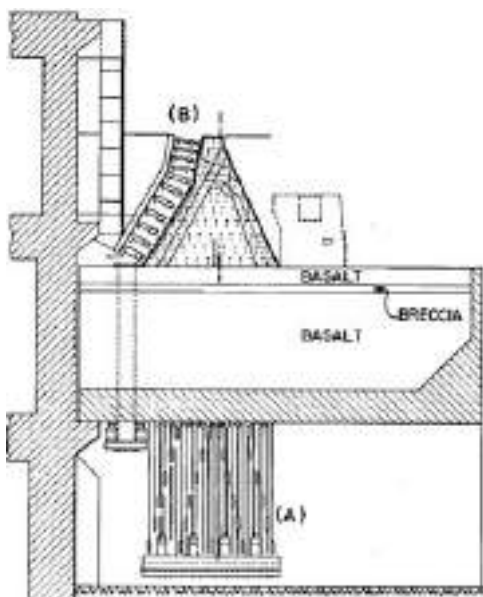
Os modelos estruturais foram construídos no IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, na escala 1:90, para verificar o comportamento das estruturas de concreto sob carregamento próprio e sob o empuxo d'água máximo, tendo sido levados até a ruptura. A fundação foi representada nos modelos, de modo a fornecer as condições de contorno. A **Figura 5.47** apresenta um dos modelos, correspondente à seção de altura máxima da barragem de concreto aliviada.

Esses modelos físicos permitiram verificar a integridade estrutural e a segurança dos blocos por meios experimentais, em complementação aos cálculos realizados pelos métodos convencionais e de elementos finitos. Os resultados

experimentais obtidos dentro do campo elástico se mostraram compatíveis com os valores calculados e permitiram, além disso, verificar o mecanismo de ruptura da estrutura e os fatores de segurança correspondentes.

FIGURA 5.47

Itaipu – Barragem de concreto aliviada – Modelo estrutural e sistema de cargas.



Legenda: A) Carregamento de peso próprio; B) Carregamento hidráulico.

Fonte: Barros & outros, 1982.

5.8 Reforço da fundação com chavetas

A presença e extensão das descontinuidades (juntas-falhas) na fundação de praticamente todas as estruturas de concreto, em maior ou menos profundidade, foi sendo confirmada e documentada à medida que poços e galerias de investigação eram abertos após a etapa de ensecamento da área central do vale, onde as mais altas estruturas seriam erguidas. As avaliações de projeto indicaram a necessidade de remover tais descontinuidades, até certa profundidade, devido às baixas características de resistência e deformabilidade ou proceder a alguma forma de tratamento capaz de atender aos requisitos de segurança necessários.

Em particular, os blocos mais altos da barragem principal, com mais de 180 metros de altura, estão localizados no centro do vale, trecho em que ficou caracterizada a existência de elementos de fraqueza estrutural no maciço rochoso, capazes de condicionar a estabilidade das estruturas, em termos de resistência e deformabilidade, entre as elevações de 20 m e 30 m, aproximadamente.

Na referida área, foram identificados três níveis principais de descontinuidades, sendo que o nível médio de fundação das estruturas se situava na elevação aproximada de 40 m. A descontinuidade de elevação 20 m é um contato entre derrames e constituía o principal condicionante aos fins da estabilidade da barragem. As outras duas descontinuidades eram representadas por juntas-falhas subhorizontais, com indícios de movimentação e material cataclasado contendo argilas plásticas. Para estudo em modelo pelo método dos elementos finitos, foram definidas as principais características geomecânicas conforme segue:

- a. o maciço rochoso foi considerado elástico, isotrópico, não resistente à tração, com módulos de deformabilidade de 20 e 15 GPa para o basalto denso e basalto vesicular com brecha, respectivamente;
- b. para a descontinuidade da elevação 20 m, foi idealizada uma junta com comportamento elasto-plástico, com os seguintes parâmetros: $\phi = 25^\circ$, $c = 0,0 \text{ kgf/cm}^2$, $K_t = 5 \text{ MPa/cm}$ e $K_n = 15 \text{ MPa/cm}$;
- c. os parâmetros elásticos para o concreto foram $E = 30 \text{ GPa}$ e o coeficiente de Poisson = 0,2.

Os resultados dos estudos por elementos finitos indicaram que não se alcançavam os coeficientes de segurança requeridos, devendo-se introduzir alguma modificação no projeto. Buscou-se reduzir a subpressão atuante na descontinuidade, inserindo-se um túnel perimetral de drenagem na elevação da descontinuidade, de modo a envolver toda a área em questão. Entretanto, apesar dos coeficientes de segurança estabelecidos terem sido alcançados no caso de carregamento normal, o mesmo não ocorreu no caso de cargas excepcionais. Foram então levantadas diversas alternativas ou formas de tratamento, cada uma sendo analisada em termos não apenas de eficiência, como também pela interferência com as demais atividades construtivas da obra (Itaipu, 1982).

A alternativa de rebaixamento da fundação até a el.20,00 m, configurando um *cut off* de grandes dimensões, o qual seria preenchido com concreto, apesar de apresentar vantagens executivas iria necessariamente envolver a fundação da casa de

força, exigindo um volume de escavação adicional de 190.000 m³ de rocha e, por ser realizado a céu aberto, resultaria em atraso de sete meses no cronograma da obra. A solução tampouco eliminaria a questão da deformabilidade da fundação na região mais a montante das estruturas. O volume de concreto adicional seria de 180.000 m³.

Outra alternativa, que acabou prevalecendo, consistia na remoção seletiva das zonas de fraqueza estrutural através da abertura de um sistema de túneis, para posterior preenchimento por concreto, de modo a atuar como chavetas, isto é, elementos de resistência à movimentação do conjunto estrutura/fundação. Os túneis teriam que acompanhar as descontinuidades que representavam os principais elementos de fraqueza estrutural do maciço. Esta solução proporcionava atender aos requisitos de segurança, com as vantagens de ser pelo menos 20% mais barata e de não interferir com o andamento das obras. Tecnicamente não apresentava dificuldades executivas, dependendo apenas da mobilização de equipamentos especiais para escavação dos túneis.

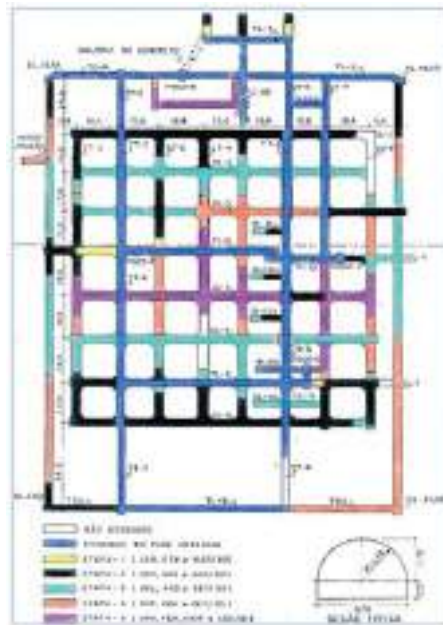
A possibilidade de tratamento das descontinuidades por injeções de cimento, que representaria uma solução de mais baixo custo, foi descartada devido às incertezas a respeito da eficiência da solução, visto que a presença de argilas plásticas ao longo das referidas descontinuidades seria um empecilho para a melhoria das características geomecânicas do maciço.

O projeto de abertura de túneis para chavetamento definiu uma malha de cavidades longitudinais e transversais ao eixo da barragem, em duas elevações diversas, culminando com a inserção de um túnel de drenagem perimetral à área a ser tratada. Na el. 20 m, o projeto foi intenso, constando de oito chavetas longitudinais e outras tanta transversais, desde a almadobloco F-13 até a F-20, totalizando cerca de 2.200 m lineares de escavação, aos quais somaram-se os 700 m do túnel perimetral de drenagem (**Figura 5.48**).

Na el. 30 m, o tratamento consistiu na abertura de um túnel transversal sob a almadobloco F-16 e, a partir deste, mais quatro túneis longitudinais, somando aproximadamente 280 m (Itaipu, 1982). Os túneis foram abertos com 3,50 m de largura e 2,50 m de altura, com a característica de perseguir a junta-falha a ser tratada, mantendo-a sempre à meia altura das paredes, o que resultou em um alinhamento vertical irregular dos túneis. Já, o túnel perimetral de drenagem tem 2,60 m de altura e 2,40 m de largura. A **Figura 5.49** documenta a sequência de escavação dos túneis das chavetas na elevação 30 m.

FIGURA 5.48

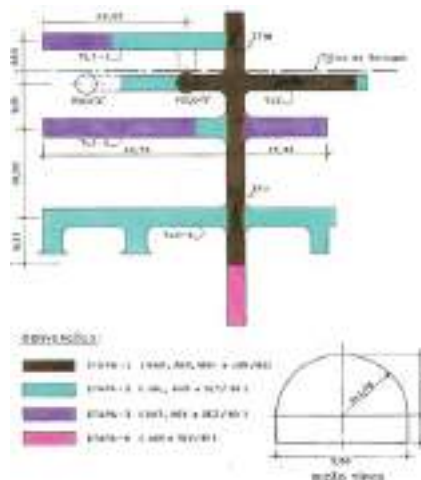
Etapas de chavetamento na El.20 m.



Fonte: Itaipu Binacional, 1982.

FIGURA 5.49

Sequência de escavação dos túneis na elevação 30 m.

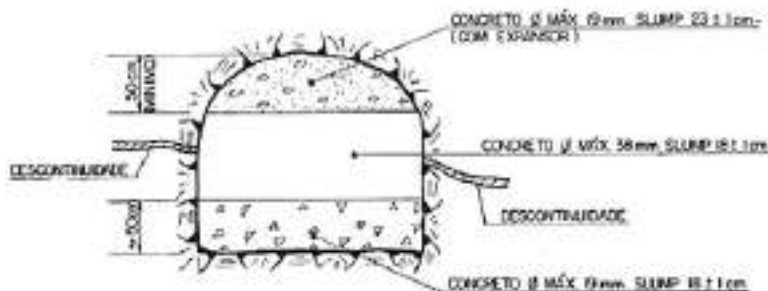


Fonte: Itaipu Binacional, 1982.

De modo a atender às exigências estabelecidas sobre a qualidade do concreto, em termos de resistência mecânica, foram definidos três tipos de composição, distribuídos na seção do túnel conforme mostra a **Figura 5.50**.

FIGURA 5.50

Distribuição do concreto na seção do túnel.



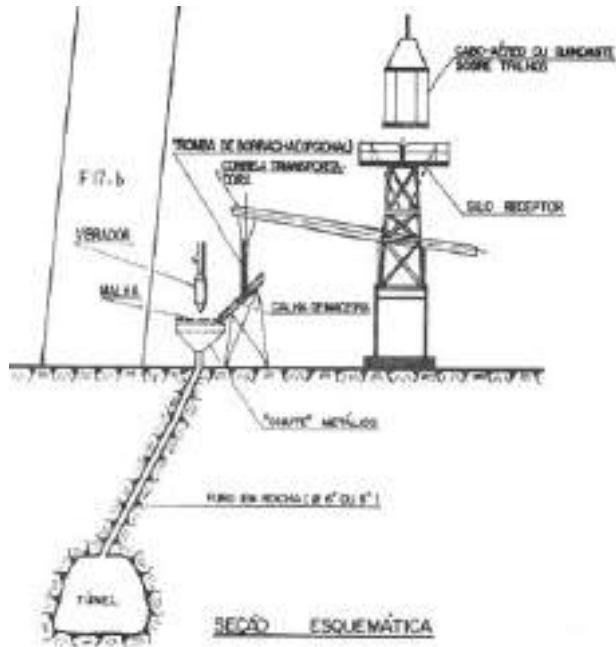
Fonte: Betioli & outros, 1981.

Os túneis foram concretados em trechos com extensão média de 15 a 20 m, sendo executados furos para lançamento do concreto, espaçados de aproximadamente 4 m. A **Figura 5.51** documenta o sistema de concretagem utilizado, consistindo na abertura de furos em rocha a partir da superfície, com 6" a 8" de diâmetro, neles despejando-se o concreto, com a vantagem de preencher a abóbada do túnel. Para constituição das chavetas, o concreto era lançado a partir da superfície do terreno, através de furos verticais com espaçamentos variáveis.

Para enchimento da última camada em contato com a abóbada foi utilizado um composto expensor, de modo a minimizar a ocorrência de vazios. Ao término da concretagem, foi feita a injeção sistemática da abóbada das chavetas, através de furos abertos na superfície da fundação, visando eliminar possíveis vazios remanescentes. No leito do rio, toda a área tratada por chavetas foi contornada por um túnel de drenagem, local de convergência e medição de vazões, visível na **Figura 5.48**. A execução desse tratamento em subsuperfície representou a escavação de 3.160 m de túneis para chavetamento, acrescidos de 700 metros referentes ao túnel de drenagem perimetral. Nas chavetas foram ao todo consumidos 34.000 m³ de concreto.

FIGURA 5.51

Sistema de concretagem.



Fonte: Betioli & outros, 1981.



DESVIO DO RIO

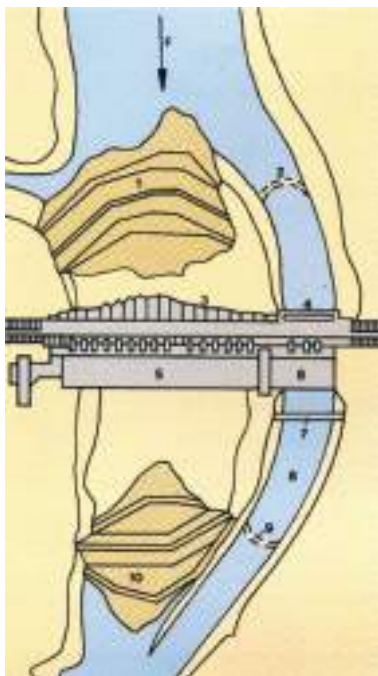
6.1 Aspectos gerais

Para a construção da barragem principal e da casa de força no leito do rio, foi aberto um canal na margem esquerda com extensão aproximada de dois quilômetros, 150 m de largura de base e profundidade máxima de 90 m, documentado na **Figura 6.1**, a seguir. O volume de escavação resultante foi de cerca de 22.500.000 m³, constituído em grande parte por rocha de boa qualidade.

Devido à magnitude das vazões envolvidas e às condições fisiográficas do vale, o projeto de desvio do rio se revestiu de grande complexidade. Para fins de projeto de desvio foi considerada uma vazão de 35.000 m³/s, correspondente a um período de recorrência de 100 anos. Esse critério foi adotado tendo em vista a segurança adequada contra o galgamento das obras durante a construção, levando em conta os custos de construção.

FIGURA 6.1

Esquema de desvio do rio.



Legenda: 1. Ensecadeira de montante; 2. Ensecadeira em arco montante; 3. Barragem Principal; 4. Estrutura de controle de desvio; 5. Casa de força; 6. Casa de força do canal de desvio; 7. Ponte de serviço; 8. Canal de desvio; 9. Ensecadeira de jusante em arco; 10. Ensecadeira de jusante; F. Fluxo.

Fonte: CBDB, 2009.

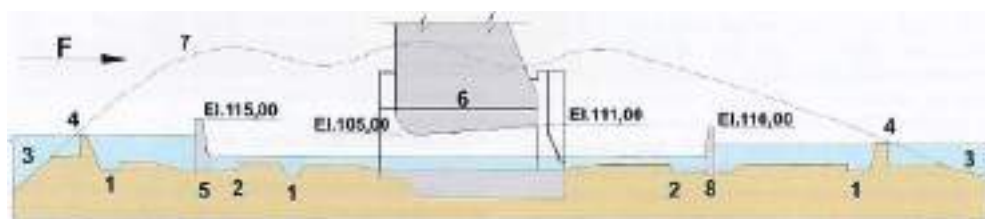
O arranjo geral das obras de desvio (**Figura 6.1**) foi selecionado em função da topografia favorável e de fatores técnicos e econômicos a seguir indicados:

- a. a rocha escavada no canal de desvio seria empregada na construção da barragem de enrocamento e das ensecadeiras principais, além de se destinar à produção de agregado para concreto,
- b. a construção da barragem de enrocamento na margem esquerda ocorreria simultaneamente à escavação do canal de desvio, evitando a estocagem intermediária e
- c. as obras do vertedouro, na ombreira direita, seriam feitas independentemente do desvio, de modo que a rocha escavada para a fundação do vertedouro e canal de aproximação também poderia ser utilizada para as ensecadeiras principais e agregados.

Para permitir a escavação da rocha em condições submersas foi necessário construir duas ensecadeiras de concreto em arco nas extremidades do canal de desvio, uma a montante e a outra a jusante, com 32,50 m e 29,00 m de altura, respectivamente. Para erguer as ensecadeiras de concreto foram deixados propositalmente septos de rocha, do lado externo, mais tarde removidos. A **Figura 6.2** apresenta uma seção longitudinal pelo canal de desvio e identifica os principais elementos constituintes.

FIGURA 6.2

Seção esquemática longitudinal pelo desvio.



Legenda: 1) Rock trap; 2) Trincheira; 3) Leito natural do rio; 4) Septo natural de rocha; 5) Ensecadeira montante em arco; 6) Estrutura de controle do desvio; 7) Perfil do terreno original; 8) Ensecadeira jusante em arco; F) Fluxo d'água.

Fonte: CBDB, 2009.

O fundo do canal de desvio foi definido cerca de 30 metros acima do talvegue do rio, de modo que o arranjo adotado serviu para evitar que o material natural existente no leito do rio fosse transportado para o interior do canal durante o período de desvio das águas. Duas trincheiras interceptoras (*rock traps*) foram escavadas no fundo do canal para auxiliar nesta tarefa de interceptação, além de atender à finalidade de conter os detritos resultantes do desmonte das ensecadeiras.

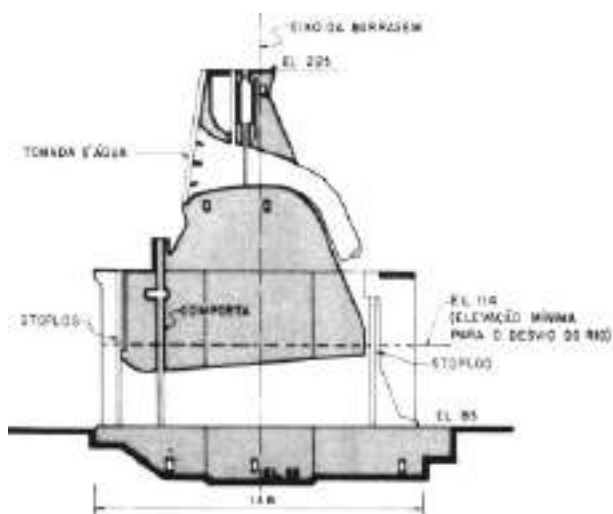
Para fechamento do canal de desvio foi implantada uma estrutura de concreto gravidade, dotada de 12 aberturas de 6,7 m x 22,0 m, capazes de prover a passagem da referida vazão de 35.000 m³/s. Por ocasião do enchimento do reservatório, as aberturas foram fechadas por comportas e tamponadas com concreto. No canal de desvio, imediatamente a jusante dessa estrutura, foi executado o segundo estágio da casa de força, tendo sido ali instaladas três unidades de geração. As **Figuras 6.3 e 6.4** mostram a estrutura de desvio em cortes transversal e longitudinal, respectivamente.

O projeto hidráulico das obras de desvio foi orientado por investigações detalhadas em um modelo do conjunto, na escala 1:100, executado no Laboratório

Hidráulico do Centro de Estudos e Pesquisas de Hidráulica e Hidrologia (CEHPAR) em Curitiba, Paraná.

FIGURA 6.3

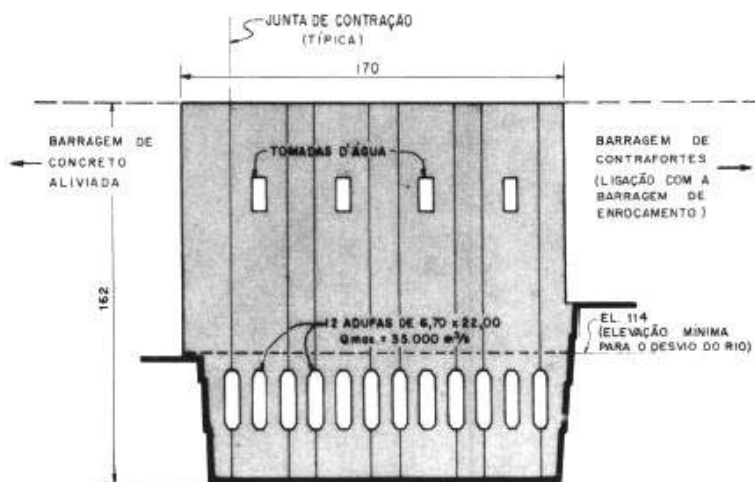
Estrutura de desvio – Seção transversal.



Fonte: Szpilman, 1981.

FIGURA 6.4

Estrutura de desvio – Seção longitudinal.



Fonte: Szpilman, 1981.

6.2 Processo construtivo

As obras de desvio foram iniciadas em 1975 e concluídas em 1978, envolvendo a remoção de 2,8 milhões de m³ de material comum e 18,4 milhões de m³ de rocha. A escavação obedeceu ao cronograma estipulado e, em 20/10/1978, as ensecadeiras de concreto (em arco) foram detonadas, com 58 toneladas de explosivos.

FIGURA 6.5

Início da construção das ensecadeiras de montante no leito natural do Rio Paraná, pela margem direita, em 1978. Ao fundo avista-se início de construção de braço da ensecadeira de jusante.



Fonte: Acervo dos autores.

No começo das escavações foi atribuída prioridade à área central do canal de desvio, onde seriam implantadas as estruturas de concreto, de modo a alcançar rapidamente a cota de assentamento das mesmas e dar início à concretagem, enquanto as escavações prosseguiam no restante do canal. Septos de rocha foram preservados nas duas extremidades, com a função de ensecamento.

Ao mesmo tempo que as escavações progrediam na área interna ao canal, realizava-se o desmonte de rocha subaquático na entrada e na saída do canal, de modo a atender aos requisitos hidráulicos do projeto. Cerca de 900.000 m³ de rocha foram removidos por desmonte a fogo, sob uma lâmina d'água de até 10 metros de espessura. A estrutura de controle foi fundada sobretudo em basalto maciço na elevação

65 m, exceto nas porções da parte central dos blocos, onde houve um aprofundamento de dois metros para eliminar brechas e basalto amigdaloidal existente no local (**Figura 6.6**).

FIGURA 6.6

Vista aérea do canal de desvio (1978) com as estruturas de controle já concretadas e taludes de escavação envolvendo os derrames C, D e E e os contatos entre eles.



Fonte: Acervo dos autores.

Para alcançar as cotas de fundação previstas na base e nas laterais das estruturas de controle do desvio, as escavações foram feitas em três estágios:

- **Estágio 1** – Correspondeu à parte de escavação primária do canal de desvio, com bancadas de 5 a 10 metros, conforme as condições.
- **Estágio 2** – Os últimos três metros de rocha acima da cota de fundação foram escavados em bancadas de um metro, com menor espaçamento dos furos de detonação controlada. Nas paredes laterais, blocos de basalto colunar aparentemente instabilizados foram removidos a frio. Em alguns locais foi necessária a instalação de chumbadores.

- **Estágio 3** – A finalização da escavação incluiu a remoção de bolsões de rocha fraca ou solta, por meio de marteletes. A limpeza final da fundação, logo antes da colocação das formas, foi feita de modo que a rocha sã estivesse adequada para o lançamento do concreto.

A construção do canal de desvio foi considerada a atividade mais crítica, segundo indicação da rede CPM (*Critical Path Method*) adotada. Com base nessa indicação, foram então separadas as atividades que dela dependiam, o que permitiu que, no programa de construção, se estabelecesse o início no ano de 1975, envolvendo as diferentes frentes de trabalho em paralelo, para algumas importantes obras civis e diversas encomendas de equipamentos e componentes eletromecânicos, que só poderiam ser fornecidos a longo prazo (Sória, 2012).

FIGURA 6.7

Vista aérea para jusante do canal de desvio (1978), vendo-se a estrutura de controle na parte central do canal e parte da ensecadeira de concreto em arco de montante, na extremidade esquerda inferior da foto.



Fonte: Acervo dos autores.

A escavação de tão volumosa massa de rocha, a construção das ensecadeiras de concreto e a remoção dos septos de rocha foram as atividades que definiram o caminho crítico aos efeitos do cronograma das obras. Segundo Pinheiro (2017), *“No planejamento original, toda a escavação do canal de desvio seria executada*

ao abrigo de dois septos rochosos naturais, volumosos, que teriam as suas geometrias reduzidas por escavação a seco e por fim detonadas e limpas por escavação submersa, para a concretização do desvio do rio. Como o fluxo do rio desviado tinha que passar por quatro adufas, deixadas sob as quatro tomadas d'água posicionadas no leito do canal, para que o desvio fosse concretizado, as tais adufas e seus dispositivos de fechamento deveriam estar concluídos quando da inundação do canal pela remoção dos septos de montante e jusante”.

FIGURA 6.8

Vista aérea do canal de desvio antes do enchimento com água do recinto entre os dois arcos.



Fonte: ABGE, 2017.

Ainda de acordo com Pinheiro, “O que aconteceu é que, pela ocorrência de vários imprevistos, a conclusão da construção das adufas, estimada para entre maio e junho de 1978, foi postergada para outubro de 1978, data hidráulica tardia para permitir o fechamento do leito do Rio Paraná sem causar atrasos no início da geração da primeira unidade da UHE Itaipu. A constatação desse atraso identificou a impossibilidade de se executar toda a escavação e remoção dos septos para permitir o desvio do rio em outubro de 1978. Por conta dessa constatação, as equipes de Engenharia e Planejamento decidiram executar duas ensecadeiras de concreto, com geometria em arco, uma a montante e outra a jusante da estrutura de desvio (adufas sob os quatro blocos da tomada de água). Com a construção dos arcos, já a partir de maio de 1978, foi possível iniciar as escavações dos septos rochosos, que foram concluídas em setembro de 1978”.

Finaliza o engenheiro Pinheiro: “As estruturas e dispositivos das adufas também foram concluídos no início de outubro de 1978 e, conforme planejado, os arcos em concreto foram detonados em 20 de outubro de 1978, com presença dos presidentes das repúblicas do Brasil e do Paraguai, inúmeras autoridades e convidados. A detonação fez resultar uma fragmentação pulverizada do concreto, sem requerer nenhum trabalho de rocktrap escavado a montante da estrutura de desvio”.

A entrada do canal de desvio foi projetada de modo a limitar as velocidades ao longo da ensecadeira de montante para cerca de três m/s, para descargas de até 35.000 m³/s. A profundidade das escavações variou entre 20 e 80 metros e envolveu os derrames basálticos C (inferior), D e E. Os taludes em basalto e brecha basáltica tiveram declividade subvertical, de 1,0H: 20,0V, com bermas de quatro metros de largura em intervalos de 20 metros de altura.

Os planos de desmonte a fogo levaram em consideração as condições de diaclasamento da rocha em cada derrame e tiveram bons resultados nos dois derrames inferiores, enquanto no derrame superior, caracterizado por diaclasamento colunar intenso, o alinhamento de projeto das paredes foi afetado pela condição não coesiva nas faces das diaclases e pelo caráter sinuoso das colunas basálticas, resultando em uma superfície irregular (**Figura 6.9**).

FIGURA 6.9

Derrames C (inferior), D e E expostos na escavação da parede direita do canal de desvio, observando-se o diaclasamento colunar no topo da sequência de derrames.



Fonte: Acervo dos autores, 1978.

Para estabilização das paredes rochosas foram utilizados, além dos fogos de desmonte cuidadosos, chumbadores, tirantes protendidos, concreto projetado e drenos, aplicados, quando necessário, em áreas de brecha basáltica ou em trechos mais intensamente fraturados. A velocidade média do fluxo d'água não ultrapassou, durante a vida útil do canal de desvio, a cinco m/s, insuficiente para causar danos às paredes laterais. Para controle do comportamento das paredes de escavação durante as detonações foram instalados acelerógrafos, inclinômetros, extensômetros, medidores triortogonais de juntas e marcos topográficos de referência.

A escavação do canal de desvio teve a duração de 32 meses. Foi dada prioridade à parte central do canal, onde 6×10^6 m³ de rocha foram escavados em 18 meses, de modo a atingir as fundações da estrutura de desvio e permitir o início da concretagem ao mesmo tempo em que prosseguia a escavação do resto do canal. Quando a escavação do canal estava no fim, foram deixados dois septos de rocha, um na entrada e outro na saída do canal (**Figuras 6.10 e 6.11**).

FIGURA 6.10

Septo de rocha basáltica de montante do canal de desvio e equipamentos para detonação subaquática.



Fonte: Acervo dos autores, 1978.

Já, a **Figura 6.12** documenta a ensecadeira de montante em concreto em arco, vista por jusante.

FIGURA 6.11

Ensecadeira em arco de concreto de montante, erguida no interior do canal de desvio. Avista-se parcialmente, em primeiro plano, o septo escavado em basalto, que possibilitou o ensecamento provisório do canal. A estrutura de controle, em construção, é visível no meio do canal, a montante da ponte de serviço.



Fonte: Acervo dos autores.

FIGURA 6.12

Ensecadeira em arco de concreto de montante e o talude rochoso da margem direita do canal de desvio.

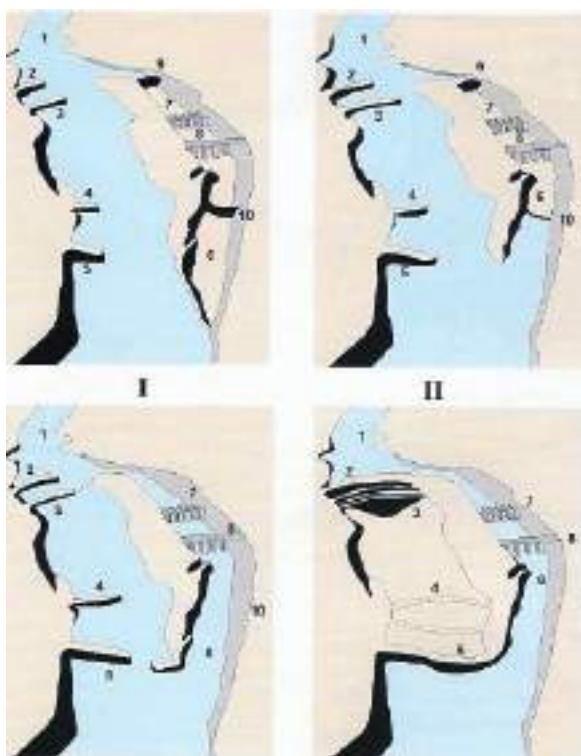


Fonte: Acervo dos autores.

A sequência de imagens da **Figura 6.13** focaliza algumas das principais etapas para desvio do rio, entre início de setembro/1978 e final de julho/1979. Na primeira imagem (I) (02/09/1978) o septo em rocha na extremidade montante do canal de desvio já havia sido removido e as pré-ensecadeiras (2 e 3 a montante e 4 e 5 a jusante) haviam sido parcialmente lançadas, avançando de modo a acelerar o fluxo d'água, favorecendo a remoção dos sedimentos presentes na parte mais profunda do canal do rio.

FIGURA 6.13

Etapas de desvio do rio.



Legenda: I) Situação em 02/09/1978; II) Em 06/09/1978; III) Em 20/10/1978; IV) Em 30/07/1979. 1) Rio Paraná; 2 e 3) Pré-ensecadeiras de montante; 4 e 5) Pré-ensecadeiras de jusante; 6) Canal de desvio; 7) Estrutura de desvio; 8) Ponte de serviço; 9) Ensecadeira de montante em arco; 10) Ensecadeira de jusante em arco.

Fonte: Fiorini, 2009.

Na segunda imagem (II) (06/09/1978) o septo em rocha de jusante também já foi removido e o ensecamento do canal de desvio está sendo feito somente pelas duas ensecadeiras de concreto em arco. Na terceira imagem (III) (20/10/1978) as ensecadeiras em arco no canal de desvio já foram implodidas e o fluxo se divide, enquanto as pré-ensecadeiras avançam para finalizar o fechamento do rio. A quarta imagem (IV) (30/07/1979) retrata a situação após ensecamento total do rio e pleno uso do canal de desvio. O desmonte a fogo das ensecadeiras em arco resultou na fragmentação pulverizada do concreto e não requereu trabalhos para remoção do entulho, que foi carregado pelas águas e, no caso da ensecadeira de montante, parcialmente depositado em um *rocktrap* escavado a montante da estrutura de desvio (**Figura 6.14**).

FIGURA 6.14

Detonação da ensecadeira de concreto de montante, no canal de desvio de Itaipu, ocorrida em 20/10/1978.



Fonte: ABGE, 2017.

A **Figura 6.15** oferece uma vista das estruturas de desvio em pleno funcionamento, pouco antes do fechamento das adufas, com as quatro unidades da casa de força sobre o canal de desvio já concretadas.

FIGURA 6.15

Vista para montante do canal de desvio (1982) em pleno funcionamento.



Fonte: Acervo dos autores.



ENCHIMENTO DO RESERVATÓRIO

7.1 Premissas

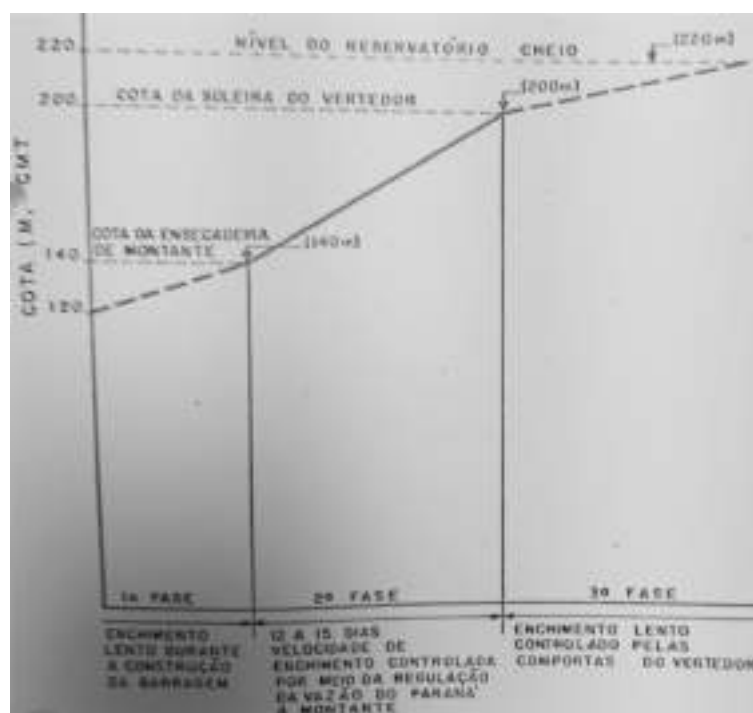
O enchimento do reservatório foi programado para acontecer em três sucessivas etapas. A primeira etapa corresponderia à elevação do nível d'água até a cota de coroamento da ensecadeira de montante (el. 139 m), a ser realizada por bombeamento da água do rio para o interior da área ensecada, antes do fechamento das comportas do canal de desvio, sem alterar a vazão do rio Paraná a jusante da obra.

A segunda etapa teria início com o fechamento das comportas do canal de desvio e elevação do nível d'água até a cota da crista do vertedouro (el. 200 m), prevendo-se a duração de 12 a 15 dias, conforme a vazão afluente ao reservatório, que poderia ser controlada pela operação dos reservatórios de montante, notadamente os de Jupia e Ilha Solteira. Uma vez atingida a el. 200 m, a água passaria a escoar pela soleira do vertedouro, restabelecendo-se as condições naturais de vazão para jusante da obra.

A terceira etapa levaria ao enchimento do reservatório através do controle do vão das comportas do vertedouro, de forma a atingir a el. máxima de 220 m sem prejuízo das condições de navegação a jusante. A **Figura 7.1** apresenta o esquema de enchimento previsto em três etapas.

FIGURA 7.1

Esquema de enchimento do reservatório.



Fonte: Arquivos Memória da Eletricidade (Itaipu Binacional, 1979).

Segundo essa sistemática, somente haveria alteração na vazão do rio Paraná a jusante de Itaipu durante os 12 a 15 dias da segunda etapa de enchimento. Nesse período, as condições de navegação a jusante da obra seriam afetadas numa extensão de aproximadamente 680 km, até alcançar a confluência com o rio Paraguai, visto que a vazão neste trecho seria limitada à contribuição do rio Iguaçu pelo lado brasileiro e pelos rios Acaray, Monday, Nacunday e outros menores pelo lado paraguaio, assim como por pequenos tributários do lado argentino.

O problema da fixação da vazão mínima a ser mantida a jusante estava ligado à questão do calado de navegação no porto de Posadas, onde era necessário

manter uma vazão mínima de 7.000 m³/s, que provia um calado de cinco pés, suficientes para a navegação.

O barramento de Itaipu não dispõe de descarregadores de fundo. Os argumentos contra a inserção de descarregadores de fundo na estrutura de desvio foram de cunho técnico, econômico e logístico em termos de cronograma da obra, tendo prevalecido a decisão de não os utilizar. Para compensar a ausência de descarregadores de fundo em Itaipu, cogitou-se, durante a elaboração do projeto, em construir uma barragem ao longo do rio Monday, localizado em território paraguaio, cuja foz no rio Paraná se situa pouco a jusante da foz do rio Iguaçu. O volume d'água deste novo reservatório seria utilizado para suprir as necessidades de vazão no rio Paraná durante os 12 a 15 dias críticos. Entretanto, o custo adicional desse novo empreendimento, o tempo de enchimento de seu reservatório, previsto em três anos e a necessidade de obter a concordância do Paraguai, conduziram ao abandono da ideia. Assim, a necessidade de suprir a vazão mínima a jusante de Itaipu recaiu sobre os reservatórios das usinas de Foz do Areia e Salto Santiago, no rio Iguaçu, que deveriam prover uma vazão de 5.200 m³/s ao rio Paraná, à qual se somariam as contribuições dos demais rios, já mencionados anteriormente.

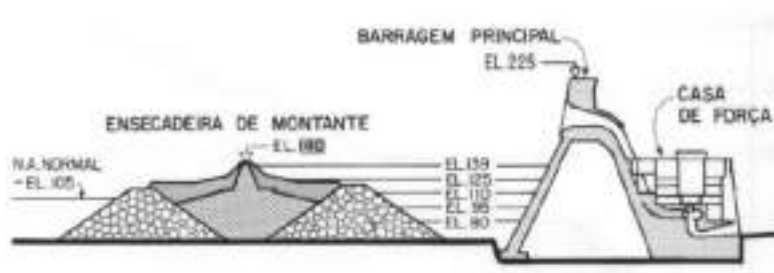
7.2 Etapas de enchimento

O reservatório de Itaipu iniciou o enchimento com o completo fechamento das comportas de desvio em 13 de outubro de 1982 (Sória, 2012). Como já referido, o enchimento se deu em três etapas e o evento, da mais alta importância para todo o projeto, foi precedido por uma série de preparativos a montante e a jusante da barragem, fundamentais para que a operação fosse bem sucedida.

A primeira etapa equivaliu a um teste de pré-enchimento e consistiu em elevar o nível do reservatório para a cota 139,00 m, através do enchimento do espaço compreendido entre a enscadeira de montante e a barragem principal, para isso bombeando-se água do rio. Este enchimento parcial representou 56% da altura da coluna d'água e 31% do carregamento hidrostático total. Conforme mostra a **Figura 7.2**, esta etapa foi cumprida em incrementos sucessivos do nível d'água, com patamares de espera de cinco dias, de modo a permitir a estabilização das leituras nos instrumentos de monitoramento das estruturas. Esta fase interessou somente as estruturas da barragem principal, de posição central no vale fluvial.

FIGURA 7.2

Situação geométrica na obra no teste de pré-enchimento.

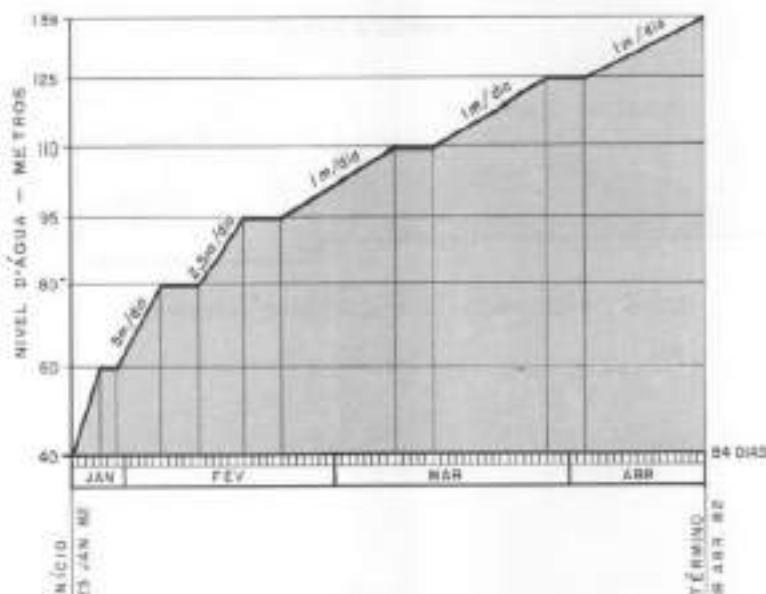


Fonte: Szpliman & outros, 1983.

Essa etapa teve a duração de 84 dias, entre janeiro e abril de 1982, com velocidades de enchimento variáveis. A **Figura 7.3** exibe a curva de pré-enchimento e indica a velocidade diária de elevação do nível da água.

FIGURA 7.3

Curva de pré-enchimento até a El. 139,00 m.



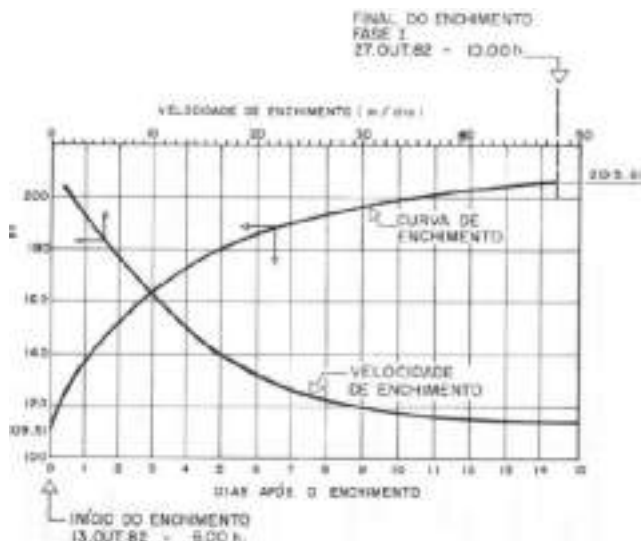
Fonte: Szpliman & outros, 1983.

Uma vez considerada satisfeita a resposta das estruturas a essa primeira etapa, em outubro de 1982 passou-se à segunda fase de elevação das águas, de modo a alcançar a cota da soleira do vertedouro (el. 200 m), quando então as águas começariam a escoar pelos vãos das comportas abertas. Essa operação teve que obedecer a certos requisitos, devido ao fato de o Rio Paraná interessar a três diferentes nações. O Tratado Tripartite entre Brasil, Argentina e Paraguai impôs limitações para a vazão mínima a ser mantida a jusante de Itaipu, de maneira a permitir a navegação em Posadas/Encarnación.

Como já referido, uma vez que em Itaipu não foi deixada estrutura para descarga da vazão sanitária, a vazão mínima de 5.000 m³/s foi provida pelos reservatórios existentes no Rio Iguaçu até que o nível d'água do reservatório de Itaipu alcançasse a soleira do vertedouro. Essa segunda etapa foi rápida, graças à estação hidrológica favorável. Em cerca de 13 dias, o nível d'água da represa alcançou e superou a soleira do vertedouro, dando início ao vertimento das águas. A **Figura 7.4** documenta a gradual elevação das águas, quando o nível atingiu a el. 205,81 m, em 27/10/1982.

FIGURA 7.4

Curva de enchimento do reservatório.



Fonte: Szpliman & outros, 1983.

O nível d'água normal do reservatório (220 m), entretanto, somente foi atingido decorridos ainda vários meses, uma vez que, preenchida a estreita calha fluvial, atingiu-se a extensa plataforma regional. A **Figura 7.5** mostra as Sete Quedas antes e durante o represamento.

FIGURA 7.5

As quedas antes e durante o represamento, com identificação dos saltos 1 a 7.



Fonte: Brunetto & Muraski, 1983.

A seguir, apresentam-se aspectos típicos da fase anterior ao enchimento do reservatório, bem como da progressiva ocupação do leito fluvial pelas águas.

FIGURA 7.6

Início do *canyon* do Rio Paraná logo a jusante das Sete Quedas, mostrando o curso caudaloso caracterizado por grandes ressaltos hidráulicos.



Fonte: Acervo dos autores.

FIGURA 7.7

Trecho inicial do *canyon* do Rio Paraná, caudaloso e não navegável, alguns dias antes do enchimento do reservatório de Itaipu.



Fonte: Acervo dos autores.

FIGURA 7.8

Aspectos do *canyon* do Rio Paraná algumas dezenas de km a jusante de Sete Quedas, com águas relativamente calmas, possibilitando a navegação.



Fonte: Acervo dos autores.

FIGURA 7.9

Dique de proteção logo a montante da barragem para retenção de troncos e objetos que poderiam danificar as estruturas no início do enchimento. Data da fotografia: 14/10/1982, um dia após o fechamento das comportas de desvio.

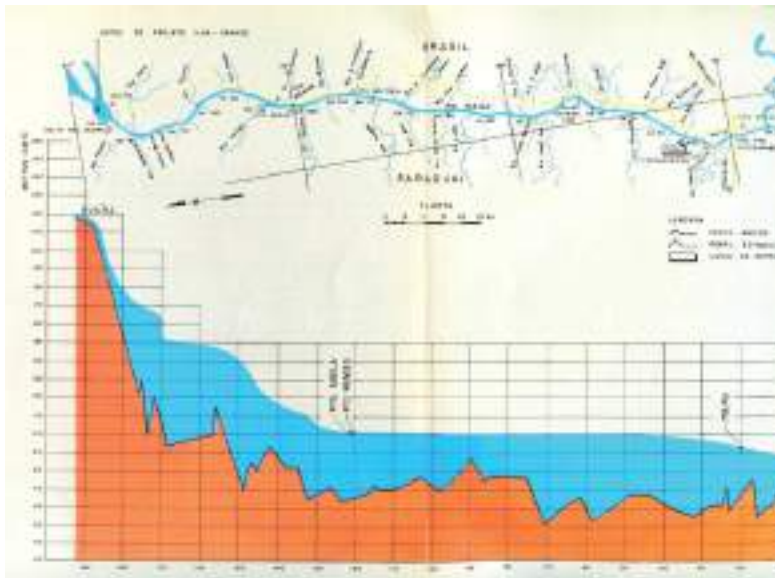


Fonte: Acervo dos autores.

O *canyon*, que antes comportava toda a água do Rio Paraná, transbordou com o enchimento e a água invadiu e se espalhou com rapidez nas terras marginais à calha do rio. A **Figura 7.10** documenta o perfil longitudinal da linha d'água entre Guaíra e a Foz do Iguaçu antes do enchimento.

FIGURA 7.10

Perfil longitudinal da linha d'água.



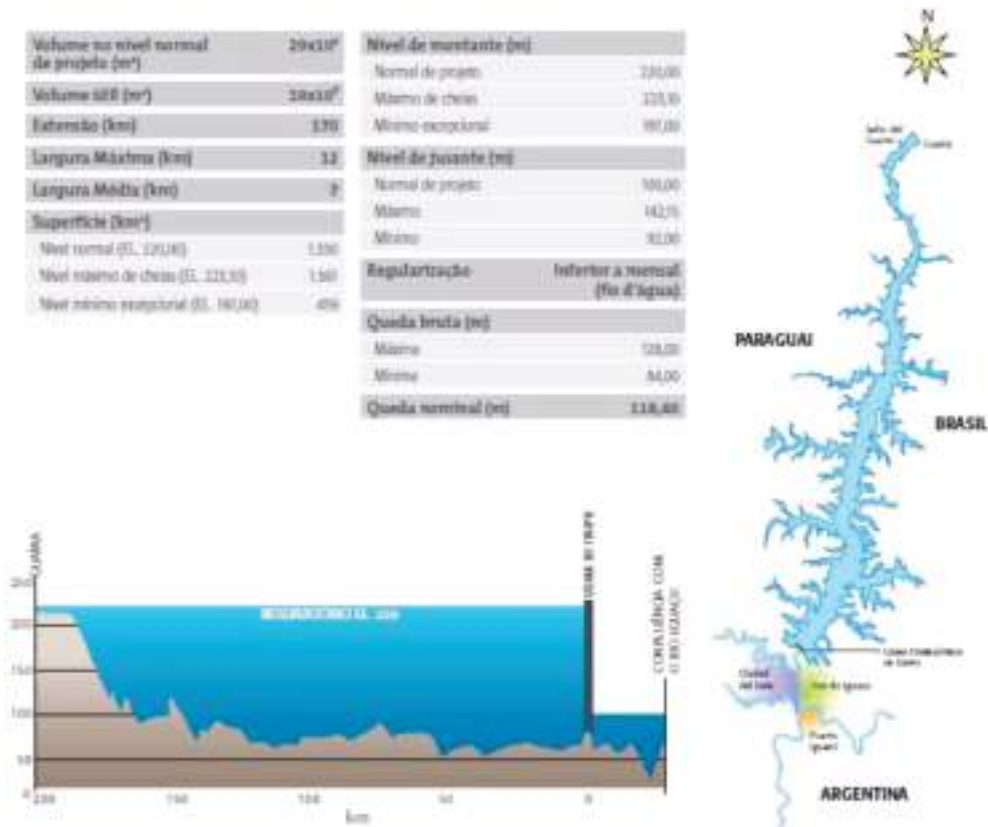
Fonte: Itaipu Binacional, 1980.

Formou-se, assim, a represa de Itaipu, com 170 km de comprimento, 180 m de profundidade máxima e ocupando uma área de 1.350 km² (780 km² no Brasil e 570 km² no Paraguai). Sua capacidade de armazenamento é de 29 bilhões de m³ de água. A **Figura 7.11** traz uma representação esquemática do reservatório.

O reservatório de Itaipu, compartilhado pelos dois países, está situado na porção mais a jusante do Rio Paraná (no caso do Brasil), sendo o último de um conjunto de 52 reservatórios existentes na região hidrográfica do Rio Paraná, que abrange os cursos d'água de uma vasta área com mais de 820 mil km², a montante de Itaipu. Essa configuração faz com que a vazão que afluí para Itaipu seja bastante regularizada, proporcionando uma condição muito favorável à produção de energia hidroelétrica, motivo que, dentre outros, foi um dos principais argumentos para a construção da UHE.

FIGURA 7.11

Representação esquemática do reservatório de Itaipu.



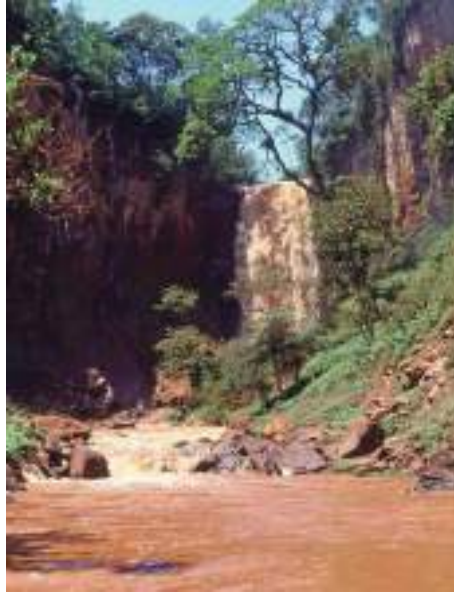
Fonte: Itaipu Binacional, 1980.

No desempenho operativo de Itaipu teve também influência a regularização proporcionada pelas usinas do Rio Iguaçu, com vazão média em torno de 1.500 m³/s. A variação de nível do rio Iguaçu, na sua foz, pode interferir na determinação da queda bruta da UHE de Itaipu.

O Brasil, com a regularização a jusante de Itaipu, deu um grande benefício ao Paraguai e Argentina, sem qualquer ônus para esses países, dentro de um espírito de cooperação entre países do cone sul.

FIGURA 7.12

Cachoeira de afluente suspenso na margem esquerda do *canyon* do Rio Paraná fotografada no dia anterior ao fechamento das comportas de desvio.



Fonte: Acervo dos autores.

FIGURA 7.13

Vista aérea do mesmo afluente da figura anterior, já semi-afogado pela subida do nível d'água no dia seguinte ao início do enchimento do reservatório de Itaipu.



Fonte: Acervo dos autores.

FIGURA 7.14

Pequeno afluente da margem esquerda do Canyon do Rio Paraná, algumas dezenas de km a montante de Itaipu, semi-afogado no dia seguinte ao início do enchimento do reservatório.



Fonte: Acervo dos autores.

FIGURA 7.15

Sobras de obra durante a fase inicial do enchimento.



Fonte: Acervo dos autores.

FIGURA 7.16

Fluxo de água pelo canal de desvio no dia anterior ao fechamento das comportas do desvio (acervo dos autores). Quando o fechamento foi total, a vazão a jusante foi suprida pelo rio Iguaçu.



Fonte: Acervo dos autores.

FIGURA 7.17

Vista da soleira no vão central do vertedouro.



Fonte: Acervo dos autores.

Comparativamente a outros empreendimentos hidrelétricos de grande porte, o reservatório de Itaipu, com 1.350 km² de área inundada, é o sétimo maior do Brasil, o maior sendo o de Sobradinho (BA), com 4.214 km² de área inundada. Itaipu, entretanto, dispõe do melhor índice de aproveitamento da água para geração de energia entre os grandes reservatórios brasileiros, sendo seu índice de produção de 10,4 MW por km², ou seja, a cada 0,1 km² gera 1 MW. Algumas características do reservatório de Itaipu constam da **Tabela 7.1**, a seguir.

Tabela 7.1 – Características da UHE Itaipu.

CARACTERÍSTICAS	DIMENSÕES
Volume no nível máximo normal	29 x 10 ⁹ m ³
Volume útil	19 x 10 ⁹ m ³
Extensão	170 km
Largura máxima	12 km
Largura média	7 km
Superfície	
Nível normal	1.350 km ²
Nível máximo de cheia	1.561 km ²
Nível máximo excepcional	459 km ²
Nível de montante	
Normal	220,30 m
Máximo de cheias	223,10 m
Mínimo excepcional	197,00 m
Nível de jusante	
Normal	104,00 m
Máximo	142,15 m
Mínimo	92,00 m
Queda bruta	
Máxima	128,00 m
Mínima	84,00 m
Queda nominal	118,40 m

Fonte: <https://www.itaipu.gov.br/energia/reservatório> (acesso em 3/06/2023).

Afora os aspectos ambientais relacionados à formação do lago de Itaipu, o projeto previu a magnitude dos recalques da crosta terrestre devidos ao peso da água e à atividade sísmica induzida, que se revelou de pequena intensidade nas vizinhanças do reservatório.



MONITORAMENTO E COMPORTAMENTO DA BARRAGEM

8.1 Principais aspectos comportamentais

O enchimento do reservatório foi monitorado por uma ampla rede de instrumentos implantados de modo a cobrir as principais feições detectadas nas etapas de investigação e construção, capazes de ter influência no comportamento do conjunto estruturas/fundação. A **Tabela 8.1** apresenta um resumo de toda a instrumentação instalada nas estruturas de barramento e em sua fundação.

Foi selecionada uma série de blocos, que foram dotados de instrumentação completa, consistindo em piezômetros, extensômetros, pêndulos invertidos, medidores de vazão, além de marcos de referência para controle topográfico. De um total de 150 blocos de concreto da barragem, 27 foram densamente instrumentados. A instrumentação foi estendida aos túneis e galerias abertas na fundação, onde as principais feições geológicas foram monitoradas com extensômetros,

medidores triortogonais e medidores de vazão. A **Figura 8.1** documenta a distribuição de instrumentos em uma seção modelo nas estruturas de concreto da tomada d’água/casa de força.

Tabela 8.1 – Quantitativos de instrumentos instalados.

TIPO LOCALIZAÇÃO	PIEZÔMETRO	EXTENSÔMETRO	MEGOM DE RECALQUE	PÊNDULO	CÁLCULA DE PRESSÃO	MANO DE REFERÊNCIA	MEGOM TRIORTOGONAL DE JUNTAS	DEFORMÂMETRO	PIEZÔMETRO	BASE PARA MEGOM DE JUNTAS	PIEZÔMETRO	PIEZÔMETRO PARA AMPLAÇÃO	MEGOM DE JUNTAS ENLUTADO	MEGOM DE VAZÃO	ACELERÔMETRO	BASE PARA PRESSÃO	TOTAL
VERTICAIS	72	16	-	2	6	8	-	36	2	38	10	-	-	3	-	0	195
BARR. LATERAL DRETO	144	65	-	6	-	20	-	78	6	179	13	-	2	5	-	0	523
BARRAGEM PRINCIPAL	143	100	-	13	6	22	-	132	45	198	44	-	22	-	1	7	733
ESTRUTURA DE DERVO	74	44	-	1	-	3	-	168	-	107	47	-	26	10	-	1	481
BARR. ENCAMAMENTO	45	-	-	-	-	38	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	87
BARR. TERRA ESQUERDA	47	-	9	-	-	37	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	93
BARR. TERRA DIREITA	15	-	-	-	-	14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	29
CASA DE FORÇA E ÁREA DE MONTAGEM	79	59	-	2	-	-	-	48	20	151	19	11	28	5	-	-	402
PÓNTON DE DRENAGEM	-	-	-	-	-	-	16	-	-	-	-	-	-	11	-	-	27
TOTAL GERAL	619	284	9	24	12	162	16	462	73	653	133	11	78	34	1	18	2570

Fonte: Szpilman & outros, 1983.

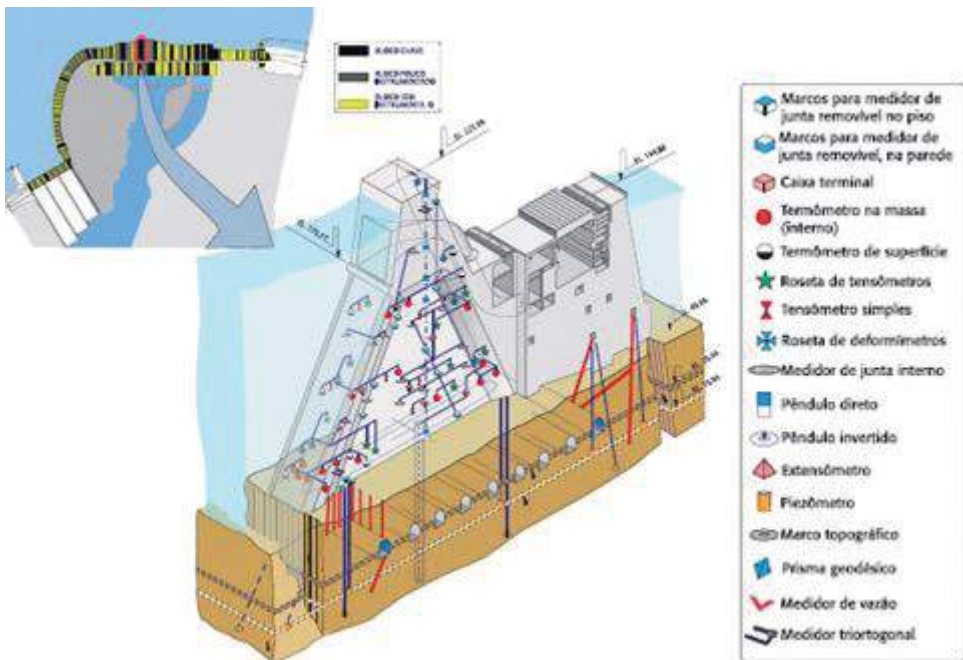
O enchimento do reservatório foi realizado em diversas etapas, já descritas no **item 7**, cada qual tendo sido acompanhada e interpretada em termos de comportamento das estruturas perante as novas solicitações impostas. Já, no teste de pré-carregamento das estruturas centrais que correspondeu, na realidade, à primeira etapa de enchimento, concluiu-se que o desempenho da barragem principal e da casa de força era satisfatório, uma vez que os valores fornecidos pela instrumentação se situavam dentro das previsões de projeto, não tendo sido detectada qualquer anormalidade. Na etapa de carregamento final o desempenho das estruturas de barramento continuou sendo satisfatório, dentro das expectativas.

Em todas as feições geológicas instrumentadas, as respostas dos piezômetros à elevação do nível do reservatório foram imediatas, ocorrendo assim que os mesmos eram alcançados pela subida das águas. Em todas as estruturas, as subpressões medidas em diferentes níveis da fundação permaneceram inferiores àquelas admitidas nos critérios de projeto, comprovando-se a eficiência dos sistemas

de drenagem, sejam eles através de furos na fundação das estruturas, túneis ou meias-canais. Alguns piezômetros implantados no contato concreto-rocha, situados sob a cabeça de montante da barragem principal, acusaram níveis de pressão bastante elevados que, ao longo dos primeiros meses após o enchimento, mostraram tendência à diminuição gradual, provavelmente devido à colmatação progressiva dos caminhos de percolação, bem como à decantação de material fino junto ao pé de montante da barragem. Em alguns desses locais as subpressões foram aliviadas pela abertura de drenos adicionais.

FIGURA 8.1

Plano geral de instrumentação de fundação nas estruturas da tomada d'água/casa de força.



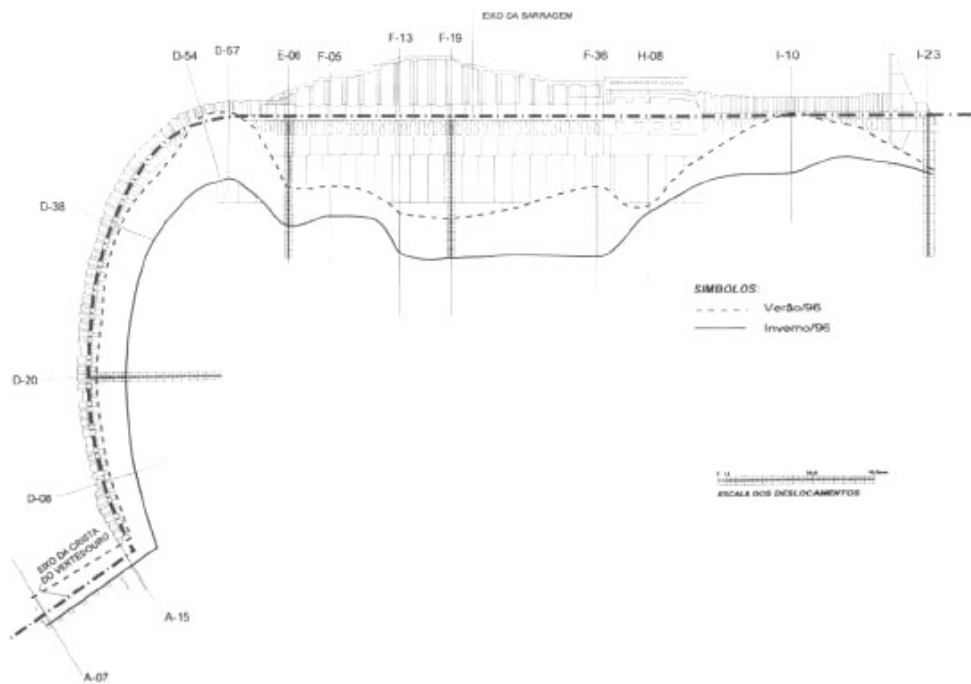
Fonte: Itaipu, 2017.

As vazões de drenagem de fundação revelaram-se, também, inferiores às previstas no projeto e acusaram uma redução gradual em relação às registradas logo após o enchimento, indicando uma progressiva colmatação do maciço rochoso. A **Figura 8.2** ilustra, para cada trecho da barragem, as vazões medidas em setembro/1998, decorridos 16 anos desde o início da operação da usina. Constata-se que o total das surgências era de aproximadamente 150 l/s, cerca de um terço do

estão plotados os deslocamentos da crista da barragem rumo a jusante e a amplitude das oscilações desde o início do enchimento, em função da altura dos blocos. Constatou-se que os blocos de um mesmo tipo (contraforte, gravidade aliviada ou maciça) tem um comportamento específico, em função da altura. Os blocos de contrafortes, mais esbeltos e com maior superfície, exibem maiores deslocamentos, enquanto os de gravidade maciça, mais rígidos, apresentam os menores movimentos. Aqueles de gravidade aliviada se situam entre os dois extremos. Os dados da figura se referem ao ano de 1996, que teve um inverno bastante rigoroso, com maior amplitude sazonal e maiores deslocamentos para jusante.

FIGURA 8.3

Deslocamentos da crista da barragem para jusante em relação à base dos blocos – Medições pelos pêndulos em 1996.



Fonte: Betioli & outros, 1999.

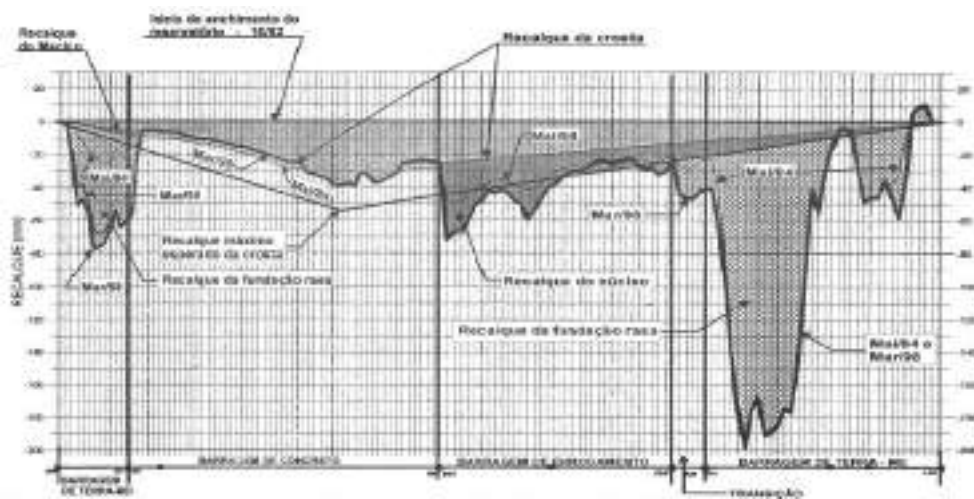
Constatou-se, também, que os blocos localizados na ombreira direita apresentaram uma componente de deslocamento para a esquerda hidráulica e os da ombreira esquerda para a direita hidráulica, indicando convergência para o leito do rio.

8.3 Monitoramento geodésico

Dentre as medidas voltadas para o monitoramento do comportamento das estruturas, o enchimento do reservatório em Itaipu requereu a realização de levantamentos geodésicos de precisão, capazes de revelar a magnitude dos assentamentos devidos ao acréscimo de carga imposto pelo reservatório, medidos ao longo da crista do barramento. Esses recalques são formados pela somatória das seguintes parcelas: a) recalque da crosta terrestre devido ao peso da água, b) deformação da própria estrutura e c) deformação da fundação. A **Figura 8.4** apresenta os resultados das campanhas de nivelamento geodésico realizadas entre outubro/1982 e setembro/1994, a primeira campanha representando a situação previamente ao enchimento do reservatório. Leituras recentes (2022) não revelaram o prosseguimento dos assentamentos, permanecendo nos valores do gráfico.

FIGURA 8.4

Nivelamento geodésico da crista do barramento.



Fonte: Villalon & outros, 1999.

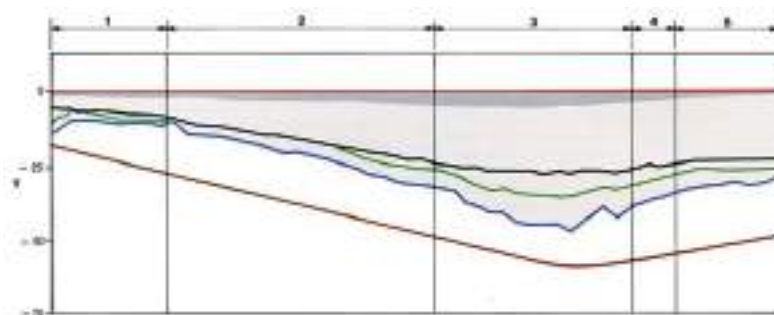
No gráfico sobressaem os recalques na barragem de terra da margem esquerda, devidos à própria fundação rasa da estrutura, tendo alcançado pouco mais de 18 cm entre 10/1982 e 05/1984, para estabilizar em seguida.

Já nas estruturas de concreto, os maiores assentamentos ocorreram no canal principal do rio, onde a profundidade da água com o lago cheio é de 180 m.

A **Figura 8.5**, detalhe da figura anterior, mostra as curvas dos assentamentos nos trechos em concreto, incluindo os contrafortes e os blocos de gravidade ocos, além da estrutura de controle do desvio, ao longo de cinco anos após o primeiro enchimento do reservatório.

FIGURA 8.5

Assentamentos medidos.



Legenda: Y) Assentamento crustal (mm); 1) Vertedouro; 2) Barragem de contrafortes direita; 3) Barragem principal; 4) Estruturas de desvio; 5) Barragem de contrafortes esquerda.

Fonte: Itaipu Binacional, 1994.

Na figura acima, a linha vermelha representa a referência básica, de 07/10/1982. A linha preta traz os assentamentos medidos em 29/11/1982. A linha verde, em 21/05/1984. A linha azul, em 03/09/1987. A linha marrom, o assentamento crustal máximo teórico (pouco inferior a 60 mm). Ainda, a área sombreada escura se refere aos assentamentos próprios da fundação.

Os assentamentos foram medidos a partir de uma semana antes do início do enchimento do reservatório. Descontando-se as variações no ajuste interno e deformação das fundações mais superficiais, que sofrem influência do tipo de barragem e configuração da fundação, obtêm-se as seguintes conclusões gerais:

- cerca de 50% da deformação crustal ocorreu nos 30 dias a partir do término do primeiro enchimento do reservatório,
- o assentamento crustal continuou a aumentar durante os primeiros cinco anos de operação, com o nível do reservatório essencialmente constante, mas, de maneira gradual, a uma razão menor. Na parte mais profunda do reservatório, a razão era de cerca cinco mm/ano, que é significativamente maior que a deformação incremental da fundação superior. Também ficou

indicado que a deformação tipo rastejo (*creep*) da crosta profunda parecia continuar por mais vários anos.

- os assentamentos crustais foram proporcionais à profundidade da água, variando gradualmente na direção axial. Qualquer mudança abrupta no assentamento da crista refletiu deformação da fundação superior e não aquela de um *continuum crustal*.
- não existiram assentamentos crustais diferenciais que pudessem ocorrer ao longo de falhas profundas.

Os assentamentos crustais foram estimados, também, assumindo-se o leito do reservatório como um meio elástico plano semi-infinito. A fórmula usada considera a deformação diretamente proporcional ao peso da água e à largura média da área carregada, e inversamente proporcional ao módulo de deformação da massa rochosa. A curva de assentamento crustal teórico da **Figura 8.5** assumiu a área carregada do reservatório com largura de 1,5 km e extensão de 100 km, com módulo de deformação de $5 \times 10^3 \text{ kN/cm}^2$.

A comparação dos valores estimados teoricamente com os assentamentos medidos indicou que não existiram anomalias no comportamento do substrato rochoso ao longo de toda área do reservatório. Confirmou-se, assim, que a resposta crustal era elástica e dentro do intervalo esperado, não afetando adversamente a segurança e a estabilidade das estruturas do projeto de Itaipu.

8.4 Monitoramento sísmico

Com base nos registros históricos de sismos e dados geológicos regionais, o projeto de Itaipu e a área do reservatório foram considerados assísmicos. Todavia, houve considerável interesse na possível ocorrência de atividade sísmica induzida pelo reservatório, similar à experiência de alguns grandes reservatórios em diversos países. Uma preocupação adicional foi a correlação, desconhecida, entre a rápida razão do enchimento do reservatório, instabilidade crustal e atividade sísmica.

Foi instalada uma rede de monitoramento sísmico que começou a operar cerca de 18 meses antes do primeiro enchimento do reservatório. A rede consistiu de cinco estações sismológicas ao redor do reservatório, um sismógrafo situado

próximo à confluência dos rios Monday e Paraná, cerca de dois quilômetros a jusante do vertedouro e dois acelerômetros situados na crista da barragem. No início, os dados foram registrados em rolos (*drums*) que eram substituídos a intervalos de um a dois dias. Durante a época do enchimento do reservatório, os dados eram obtidos por telemetria e enviados a uma estação central no laboratório de Itaipu, na margem direita, próximo à barragem.

Dados de instrumentação foram analisados na Universidade de Brasília, com relatórios semanais à gerência de projeto. Os instrumentos detectaram terremotos distantes, bem como vibrações de detonações. Durante o enchimento do reservatório, sismólogos estiveram presentes na área e revisaram os dados registrados todos os dias.

As seguintes observações foram baseadas em dados reunidos pela rede sísmológica por um período de oito anos, conforme relato de Cotrim (1999):

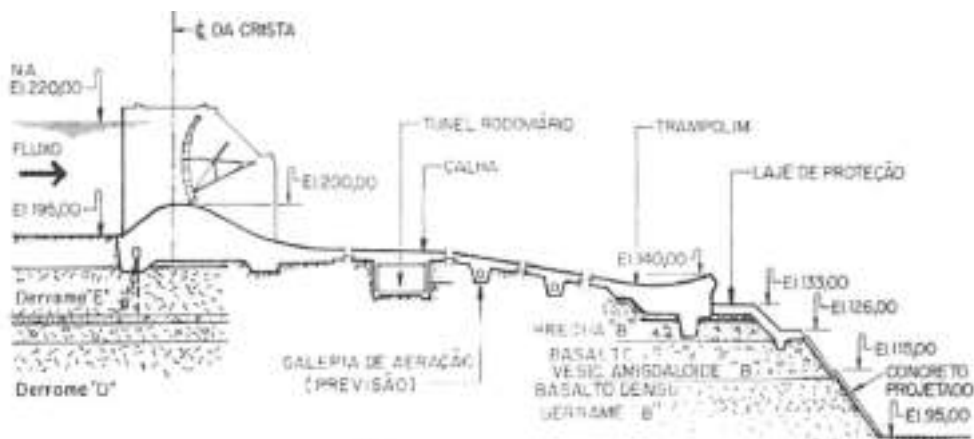
- não foi registrada qualquer atividade sísmica originada a partir da área do reservatório ou no âmbito de 200 km ao redor do projeto, durante os 18 meses anteriores ao enchimento do reservatório,
- durante a etapa de rápido enchimento do reservatório, em 15 dias, não houve indicação de microssismos na área e vizinhanças,
- nenhuma atividade sísmica originada a partir da área do reservatório, ou num raio de 200 km ao redor do projeto, foi detectada durante oito anos de operação,
- os acelerógrafos destinados a medir acelerações maiores que 0,01 g não foram acionados durante o enchimento do reservatório nem durante oito anos de operação,
- o sismógrafo de jusante registrou vibrações devidas à operação do vertedouro, particularmente quando a descarga superou 20.000 m³/s.

8.5 Erosões a jusante do vertedouro

Cada uma das três calhas do rápido do vertedouro conduz as águas para um trampolim, onde ocorre o destaque do jato, que finaliza sua trajetória em uma fossa pré-escavada, após uma queda com desnível de 45 m, conforme mostra a **Figura 8.6**, a seguir.

FIGURA 8.6

Seção longitudinal do vertedouro – Elementos integrantes.



Fonte: Szpilman & outros, 1991.

A **Figura 8.7** traz uma vista da área do vertedouro ao final dos trabalhos construtivos, pouco antes de sua entrada em operação.

FIGURA 8.7

Vista aérea do vertedouro ao final da construção.

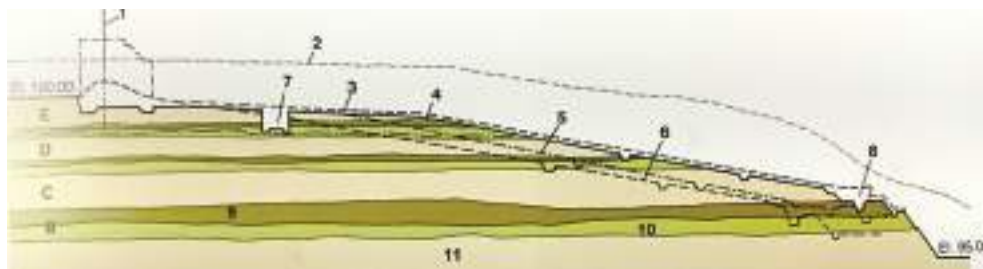


Fonte: Sucharov & Fiorini, 2002.

A **Figura 8.8** traz uma seção geológica ao longo das calhas do vertedouro, que exhibe a presença de quatro dos cinco derrames que caracterizam o sítio, faltando apenas o derrame A, de posição inferior.

FIGURA 8.8

Seção geológica longitudinal esquemática.



Legenda: 1) Eixo do vertedouro; 2) Terreno original; 3) Perfil da estrutura; 4) Calha esquerda; 5) Calha central; 6) Calha direita; 7) Túnel rodoviário; 8) Trampolim; 9) Brecha basáltica; 10) Basalto vesículo-amigdaloidal; 11) Basalto denso.

Fonte: Itaipu Binacional, 1994.

As altas vazões da estação 1982-1983, somadas ao funcionamento ininterrupto do vertedouro nos três primeiros anos após o enchimento, causaram um intenso processo erosivo a jusante dos trampolins, bem como na parede lateral da fossa pré-escavada. Observou-se com clareza que o jato d'água saindo do trampolim, ao impactar na massa d'água, formava um trem de ondas que progredia de jusante para montante, em intervalos de poucos segundos. Esta ação incessante destruiu a proteção de concreto projetado existente e desestruturou o maciço rochoso, constituído por basalto denso colunar do derrame B, removendo da parede grande quantidade de blocos. Os danos foram mais intensos a jusante da calha esquerda, secundados pela calha central.

A jusante da calha direita, os danos visíveis foram de pequena intensidade, possivelmente devido ao menor tempo de operação, mas foram intensos na base da parede lateral direita, paralela ao fluxo, favorecidos por uma extensa junta sub-horizontal no maciço basáltico, tendo chegado a formar uma cavidade no maciço rochoso com oito a 10 metros de largura em balanço e com uma centena de metros de comprimento (**Figura 8.9**).

FIGURA 8.9

Erosão intensa na parede lateral direita da fossa.

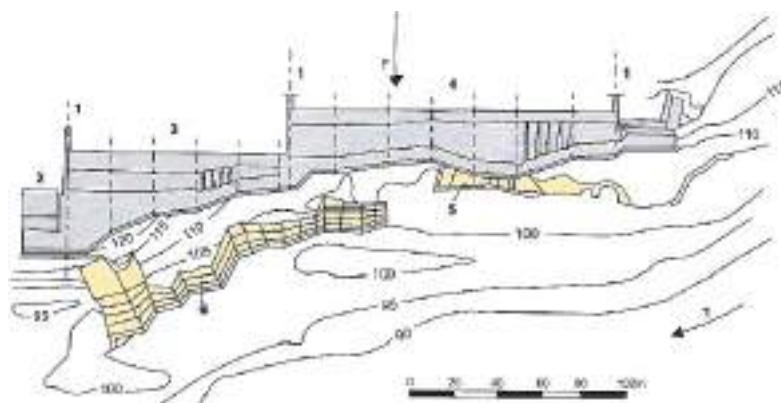


Fonte: CBDB, 2002.

Em setembro/outubro de 1985, durante a estiagem, aproveitando as águas baixas do período, executaram-se reparos na faixa de atuação das ondas, implantando-se muros de proteção de concreto armado ancorados no maciço rochoso (**Figura 8.10**).

FIGURA 8.10

Reparos a jusante do vertedouro (CBDB, 2002).



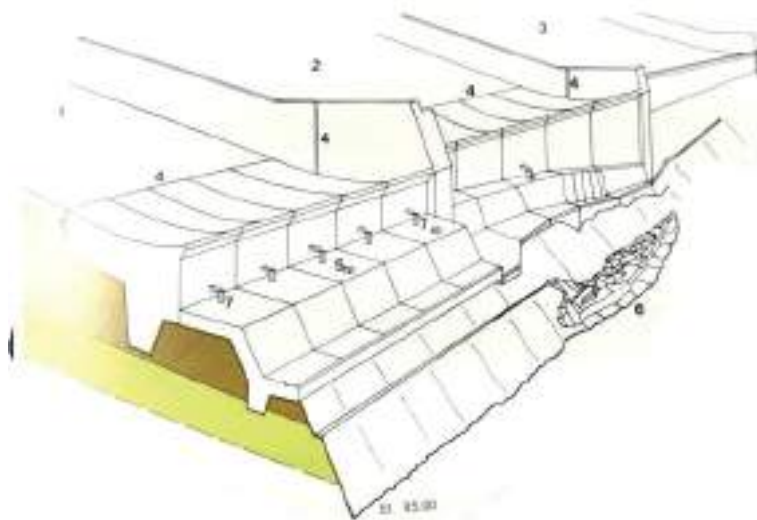
Legenda: 1) Linha de referência dos muros; 2) Calha direita; 3) Calha central; 4) Calha esquerda; 5) Muro de proteção (1985); 6) Muro de proteção (1986); 7) Rio Paraná.

Fonte: Sucharov & Fiorini, 2002.

A **Figura 8.11** mostra uma perspectiva da área dos trampolins e documenta os dispositivos de monitoramento instalados para acompanhar a evolução de eventuais deslocamentos.

FIGURA 8.11

Perspectiva e indicação de dispositivos de monitoramento.



Legenda: 1 a 3) Calhas do vertedouro; 4) Trampolins e muros laterais; 5) Medidores triortogonais; 6) Muro de reparo e proteção das áreas erodidas; 7) Extensômetros.
Fonte: Itaipu Binacional, 1994.

Em 1988, passados seis anos desde a entrada em operação da usina, foi possível realizar uma batimetria da fossa pré-escavada, tendo-se constatado que no prazo de seis anos, aproximadamente, a erosão progrediu de maneira assimétrica, concentrando-se a jusante da calha direita, onde se aprofundou cerca de 30 metros. Não ocorreram aprofundamentos significativos a jusante das calhas central e direita. Uma discreta barra de acumulação se formou transversalmente ao fluxo d'água pelo vertedouro, paralelamente ao fluxo do rio, atingindo altura máxima de 15 metros, sem prejudicar a descarga da casa de força (**Figura 8.12**).

Computando-se os volumes erodidos e depositados no período de operação da usina, constatou-se que cerca de 570.000 m³ de rocha foram removidos da área de impacto dos jatos, do leito do rio e do talude lateral direito. Desse volume, cerca de 190.000 m³ foram depositados nas imediações, o que indica que 1/3 do material erodido foi depositado a curta distância, enquanto 2/3 foram carreados mais para jusante (Szpilman & outros, 1991). A **Figura 8.13**, a seguir, apresenta uma seção esquemática da evolução da fossa no período de seis anos.

FIGURA 8.12

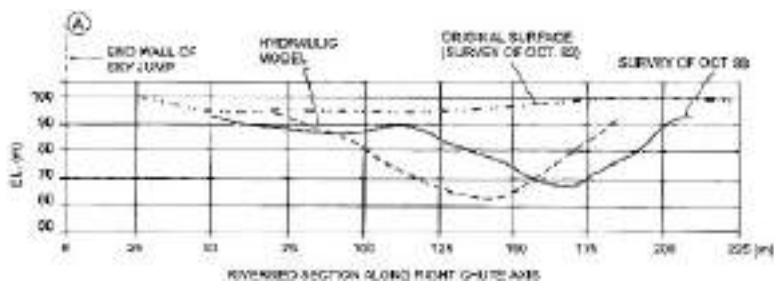
Comparação entre as batimetrias de 1982 e 1988. Área de erosão (laranja). Área de deposição (cinza).



Fonte: Sucharov & Fiorini, 2002.

FIGURA 8.13

Seção batimétrica a jusante da calha direita – Evolução da fossa no período de seis anos.



Fonte: Sucharov & Fiorini, 2002.

O maior aprofundamento da fossa a jusante da calha direita não dependeu do tempo de operação, visto que a prioridade na operação das comportas era dada à calha esquerda, seguida pela central e, finalmente, pela direita. Atribuiu-se o maior aprofundamento à existência do muro de concreto lateral, a jusante da calha direita, confinando o fluxo e concentrando a energia erosiva na área impactada.



CONSIDERAÇÕES FINAIS

O longo histórico envolvendo a evolução das ideias a respeito do aproveitamento hidroenergético do potencial das Sete Quedas, até culminar no projeto e realização da Usina Hidrelétrica de Itaipu, teve a duração aproximada de sete décadas, desde que a Câmara dos Deputados, em outubro de 1908, fez uma primeira referência ao aproveitamento da energia hidráulica dos saltos, até chegar ao início das obras civis, em maio de 1975 e à finalização da construção e fechamento das comportas em outubro de 1982.

Ao longo desse período de tempo, registrou-se uma profícua sequência de ideias e projetos, desde a percepção de que o aproveitamento não poderia ser realizado nas imediações das quedas, devido a afogamento do *canyon* a jusante por ocasião dos períodos de cheia, passando pela concepção de um aproveitamento por derivação das vazões ao longo da margem esquerda do rio Paraná, até culminar na identificação de Itaipu como local mais apropriado à implantação de um só empreendimento de caráter binacional.

Ao longo do presente texto buscou-se retratar, o mais fielmente possível, as características dos sucessivos empreendimentos concebidos ao longo do tempo, em cada caso buscando-se colocar em evidência os aspectos geológicos dos sítios envolvidos, com destaque à evolução das técnicas de investigação que ocorreu a partir dos anos 60, com o forte desenvolvimento da Geotecnia no País.

Neste contexto tecnológico, Itaipu representou o grande campo de aplicação do conhecimento adquirido pela Geotecnia no Brasil, nas três grandes áreas da Mecânica dos Solos, Mecânica das Rochas e da Geologia de Engenharia.



MATERIAL CONSULTADO

ABGE – Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental (2017) – Geologia de Engenharia e Mecânica das Rochas no Brasil: a contribuição de Murillo Dondici Ruiz. São Paulo. Organizador: BARTORELLI, A. 459 páginas.

AB’SÁBER, A.N. (1949) – Sobre “Regiões de circundesnudação pós-cretácea no Planalto Brasileiro». Boletim Paulista de Geografia. São Paulo, 1:1-21

AB’SÁBER, A.N. (1955) – Bacia do Paraná-Uruguai. Estudo da geomorfologia aplicada. In: Condições geográficas e aspectos geoeconômicos. Comissão Interestadual da Bacia Paraná-Uruguai. São Paulo. Vol. 1, pág. 76-93.

ABRAHÃO, R.A., SILVEIRA, J.F.A. & BARROS, F.P. (1983) – Itaipu main dam foundations: design and performance during construction and preliminary filling of reservoir. In: V International Congress on Rock Mechanics. Melbourne. Ed. A.A. Balkema. Vol. 1, pág. 191-197.

ALMEIDA, F.F.M. (1956) – O planalto basáltico da bacia do Paraná. Boletim Paulista de Geografia, nº 24, pág. 3-34.

ALMEIDA, F.F.M., CARNEIRO, C.D.R. & BARTORELLI, A. (2012) – Magmatismo pós-paleozoico no Brasil. In: Geologia do Brasil. Organizado por HASUI, Y., CARNEIRO, C.D.R.; ALMEIDA, F.F.M & BARTORELLI, A. São Paulo, Ed. Beca, 2012. Pág. 430-452.

AMORIM, R. (1983) – Escavação em rocha de poços e túneis sob a fundação dos blocos mais altos da barragem principal da hidrelétrica de Itaipu. In: Simpósio sobre a Geotecnia da Bacia do Alto Paraná. Anais...Vol. 2B, pág. 9-33.

AMORIM, R. (1983) – Fogos cuidadosos para obtenção de taludes finais e superfícies de rocha das fundações das estruturas de concreto da hidrelétrica de Itaipu. In: Simpósio sobre a Geotecnia da Bacia do Alto Paraná. Anais...Vol 2B, pág. 35-55.

ANDRADE, T. (1941) – O Rio Paraná no roteiro da marcha para o Oeste. Editora Irmãos Pongetti. 192 páginas.

ANDREOLO, F.R. & BETIOLI, I. (2015) – Obras de concreto de Itaipu – Desenvolvimento, controle, qualidade, durabilidade ... 40 anos depois. Editora Cubo. 1600 páginas.

BARBI, A.L. (1981) – Comportamento do maciço rochoso em função da escavação do canal de desvio do rio da Usina de Itaipu. In: III Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia. Itapema. ABGE. Anais...Vol. 2, pág. 463-485.

BARBI, A.L. (1983) – Comportamento de fundações de barragens em concreto. Fatores condicionantes e desempenho dos tratamentos. In: Simpósio sobre a Geotecnia do Bacia do Alto Paraná. São Paulo. ABGE/ABMS. Anais...Vol. 1B, pág. 209-231.

BARBI, A.L., SIQUEIRA, G.H., GOMBOSSY, Z.M. & PORTO, E.O. (1982) – Problemas relacionados com a fundação dos blocos mais altos da Barragem de Itaipu. Relatório DGMRI-00-065-82 (Abril/1982). Itaipu Binacional. 191 páginas.

BARROS, L.E.P. (2012) – Os saltos da discórdia: o impasse entre Brasil e Paraguai em torno das Sete Quedas (1962-1966). Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Grande Dourados –UFGD. 159 páginas.

BARROS, F.P. & GUIDICINI, G. (1981) – Um processo natural de alívio de tensões e o projeto de drenagem das fundações da barragem de Itaipu. In: XIV Seminário Nacional de Grandes Barragens. Recife, 1981. CBGB. Anais: Vol. 1, Tema 1. Pág. 519-539.

BARROS, F.P. & BARBI, A.L. (1983) – Análise do comportamento das fundações das estruturas de concreto de Itaipu: XV Seminário Nacional de Grandes Barragens. Rio de Janeiro, 1983. CBGB. Anais: Vol. 1, Tema 3. Pág. 287-310.

BARROS, F.P., COLMÁN, J.L., GALLICO, A., MARTINELLI, D.A.O. & FERREIRA, J.C. (1982) – Itaipu project: the structural safety assesment through physical models.

In: XIV Congress on Large Dams. Rio de Janeiro. ICOLD/CBGB. Anais...Vol.1, pág. 117-142.

BARROS, F.P., CARVALLO, J.C., MARTINEZ, L. & MARTINELLI, D.A.O. (1982 bis) – Itaipu project: geomechanical model safety assesment. In: XIV Congress on Large Dams. Rio de Janeiro. ICOLD/CBGB. Anais...Vol. 1, pág. 1219-1244.

BARROS, F.P., SILVEIRA, J.F.A. & ABRAHÃO, R.A. (1982 tris) – Fundações da barragem principal de Itaipu: projeto e desempenho durante a construção e enchimento parcial. In: VII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações. Olinda/Recife. ABMS. Anais...Vol. 6, pág. 185-205.

BARTORELLI, A. (1983) – Geologia da Bacia do Alto Paraná. In: Simpósio sobre a Geotecnia da Bacia do Alto Paraná. São Paulo, ABGE/ABMS. Anais...Cadastro Geotécnico das Barragens da Bacia do Alto Paraná. Pág. 11-15.

BARTORELLI, A. (1997) – As grandes cachoeiras da Bacia do Paraná e sua relação com alinhamentos tectônicos. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro. 190 páginas.

BARTORELLI, A. (2012) – Contexto geológico e evolução da rede hidrográfica do Brasil. In: Geologia do Brasil. Organiz. HASUI, Y., CARNEIRO, C.D.R., ALMEIDA, F.F.M. & BARTORELLI, A. Pág. 574-610. São Paulo, BECA, 900 páginas.

BETIOLI, I., SCANDIUZZI, L. & SONODA, A. (1981) – Projeto Itaipu – Método de concretagem das chavetas da fundação da barragem principal de Itaipu. In: XIV Seminário Nacional de Grandes Barragens. Recife. CBGB. Vol. II, pág. 87-109.

BETIOLI, I., FIORINI, A.S., ROSSO, J.A., BIANCHI, P.R. & PIASENTIN, C. (1999) – Projeto Itaipu – Aspectos relacionados com a segurança das estruturas e equipamentos. In: XXIII Seminário Nacional de Grandes Barragens. Belo Horizonte. CBGB. Vol. 1, pág. 213-221.

BETIOLI, I., PORTO, E.C., PIASENTIN, C., SILVEIRA, J.F. & SUCHAROV, M. (1999) – Comportamento das estruturas de concreto da usina hidrelétrica de Itaipu após 16 anos de operação. In: XXIII Seminário Nacional de Grandes Barragens. Belo Horizonte. CBGB. Vol. 1, pág. 223-234.

BRUNETTO, E.J. & MURASKI, J.D. (1983) – Editores – Memórias de Sete Quedas. Album não paginado. Fotos de NAKAJIMA, A., SOMENSI, J. & HACHMANN, R. Concórdia, SC. Acervo consultado nos arquivos da Memória da Eletricidade.

CABRERA, J.G. & BARBI, A.L. (1981) – Engineering geology of dam foundations on basalt flows of the Upper Paraná Basin, Brazil. In: ASCE. Recent development in geotechnical engineering for hydro projects: embankment dams instrumentation performance, engineering geology aspects, rock mechanics studies. New York. Pág. 177-191.

CAMARGO, F.P., LEITE, C.A.G., BERTIN NETO, S., MALDONADO, F. & CRUZ, P.T. (1978) – Development of conceptual geomechanical models for foundations of concrete dam: approach applied to three projects. In: International symposium on rock mechanics related to dam foundation. Rio de Janeiro. ISRM/ABMS. Anais... Vol. 1, pág. 11.57-11.78.

CANAMBRA ENGINEERING CONSULTANTS LTD. (1966) – Power Study of South Central Brazil – Part B – São Paulo Group. Julho/1966. 227 páginas.

COMISSÃO INTERESTADUAL DA BACIA PARANÁ-URUGUAI (1963) – Usina Hidrelétrica Paranayara. Acervo da Memória da Eletricidade. 32 páginas.

CORREIA, P.C.F., TAJIMA, R. & FERREIRA, R.C.S. (1990) – Estudos com o arenito Caiuá visando sua utilização na UHE Ilha Grande. In: VI Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia/IX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações. Salvador, 1990. Anais... São Paulo. ABMS/ABGE. Vol. 1, pág. 135-144.

COTRIM, J.R. – Enchimento do reservatório de Itaipu e compatibilização com outros empreendimentos. Coletânea de 23 documentos datados de mar/1978 a abr/1982, totalizando 300 páginas. Rio de Janeiro. Memória da Eletricidade, Registro nº CP.JRC.365.

COTRIM, J.R., KRAUCH, H.W., SZPILMAN, A. & MEDAGLIA, L. (1982) – Instrumentation for evaluating the performance of Itaipu structures and foundations. In: XIV Congresso Internacional da ICOLD, Rio de Janeiro. Anais...Vol. 1, Q-52, R-71, pág. 1195-1217.

COTRIM, J.R. (1999) – Notas sobre os antecedentes da criação de Itaipu Binacional. Centro da Memória da Eletricidade no Brasil. Rio de Janeiro: Memória da Eletricidade. 224 páginas.

CRUZ, P.T. (1996) – 100 barragens brasileiras: casos históricos, materiais de construção, projeto. Oficina de Textos. São Paulo. 647 páginas.

CURTI, D.K. (2011) – Tipologia e origem das fraturas sub-horizontais em basaltos da Formação Serra Geral, Brasil. Dissertação de Mestrado. USP/IG. 131 páginas.

DIJKSTRA, H.H. & ANTUNES SOBRINHO, J. (1981) – Rodoferrovia e hidrovia associados à barragem de Ilha Grande. In: XIV Seminário Nacional de Grandes Barragens, Recife. CBGB. Anais... Vol. 2, pág. 371-393.

FERREIRA, V. (2021) – No aniversário da Itaipu, conheça a expedição que ajudou a definir o local da usina. 4 páginas. <https://www.naoviu.com.br/no-aniversario-da-itaipu-conheca-a-expedicao-que-ajudou-a-definir-o-local-da-usina/>

FIORINI, A.S. (2009) – Paraná river diversion at Itaipu. In: Diversion of large brazilian rivers. CBDB. Rio de Janeiro, pág. 95-117.

GARDIN, C. (2009) – CIBPU – A Comissão Interestadual da Bacia Paraná-Uruguaí no planejamento regional brasileiro (1951-1972). Editora UFGD. Dourados, MS. 244 páginas.

GOMBOSSY, Z.M., BARBI, A.L. & SIQUEIRA, G.H. (1981) – Injeções de cimento na fundação da barragem principal de Itaipu. In: XIV Seminário Nacional de Grandes Barragens. Recife. CBGB. Anais...Vol. 1, pág. 225-245.

GUIDICINI, G. (1982) – Discussão. In: XIV Congresso Internacional de Grandes Barragens, Rio de Janeiro. Anais... CIGB/ICOLD, vol. V, pág. 307-310, 1984.

ITAIPU BINACIONAL (1979) – Fechamento da barragem e enchimento do reservatório – Manutenção da vazão a jusante (20/04/1979). Texto datilografado. 6 páginas. Arquivos da Memória da Eletricidade.

ITAIPU BINACIONAL (1980) – Resumo do Projeto Itaipu.

ITAIPU BINACIONAL (1982) – Problemas relacionados com a fundação dos blocos mais altos da barragem de Itaipu. Relatório interno. Inédito. 191 páginas.

ITAIPU BINACIONAL (1994) – Itaipu Hydroelectric Project. Engineering Features. Curitiba, PR. Coord. COTRIM, J.R.

ITAIPU BINACIONAL (2000) – Itaipu Hydroelectric Development – The project of the century. Asesoria de Comunicación Social. Dirección General Paraguai. 87 páginas.

ITAIPU BINACIONAL (2017) – Usina Hidrelétrica de Itaipu – Principais características técnicas. 17 páginas. www.itaipu.gov.br

ITAIPU BINACIONAL (2023) – Dois países, um acordo: 50 anos do Tratado de Itaipu. Youtube – https://www.youtube.com/watch?v=4_SCd2aavB4

JOHNSON, M.A.M.P. (2021) – Temples of modern pharaohs: an environmental history of dams and dictatorship in Brazil, 1960s-1990s. Tese de Doutorado. Georgetown University, Washington D.C. 476 páginas.

KOMESU, I., CUNHA, O.L., REPSOLD, C.F., NAHAS, C.M. & LUZ, P.A.C. (1987) – A economia obtida no projeto da barragem e enseada de Ilha Grande, a partir da execução de aterro e escavação experimentais. In: XVII Seminário Nacional de Grandes Barragens. Brasília. Anais... São Paulo, CBGB. Vol. 1, pág. 710-735.

LIRA, F. (1980) – Considerações a respeito da usina hidrelétrica Ilha Grande. Memória da Eletricidade. 5 páginas.

LONG, J.S & VINCI, A. (1974) – The Rio Paraná Project – A progress report and discussion of Engineering Geology aspects for this 10.000 MW hydroelectric project. One of the world's largest. In: II Congresso Internacional de Geologia de Engenharia. São Paulo. IAEG/ABGE. Anais ...Vol. 2, Trabalho VI-2.1. 8 páginas.

LUZ, P.A.C. (2017) – Maestria em fazer a junção dos fundamentos teóricos com os aspectos práticos de Engenharia. In: Geologia de Engenharia e Mecânica das Rochas no Brasil: a contribuição de Murillo Dondici Ruiz. ABGE, São Paulo. Pág. 392-405.

MAGGI, L.B. (2015) – Itaipu e a formação do território do capital. Revista NERA, Ano 18, nº 27, pág. 53-63 (jan-jun/2015).

MARQUES, L.S. & ERNESTO, M. (2004) – O magmatismo toleítico da Bacia do Paraná. In: MANTESSO NETO, V., BARTORELLI, A., CARNEIRO, C.D.R. & NEVES, B.B. (Editores). 2004. Geologia do Continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. Beca, São Paulo. Pág. 245-263.

MEMÓRIA DA ELETRICIDADE – Numerosos documentos referentes a todas as etapas relatadas no texto, na forma de livros, anotações, cartas, relatórios, depoimentos, fotografias, esboços e desenhos.

MEMÓRIA RONDONENSE (2018) – Sete Quedas – Filme de 1936. <https://www.memoriarondonense.com.br/atualidades-single/sete-quedas-filme-de-1936/40/>

MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA (1962) – Relatório preliminar sobre o aproveitamento do Salto de Sete Quedas (Guaira) – Rio Paraná. Escritório Técnico OMF. Rio de Janeiro. Dez/1962. 99 páginas.

MORAES, J., VILLALBA, J.R., BARBI, A.L. & PIASENTIN, C. (1982) – Subsurface treatment of seams and fractures in foundation of Itaipu Dam. In: XIV International Congress on Large Dams. Rio de Janeiro. ICOLD/CBGB. Anais...Vol. 2, pág. 179-198.

OLIVEIRA, P.C. (2012) – Caracterização geológico-geotécnica de diferentes litotipos basálticos: basalto denso, basalto vesículo-amigdaloidal e brecha basáltica. Dissertação de Mestrado. EGSC/USP. São Carlos. 160 páginas.

PAROLIN, M., VOLKMER-RIBEIRO, C. & LEANDRINI, J.A. (Organizadores) (2010) – Abordagem ambiental interdisciplinar em bacias hidrográficas no Estado do Paraná. Editora Fecilcam. Campo Mourão, PR. 170 páginas.

PATIAS, J., FERNANDES, D.O. & YAMAMOTO, J.K. (2017) – Modelagem geológica e geotécnica da fundação integrada com dados piezométricos. In: XXXI Seminário Nacional de Grandes Barragens, Belo Horizonte. CBDB. Anais...T.4, A-20. 20 páginas.

PIASENTIN, C. (1992) – Auscultação e comportamento da fundação da barragem de Itaipu. In: Simpósio de Instrumentação Geotécnica em Barragens. Rio de Janeiro. CBGB. Revista do CBGB, Publicação 01/96, pág. 71-96.

PINHEIRO, C.R. (2017) – Desvio do Rio Paraná, na Usina Hidrelétrica de Itaipu. In: Geologia de Engenharia e Mecânica das Rochas no Brasil: a contribuição de Murillo Dondici Ruiz. ABGE. São Paulo. Pág. 221-237.

SCHWAB, P.R. & PEDRONI, R.M. (1987) – Usina Hidrelétrica Ilha Grande – Um aproveitamento de usos múltiplos. In: XVII Seminário Nacional de Grandes Barragens, Brasília. CBGB. Anais...Vol. 1, pág. 310-327.

SEFART, L.A., SZPILMAN, A. & PIASENTIN, C. (1985) – Itaipu structures evaluation of their performance. In: XV Congresso Internacional de Grandes Barragens. Lausanne. ICOLD. Anais ... Vol. 1, pág. 287-317.

SEM AUTOR (1981) – Usina hidrelétrica Ilha Grande. Construção Pesada, São Paulo. Vol. 10, n. 127, pág. 74-88.

SIGNER, S. (Coordenação) – Cadastro geotécnico das barragens da Bacia do Alto Paraná. In: Simpósio sobre a Geotecnia da Bacia do Alto Paraná. São Paulo. 1983. Anais...ABGE/ABMS/CBMR. 755 páginas.

SILVA, A.M.F., OLIVEIRA, L.K., ROSÁRIO, N.C. & JORDAN, S.S. (2019) – Geopolítica de Itaipu: Da ameaça de Guerra entre Brasil e Paraguai (1965-1966) ao Processo de Cooperação e Integração Energética Regional. In: XVII Congresso Internacional FoMercó, Foz do Iguaçu. Set/2019. 19 páginas.

SIQUEIRA, G.H., BARBI, A.L. & GOMBOSSY, Z.M. (1981) – Injeções profundas da Usina de Itaipu: equipamentos e produção. In: XIV Seminário Nacional de Grandes Barragens. Recife. CBGB. Anais...Vol. 1, pág. 187-205.

SÓRIA, M.A.Z. (2012) – Usina de Itaipu: integração energética entre Brasil e Paraguai. Curitiba. Ed. Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 252 páginas.

SUCHAROV, M. & FIORINI, A.S. (2002) – Itaipu spillway. In: Large brazilian spillways. CBDB. Rio de Janeiro. Pag. 65-77.

SZPILMAN, A., ROSSO, J.A. & PIASENTIN, C. (1983) – Itaipu: auscultação e inspeção das estruturas e fundações durante o enchimento parcial e total do reservatório. In: XV Seminário Nacional de Grandes Barragens. Rio de Janeiro. CBGB. Anais ... Vol. 1, pág. 311-337.

SZPILMAN, A. & PIASENTIN, C. (1989) – A concepção da barragem principal de Itaipu e seleção do tipo de barragem. In: XVIII Seminário Nacional de Grandes Barragens, Foz do Iguaçu. CBGB. Anais ... Vol. 3, pág. 1205-1228.

SZPILMAN, A., ROSSO, J.A., PIASENTIN, C. & FIORINI, A.S. (1991) – Vertedouro de Itaipu e região a jusante do trampolim: comportamento hidráulico e estrutural após oito anos de operação. In: XIX Seminário Nacional de Grandes Barragens. Aracaju. CBGB. Anais ... Vol. 2, pág. 239-254.

TORALES, M.A., VILLALÓN, A.O.A., CARVALHO, J.C., ROSSO, J.A., FIORINI, A.S. & PIASENTIN, C. (1996) – Revisão e medição dos recalques da crosta terrestre ao longo da crista da barragem provocados pelo reservatório de Itaipu. In: VIII Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental. Rio de Janeiro. ABGE. Anais. Pág. 681-690.

URIARTE, J., CARIC, D.M., NIMIR, W.A., EIGENHEER, L.P.Q.T. & NITTA, T. (1982) – Itaipu main dam: geological and geotechnical features affecting the design. In: XIV Congress on Large Dams. Rio de Janeiro. ICOLD/CBGB. Vol. 2, pág. 219-240.

VARGAS, M. & BARROS, F.P. (1983) – História das obras na Bacia do Alto Paraná. In: Simpósio sobre a Geotecnia da Bacia do Alto Paraná. São Paulo. ABGE/ABMS. Anais...Vol. 1A, pág. 59-78.

VILLALON, O., FIORINI, A.S., PORTO, E.C. & PIASENTIN, C. (1999) – Levantamentos geodésicos da barragem de Itaipu. In: XXIII Seminário Nacional de Grandes Barragens. Belo Horizonte. CBGB. Anais...Vol. 1, pág. 247-258.

YACUBIAN, P.H. (2007) – A Questão da Serra do Maracaju. <https://pt.scribd.com/document/48242721/Brasil-Paraguai-Serra-do-Maracaju#>. 6 páginas.

ZADJ, L. (1963) – Sete Quedas abre novas perspectivas para a economia brasileira. Revista Brasileira de Energia Elétrica, nº 2, set/out/1963. Memória da Eletricidade, Reg. Nº CP.JRC.211. 14 páginas.

SÓCIOS PATROCINADORES DA ABGE



SEJA SÓCIO DA ABGE ASSOCIADOS INDIVIDUAIS



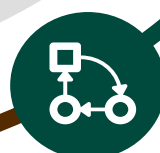
TÍTULAR



ESTUDANTE



AFILIADO



SÊNIOR E MASTER

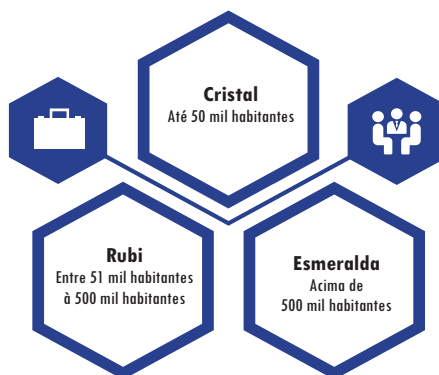
SÓCIOS

PATROCINADORES
EMPRESAS E ENTIDADES



SÓCIOS

PATROCINADORES COLETIVOS
PREFEITURAS



Vantagens do Sócio ABGE

- Recebe grátis todas as publicações editadas pela entidade durante o período de filiação;
- Recebe informações técnicas e acadêmicas/participa de network;
- Desconto em cursos e eventos promovidos pela ABGE e entidades parceiras.

A melhor relação entre custo e benefício de entidades tecnocientíficas.

Previsão de distribuição de seis publicações no ano.

Consulte os valores de nossa anuidade.

www.abge.org.br/associe-se



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE
GEOLOGIA DE ENGENHARIA
E AMBIENTAL

DE SETE QUEDAS A ITAIPU

O período histórico envolvendo a evolução das ideias a respeito do aproveitamento hidroenergético do potencial das Sete Quedas, até culminar no projeto e realização da Usina Hidrelétrica de Itaipu, teve a duração aproximada de sete décadas e teve início quando a Câmara dos Deputados, em outubro de 1908, fez uma primeira referência ao aproveitamento da energia hidráulica dos saltos, evoluindo até chegar ao começo das obras civis, em maio de 1975 e à finalização da construção e fechamento das comportas em outubro de 1982.

Ao longo desse período de tempo, registrou-se uma intensa sequência de ideias e projetos, desde a percepção de que o aproveitamento não poderia ser realizado nas imediações das quedas, devido a afogamento do canyon a jusante, por ocasião dos períodos de cheia, passando pela concepção de um aproveitamento por derivação das vazões em canal ao longo da margem esquerda do rio Paraná, até culminar na identificação e confirmação de Itaipu como local mais apropriado à implantação de um só empreendimento de caráter binacional.

No texto buscou-se retratar, o mais fielmente possível, as características dos sucessivos empreendimentos concebidos ao longo do tempo, em cada caso buscando-se colocar em evidência os aspectos geológicos dos sítios envolvidos, com destaque à evolução das técnicas de investigação que ocorreu a partir dos anos 60, com o forte desenvolvimento da Geotecnia no País.

PATROCINADORES:



REALIZADORES:



ISBN: 978-85-68463-46-7

