

UHE Itaipu: 40 anos — um resgate da história

ÉTORE FUNCHAL DE FARIA - ENG. - ORCID <https://orcid.org/0000-0002-0864-5423> (etore@itaipu.gov.br);

FÁBIO LUIZ WILLRICH - ENG. - ORCID <https://orcid.org/0000-0003-0215-6044>

MAURICIO KAZUTO ICHIKAWA - TÉC. DE OBRAS | DIVISÃO DE OBRAS CIVIS, SUPERINTENDÊNCIA DE OBRAS, ITAIPU BINACIONAL

RESUMO

ITAIPU FOI CONSTRUÍDA DENTRO DE UM CONTEXTO DIPLOMÁTICO E SE TORNOU UMA REFERÊNCIA PARA ENGENHARIA DE FORMA GERAL. A OBRA ATUALMENTE AINDA CAUSA IMPACTOS PELAS DIMENSÕES DAS SUAS ESTRUTURAS AOS VISITANTES. EM FUNÇÃO DOS GRANDES VOLUMES DE MATERIAIS NECESSÁRIOS PARA A SUA CONSTRUÇÃO, UMA AMPLA INVESTIGAÇÃO FOI FEITA SENDO NECESSÁRIO O APROVEITAMENTO MÁXIMO DOS MATERIAIS DA ESCAVAÇÃO REALIZADA NO LEITO DO RIO. NESTE TRABALHO, OS AUTORES APRESENTARAM UM RESGATE DA HISTÓRIA POLÍTICA E DO PROJETO E EXECUÇÃO DAS PARTES CONSTRUÍDAS DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO. É IMPORTANTE REGISTRAR QUE EM UM ARTIGO NÃO É POSSÍVEL ABRANGER TODA A HISTÓRIA DE ITAIPU.

PALAVRAS-CHAVE: ITAIPU, BARRAGEM, CONCRETO, GRAVIDADE ALIVIADA, CONTRAFORTE.

1. INTRODUÇÃO

A obra da Usina Hidrelétrica de Itaipu é notadamente uma referência da engenharia. Mas foi preciso uma engenharia política, diplomática e jurídica para viabilizar essa maravilha do mundo moderno. Itaipu permitiu resolver uma disputa de fronteiras entre Brasil e Paraguai, de forma pacífica e inteligente, integrando os dois países e gerando energia para os seus desenvolvimentos. As negociações diplomáticas foram consolidadas pela Ata do Guaçu, em 22 de junho de 1966. Na sequência, foi criada a Comissão

Mista Técnica Brasileira-Paraguai (1967) e conduzida a contratação do Consórcio de Consultores Internacionais para investigação do local da Obra (1970), que apresentaram o relatório sobre alternativas de locais para a obra e seus arranjos (1972). Em 26 de abril de 1973, foi assinado o Tratado de Itaipu e a entidade binacional foi constituída formalmente em 17 de maio de 1974, com base legal no Direito Internacional, na forma de condomínio, onde Brasil e Paraguai participam em partes iguais no capital do consórcio formado, na época, por ELETROBRÁS e ANDE. (ITAIPU, 2009). A ENBPar - Empresa Brasileira de Participações em Energia Nuclear e Binacional S.A., criada em 2021 (BRASIL, 2021), assumiu a parte da ELETROBRÁS, que foi desestatizada em junho de 2022.

A construção da Itaipu foi iniciada em 2 de maio de 1975. Em 20 de outubro de 1978, 58 toneladas de dinamite explodem as duas ensecadeiras que protegiam a construção do desvio do rio Paraná, alterando o curso do rio para permitir a continuidade da construção, incluindo a Barra-

gem Principal e a Casa de Força. As obras civis foram concluídas em outubro de 1982, quando foram fechadas as comportas do canal de desvio para permitir o enchimento do reservatório, que ocorreu em apenas 14 dias (eram previstos 90 dias). Em 5 de novembro de 1982, as 14 comportas do vertedouro liberaram o excedente da água represada e, assim, inauguram oficialmente a maior hidrelétrica do mundo, após mais de 50 mil horas de trabalho.

Neste artigo, além desse breve histórico, tem-se o objetivo de resgatar o histórico da execução das obras de concreto de uma obra com volumes e quantidades de ensaios fora do comum na engenharia. A fonte mais utilizada neste trabalho foi o chamado Livro Técnico de ITAIPU (ITAIPU, 2009). Outras fontes também foram consultadas no acervo do arquivo técnico da Empresa, assim como em outras publicações.

2. O PROJETO DE ITAIPU - ESTRUTURAS DE CONCRETO

O arranjo geral do projeto de Itaipu compreende diversos tipos de estruturas de concreto (Figura 1). A Barragem Lateral Direita - BLD e as Barragens de Ligação (Trechos E e I) são estruturas em contrafortes, a Barragem Principal (Trecho F) é uma barragem de gravidade aliviada e a Estrutura de Desvio (Trecho H) é uma estrutura de gravidade maciça. O vertedouro não será objeto deste artigo.



FIGURA 1
ARRANJO GERAL DA UHE ITAIPU

FONTE: ACERVO PESSOAL (ADAPTADO DE IMAGEM DO GOOGLE EARTH)

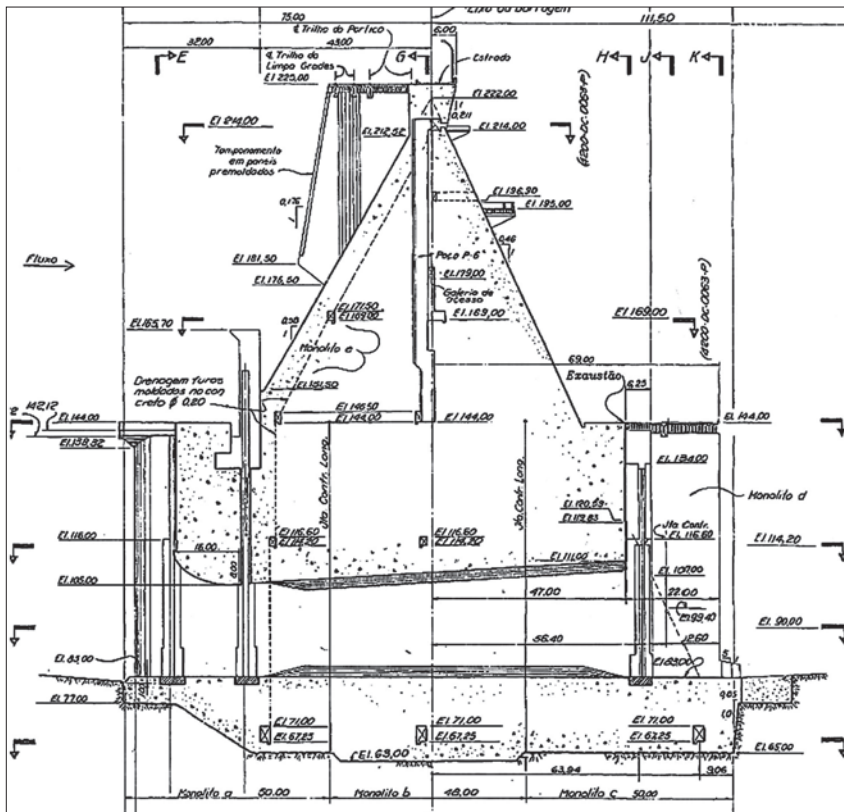


FIGURA 2
GEOMETRIA DA ESTRUTURA DE DESVIO, EM GRAVIDADE MACIÇA
 FONTE: ARQUIVO TÉCNICO DE ITAIPU

A estrutura de concreto da barragem no canal de desvio tem a geometria da Figura 2. É uma barragem de gravidade maciça, com altura máxima de 162 m. O concreto massa principal especificado deveria ter uma resistência mínima à compressão de 140 kg/cm² aos 365 dias, com agregado graúdo de 152 mm (classe A-140-f, conforme indicado na Figura 6). Análises de tensão e estabilidade foram efetuadas pelos métodos convencionais. Foram realizadas análises pelo método dos elementos finitos para a porção que continha as adufas. Um modelo estrutural da estrutura de desvio (Figura 3) foi testado no IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo). O modelo, chamado modelo 2, fazia parte de uma série de testes que incluíam modelos similares para os blocos da barragem de gravidade aliviada.

A estrutura da Barragem Principal, em gravidade aliviada, tem a geometria da Figura 4. Segundo ITAIPU (2009), há dois subtipos de barragens de gravidade

aliviada: no primeiro, uma grande abertura ou cavidade longitudinal é formada dentro de uma barragem de gravidade maciça convencional; o segundo consiste em diversas variações na barragem de contrafortes. O formato celular da barragem de gravidade aliviada de contraforte duplo com uma estrutura superior monolítica foi o mais conveniente e econômico para o alinhamento transversal da tomada d'água e dos blocos da casa de força.

Foram requeridos estudos não

apenas por métodos convencionais, mas também por Método dos Elementos Finitos (MEF) e por ensaios em modelo estrutural. Além disso, foram feitos estudos comparativos do projeto e do desempenho com outras barragens existentes do mesmo tipo.

As geometrias das barragens de contraforte (Figura 5) visaram manter a continuidade visual da barragem de gravidade aliviada. Num bloco típico da barragem de contrafortes, foi especificado o concreto de 210 kg/cm² aos 365 dias, com agregado de 76 mm, para os primeiros 5 m acima das fundações, com aumento nas camadas de 50 cm até 2,5 m de altura. Acima disto, foi usado concreto de 180 kg/cm² aos 365 dias, com agregado de 76 mm nas cabeças e de 140 kg/cm² aos 365 dias, com agregado de 152 mm, para as almas e a altura padrão da camada foi de 2,5 m.

3. A OBRA DE ITAIPU - CONCRETO MASSA E CONCRETO ARMADO

A Tabela 1 apresenta as quantidades principais registradas para as produções de concreto e para a execução da obra. Além do volume total de concreto, houve recordes de produção de 14.940,5 m³ (diária, em 23/11/1979), de 338.415,0 m³ (mensal, em 11/1979) e de 3.055.725,5 m³ (em 1980).

Os cimentos usados para o concreto eram equivalentes ao tipo II da ASTM. Eles eram adquiridos de quatro fabricantes

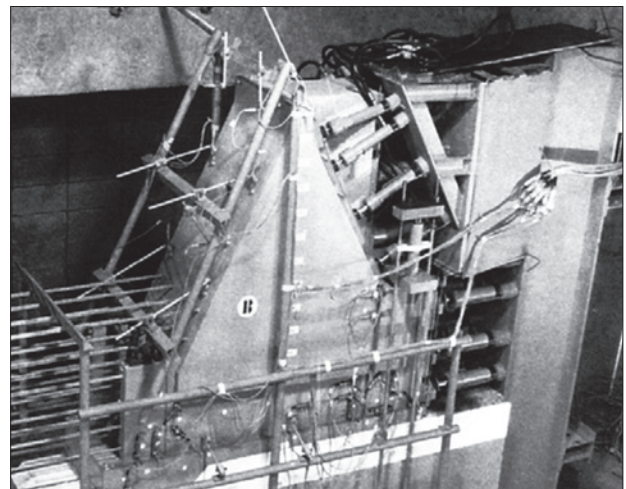


FIGURA 3
MODELO DA ESTRUTURA DE DESVIO
 FONTE: ITAIPU (2009)

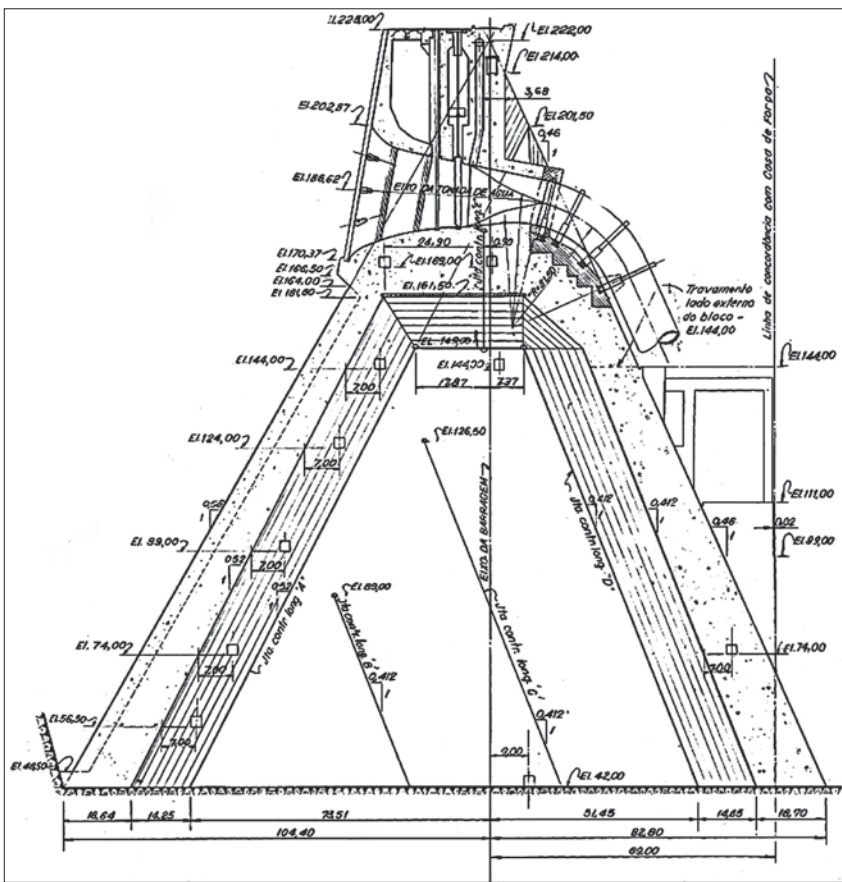


FIGURA 4
GEOMETRIA DA BARRAGEM PRINCIPAL, EM GRAVIDADE ALIVIADA
 FONTE: ARQUIVO TÉCNICO DE ITAIPU

diferentes: Itambé, Santa Rita e Votoran no Brasil e Vallemi no Paraguai. A cinza volante era adquirida das usinas termelétricas de Candiota e Tubarão no Brasil. As propriedades mais importantes do cimen-

to e da cinza volante especificadas estão apresentadas nas Tabelas 2 e 3.

As características físicas principais dos cimentos e das cinzas volantes utilizados são apresentadas na Tabela 4. Foram consumidos aproximadamente 2,5 milhões de toneladas de cimento forneci-

dos por 9 fábricas localizadas nos estados do Paraná, São Paulo, Minas Gerais, Goiás e de Puerto Vallemi, no Paraguai. O transporte era feito em carretas-silos (chamadas de cebolão), com capacidade igual a 30 t. O consumo de pico foi de 70 carretas/dia. O consumo de cinza volante, quase 300.000 toneladas, foi fornecida em carretas-contêiner de 30t, pela Usina Termelétrica Candiota - Candiota/SC, e pela Usina Termelétrica Jorge Lacerda - Tubarão/SC.

O alto consumo de areia exigido para a execução dos filtros das barragens de terra e para a produção de concreto levou a investigações numa extensão de 165 km no leito do rio Paraná, a jusante, a partir do local de implantação de Itaipu. Grandes depósitos de cascalho natural não foram encontrados nas proximidades de Itaipu. Agregados britados a partir de basalto são e denso foram estudados para o uso no concreto. As areias artificiais eram fisicamente satisfatórias, mas eram muito finas e uniformes e, por isso, foi necessário melhorar a granulometria do agregado miúdo, adicionando-se areia natural. A proporção foi de 70% de areia artificial e 30% de areia natural fina de origem aluvial proveniente dos depósitos ao longo do rio Paraná, em peso. A Companhia de Cimento Votoran Rio Branco (Rio Branco do Sul/PR) foi a que mais forneceu cimento para Itaipu (em torno de 50%).

O agregado graúdo também foi obtido pela britagem do basalto são e os tamanhos máximos dos agregados (TMA) utilizados foram: 19 mm, 38 mm,

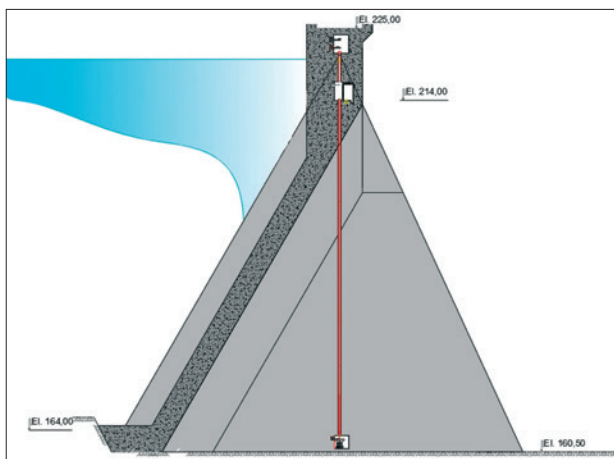


FIGURA 5
GEOMETRIA DAS BARRAGENS DE CONTRAFORTE
 FONTE: ARQUIVO TÉCNICO DE ITAIPU

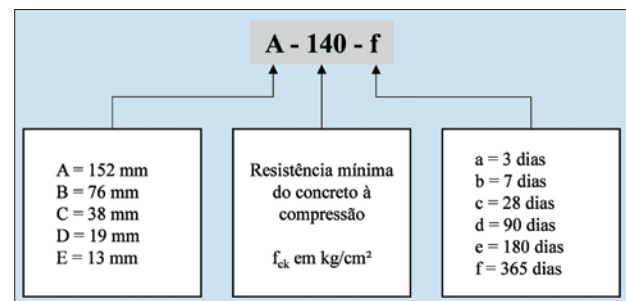


FIGURA 6
ESPECIFICAÇÕES DOS TIPOS DE CONCRETO
 FONTE: ITAIPU (2009)

TABELA 1

QUANTIDADES PRINCIPAIS

Material	Quantidade final
Concreto	12.750.000 m ³
Aço	481.074 t
Escavação comum	23.600.000 m ³
Escavação em rocha	32.000.000 m ³
Enrocamento	15.000.000 m ³
Argila, agregados, etc.	16.700.000 m ³

76 mm e 152 mm. Os consumos desses materiais estão indicados na Tabela 5.

Os testes especificados para o controle da qualidade física do agregado britado eram: densidade, absorção, abrasão Los Angeles, envelhecimento natural e artificial (ciclos de saturação e secagem), ciclos de etileno de glicol, sanidade ao ataque do sulfato de sódio e reatividade álcali-agregado. Foi dada uma atenção especial à reatividade potencial álcali-agregado. Ela foi verificada não apenas por testes químicos, mas também pelo teste de expansão das barras de argamassa (ASTM C-227).

Os aditivos utilizados e seus consumos estão na Tabela 6. Otto Baumgart, Sika Aer S.A. e MBT Brasil foram as empresas fornecedoras dos aditivos.

Os concretos receberam nomenclaturas conforme mostra a Figura 6. As resistências à compressão utilizadas foram 100, 140, 180, 210, 240 e 280 kg/cm². A Tabela 7 apresenta os concretos utilizados nas obras de Itaipu.

Um programa abrangente de ensaios de laboratório para a determinação das diversas propriedades do concreto foi iniciado antes do começo do lançamento do concreto e continuou em paralelo com a construção: resistência à compressão, módulo de elasticidade, calor de hidratação, calor específico, difusividade térmica, expansão térmica, resistência à tração, deformação última de tração, fluência e relaxamento e variação autógena de volume. (ITAIPU, 2009)

Grandes volumes de concreto lançados exigem o controle de temperatura durante a pega para evitar fissuração. Em Itaipu, as camadas de concreto são

de 2,5 m e a temperatura de lançamento do concreto prescrita foi de 7 °C. Para chegar nesta temperatura, a pré-refrigeração teve vantagens decisivas do ponto de vista técnico-econômico e de programação sobre o método de pós-refrigeração com tubulações embutidas. (ITAIPU, 2009). Perto da fundação,

as camadas foram reduzidas para 1,25 m. A água consumida nos concretos “gelados” foi em média 170 kg/m³, sendo 80% em gelo e 20% *in natura*.

Na Casa de Força, nas barragens de contraforte, e em outras partes da estrutura, foram utilizadas, ainda, aproximadamente 480.000 t de aço.

TABELA 2

PRINCIPAIS PROPRIEDADES ESPECIFICADAS DO CIMENTO

Propriedade	
Superfície específica, Blaine mínima	3200 cm ² /g
Material retido na peneira nº 200, máximo	15%
Tempo de pega inicial, mínimo	60 min
Tempo de pega final, máximo	10 horas
Expansão em autoclave, máximo	0,8 %
Calor de hidratação aos 7 dias, máximo	314 kJ/kg
Calor de hidratação aos 28 dias, máximo	356 kJ/kg
Resistência à compressão aos 3 dias, mínimo	0,8 kN/cm ²
Resistência à compressão aos 7 dias, mínimo	1,5 kN/cm ²
Resistência à compressão aos 28 dias, mínimo	2,5 kN/cm ²
MgO máximo	6,5 %
SO ₃ máximo	3%
Equivalente alcalino (Na ₂ O) máximo	0,6 %
C ₃ S máximo	35%
C ₃ A máximo	8%

FONTE: ITAIPU, 2009

TABELA 3

PRINCIPAIS PROPRIEDADES ESPECIFICADAS DA CINZA VOLANTE

Propriedade	
Superfície específica, Blaine mínima	3500 cm ² /g
Material retido na peneira nº 325, máximo	34%
Expansão ou retração em autoclave, máximo	0,8 %
Calor de hidratação aos 7 dias, máximo	314 kJ/kg
Calor de hidratação aos 28 dias, máximo	356 kJ/kg
Resistência à compressão aos 3 dias, mínimo	0,8 kN/cm ²
Resistência à compressão aos 7 dias, mínimo	1,5 kN/cm ²
Resistência à compressão aos 28 dias, mínimo	2,5 kN/cm ²
MgO máximo	6,5 %
SO ₃ máximo	3%
Equivalente alcalino (Na ₂ O) máximo	0,6 %
C ₃ S máximo	35%
C ₃ A máximo	8%
Índice de atividade pozzolânica	
Água requerida, máximo	105%
Com cimento aos 28 dias, mínimo	75%
Com cal aos 7 dias, mínimo	560 N/cm ²

FONTE: ITAIPU, 2009

TABELA 4

PRINCIPAIS PROPRIEDADES DOS CIMENTOS E DAS CINZAS VOLANTES UTILIZADOS

Propriedades	Material					
	Cimento				Cinza volante	
	Votoran	Itambé	Vallemi	Santa Rita	Candiota	Tubarão
Finura Blaine (cm ² /g)	3368	3259	3417	3586	3190	2830
Peneira 200 (%)	6,2	2,4	13,8	13,2	—	—
Peneira 325 (%)	13,3	6,4	18,6	19,4	27,1	41,2
Expansão em autoclave (%)	0,09	0,02	0,03	0,08	—	—
Equivalente alcalino (Na ₂ O)	0,5	0,47	0,54	0,69	—	—
Cal livre (%)	1,04	0,81	1,39	0,7	—	—
C3S (%)	46,7	57,5	52,1	49,5	—	—
C3A (%)	6,7	6,6	6,2	8,7	—	—
Redução da expansão (%)	—	—	—	—	64,3	68,9
Reação à cal (kg/cm ²)	—	—	—	—	36	31

FONTE: ITAIPU, 2009

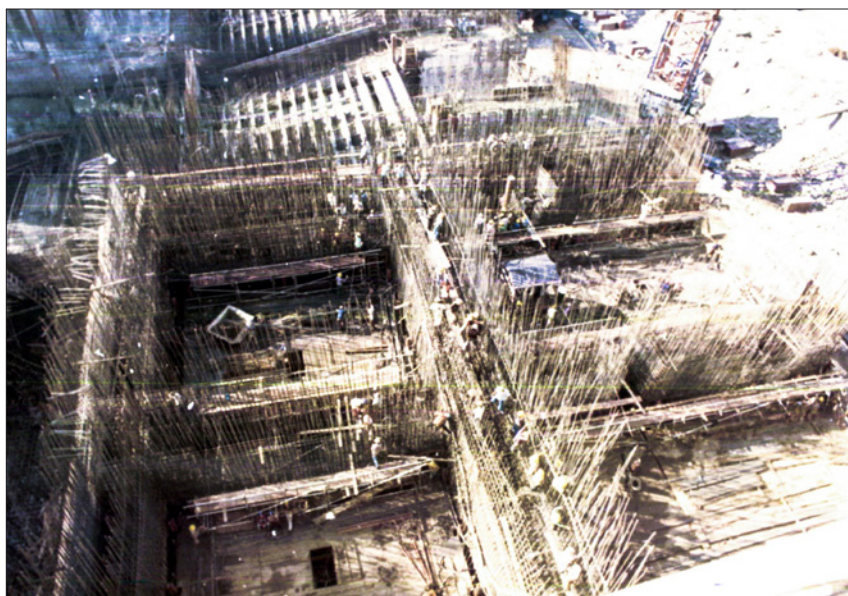


FIGURA 7

VISÃO GERAL DOS MÓDULOS E DESLIZANTES, ONDE SE OBSERVA TAMBÉM A ARMADURA DO BLOCO

FONTE: FUKUROZAKI ET AL. (1981)

3.1 Formas deslizantes

Em Itaipu, as formas deslizantes foram usadas para concreto massa com agregados graúdos a uma temperatura de lançamento de 7 °C, como também em condições relativamente desfavoráveis de temperatura e umidade relativa. Por exemplo, nos pilares maciços das adufas da estrutura de desvio, para minimizar os problemas de estabilidade, foi usado concreto com agregado de 76 mm e abatimento de 2 cm e aditivo redutor do teor de água. Esse concreto, lançado a 7 °C, possuía uma boa trabalhabilidade e consistência e muito pouca exsudação. O concreto era lançado nas formas deslizantes em camadas quase horizontais de 30 cm e adensado por vibradores de imersão. Tomava-se o máximo cuidado para garantir que os vibradores não tocassem as fôrmas para não “danificar” o concreto fresco. A velocidade das formas variava de acordo com a dimensão e a complexidade da estrutura. As velocidades efetivas máximas e mínimas realizadas em Itaipu foram 6,97 e

TABELA 5

CONSUMOS DE AREIA E BRITA NOS CONCRETOS

Substrato	Revestimento com argamassa cimentícia
Tipo de agregado	Consumo
Areia natural	≅ 3.250.000 t (≅ 2.200.000 m ³)
Areia artificial	≅ 5.810.000 t (≅ 3.600.000 m ³)
Brita 1 (19 mm)	≅ 7.760.000 t (≅ 4.880.000 m ³)
Brita 2 (38 mm)	≅ 4.600.000 t (≅ 3.100.000 m ³)
Brita 3 (76 mm)	≅ 3.580.000 t (≅ 2.470.000 m ³)
Brita 4 (152 mm)	≅ 2.820.000 t (≅ 2.015.000 m ³)

TABELA 6

CONSUMOS DE ADITIVOS PARA CONCRETO, EM %

Tipo de aditivo	Consumo
Incorporador de ar	0,05 a 0,15
Plastificante	0,20 a 0,30
Plastificante redutor de água	0,20 a 0,30
Super plastificante	0,20 a 3,00
Fluidificante	0,20 a 3,00
Super fluidificante	0,20 a 3,00
Retardador de pega	0,20 a 0,40

TABELA 7

TIPOS DE CONCRETO E APLICAÇÃO

2,53 m/dia. Tomou-se um cuidado especial no controle das ondulações e rugosidades das lajes acabadas nas superfícies hidráulicas expostas a elevadas velocidades da água como, por exemplo, nas calhas do vertedouro que podem estar sujeitas a velocidades máximas de escoamento de 37 m/s. O uso de gabarito de nivelamento de aço, de 6 t de peso, que se deslocava sobre guias metálicas, resultou numa superfície hidráulica praticamente isenta de irregularidades.

Segundo FUKUROZAKI et al. (1981), a experiência obtida durante a construção dos pilares da estrutura de desvio foi aproveitada para a construção das paredes e contrafortes das estruturas da casa de força, cuja geometria é bastante complexa e de grandes dimensões. Os autores concluíram ainda que a aplicabilidade do processo em estruturas com grandes dimensões, de geometria vazada e contorno recortado, sem comprometimento dos requisitos técnicos de qualidade e prazos executivos, foi evidenciado. A Figura 7 mostra uma particularidade da aplicação de formas deslizantes independentes devido à impossibilidade de utilização das cangas para o travamento das formas moldantes paralelas.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi possível apresentar uma parte de todo o histórico de uma engenharia brilhante desenvolvida em parceria por 2 países, Brasil e Paraguai. As informações trazidas são limitadas, pois Itaipu abrangeu uma quantidade extremamente grande de documentos de projeto e de ações executivas que podem ser consideradas como um curso completo de engenharia na prática. Os autores se

limitaram a abordar os aspectos principais das estruturas construídas em concreto massa e em concreto armado, mostrando etapas construtivas e como foi feito o controle de qualidade dos materiais e dessas estruturas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à ITAIPU Binacional pela disponibilidade de informações e pelo incentivo à publicação de estudos e artigos desenvolvidos com as experiências vividas com a construção da sua hidrelétrica. ☺

Tipo de concreto	Utilização típica	Tamanho máximo do agregado (mm)	Máxima relação água:cimento e concreto cinza volante	
			Concreto com ar	Concreto sem ar
A-100-f	Concreto não estrutural de enchimento	152	0,75	0,85
A-140-f	Concreto massa para barragens	152	0,65	0,80
A-180-f	Concreto massa para barragens	152	0,55	0,75
A-210-f	Concreto massa para barragens	152	0,43	0,70
A-240-f	Concreto massa para barragens	152	0,42	0,68
A-280-f	Concreto massa para barragens	152	0,40	0,65
B-140-f	Concreto massa nas camadas próximas da fundação	76	0,64	0,70
B-180-f	Concreto massa, barragens e muros maciços	76	0,55	0,68
B-210-f	Concreto massa e estrutural para muros maciços	76	0,50	0,65
B-240-f	Idem como acima	76	0,45	0,70
B-280-f	Concreto massa, próximo da face de montante da barragem, pilares da estrutura de desvio	76	0,40	0,65
C-140-c	Concreto estrutural, estruturas esbeltas	38	0,55	0,65
C-180-c	Idem	38	0,47	0,60
C-210-c	Concreto estrutural ou exposto a altas velocidades de água	38	0,48	0,55
C-280-c	Idem	38	0,40	0,58
C-350-c	Idem	38	0,35	0,50
D-100-f	Concreto poroso	19	0,85	
D-210-c	Concreto para estruturas finas e <i>blockouts</i>	19	0,45	0,55
D-280-c	Concreto para vigas e lajes pré-moldadas	19	0,40	0,52
D-350-c	Concreto para vigas e lajes pré-moldadas e protendidas	19	0,35	0,50
E-210-c	Concreto projetado (<i>Gunite</i>)	13	0,50	0,65

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ANDRIOLO, F.R., BETIOLI, I. Obras de Concreto de Itaipu – Desenvolvimento, controle, qualidade, durabilidade... 40 anos depois. Disponível em: https://www.itaipu.gov.br/sites/default/files/publicacoes/livro_obras_de_concreto_itaipu/web/index.html. Acesso em: 19 jan. 2023. ISBN: 978-85-60064-61-8.
- [2] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM C-227. Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Cement-Aggregate Combinations (Mortar-Bar Method), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003, DOI: 10.1520/C0227-03.
- [3] BRASIL. Decreto nº 10.791, de 10 de setembro de 2021. Cria a Empresa Brasileira de Participações em Energia Nuclear e Binacional S.A. Brasília, DF: Presidência da República. Disponível em <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/decreto-n-10.791-de-10-de-setembro-de-2021-344145312>. Acesso em: 19 jan. 2023.
- [4] FUKUROZAKI, Y., SILVA, R.R., BETIOLI, I., SONODA, A. Utilização de formas deslizantes na execução da Casa-de-Força da Hidroelétrica de Itaipu. In: XIV SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 1981, Recife. Anais do evento. Re: CBDB, 1981, 1230 p.
- [5] ITAIPU Binacional. Itaipu: usina hidrelétrica – projeto: aspectos de engenharia. Foz do Iguaçu: Itaipu Binacional, 2009, 790 p.