

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

ÁREA DE ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS

CAMPUS II - CAMPINA GRANDE - PB

RELATÓRIO DE ESTÁGIO SUPERVISIONADO

VISUALIZAÇÃO E ANÁLISE DE FLUXO E PADRÃO DE
EROSÃO EM MODELOS REDUZIDOS DE BARRAGEM

POR

CLAUDINEI OLIVEIRA DE SOUSA

CAMPINA GRANDE - PARAÍBA

FEVEREIRO / 1995



Biblioteca Setorial do CDSA. Maio de 2021.

Sumé - PB

Í N D I C E

	Páginas
AGRADECIMENTOS	
APRESENTAÇÃO.....	i
1.0 Introdução.....	01
2.0 - Modelos Reduzidos.....	02
2.1 - Teoria da Semelhança.....	03
2.1 - Procedimentos de investigação... ..	09
3.0 - Os Modelos da Barragem da Pedra.....	12
3.1 - O Modelo Bidimensional.....	13
3.2 - O Modelo Tridimensional.....	17
4.0 - Visualização de Fluxo/Erosão nos Modelos da Barragem da Pedra.....	23
5.0 - Ensaios com Métodos de Visualização convencionais....	25
5.1 - Ensaios de Operação.....	25
5.2 - Ensaios de Padrão de Erosão.....	26
5.3 - Resultados.....	26
6.0 - Ensaios com Câmera de vídeo.....	31
7.0 - Conclusão.....	33
8.0 - Referências Bibliográficas.....	34
A N E X O S.....	35

AGRADECIMENTOS

Primeiro á Deus, presente em todos os momentos iluminando minha mente e conduzindo-me por melhores caminhos.

Aos meus pais, irmãos e demais familiares pelo incentivo e força que sempre me deram, fazendo com que superasse todos os obstáculos.

Agradeço ao professor GILSON ANTÔNIO DE MIRANDA da área de transporte por ter getilmente cedido á câmara de vídeo e a coordenação da área de recursos hidricos pelo conserto da mesma e aos professores pela confiança e orientação durante todo o estágio, principalmente aos professores CARLOS DE OLIVEIRA GALVÃO e MANOEL GILBERTO DE BARROS.

Aos amigos, especialmente a SUNDAR SINGH DE MEDEIROS OLIVEIRA, pelo companherismo e participação nas filmagens.

E, em particular, á minha noiva pela dedicação e compreensão no decorrer deste periodo.

APRESENTAÇÃO

Este relatório refere-se ao estágio supervisionado realizado por CLAUDINEY OLIVEIRA DE SOUSA, matriculado no Curso de Graduação em Engenharia Civil na Universidade Federal da Paraíba, Campus II, matrícula nº 902.1158-7, realizado nos Laboratórios de Hidráulica e de Modelos Reduzidos da Área de Engenharia de Recursos Hídricos do Departamento de Engenharia Civil, sob regime semanal de 20 (vinte) horas, tendo como supervisor o professor CARLOS DE OLIVEIRA GALVÃO, sendo coordenador de estágio do Departamento o professor RICARDO CORREIA LIMA. Como parte do estágio frequentou como ouvinte o curso "Modelos Reduzidos em Obras Hidráulicas" do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro de Ciências e Tecnologia da UFPB, ministrado pelo professor MANOEL GILBERTO DE BARROS, com 30 horas de duração (Declaração de participação no Anexo 6).

1.0 - INTRODUÇÃO

O objetivo deste estudo é testar uma nova técnica de visualização de fluxo para uso em experimentos de hidráulica em laboratório.

Inicialmente foi necessário a participação no curso sobre modelos reduzidos, como treinamento. Em seguida outras atividades foram sendo realizadas obedecendo sempre o cronograma que foi estabelecido.

- Montagem e testes dos equipamentos de aquisição de imagens no laboratório de modelos reduzidos.

- Montagem e testes do sistema microcomputador-vídeo cassete e do software de visualização e arquivamento de imagens.

- Análise preliminar das imagens já disponíveis de experimentos anteriores.

- Planejamento dos experimentos e seleção dos traçadores e sedimentos. - Execução dos experimentos.

- Seleção, catalogação e arquivamentos das imagens obtidas.

Em virtude da retomada na área de recursos hídricos, do laboratório de modelos reduzidos, para experimentos nos modelos de barragens, e a programação de uma disciplina no Pós-Graduação sobre modelos reduzidos, tornando assim esta pesquisa muito mais produtiva, optou-se pela utilização de modelos de barragens ao invés de canais de laboratório.

2.0 - MODELOS REDUZIDOS

Os modelos reduzidos são obras hidráulicas em escala inferior, que apresentam as características originais da barragem a ser estudada. Para se alcançar os objetivos no estudo de uma dada barragem são construídos um ou mais modelos reduzidos.

Os modelos reduzidos podem ser construídos antes, durante e após a construção da barragem, sendo as mais adequadas a construção antes e durante, pois, se algum tipo de problema surgir, no modelo mesmo poderá ser resolvido.

A visualização de fluxo nos estudos de modelos é um método que permite maior precisão dos parâmetros a serem estudados, observando mais detalhadamente as características do fluxo, tais como: fluxo de aproximação, velocidade, fluxo de pulsação, vórtices, descolamento da lâmina d'água, fluxo de retorno e o padrão de erosão, alcançando assim uma maior segurança nos resultados obtidos.

A seguir, se fará uma breve exposição sobre a teoria e os procedimentos de investigação em estudos de modelos necessários ao trabalho. Estas anotações foram assimiladas no curso assistido pelo estagiário e através da bibliografia (Barros, 1994, Bureau of reclamation, 1953, Lagos, 1975, Novac, 1981).

A prática nos laboratórios de hidráulica, principalmente no que se refere a Modelos Reduzidos é baseada na aplicação de um conjunto de relações que são conhecidas como Leis da Semelhança Hidráulica. Estas leis foram desenvolvidas através de relações básicas da mecânica dos fluidos e expressam as interrelações entre os vários parâmetros do fluxo e do fluido, tais como velocidade, viscosidade e pressão, sob condições limites semelhantes. O conhecimento da semelhança hidráulica é primordial para uma compreensiva utilização dos modelos hidráulicos.

2.1 - Teoria da Semelhança

• Considerações Gerais

A escala de um modelo é baseada na Teoria da Semelhança entre o modelo e o protótipo. A Teoria da Semelhança mostra:

a) como o modelo deve ser teoricamente calculado e metodologicamente preparado.

- b) que requisitos o modelo deve satisfazer para representar, em escala reduzida, as condições da realidade com a maior fidelidade possível.
- c) que parâmetros devem ser medidos durante os ensaios.
- d) como os resultados dos ensaios devem ser processados.
- e) para quais fenômenos os resultados obtidos podem ser aplicados e qual a extensão da sua validade.

• **Semelhança Geométrica**

Dois objetos ou sistemas são geometricamente semelhantes se as relações entre todas as dimensões lineares correspondentes são iguais, envolvendo, portanto, somente a semelhança de forma.

A semelhança de comprimento pode ser expressa como:

$$L_r = \frac{L_m}{L_p} \quad (1)$$

onde:

L_m - dimensão linear no modelo

L_p - dimensão linear no protótipo

L_r - escala

$$\text{Escala de área} - A_r = \frac{L_m^2}{L_p^2} = L_r^2 \quad (2)$$

$$\text{Escala de volume} - V_r = \frac{L_m^3}{L_p^3} = L_r^3 \quad (3)$$

$$\text{Escala de raio hidráulico} - R_r = \frac{L_m}{L_p} = L_r \quad (4)$$

São chamados **Sistemas Homólogos** os que têm lados, ângulos, diagonais, segmentos, vértices e outros elementos que se correspondem em figuras semelhantes.

- **Semelhança Cinemática**

É a semelhança do movimento. Quando a relação dos componentes de velocidade para pontos homólogos em sistemas geometricamente semelhantes são iguais, os dois estados de movimento são cinematicamente semelhantes e as trajetórias das partículas homólogos devem ser geometricamente semelhantes.

- **Semelhança Dinâmica**

A Semelhança Dinâmica entre dois sistemas geometricamente e cinematicamente semelhantes requer que a razão entre todas as forças homólogas (incluindo a força de inércia) nos dois sistemas seja a mesma.

A 2ª Lei de Newton do movimento pode ser escrita:

$$M.a = \text{vetor soma } (F_p + F_g + F_v + F_t + F_e) \quad (5)$$

onde:

M.a - Reação de massa para a força atuando, considerada aqui como a força de inércia.

F_p - Força de pressão.

F_g - Força imposta na massa do líquido pela gravidade, representada pelo seu peso.

F_v - Força de cisalhamento pela viscosidade.

F_t - Força devida à tensão superficial.

F_e - Força produzida pela compressão elástica do fluido.

Na semelhança pode ser escrita:

$$\frac{M_m \cdot a_m}{M_p \cdot a_p} = \frac{(F_p + F_g + F_v + F_t + F_r)_m}{(F_p + F_g + F_v + F_t + F_r)_p} \quad (6)$$

Uma perfeita semelhança requer além disso que:

$$\frac{M_m \cdot a_m}{M_p \cdot a_p} = \frac{(F_p)_m}{(F_p)_p} = \frac{(F_g)_m}{(F_g)_p} = \frac{(F_v)_m}{(F_v)_p} = \frac{(F_t)_m}{(F_t)_p} = \frac{(F_r)_m}{(F_r)_p} \quad (7)$$

onde:

M_m - relação de massa do modelo.

M_p - relação de massa do protótipo.

Na verdade, para as proposições práticas, um particular estado de fluxo pode ser simulado no modelo, considerando somente uma das forças do lado direito da equação (6). Em 90% dos modelos hidráulicos as forças de gravidade e viscosidade ou somente uma delas predomina.

• A Lei de Froude

Quando os efeitos da força gravitacional predominam, uma base prática para a semelhança pode ser estabelecida pela relação entre as forças gravitacionais e as forças de inércia do fluxo, desprezando-se as outras na equação (6):

$$\frac{V_r}{\sqrt{g_r \cdot L_r}} = 1 \quad (8)$$

- Lei de Reynolds

Quando há predominância das forças de viscosidade, estas são relacionadas com as de inércia, desprezando as outras na equação (6).

$$\frac{l_r \cdot V_r}{\nu} = 1 \quad (9)$$

Para as leis de Froude e Reynolds as relações de escala podem ser estabelecidas segundo a Tabela 1.

Tabela 1: Relações de escala das Leis de Froude e Reynolds.

		Relações de Escala	
Características	Dimensões	Froude	Reynolds
Propriedades Geométricas			
Comprimento	L	L_r	L_r
Área	L^2	L^2_r	L^2_r
Volume	L^3	L^3_r	L^3_r
Propriedades Cinemáticas			
Tempo	t	$[L\rho/\gamma]^{1/2}_r$	$[L^2\rho/\mu]_r$
Velocidade	$L.t^{-1}$	$[L\gamma/\rho]^{1/2}_r$	$[\mu/L\rho]_r$
Aceleração	$L.t^{-2}$	$[\gamma/\rho]_r$	$[\mu^2/\rho^2L^2]_r$
Descarga	$L^3.t^{-1}$	$[L^{5/2} . (\gamma/\rho)^{1/2}]_r$	$[\mu/\rho]_r$
Propriedades Dinâmicas			
Massa	M	$[L^3\rho]_r$	$[L^3\rho]_r$
Força	$M.L.t^{-2}$	$[L^3\rho]_r$	$[\mu^2/\rho]_r$
Densidade	$M.L^{-3}$	ρ_r	ρ_r
Peso Específico	$M.L^{-2}.t^{-2}$	γ_r	$[\mu^2/L^3\rho]_r$

Em suma, as Leis de Semelhança, assim como as Leis de Froude e de Reynolds, são comumente utilizadas na hidráulica, como em construção de canais, e não somente em construção de Modelos Reduzidos.

2.2 - Procedimentos de Investigação

• Trabalhos Preparatórios

Estes trabalhos consistem em:

Parte Teórica:

- Definição da escala;
- Esquematização do modelo, que é determinada pela análise de condições e critérios de semelhança;
- Definição do conteúdo, extensão e procedimentos da pesquisa.

Parte Prática:

- Seleção do material para o modelo;
- Localização;
- Locação, projeto, construção e acoplamento do modelo ao circuito hidráulico do laboratório.

Antes de ter-se iniciado os trabalhos preparatórios, o cliente apresenta seus problemas e o engenheiro responsável (chefe da equipe do modelo) discute com o mesmo as possíveis soluções. É nesta etapa onde todo o material informativo é requisitado, decide-se sobre os tipos e quantidades de modelos, e finalmente a decisão final sobre a escala e os tipos de materiais a serem empregados na construção como, pôr exemplo, madeira, cimento, ferro, areia, acrílico, cobre, PVC, zinco e materiais vedantes.

• **Técnicas de Modelagem**

As técnicas de modelagem definem os principais tipos de modelos hidráulicos e sua localização no laboratório. Os tipos ou grupos de modelos mais importantes são:

1- Modelos de rios e de engenharia de costa, que são modelos tridimensionais com ou sem estruturas hidráulicas:

- a) Modelos com leito fixo - para o estudo de problemas que não envolvam transporte de sedimentos ou erosão.
- b) Modelos com leito móvel - para o estudo de erosão, transporte e deposição de sedimentos.

2- Modelos de estruturas hidráulicas:

- a) Bidimensionais - para investigação de problemas básicos de fluxo em vertedores, válvulas, etc.
- b) Tridimensionais - utilizados para o estudo das condições do fluxo de montante e jusante, leis de manobra de comportas, etc.

Ao mesmo tempo em que está se escolhendo o tipo de modelo e projetando o mesmo, o problema de localização no laboratório deve ser resolvido. As seguintes considerações podem ser levadas em conta:

- a) Usualmente o espaço no laboratório é limitado, influenciando na escolha da escala.
- b) A localização do modelo deve permitir uma construção e operação econômicas, bem como a instalação de acessórios e equipamentos de medição.
- c) A localização deve ser compatível com o sistema de recirculação de água do laboratório.

3.0 - OS MODELOS DA BARRAGEM DA PEDRA

Tomou-se o estudo da Barragem da Pedra como teste para os ensaios de visualização de fluxo, no qual foi feita a montagem dos equipamentos para aquisição de imagens nos modelos de barragem. Uma sequência de experimentos utilizando traçadores de fluxo e sedimentos foi conduzida. As imagens foram então digitalizadas em computadores, selecionadas, catalogadas e armazenadas em meios magnéticos, para passar por uma última fase de análise.

No estudo da Barragem da Pedra, em função de seus objetivos, tomou-se a decisão da construção de dois modelos: um modelo bidimensional e outro tridimensional. Neles foram analisados parâmetros distintos, de tal forma que proporcionassem elementos substanciais para o estudo.

Para melhor compreensão do estudo é apresentada em uma síntese da pesquisa realizada, originalmente tendo como base o relatório da ATECEL (1982) e depoimentos dos técnicos e professores da UFPB envolvidos no estudo original.

3.1 - O Modelo Bidimensional

• Descrição

No modelo bidimensional da Barragem da Pedra, na escala 1:50, onde foram estudados os seguintes aspectos:

- Determinação das curvas de cota/abertura/vazão para os descarregadores de superfície;

- Comportamento da lâmina d'água nos vertedores sob o ponto de vista de:

1. Pressões negativas
2. Descolamentos
3. Situação na bacia de dissipação e localização do ressalto hidráulico.

A gravidade foi considerada efeito predominante no fluxo para o estabelecimento da semelhança. Pela Lei de Froude estabeleceu-se as seguintes relações entre o protótipo (p) e o modelo (m):

$$\text{Velocidade: } V_p = 7,092 V_m$$

$$\text{Tempos: } T_p = 7,092 T_m$$

$$\text{Pressões: } P_p = 50,000 P_m$$

$$\text{Vazões: } Q_p = 17.677,670 Q_m$$

A vazão máxima do modelo bidimensional chegou a atingir 161,62 l/s, que corresponde a 10.000 m³/s no protótipo.

A vazão escoada é medida através de um vertedor retangular sem contração, instalado numa cuba vertedora colocada no início da bacia de tranquilização. O canal possui as seguintes dimensões: 12m de comprimento, 0,68m de largura e 1,90m de altura. O modelo bidimensional está assente sobre uma laje de concreto simples e suas paredes foram construídas em alvenaria de tijolos e revestidas com argamassa de cimento e areia.

O perfil vertente e os pilares foram reproduzidos em formas pré-moldadas e construídas em concreto, com máximo cuidado na instalação dos manômetros. As comportas de setor foram feitas com chapas de cobre a partir de gabaritos em madeira, cuja reprodução foi de um vão e duas metades das comportas. A partir de gabaritos em chapa foram modelados os dentes da bacia de dissipação utilizando-se madeira mole. Na parte lateral da barragem a vedação é feita de um lado com a própria parede do modelo e do outro com vidro de 130 x 200 x 1 cm, o qual possibilita a visualização lateral do fluxo.

• **Ensaaios**

Os ensaios foram definidos em 3 séries (ATECEL, 1982):

1ª Série - Vazões de 0 a 5.000 m³/s com comportas totalmente abertas;

2ª Série - Vazões de 5000 a 10000 m³/s com comportas totalmente abertas;

3ª Série - Vazões de 0 a 5000 m³/s com comportas parcialmente abertas.

Definida a série, o seguinte procedimento:

1. Determinar a leitura da carga no vertedor;
2. Determinar a leitura da carga à montante do modelo;
3. Proceder, então, o levantamento da linha d'água;
4. Fazer a leitura das pressões em pontos do perfil vertente e na fase interna dos pilares;
5. Observar e anotar as condições de fluxo a jusante.

Nas primeira e segunda séries de ensaios foram utilizados os procedimentos 1,2,3 e 4.

Na terceira série foram utilizados os procedimentos 1 e 3.

• Resultados

O conjunto dos resultados correspondente às aberturas parciais é apresentado nas Figuras F1 e F2 (Anexo 1). Estas figuras permitem o cálculo das vazões para aberturas intermediárias, através da interpolação, para uma determinada cota (fig.F1) ou determinação da abertura que permita escoar uma determinada vazão entre 800 m³/s e 3000 m³/s (correspondente aos 7 vãos), para qualquer cota (fig.F2).

A tabela 2 (Anexo 2) fornece as vazões em um vão para várias cotas e aberturas acima da cota 218,526 (nível inferior da borda da comporta quando fechada e apoiada na calha). Com esta tabela há facilidade de determinação da vazão total no vertedor quando as aberturas das comportas não são iguais em todos os vãos. Assim, a vazão total será calculada através do somatório do fluxo nos vãos individuais, para cotas e aberturas escolhidas.

Também poderia ser possível determinar várias combinações de aberturas que permitam escoar uma vazão pré-estabelecida, para qualquer cota do nível d'água no reservatório, entre as cotas 222,50 e 230 m (ATECEL, 1982).

3.2 - O Modelo Tridimensional

• Descrição

O modelo tridimensional da Barragem da Pedra foi construído na escala 1:100 e tendo como objetivos os seguintes aspectos:

- Lei de manobra das comportas dos descarregadores de superfície;
- Condições do fluxo de aproximação;
- Condições do fluxo a jusante dos vertedores e padrão de erosão.

Da mesma forma que o modelo bidimensional, foi estabelecida a semelhança de Froude, sendo as seguintes as relações entre o protótipo(p) e o modelo(m):

$$\text{Velocidades: } V_p = 10,000 V_m$$

$$\text{Tempos: } T_p = 10,000 T_m$$

$$\text{Vazões: } q_p = 100.000 q_m$$

A construção do modelo tridimensional foi feita a partir de dados de levantamento topográfico de montante e de jusante e o projeto executivo da Barragem da Pedra.

Na área do laboratório que seria assente o modelo foi feita uma laje de concreto simples de 7cm de espessura e, sobre esta laje, foi construída uma outra de concreto armado nas as direções, com 10cm de espessura. As lajes foram preparadas com a adição de um impermeabilizante.

Os perfis de montante foram locados a uma distância equivalente a 50m no protótipo, enquanto os de jusante ficaram situados mais próximos uns dos outros, principalmente nas proximidades da bacia de dissipação. No espaço entre os perfis foram colocados camadas de metralha úmidas e compactadas, ficando a parte final para ser completada por argamassa de cimento e areia, com 5cm de espessura. Após a fase de complementação, toda a superfície recebeu um tratamento impermeabilizante com nata de cimento e sika 1.

As paredes de contorno do modelo e a bacia de tranquilização foram construídas em alvenaria de tijolos com argamassa de cimento e areia. A barragem foi construída a partir de uma forma em maderit, que foi lançada no eixo da mesma, tendo como enchimento concreto simples com cascalhinho. No entanto, os pilares foram construídos em elementos pré-moldados em forma de madeira, utilizando-se concreto no enchimento.

Os dentes da bacia de dissipação foram feitos empregando-se madeira mole, modelados de acordo com gabaritos em chapa e implantados em blocos nas cotas e posições de acordo com o projeto.

As tomadas d'água foram feitas utilizando-se chapas de PVC e madeira mole. Nas aberturas das entradas d'água foram colocadas telas para impedir a passagem de sedimentos conforme situação no protótipo.

Na seção final do modelo foi instalada uma comporta basculante com a finalidade de controlar os níveis d'água de jusante. Foram instaladas, também, três pontas linimétricas, sendo uma no trecho de montante e duas a jusante da barragem.

• Ensaios

Para alcançar os objetivos de operação do modelo, os ensaios foram organizados em 3 séries assim distribuídas (ATECEL, 1982):

1ª Série - Vazões de 1000 a 6000 m³/s com comportas totalmente abertas;

2ª Série - Vazões de 400 a 6000 m³/s com comportas parcialmente abertas;

3ª Série - Vazões de 1000 a 4000 m³/s com comportas totalmente abertas e vazões de 400 a 6000 m³/s com comportas parcialmente abertas, para o estudo do padrão de erosão.

Na 1ª série de ensaios com comportas totalmente abertas, a finalidade era a observação das condições de aproximação com a verificação da cota, condições do escoamento a jusante da bacia e a dissipação de da energia.

A carga no vertedor de medida era estabelecida a partir da curva de calibração do fluxo o ensaio tinha o seu início, sendo este controle feito através da repetição das leituras da carga no vertedor de medida e as cotas linimétricas a montante e a jusante.

Na 2ª série de ensaios com comportas parcialmente abertas, o objetivo fora a verificação do efeito de várias combinações de aberturas das comportas para cada vazão. Nesta série, o ensaio iniciava-se com a colocação das aberturas pré-estabelecidas, apresentando os mesmos procedimentos da série anterior.

Nos ensaios da 3ª série foi feito o estudo do padrão de erosão a jusante da bacia de dissipação com comportas totalmente ou parcialmente abertas.

O procedimento neste ensaio foi diferente dos anteriores no levantamento do leito erodível, logo após o término do ensaio. Quando cessava o escoamento, a água acumulada nas depressões era retirada de 1,0 cm em 1,0 cm com o auxílio de uma mangueira ou uma seringa hipodérmica, marcando-se os níveis d'água com um cordão (Fotos 6, 7, 8).

Para a realização do ensaio é importante que seja verificada a estabilização do fluxo. Isto pode ser feito pela observação da ponta linimétrica de montante. Quando não houver variação do nível da água o ensaio poderá ser iniciado.

• Resultados

Os resultados detalhados desse modelo (Anexo 3) servem como guia para novos estudos no modelo tridimensional da barragem da pedra.

Apresentamos a seguir uma síntese dos resultados obtidos durante o estudo no modelo (ATECEL, 1982).

Os estudos referentes à manobra das comportas indicaram melhores condições quando os seguintes aspectos foram incluídos no processo de escolha:

1. Aberturas simétricas;
2. Não ter duas ou mais comportas adjacentes fechadas;
3. Não apresentar alternância de comportas fechadas e abertas;
4. Para as vazões de 3000 m³/s ou menores, diminuição das aberturas do centro para os extremos;
5. Para as vazões maiores do que 3000 m³/s, aberturas iguais em todos os vãos.

Os estudos do padrão de erosão mostraram que a área crítica é a margem esquerda junto ao muro guia e num grau pouco menor junto ao muro guia direito. Este problema se alivia através da diminuição das vazões nos vãos extremos, mas a erosão na área central fica acentuada.

4.0 - VIZUALIZAÇÃO DE FLUXO E PADRÃO DE EROSÃO EM MODELOS DE BARRAGEM

A visualização de fluxo em modelos de barragem é de fundamental importância na interpretação dos resultados. Com a visualização são identificadas as principais características do fluxo, como: fluxo de aproximação, velocidade, fluxo de pulsação, vórtices, descolamento da lâmina d'água, fluxo de retorno e o padrão de erosão. Evidenciando e apresentando soluções para o problema.

Existem dois métodos convencionais utilizados na visualização de fluxo, que são:

- 1.- "In loco" - Observação visual no local do estudo, onde são observados as condições do fluxo e feitas as anotações numa planilha.
- 2.- **Fotografias** - Durante o estudo são feitas várias fotos, depois observadas e assim tiradas as conclusões.

A visualização de fluxo com imagens de video em modelos de barragem tem como objetivo uma maior precisão na determinação dos seus parâmetros. Com isso é possível analisar as imagens no monitor, observar detalhadamente as condições do fluxo e tirar as conclusões.

No curso realizado de modelos reduzidos, foram utilizados os dois métodos convencionais que estão descritos neste relatório. Durante o estágio foi realizado um ensaio de operação com utilização de imagens de vídeo como está mostrado no item 6.0.

5.0 - ENSAIOS COM MÉTODOS DE VISUALIZAÇÃO CONVENCIONAIS

Nestes novos ensaios, realizou-se prática de ensaios no modelo tridimensional da barragem da pedra.

Foram realizados sete ensaios, sendo cinco ensaios de operação e dois de padrão de erosão.

5.1 - Ensaio de Operação

Todos os ensaios de operação foram realizados no período de 26 a 27 de outubro de 1994, num total de cinco ensaios.

O primeiro e o segundo ensaios foram realizados com as comportas totalmente abertas com as vazões nominais de 2000 m³/s e 3500 m³/s.

Os demais ensaios foram realizados com comportas parcialmente abertas e com as seguintes vazões nominais: 3500, 2500 e 1000 m³/s.

Para todos os ensaios foram feitas observações e anotadas as condições de fluxo a montante e a jusante da barragem, que se encontram nas planilhas (Anexo 4).

5.2 - Ensaio de Padrão de Erosão

Foram realizados dois ensaios de padrão de erosão nos dias 03 e 04 de novembro de 1994 com comportas parcialmente abertas.

O primeiro ensaio foi realizado com aberturas iguais em todas as comportas de 2cm e uma vazão nominal de 1000 m³/s. O tempo de escoamento no ensaio foi de uma hora.

O segundo ensaio foi definido com aberturas crescentes da extremidade para o meio do vão. O tempo de escoamento no ensaio foi de uma hora e trinta minutos.

Nestes dois ensaios foi também preenchida uma planilha, onde eram também observadas as condições de fluxo a jusante e a montante (Anexo 5).

5.3 - Resultados

• Ensaio de Operação

Para os ensaios com comportas totalmente abertas foram feitas as seguintes observações:

Montante - Fluxo de aproximação foi, em geral, muito tranquilo; para a vazão de 2000 m³/s, o fluxo teve velocidade decrescente da direita para a esquerda e fluxo de aproximação muito lento à esquerda do vertedor. Para a vazão de 3500 m³/s foi verificado uma maior velocidade nos vãos centrais, mas depois de um certo tempo percebeu-se aumento da velocidade no vão 7 (Foto 1).

Jusante - Para vazão de 2000 m³/s foi verificado um jato de intensidade significativa no vão 7 dirigido para margem esquerda, causando fluxo de retorno, provocando erosão. Para vazão de 3500 m³/s foi verificada uma maior turbulência na bacia de dissipação no vão 7, ocorrendo transbordamento d'água sobre o muro guia. Também nos vãos 2 e 6 ocorreu fluxo de pulsação junto às comportas.

Para os ensaios com comportas parcialmente abertas foi observado o seguinte:

- No ensaio n° 3, com vazão de 3500 m³/s, o fluxo de aproximação teve velocidade crescente da direita para a esquerda. Foram observados também vórtices de pequena intensidade no vão central; fluxo de pulsação nos vãos 2 e 6; vórtices bem acentuados nos vãos 1 e 7. À jusante foi observado descolamento da lâmina d'água nos vãos 1 e 7; fluxo de retorno nos dois lados da barragem, sendo maior na margem esquerda; o ressalto ficou bem caracterizado nos vãos centrais; fluxo bastante turbulento nos vãos 1 e 7 (Foto 2).

- No ensaio n° 4, com vazão de 2500 m³/s, fluxo de aproximação à esquerda da barragem muito rápido; À jusante ocorreu fluxo de retorno de grande intensidade na margem esquerda causando erosão; jato de impacto na margem direita. Devido à combinação de aberturas das comportas o fluxo se concentrou-se no centro da bacia de dissipação.

- No ensaio nº 5, com vazão de 1000 m³/s, foi verificado um fluxo de aproximação muito tranquilo, concentrando-se nos vãos centrais. A jusante, o fluxo na bacia de dissipação ficou bem distribuído. Houve também fluxo de retorno de pequena intensidade na margem esquerda (Fotos 3 e 4).

Foi observado que, para uma vazão acima de 3000 m³/s, com comportas parcialmente abertas, há formação de vórtices e descolamento da lâmina d'água na barragem.

Quando os ensaios foram realizados com todas as comportas abertas, com vazão variando de 2000 a 3500 m³/s, notou-se que a turbulência na bacia de dissipação tinha mais intensidade na margem esquerda, o que ocasionaria erosão próximo ao muro guia esquerdo.

Nos ensaios onde as comportas 1 e 7 estiveram fechadas foi verificado que houve diminuição da turbulência na bacia de dissipação, também, fluxo de circulação à direita.

• Ensaios de Padrão de Erosão

Os ensaios relativos ao estudo do padrão de erosão são apresentados com a natureza qualitativa e comparativa.

- Comportas parcialmente abertas de 2 cm:

No ensaio nº 6, com vazão de 1000 m³/s e tempo de escoamento de uma hora, foi observada erosão mais acentuada em frente ao vão 7, provocando depressões de maior comprimento, menor largura e maior profundidade do que na região central.

No ensaio n° 7, com vazão de 3000 m³/s, a erosão mais intensa foi originada em frente aos vãos centrais e houve acúmulo de sedimentos junto ao muro guia.

Esta combinação de abertura foi a mais conveniente, pois as margens esquerda e direita foram protegidas do leito da erosão. Com a colocação de cotas relativas em cada curva de nível estava identificada o padrão de erosão para a vazão escoada sendo documentada através de fotografias (Fotos 5, 6, 7, 8, 9 e 10).

• Conclusões

Nos ensaios realizados no modelo da Barragem da Pedra está bem caracterizado que o trecho mais problemático fica situado a jusante na margem esquerda, que os ensaios de operação e de padrão de erosão, indentificaram como o de situação mais crítica.

Em relação às aberturas das comportas foi observado que:

1. Para vazões acima de 3000 m³/s não devem ser utilizadas as comportas parcialmente abertas, com aberturas maiores nos vãos centrais e menores nos vãos extremos, pois esta combinação provoca vórtices e descolamento da lâmina d'água.

2. Não foi considerada satisfatória a situação que mantinha algumas comportas abertas e outras fechadas, devido aos problemas apresentados na margem direita.

3. Em relação à erosão a condição que não provocou maiores danos foi a combinação de comportas parcialmente abertas, simetricamente, sendo as aberturas maiores nos vãos centrais e menores nos vãos extremos.

6.0 ENSAIOS COM CÂMARA DE VÍDEO

- Instrumentação

Para o experimento no modelo tridimensional foi montado um dispositivo de aquisição de imagens composto basicamente de uma câmara de vídeo com tripé, iluminação adequada para o melhoramento das imagens e também foi utilizado traçadores.

Várias sequências de medição e gravação foram realizadas variando os traçadores para visualização do fluxo. As imagens então eram transferidas para o monitor através de um vídeo cassete e analisadas posteriormente.

- Ensaio de Operação

Foi realizado um ensaio de operação com comportas parcialmente abertas e uma vazão de $3500 \text{ m}^3/\text{s}$ no modelo tridimensional da barragem da pedra.

Com as imagens coletadas e transferidas para o monitor, foram feitas observações e anotadas as condições de fluxo a montante e a jusante da barragem.

- Resultados

Para este ensaio com comportas parcialmente abertas foram feitas as seguintes observações:

Montante - Na imagem selecionada do fluxo de aproximação vimos que a velocidade é crescente da direita para esquerda, é possível determinar essa velocidade utilizando o contador do aparelho de vídeo cassete e paralisando a imagem em dois pontos. Com isso tem-se a distância, o tempo e conseqüentemente a velocidade. Foram observados também vórtices de grande intensidade nas comportas 1 e 7; fluxo de pulsação ficou bem evidenciado na imagem nas comportas 2 e 6.

Jusante - Nas imagens de jusante da barragem foi observado descolamento da lâmina d'água nas comportas 1, 3 e 7; jogando os traçadores a jusante na bacia de dissipação observou-se o fluxo de retorno nos dois lados da barragem, sendo maior na margem esquerda; na imagem ficou bem caracterizado o ressalto nos vãos centrais, com isso podemos medir o tamanho do ressalto

7.0 - CONCLUSÃO

Neste trabalho estudou-se a visualização de fluxo em modelos de barragens. O que se conclui é que é de muita utilidade na interpretação dos dados.

A visualização de fluxo com câmera de vídeo permite determinar a velocidade paralisando imagens em dois pontos, observar vórtices determinando seu tamanho, fluxo de pulsação e descolamento da lâmina d'água.

Enfim permite uma maior precisão na determinação dos parâmetros envolvidos, possibilitando análises mais detalhadas do comportamento do fluxo no modelo.

8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ATECEL, (1982) - Estudo em Modelo Reduzido da Barragem da Pedra (CHESF) - Jequié - BA. Campina Grande, ATECEL. BARROS, M. G. (1994) - Modelos Reduzidos em Obras Hidráulicas. Campina Grande, UFPB (Notas de Aulas).

BUREAU OF RECLAMATION (1953) - Hydraulic Laboratory Practice - Denver, Colorado.

LAJOS, I. (1975) - Hydraulic Models - Research Institute for Water Resources Development - Budapest.

NOVAC, C. (1981) . Models in Hydraulic Engineering , Praga.

A N E X O S

A N E X O 1

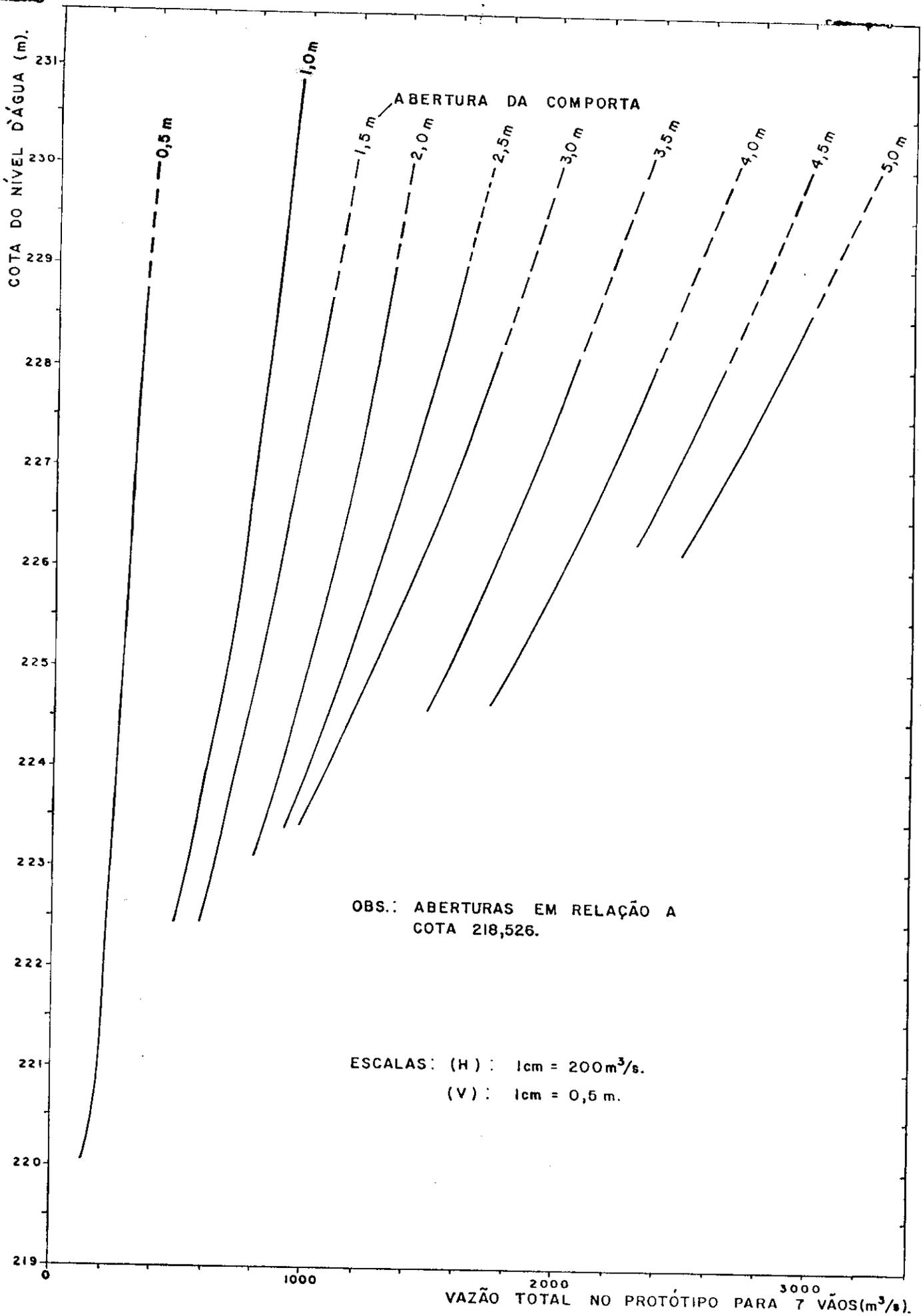


FIG. F1 - RELAÇÃO COTA-VAZÃO PARA ABERTURAS DE COMPORTA DE 0,5 A 5,0 m.

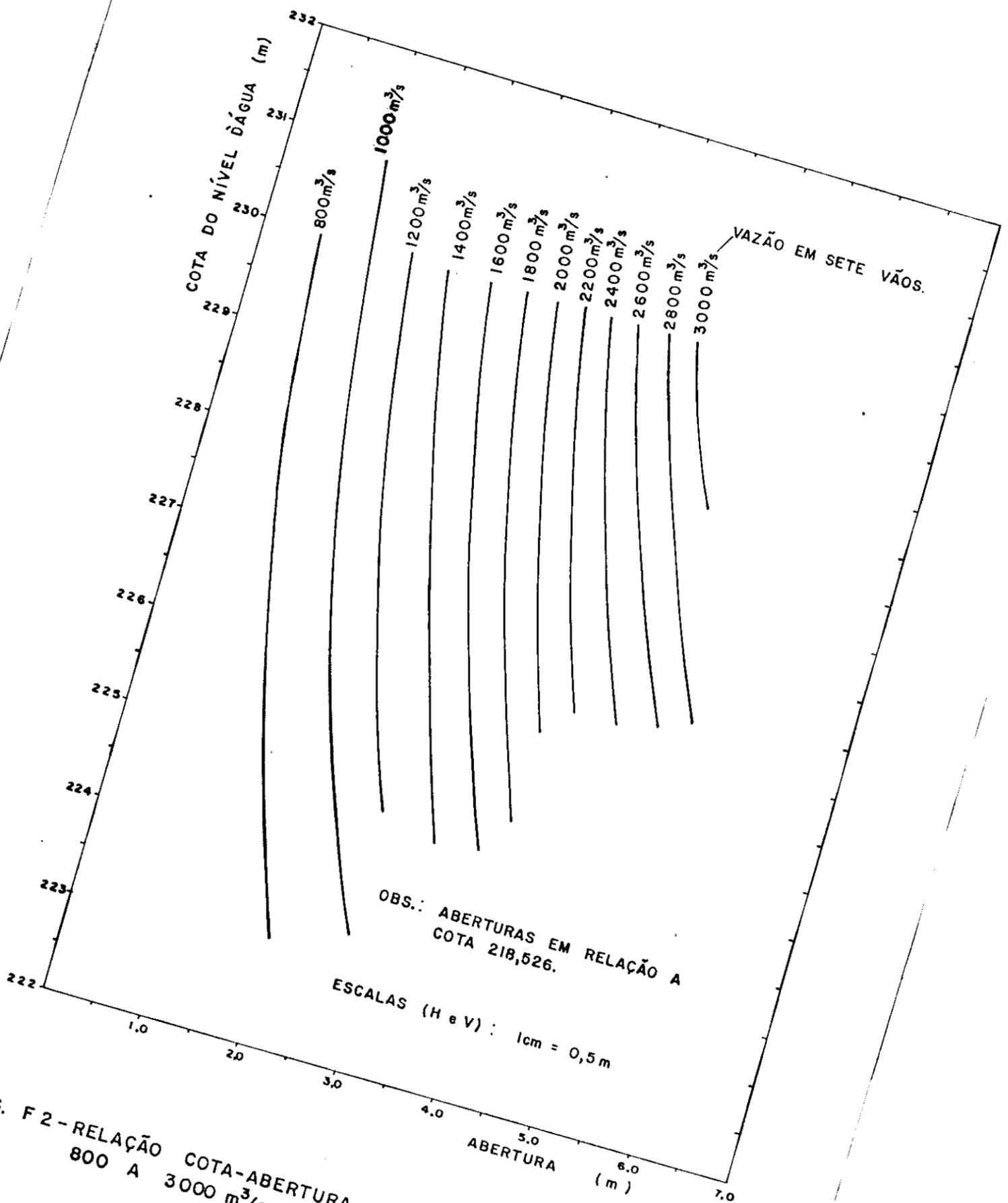


FIG. F 2 - RELAÇÃO COTA-ABERTURA PARA VAZÕES DE 800 A 3000 m³/s.

A N E X O 2

TABELA T2 - Vazão em um vão (m^3/s) para abertura de comportas de 0,5 a 5,0 m

COTA DO NÍVEL D'ÁGUA (m)	ABERTURAS DE COMPORTAS (m) - ACIMA DA COTA 218,526 m									
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
222,50	31,4	71,4	85,7							
223,00	32,9	75,7	92,9	111,4						
223,50	34,3	81,4	100,0	121,4	132,9	142,9				
224,00	35,7	87,1	105,7	128,6	144,3	157,1				
224,50	37,1	92,9	111,4	137,1	154,3	170,0	210,0	242,9		
225,00	40,0	97,1	117,1	144,3	164,3	182,9	224,3	260,0		
225,50	41,4	102,9	122,9	151,4	172,9	195,7	237,1	275,7		
226,00	42,9	107,1	128,6	158,6	182,9	208,6	251,4	290,0	322,9	351,4
226,50	44,3	111,4	134,3	165,7	192,9	220,0	262,9	304,3	337,1	368,6
227,00	45,7	114,3	140,0	171,4	201,4	231,4	274,3	317,1	351,4	384,3
227,50	48,6	118,6	145,7	177,1	210,0	242,9	285,7	328,6	365,7	400,0
228,00	50,0	122,9	151,4	182,9	217,1	251,4	295,7	341,4	378,6	414,3
228,50	51,4	125,7	155,7	188,6	225,7	260,0	305,7	352,9	391,4	428,6
229,00	52,9	128,6	161,4	192,9	232,9	270,0	317,1	364,3	404,3	441,4
229,50	55,7	131,4	165,7	197,1	240,0	278,6	327,1	375,7	415,7	454,3
230,00	57,1	134,3	171,4	200,0	245,7	285,7	338,6	387,1	428,6	467,1

A N E X O 3

a) Comportas com aberturas alternadas

A zona de erosão concentrou-se nos vãos abertos com as correntes circulatórias jogando os materiais erodidos para as zonas em frente aos vãos fechados. Assim, o fechamento das comportas extremas diminuía a erosão na margem esquerda e junto aos muros guias, embora as condições gerais do fluxo, não tenham sido satisfatórias.

b) Comportas com aberturas iguais em todos os vãos

Mostrou um problema crítico na margem esquerda. Esta condição talvez deve-se ao fato da soleira dentada do vão 7 ser mais alta do que as outras e conseqüentemente, libera um fluxo de alta velocidade para o pé do muro e para a margem esquerda antes da dissipação da energia.

c) Comportas com aumento de aberturas do extremo para o centro do vertedor.

Houve grande erosão na parte central e uma atenuação significativa da erosão nas laterais. Como esta situação também apresentava a melhor opção em termos de condições de fluxo, deve se considerar esta opção como a mais favorável, de um modo geral.

g) **Vazão de 6000 m³/s**

Para qualquer comporta fechada, ocorria transbordamento e em todos os ensaios as condições à montante e à jusante da barragem foram altamente turbulentas e correntes laterais para as margens sempre estiveram presentes. A melhor alternativa foi obtida para aberturas iguais das comportas.

• **3ª Série - Padrão de Erosão**

Foram realizados 4 ensaios com comportas totalmente abertas e 26 com comportas parcialmente abertas.

Os ensaios com fluxo livre mostraram que para todas as vazões a região crítica se localiza na parte esquerda do vertedor, principalmente em frente ao vão 7. Atendência para erosão nesta área é muito grande e a zona de erosão aumenta com a vazão, com o risco da instabilidade da margem esquerda do rio, bem como o muro de ala esquerdo.

A área de menor erosão correspondia aos vãos 3 e 4 e havendo um padrão semelhante nos vãos 1, 2 e 5, 6.

Os ensaios com comportas parcialmente abertas se enquadram em 3 grupos:

Jusante: - Ineficiência da dissipação quando ocorreu o fechamento de uma ou mais comportas;

- Nas outras situações o ressalto se localizou na bacia entre os vãos 1 e 6;

- O jato saindo do vão 7, mostrou sempre a erosão na margem esquerda.

e) **Vazão de 4000 m³/s**

Montante: - Condições de fluxo se tornaram problemáticas, com o aparecimento de vórtices de grande intensidade, para quase todas as combinações de aberturas ensaiadas.

Jusante: - Dissipação insuficiente para determinadas aberturas com jatos de alta velocidade, ocorrendo principalmente nos vãos extremos.

f) **Vazão de 5000 m³/s** - Denominada vazão máxima de projeto.

Os ensaios no modelo mostraram claramente a inviabilidade de se operar a barragem deste modo, pois, nenhuma combinação de aberturas ofereceu condições de aproximação aceitáveis, nem tão pouco a estabilidade do fluxo à jusante.

- Onde havia três ou mais comportas fechadas mostrou-se a ocorrência de correntes laterais e formação de vórtices junto as calhas do stop-log, nos vãos com comportas abertas.

Jusante: - Quando houve o fechamento de duas ou mais comportas adjacentes, tanto nas laterais quanto nos vãos centrais, tivemos as piores condições do fluxo de jusante.

c) **Vazão de 2000 m³/s** - Aberturas variando de 1 a 4m.

Motante: - As condições do fluxo de aproximação para determinadas combinações de aberturas, apresentaram a ocorrência de vórtices acentuados, principalmente naquelas situações em que as comportas dos vãos extremos estavam fechadas.

Jusante: - Com a comporta do vão 7 aberta, ocorreu formação de um jato saindo deste vão, atingindo a margem esquerda de jusante.

d) **Vazão de 3000 m³/s**

Montante: - Na maioria das alternativas ensaiadas com esta vazão, apresentou problemas de aproximação e de restituição do fluxo;

- Em determinados vãos ocorreu um fluxo de pulsação devido a grande abertura das comportas;

- A ocorrência de vórtices pronunciados para várias alternativas.

• **2ª Série - Comportas Parcialmente abertas**

a) **Vazão de 400 m³/s** - Aberturas de 1,0 m no máximo em 5 comportas.

Montante: - As condições do fluxo de aproximação, para as combinações de aberturas ensaiadas, apresentaram poucos problemas.

- Para aberturas alternadas da comporta 1 até 7, ocorreram pequenos vórtices junto às calhas do stop-log.

- Para aquelas combinações simétricas sem alternância das comportas fechadas e abertas, apresentaram melhores condições de aproximação.

Jusante: - Para uma concentração de aberturas das comportas centrais ou laterais, o fluxo de jusante, mostrou algumas situações com correntes de retorno para o centro ou para as margens.

b) **Vazão de 1000 m³/s** - Aberturas nas comportas de 1, 2 e 3m.

Montante: - Para a maioria dos ensaios ocorreu ótimas condições do fluxo de aproximação;

Resultados do estudo feito no modelo tridimensional da barragem da pedra (ATECEL, 1982).

• 1ª Série - Comportas Totalmente Abertas

Montante: - À montante, para faixa de vazões ensaiadas, não houve a ocorrência de correntes laterais próximo à embocadura dos vertedores, sendo o fluxo de aproximação muito tranquilo.

Jusante: a) **Vazões de 1000 e 2000 m³/s** - O ressalto se localizou na bacia de dissipação, sendo que para 2000 m³/s, formou-se um jato de intensidade significativa dirigido para a margem esquerda.

b) **Vazão de 3000 m³/s** - Aumentou a velocidade do jato do vão 7, tendo assim consequências danosas para a margem esquerda.

c) **Vazão apartir de 4000 m³/s** - A dissipação de energia no pé da barragem com formação de "roller" era pequena. O ressalto hidráulico ficou bem caracterizado nos vãos centrais.

A N E X O 4

FOTOGRAFIAS REFERENTES AOS ENSAIOS DE
OPERAÇÃO

Comportas totalmente abertas - vazão de 1820 a 2000 m³/s

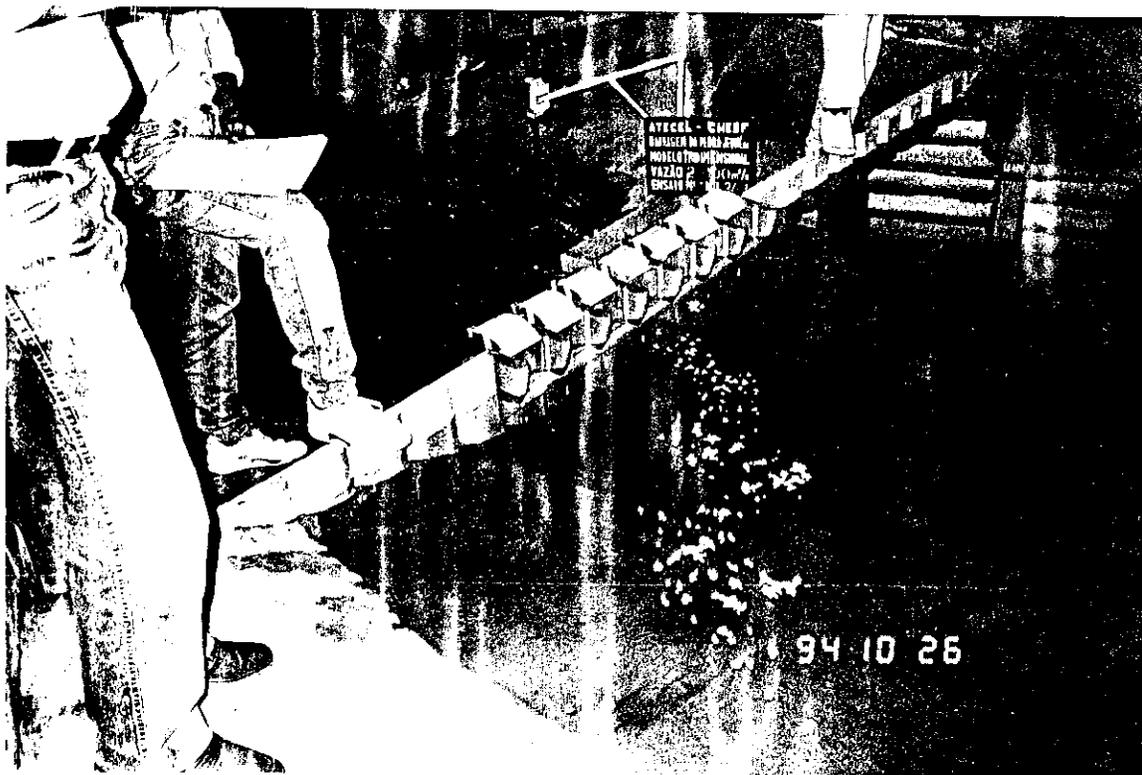


Foto 1 - Condições do fluxo de aproximação

Comportas parcialmente abertas - vazão de 3640 a 4000 m³/s



Foto 2 - Detalhe do fluxo de aproximação nos três vãos centrais

Comportas parcialmente abertas - vazão de 1000 a 1040 m³/s



Foto 3 - Escoamento com comportas fechadas a aberturas alternadas

Comportas parcialmente abertas - vazão de 1000 a 1040 m³/s

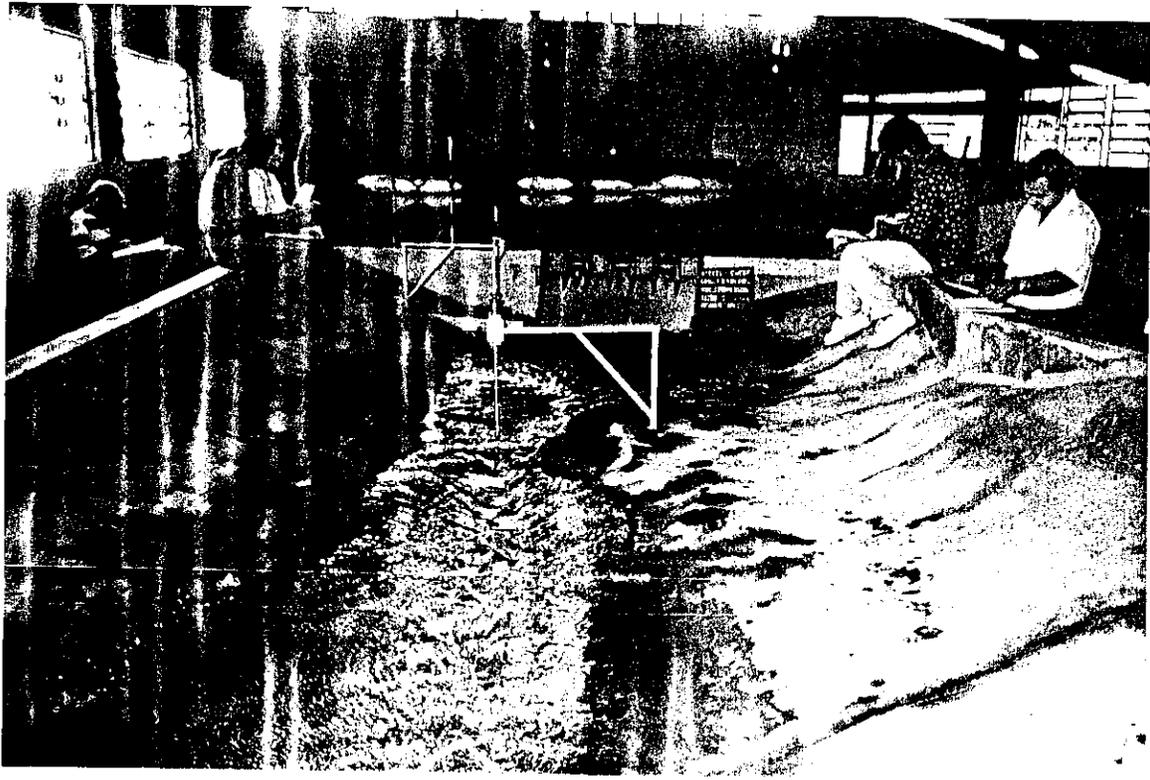


Foto 4 - Vista geral do modelo durante o ensaio

Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Disciplina: Modelos Reduzidos de Obras Hidráulicas e Rios

Professor: Manoel Gilberto de Barros

Aluno: Claudiney Oliveira de Sousa

Barragem da Pedra - Modelo Tridimensional

Ensaio nº 01 - Data: 26/10/94 - Início: 14:00h - Término: 15:40h
Zero do Vertedor: 240 mm
Leitura da Ponta Linimétrica: 196,4 mm
Carga do Vertedor Retangular: 196,4 - 140 = 56,4 mm
Vazão do Modelo: 18,2 l/s
Tomada da Turbina: 0,5 l/s
Tomada das Descargas de Fundo - 1 segundo

Comportas	1	2	3	4	5	6	7
Aberturas(cm)	A	A	A	A	A	A	A

Fluxo à Montante:

Zero da Ponta: 100 mm

Leitura: 229,3 mm

- Cota de Referência: 220 mm

- Cota: 220 + 3,03 = 223,03 mm

Fluxo à Jusante:

Zero das Pontas: - Ponta 1: 20 mm - Cota de Referência: 177,70 mm

- Ponta 2: 80 mm

Leituras: - Ponta 1: 101,4 mm

- Cotas: - Ponta 1: 165,8 mm

- Ponta 2: 156,2 mm

- Ponta 2: 155,3 mm

Condições de Fluxo à Montante

Fluxo de aproximação:

- Muito tranquilo
- A aproximação do fluxo é direta com poucas turbulências à montante
- Fluxo de aproximação muito lento à esquerda do vertedor
-

Condições de Fluxo à Jusante

Fluxo de Jusante:

- Jato de intensidade significativa na vórtice direita para margem esquerda, causando fluxo de retorno, provavelmente crítico
-
-

Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Disciplina: Modelos Reduzidos de Obras Hidráulicas e Rios

Professor: Manoel Gilberto de Barros

Aluno: Claudiney Oliveira de Sousa

Barragem da Pedra - Modelo Tridimensional

Ensaio nº 02 - Data: 26/06/04 - Início: 15:45h - Término: 16:25h
Zero do Vertedor: 510 mm
Leitura da Ponta Linimétrica: 225 mm
Carga do Vertedor Retangular: 225 - 210 = 15 mm
Vazão do Modelo: 34,0 l/s
Tomada da Turbina: 0,1 l/s
Tomada das Descargas de Fundo - 1,2 l/s

Comportas	1	2	3	4	5	6	7
Aberturas(cm)	A	A	A	A	A	A	A

Fluxo à Montante:

Zero da Ponta: 590 mm - Cota de Referência: 590 mm
Leitura: 755,1 mm - Cota: 755,1 mm

Fluxo à Jusante:

Zero das Pontas: - Ponta 1: 20 mm - Cota de Referência: 590 mm
- Ponta 2: 80 mm
Leituras: - Ponta 1: 525,5 mm - Cotas: - Ponta 1: 515,5 mm
- Ponta 2: 496,4 mm - Ponta 2: 486,4 mm

Condições de Fluxo à Montante

Fluxo de aproximação:

- Aproximação de fluxo com maior velocidade nas comportas 3, 6 e 7, com maior velocidade nas comportas 1 e 2, logo de 1 a 7, há uma diminuição da velocidade.
-
-
-

Condições de Fluxo à Jusante

Fluxo de Jusante:

- Maior turbulência no local de dissipação na comporta 7, com grande transbordamento. Água sob o mesmo guia.
- Fluxo de circulação na esargem esquerda.
- Nas comportas 1 e 2, ocorre uniformidade de fluxo, com o fluxo no local de dissipação.
-

Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Disciplina: Modelos Reduzidos de Obras Hidráulicas e Rios

Professor: Manoel Gilberto de Barros

Aluno: Claudiney Oliveira de Sousa

Barragem da Pedra - Modelo Tridimensional

Ensaio nº 03 - Data: 2-15/96 - Início: 14h - Término: 16h
 Zero do Vertedor: 210 mm
 Leitura da Ponta Linimétrica: 229,2 mm
 Carga do Vertedor Retangular: 120,2 - elev: 80,1 mm
 Vazão do Modelo: 26,4 l/s
 Tomada da Turbina: 0,2 l/s
 Tomada das Descargas de Fundo - fechada

Comportas	1	2	3	4	5	6	7
Aberturas(cm)	2	7	6	4	6	2	2

Fluxo à Montante:
 Zero da Ponta: 190 mm - Cota de Referência: 229 mm
 Leitura: 232,6 mm - Cota: 228,2016 - 232,256 mm

Fluxo à Jusante:
 Zero das Pontas: - Ponta 1: 200 mm - Cota de Referência: 229,20 mm
 - Ponta 2: 80 mm
 Leituras: - Ponta 1: 185,7 mm - Cotas: - Ponta 1: 188,77 mm
 - Ponta 2: 178,6 mm - Ponta 2: 189,56 mm

Condições de Fluxo à Montante
Fluxo de aproximação:
 - No véz central vértice de pequena intensidade
 - fluxo de aproximação nos véz 1 e 7, mas reduzido no véz 2, com vértice pequeno quanto aos véz 1 e 7.
 - vértice bem acentuado nos véz 3 e 5
 - Nos véz 3 e 5 apresenta fluxo de refluxo bem acentuado.

Condições de Fluxo à Jusante
Fluxo de Jusante:
 - Descolamento da lâmina d'água nos véz 2 e 7.
 - Fluxo de refluxo nos véz 1 e 7, mas reduzido nos véz 3 e 5.
 - O ressalto ficou bem acentuado nos véz 3 e 5.
 - Fluxo bastante turbulento nos véz 1 e 7.

Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Disciplina: Modelos Reduzidos de Obras Hidráulicas e Rios

Professor: Manoel Gilberto de Barros

Aluno: Claudiney Oliveira de Sousa

Barragem da Pedra - Modelo Tridimensional

Ensaio nº 06 - Data: 27/10/96 - Início: 08:30 h - Término: 11:30 h
Zero do Vertedor: 214 mm
Leitura da Ponta Linimétrica: 208 mm
Carga do Vertedor Retangular: 200 mm - 500 mm - 600 mm
Vazão do Modelo: 25,2 l/s
Tomada da Turbina: 0,5 l/s
Tomada das Descargas de Fundo - Fechada

Comportas	1	2	3	4	5	6	7
Aberturas(cm)	F	A	A	A	A	A	F

Fluxo à Montante:
Zero da Ponta: 500 mm - **Cota de Referência:** 220 mm
Leitura: 208 mm - **Cota:** 220 mm - 208 mm

Fluxo à Jusante:
Zero das Pontas: - **Ponta 1:** 200 mm - **Cota de Referência:** 222,2 mm
- **Ponta 2:** 200 mm
Leituras: - **Ponta 1:** 227,6 mm - **Cotas:** - **Ponta 1:** 226,2 mm
- **Ponta 2:** 246,4 mm - **Ponta 2:** 247,2 mm

Condições de Fluxo à Montante
Fluxo de aproximação:
- Fluxo à esquerda da barragem e aproximação do fluxo.
- Fluxo de aproximação à direita da barragem.
- A partir de 200 mm, ocorre um escoamento de fluxo de aproximação para a direita.
-

Condições de Fluxo à Jusante
Fluxo de Jusante:
- Fluxo à retiro de grande intensidade e escoamento equivo.
- Causando grande erosão.
- Jato de impacto no máximo da barragem.
- Concentração do fluxo no centro da boca da barragem.
- Aproxima formação de turbulência no escoamento.

Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Disciplina: Modelos Reduzidos de Obras Hidráulicas e Rios

Professor: Manoel Gilberto de Barros

Aluno: Claudiney Oliveira de Sousa

Barragem da Pedra - Modelo Tridimensional

Ensaio nº 05 - Data: 22/10/96 - Início: 05:45h - Término: 06:20h
Zero do Vertedor: 340 mm
Leitura da Ponta Linimétrica: 377 mm
Carga do Vertedor Retangular: $377 - 340 = 37$ mm
Vazão do Modelo: 20,4 l/s
Tomada da Turbina: 0,5 l/s
Tomada das Descargas de Fundo - Fechada

Comportas	1	2	3	4	5	6	7
Aberturas(cm)	F	A	F	A	F	A	F

Fluxo à Montante:

Zero da Ponta: 390 mm

- Cota de Referência: 390 mm

Leitura: 235,8 mm

- Cota: $390 + 235,8 = 625,8$ mm

Fluxo à Jusante:

Zero das Pontas: - Ponta 1: 390 mm - Cota de Referência: 390 mm

- Ponta 2: 390 mm

Leituras: - Ponta 1: 63,4 mm

- Cotas: - Ponta 1: $390 + 63,4 = 453,4$ mm

- Ponta 2: 337,4 mm

- Ponta 2: $390 + 337,4 = 727,4$ mm

Condições de Fluxo à Montante

Fluxo de aproximação:

- Muito tranquilo
- Concentração do fluxo de aproximação no vértice central.
- Apresenta fluxo de aproximação com maior velocidade próxima a comporta 4, no geral o fluxo é tranquilo.
-

Condições de Fluxo à Jusante

Fluxo de Jusante:

- Fluxo na saída de dissipação com distribuição
- Fluxo de retorno de pequena intensidade no margem esquerda
- Maior inclinação à direita
- Formação de pequenas poças à margem direita.

A N E X O 5

FOTOGRAFIAS REFERENTES AOS ENSAIOS DE
PADRÃO DE EROSÃO

Comportas parcialmente abertas com aberturas maiores no
centro



Foto 5 - Detalhe do fluxo a jusante do vertedor para uma
vazão de 5000 m³/s

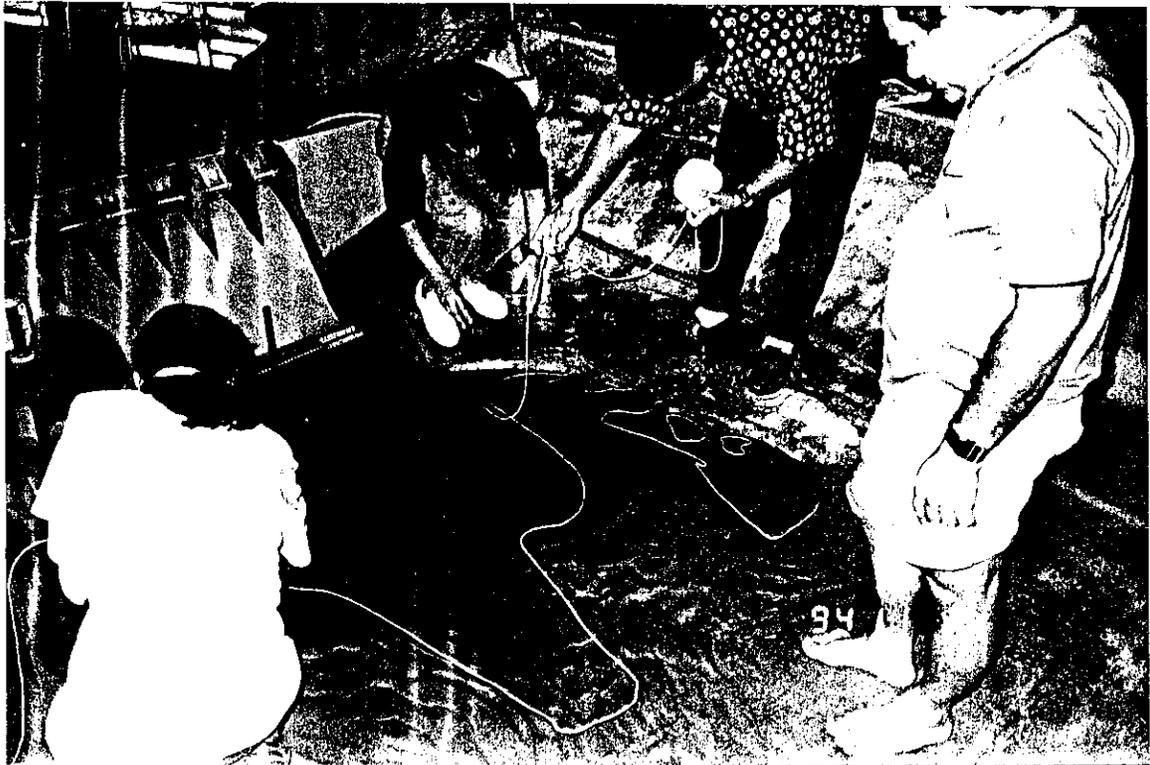


Foto 6 - Procedimento do levantamento do padrão de erosão

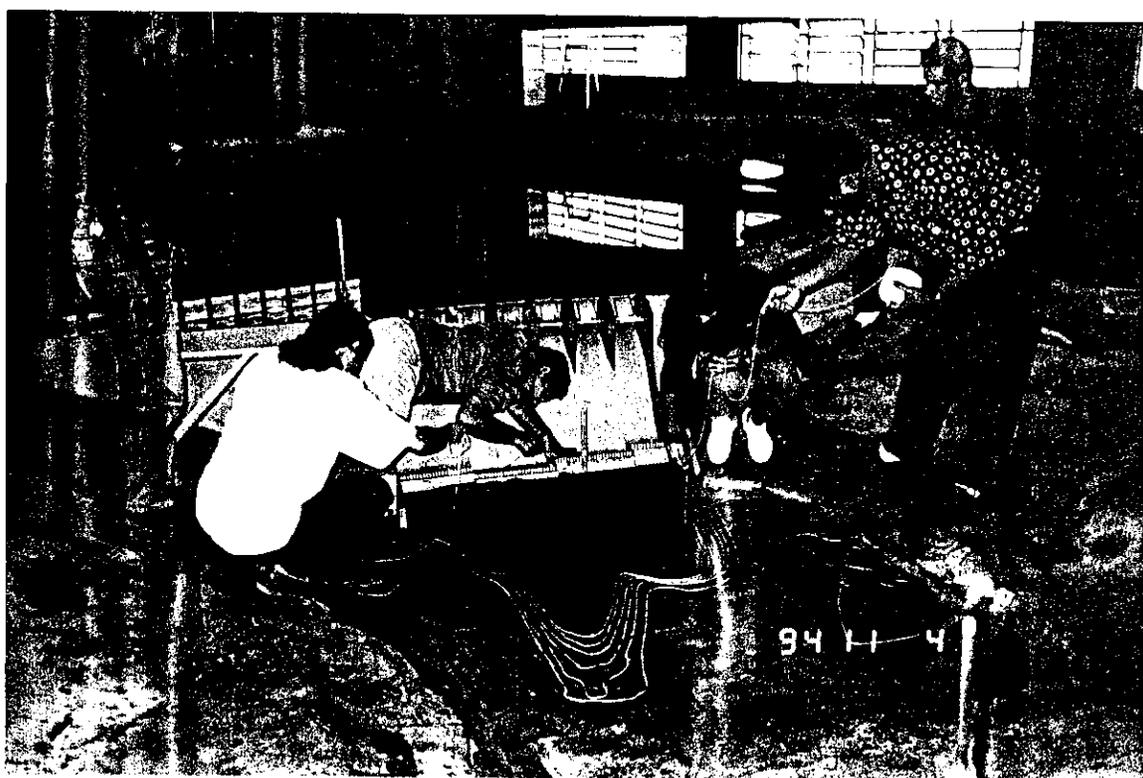


Foto 7 - Levantamento do padrão de erosão

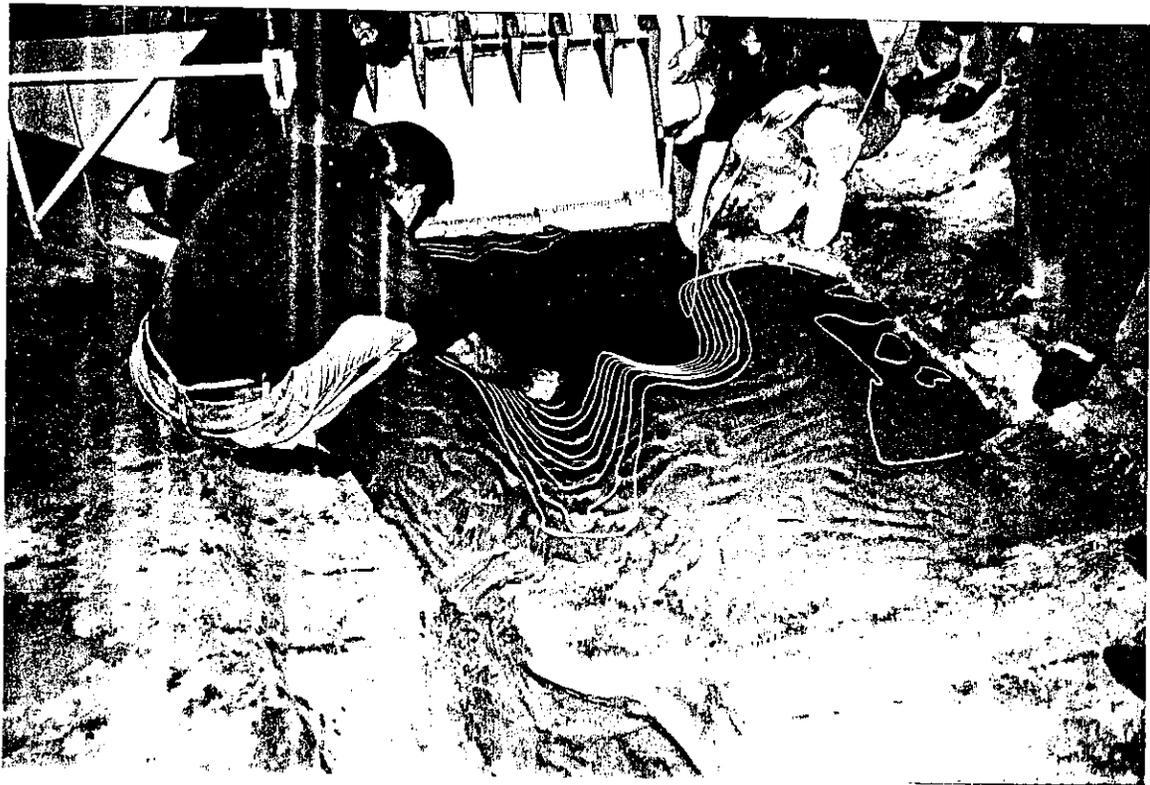


Foto 8 - Curvas de nível sendo marcadas

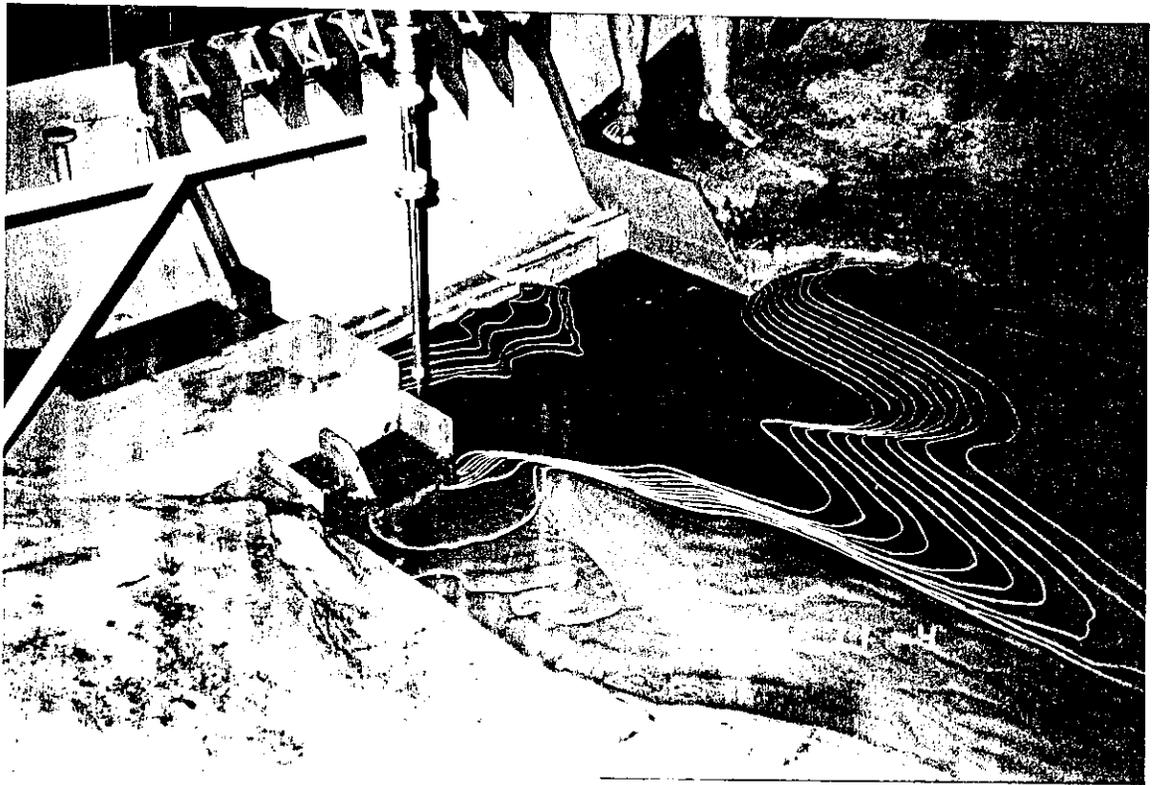


Foto 9 - Padrão de erosão concluído para determinada vazão

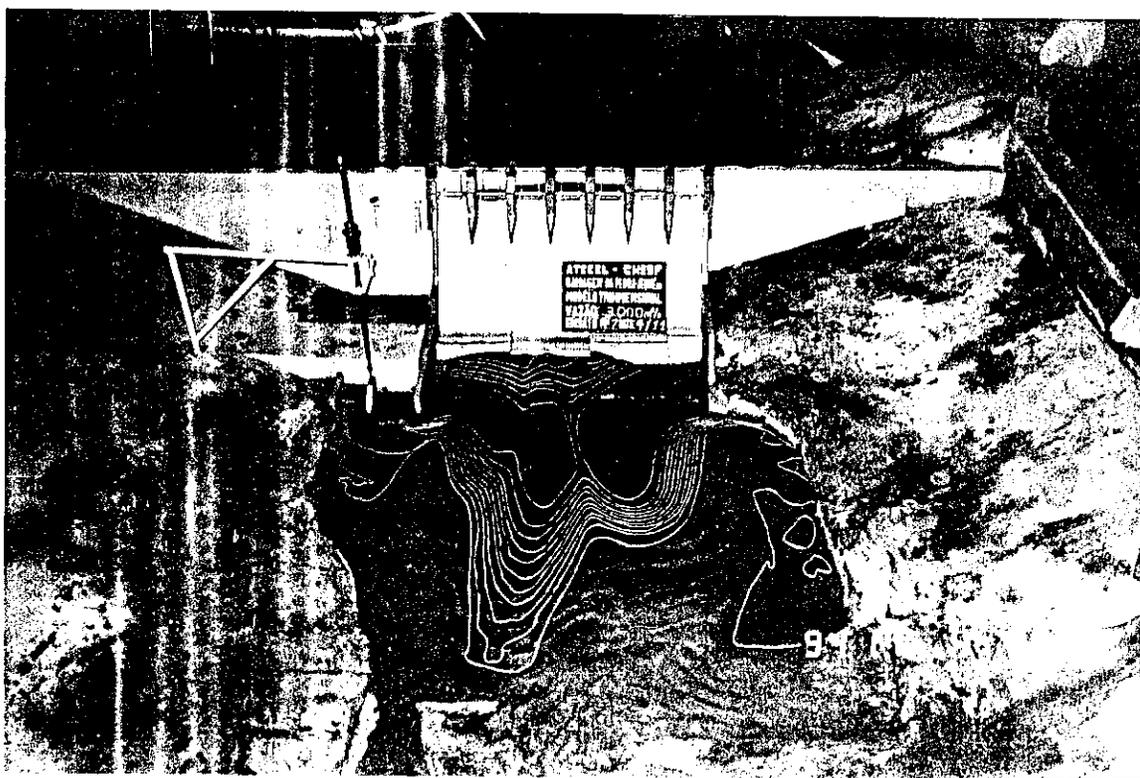


Foto 10 - Vista geral mostrando o padrão de erosão para uma
vazão de 3000 m³/s

Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Disciplina: Modelos Reduzidos de Obras Hidráulicas e Rios

Professor: Manoel Gilberto de Barros

Aluno: Claudiney Oliveira de Sousa

Barragem da Pedra - Modelo Tridimensional

Ensaio nº 06 - Data: 03/15/94 - Início: 16:30h - Término: 17:30h
Zero do Vertedor: 140 mm
Leitura da Ponta Linimétrica: 176,2 mm
Carga do Vertedor Retangular: 26,2 mm
Vazão do Modelo: 30,90 l/s
Tomada da Turbina: 0,25 l/s
Tomada das Descargas de Fundo - fechada

Comportas	1	2	3	4	5	6	7
Aberturas(cm)	2	2	2	2	2	2	2

Fluxo à Montante:

Zero da Ponta: 190 mm - **Cota de Referência: 220 mm**
Leitura: 277,3 mm - **Cota: 230 + 3,28 = 233,28 mm**

Fluxo à Jusante:

Zero das Pontas: - Ponta 1: 190 mm - Cota de Referência: 220 mm
- Ponta 2: 190 mm
Leituras: - Ponta 1: - Cotas: - Ponta 1:
- Ponta 2: - Ponta 2:

Condições de Fluxo à Montante

Fluxo de aproximação:
 - Maior fluxo de circulação ocorre na região de aproximação
 - não há maior turbulência nem dêmia comparada ao fluxo de transição
 -
 -

Condições de Fluxo à Jusante

Fluxo de Jusante:
 - Devido a selina há uma corrente mais alta, favorecendo o fluxo
 de alta velocidade para a região de jusante e para a corrente secundária
 - tudo assim em condições críticas de escoamento
 - quando
 - corrente no canal nos 300
 -

Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Disciplina: Modelos Reduzidos de Obras Hidráulicas e Rios

Professor: Manoel Gilberto de Barros

Aluno: Claudiney Oliveira de Sousa

Barragem da Pedra - Modelo Tridimensional

Ensaio nº 09 - Data: 04/11/94 - Início: 23.00 h - Término: 12.00 h
Zero do Vertedor: 280 mm
Leitura da Ponta Linimétrica: 220 mm
Carga do Vertedor Retangular: 260 mm
Vazão do Modelo: 20.50 l/s
Tomada da Turbina: 0.50 l/s
Tomada das Descargas de Fundo - 1.20 l/s

Comportas	1	2	3	4	5	6	7
Aberturas(cm)							

Fluxo à Montante:
Zero da Ponta: - Cota de Referência:
Leitura: 205.6 mm - Cota:

Fluxo à Jusante:
Zero das Pontas: - Ponta 1: - Cota de Referência:
- Ponta 2:
Leituras: - Ponta 1: - Cotas: - Ponta 1:
- Ponta 2: - Ponta 2:

Condições de Fluxo à Montante
Fluxo de aproximação:
- Ocorrem vórtices em todos os vértices das comportas (2 a 3), sendo que na comporta 2 vórtice à direita e esquerda, na comporta 3 vórtice à direita, nos demais vértices a esquerda

Condições de Fluxo à Jusante
Fluxo de Jusante:
- Detecção de turbulência nos comportas 3, 2, 6 e 7
- Fluxo de circulação à esquerda.
- Formação de vórtices à esquerda e à direita

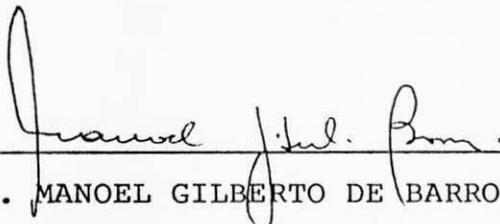
A N E X O 6

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
ÁREA DE ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS
Av. Aprígio Veloso, 882 - Caixa Postal 508
58.100 - Campina Grande - Pb

DECLARAÇÃO

Declaro para os devidos fins que CLAUDINEY OLIVEIRA DE SOUZA frequentou como ouvinte, ao Tópico Especial em Recursos Hídricos "MODELOS REDUZIDOS DE OBRAS HIDRÁULICAS E RIOS", ministrado como uma disciplina do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, no período compreendido entre 05/10/94 e 31/10/94, com uma carga horária de 30 horas/aula.

Campina Grande, 26 de janeiro de 1995



Prof. MANOEL GILBERTO DE BARROS
Professor da Disciplina