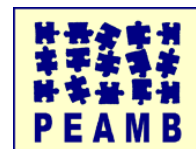




Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Centro de Tecnologia e Ciências
Faculdade de Engenharia
Departamento de Engenharia Sanitária e do Meio Ambiente
Mestrado em Engenharia Ambiental
Modalidade: Dissertação



ESTUDOS DE PESQUISA APLICADA EM MODELO REDUZIDO DE BARRAGEM
MÓVEL AUTOMÁTICA

Vera Lúcia Jardim Pitta

Orientador: Adacto Benedicto Ottoni

Co-orientador: Elmo Rodrigues da Silva

Rio de Janeiro

2002

ESTUDOS DE PESQUISA APLICADA EM MODELO REDUZIDO DE BARRAGEM
MÓVEL AUTOMÁTICA

Vera Lúcia Jardim Pitta

Trabalho Final submetido ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Aprovada por:

Prof. Adacto Benedicto Ottoni, D.Sc - Presidente
(PEAMB/ UERJ)

Prof. Dr. Elmo Rodrigues da Silva, D.Sc
(PEAMB/ UERJ)

Prof. Theophilo Benedicto Ottoni Netto, D.Sc
(UFRJ)

Rio de Janeiro

2002

PITTA, VERA LÚCIA JARDIM

Estudos de Pesquisa Aplicada em Modelo
Reduzido de Barragem Móvel Automática
[Rio de Janeiro] 2.002

xi, 71 p. 29,7 cm (FEN/UERJ, Mestrado,
Programa de Pós-graduação em
Engenharia Ambiental – Controle da
Poluição Urbana e Industrial, 2002).

Dissertação – Universidade do Estado do Rio
de Janeiro – UERJ

1. Pesquisa Aplicada em Modelo
Reduzido.

2. Barragem Móvel Automática.

3. Controle de Níveis D'água Fluviais.

4. Regeneração Ambiental.

5. Engenharia Ambiental.

I. FEN/UERJ II. Título (série).

AGRADECIMENTOS

Na realização deste trabalho contei com a colaboração e apoio dos que me cercavam e que foram fundamentais neste meu curso. A eles o meu reconhecimento e gratidão.

Agradeço a minha irmã Teresa Cristina e ao meu sobrinho Guillaume pelo apoio, carinho e incentivo neste período tão difícil.

Aos meus orientadores, Adacto Benedicto Ottoni e Elmo Rodrigues Silva, meus agradecimentos pela orientação, dedicação e incentivo.

Agradeço também a equipe desta pesquisa pela oportunidade de participar de um projeto tão relevante e oportuno, tendo em vista a importância dos recursos hídricos para o mundo neste século.

Meus respeitosos agradecimentos “in memoriam” do Professor Breno Marcondes Silva pelos ensinamentos profissional e ético e a minha mãe, Olga, pelo exemplo de vida que me foi legado.

RESUMO

ESTUDOS DE PESQUISA APLICADA EM MODELO REDUZIDO DE BARRAGEM MÓVEL AUTOMÁTICA

O presente Projeto de Pesquisa refere-se a um estudo realizado através de Convênio da UERJ/FINEP dentro do Programa RECOPE. O Projeto consiste na realização de estudos em modelo reduzido visando a utilização de um tipo inovador de obra civil - barragem móvel automática - para aplicações objetivas e de baixo custo, que não causa impactos ambientais negativos, não afeta o regime hidrossedimentológico do rio e não gera consumo de energia, aproveitando o efeito energético do escoamento fluvial natural. Esta obra hidráulica tem características próprias de: controle em condições admissíveis do N.A. a montante nas situações de vazões médias e pequenas (não afetando os N.A's nas cheias naturais); praticamente não altera o transporte de material sólido fluvial; ser robusta, de fácil manejo hidráulico e de conservação/ manutenção adequadas; não dispõe de motorização, ou seja, a energia do próprio escoamento fluvial basta para operá-la automaticamente (não é necessário consumo de energia e de pessoal para operação). Este tipo de obra hidráulica possui, portanto, várias aplicações na área da Engenharia de Recursos Hídricos.

Palavras-Chave: Barragem Móvel Automática; Modelo Reduzido; Laboratório de Hidráulica; Controle de Níveis D'água Fluviais; Regeneração Ambiental.

ABSTRACT

STUDIES OF APPLIED RESEARCH IN PHYSICAL MODEL OF AUTOMATIC MOBILE DAM

This research Project was developed from an accord among UERJ/FINEP/BID in the RECOPE Program. The Project consists in the studies performance in physical model of a new kind of Engineering work - The Automatic Mobile Dam – to be used in practical applications and at a low cost, doesn't have negative environmental impacts, it doesn't affect the river hydrosedimentological regime, and doesn't have energy consumption, using the energetic conditions of the natural river flow. This Hydraulic Civil Work has its own characteristics of: water level control in different conditions upstream in low and medium flow situations (doesn't affecting the water levels in natural floodings); it usually doesn't alter the river sediment transport; be strong, and of easy hydraulic handling and suitable conservation/maintenance; it doesn't have any kind of motorization, what means that the own river flow energy is enough to operate this civil work (it isn't necessary energy consumption and human work to operate the system). This kind of civil work has, therefore, several applications in the area of Water Resources Engineering.

Key Words: Automatic Mobile Dam; Physical Model; Laboratory of Hydraulics; Fluvial Water Level Control; Environmental Regeneration.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	2
CAPÍTULO 1	7
1.1- Pesquisas em modelos hídricos dinâmicos.....	9
1.2. Características Construtivas e Operacionais do Modelo	11
CAPÍTULO 2- METODOLOGIA.....	14
2.1- Ajustamentos da Estrutura	15
2.2- Determinação das Curvas-Chave de Controle dos Níveis D'Água de Jusante.....	16
2.3 – Obras de Proteção de Erosão a Jusante da Estrutura	18
2.4– Ensaio de Caracterização Hidráulica da Estrutura.....	19
CAPÍTULO 3- RESULTADOS	22
3.1- RESUMO DAS ATIVIDADES DE SENSORAMENTO ELETRÔNICO.....	31
CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	34
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	37
ANEXOS.....	38

LISTA DE FIGURA

FIGURA 1- Layout do sistema de instrumentação para aquisição dos dados medidos nos ensaios em modelo reduzido da Barragem Móvel Automática.....	10
---	----

LISTA DE TABELAS

TABELA 1- Valores da pressão média pontual válida para cada sensor, representativa das variações de pressão devidas aos escoamentos q variando de 0,25 a 3,50 m ³ /s.m.....	29
TABELA 2- Sensores eletrônicos utilizados no Projeto.....	32

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1 – Vista de montante para jusante do modelo sem água.	38
Anexo 2 - Vista de jusante para montante do modelo sem água.....	38
Anexo 3 – Vista do modelo da Barragem Móvel Automática armada.....	39
Anexo 4 – Vista do modelo da Barragem Móvel Automática tombada.....	39

LISTA DAS ESTAMPAS

ESTAMPA 1	Traçado do Perfil Joukowski	51
ESTAMPA 2	Croquis do perfil do painel móvel (pesquisado na década de 50)	52
ESTAMPA 3	Croquis das características geométricas da Barragem Móvel Automática isolada	53
ESTAMPA 4	Representação esquemática de um sistema de Barragem Móvel Automática implantada em série (cascata) ao longo do estirão fluvial da rede potamográfica	54
ESTAMPA 5	Croquis da configuração do lay-out dos estudos implantados no modelo – planta e cortes típicos	55
ESTAMPA 6	Croquis do projeto do modelo – planta e cortes típicos.	56
ESTAMPA 7	Croquis de configuração da alternativa inicial da Barragem Móvel Automática	57

ESTAMPA 8	Croquis da configuração da alternativa da Barragem Móvel Automática otimizada	58
ESTAMPA 9	Posições relativas dos controles hidráulicos a jusante pesquisadas no modelo.	59
ESTAMPA 10	Croquis de configuração final do sistema constituído por Barragem Móvel Automática otimizada e estruturas de proteção da erosão a jusante (alternativa 1) (protótipo).	60
ESTAMPA 11	Croquis com posicionamento dos pontos onde foram medidas as grandezas hidráulicas inerentes à pesquisa.	61
ESTAMPA 12.1	Valores das Grandezas Hidráulicas Medidas no Modelo – Curva-Chave de Jusante “A”.	62
ESTAMPA 12.2	Valores das Grandezas Hidráulicas Medidas no Modelo – Curva-Chave de Jusante “B”.	63
ESTAMPA 12.3	Valores das Grandezas Hidráulicas Medidas no Modelo – Curva-Chave de Jusante “C”.	64
ESTAMPA 13	Dados Característicos dos NA’s em Seções de Medição Localizadas a Jusante do Barramento – Curva-Chave de Jusante “A”; Curva-Chave de Jusante “B”; Curva-Chave de Jusante “C”.	65
ESTAMPA 13.1	Gráfico das Linhas D’água a Jusante da Barragem Móvel.	66
ESTAMPA 14	Croquis do Posicionamento dos Sensores de Pressão Instalados no Corpo do Barramento.	67
ESTAMPA 15.1	Análise Comparativa da Variação de Pressão em Sensores Instalados no Barramento – Curva-Chave de Jusante “A”.	68
ESTAMPA 15.2	Análise Comparativa da Variação de Pressão em Sensores Instalados no Barramento – Curva-Chave de Jusante “B”.	69
ESTAMPA 15.3	Análise Comparativa da Variação de Pressão em Sensores Instalados no Barramento – Curva-Chave de Jusante “C”.	70

LISTA DE ABREVIATURAS

BMA	Barragem Móvel Automática
N.A.'s	Níveis d'água
DNOS	Departamento Nacional de Obras de Saneamento
P	Coefficiente de perenidade de enchente
p	Coefficiente de perenidade de estiagem
m	Coefficiente de amplitude máxima
rH	Rendimento hidrológico da bacia
NA_M	Nível d'água de jusante
NA_j	Nível d'água de jusante
ΔNA	Desnível montante-jusante
Δh	Perda de carga provocada pelo sistema da barragem móvel automática
ÂNG	Ângulo de tombamento da barragem
%e	Percentuais de dissipação de energia
q	Vazão por metro de largura efetiva do barramento ensaiado
c.g.	Centro de gravidade
NA_{JR}	Nível d'água de jusante de referência
q_R	Vazão específica de referência
Q_R	Vazão de referência
L	Largura da barragem
H_{JR}	Desnível entre a cota do eixo de rotação do barramento e o nível de referência da curva-chave
H_B	Altura do corpo da barragem
P₁ P₅	Pressões medidas pelos sensores no corpo do barramento
P_M	Pressão relativa média
OMC	Operação, manutenção e conservação

INTRODUÇÃO

A ocupação antrópica a partir de empreendimentos localizados nos espaços físicos da Bacia corresponde a um processo necessário para o desenvolvimento e bem-estar das comunidades. Neste processo evolutivo de ocupação dos espaços disponíveis da Bacia, as características físicas e ambientais desta tendem com o tempo a sofrer modificações. Este histórico da evolução ambiental que se dá nas Bacias em função da sua ocupação pretérita, indica tendência de desequilíbrio e degradação gradual do regime hídrico dos cursos d'água, conforme vem acontecendo com diversas Bacias Brasileiras e no mundo.

Considerando a importância da água para o desenvolvimento da Bacia e dos processos produtivos nela contidos, a tendência é cada vez mais se implementar Planos que viabilizem intervenções na Bacia, levando em conta promover os ajustes hídricos necessários, considerando, nestes Planos, intervenções cuja metodologia se baseie numa visão abrangente e holística da Bacia.

A recente Lei 9433 (Lei das Águas), que, entre outros enfoques, trata da Política Nacional de Recursos Hídricos, incentiva a utilização racional e integrada dos recursos hídricos, agregando aos mesmos valor econômico como uma forma de incentivar o seu uso de acordo com o Desenvolvimento Sustentável. O Governo Federal, através do Legislativo, procurou, assim, demonstrar sua preocupação a respeito dos recursos hídricos disponíveis no Território Nacional, já que a água constitui fator limitante dos mais significativos do planeta e às comunidades viventes por ele suportadas, notadamente as humanas.

Intervenções baseadas na regularização hídrica do regime de calha fluvial representam uma das formas de ajustar os escoamentos dos cursos d'água que apresentam regime alterado, tendo em vista otimizar, gradativamente, os processos de geração dos deflúvios mínimos ou mesmo de intermitência de deflúvios (secas) e os de formação de enchentes, o que vai resultar na melhora gradual do regime hidrológico do curso d'água, e, como conseqüência, nos indicadores quantitativos deste (Coeficientes de Perenidade; Rendimento Hidrológico).

A Pesquisa desenvolvida a partir do Programa REHIDRO – Sub-Rede 2, no Projeto Específico da UERJ (Convênio UERJ/FINEP/BID), apresenta metodologias de intervenção na calha fluvial com vistas à melhoria do seu regime hídrico visando valorizar o meio ambiente, ao mesmo tempo que faculta melhores condições para o aproveitamento hídrico conseqüente.

O Projeto de Pesquisa se relaciona a uma estrutura hidráulica de calha fluvial, denominada de Barragem Móvel Automática, que tem por objetivo promover a regularização do regime dos níveis d'água (regularização dos N.A's), principalmente nas condições

hidrológicas de vazões mínimas e médias do escoamento fluvial. A pesquisa visa avaliar o desempenho hidráulico da estrutura para diversas condições de escoamento relacionadas às vazões afluentes e ao controle dos níveis d'água de montante. As intervenções na calha fluvial, a partir da utilização destas estruturas, visam viabilizar as seguintes condições relacionadas ao manejo dos escoamentos fluviais:

- aumento do nível d'água em estirões fluviais com insuficiência de tirante, visando atender ao calado da navegação fluvial, ou então garantindo espelho d'água mínimo compatível com condicionantes estéticos/sanitários dos escoamentos de calha em regime de águas baixas (estiagens);
- a elevação do nível d'água a montante da calha fluvial sob controle da estrutura para vazões baixa e média tende a promover um escoamento de percolação nas margens, na direção do curso d'água para o lençol freático, favorecendo o incremento da acumulação marginal de água em área pouco sujeita à evaporação (reservação subterrânea), elevando, outrossim, como consequência, o nível d'água da franja capilar do lençol freático, o que é vantajoso aos processos de irrigação sub-superficial, além de influenciar no escoamento hipodérmico;
- Pouco afeta os níveis d'água de enchentes, situação em que o barramento se encontra desarmado (resistência mínima a escoamentos de cheia).

Como consequência dos condicionantes relacionados ao manejo hídrico dos escoamentos de calha sob influências das estruturas acima referidas, a tendência será: um maior tempo de acumulação de água dentro da calha fluvial; aumento das disponibilidades hídricas para sub-irrigação de culturas e da vegetação ciliar pela elevação da franja capilar do lençol freático; aumento das disponibilidades hídricas para captações diretas visando o abastecimento d'água; valorização sócio-econômica da região da Bacia sob intervenção da estrutura, com incentivo ao turismo e comércio local; o amortecimento dos picos de enchente; a redução dos processos erosivos marginais da calha fluvial; e menor efeito de resistência de forma a escoamentos de cheia. Os escoamentos controlados pelos barramentos automáticos facultam, outrossim, maior mobilidade aos transportes de material sólido e a condicionantes hidrobiológicos dos escoamentos fluviais. Apresentam, também, menores custos de construção e maior flexibilidade de implantação e de desembolsos, envolvendo custos ambientais desprezíveis.

Em 1956, no II Congresso Geral de Transportes, em Porto Alegre, RS, foi apresentada monografia intitulada “Barragem Móvel Automática, novo tipo de estrutura hidráulica pesquisada experimentalmente pelo Laboratório Hidrotécnico Saturnino de Brito; Rio de Janeiro”.

Os estudos e pesquisas foram desenvolvidos na época de acordo com o seguinte sumário: Apresentação; Histórico; Montagem dos Ensaios; Fixação das Escalas; Desenvolvimento dos Ensaios; Mecanismo de Funcionamento da Barragem; Conclusões.

Os trabalhos experimentais iniciais resultaram de contrato com o extinto DNOS, visando pesquisar novo tipo de obra hidráulica que tivesse a finalidade de atender ao saneamento do leito do rio Cachoeira, na cidade de Itabuna, BA, através de acumulação hídrica de pequeno porte ($H \cong 2m$) que fosse automaticamente controlada por pequeno barramento capaz de afogar a calha fluvial urbana em períodos de estiagem (controle sanitário) sem promover extravasamentos em períodos chuvosos normais (cheias). Ao mesmo tempo, tal obra hidráulica promoveria espelho d'água urbano com valor paisagístico / urbanístico. Não chegou a ser implantada.

Sabe-se que as Barragens Móveis convencionais apresentam vários inconvenientes, entre os quais destacamos: problemas com transporte sólido fluvial; mecanismos de comando complicados e de difícil conservação; e são estruturas pouco robustas.

A partir do Perfil Joukowsky, mostrado na ESTAMPA 1, foi pesquisado durante 2 anos um perfil de Barragem Móvel Automática que, aproveitando o efeito energético do escoamento fluvial natural, satisfizesse aos condicionantes de: - controlar em condições admissíveis o N.A. a montante nas situações de vazões médias e pequenas; pouco afetar os N.A's nas cheias naturais; pouco afetar o transporte do material sólido fluvial; ser robusta, de fácil manejo hidráulico e de conservação/manutenção adequadas; não dispor de motorização, seja: a energia do próprio escoamento fluvial bastaria para operá-la automaticamente (não será necessário consumo de energia para operá-la).

De acordo com o exposto, o emprego dessa obra hidráulica de pequeno porte poderá ser útil para: aproveitamentos ao fio d'água que necessitem de regularização de níveis d'água (tomadas d'água; derivações; etc.); sistemas de irrigação e urbanização de cidades ou de estirões fluviais degradados; navegação interior através de passos de navegação e/ou eclusas de baixa queda.

As Barragens Móveis Automáticas poderão ser utilizadas para fins de regularização parcial de deflúvios em cursos d'água, já que afetam, quando implantadas em "cascata" ao longo dos seus perfis longitudinais, as características hidrológicas dos escoamentos fluviais.

A Barragem Móvel Automática agora estudada, apresenta as seguintes características (ESTAMPAS 2 e 3), confirmando em grande parte os conceitos básicos dos estudos realizados na década de 1950:

- Forma geométrica prevendo resistência hidráulica mínima ao escoamento fluvial;

- Contrapeso inferior constituído por um cilindro maciço de ferro fundido e tendo por finalidade influenciar o momento de tombamento e endireitamento da Barragem Móvel;
- Mancais de apoio clássicos de eixo de rotação, engastado no maciço de concreto da Barragem, embutidos em caixa de rolamentos a prova d'água embasados em pequenos montantes de concreto espaçados de 5,50m compostos com os pilares de concreto intermediários e encontros marginais;
- Calha metálica contínua ao longo de todo o desenvolvimento dos painéis móveis da barragem e constituída por duas chapas metálicas dispostas conforme mostram as ESTAMPAS 2 e 3, as quais são solidárias ao contrapeso inferior de concreto por intermédio de contraventamento de chapas de aço verticais espaçadas de cerca de 1m;
- Chapa com curvatura acentuada, colocada na extremidade superior da calha metálica referida e disposta na continuação da parede de montante da calha descrita anteriormente;
- Rebaixos na parte superior na chapa metálica referida, tendo por finalidade facilitar a ventilação do paramento de jusante da Barragem durante certas fases de funcionamento da mesma;
- Lemes superiores constituídos por chapas metálicas convenientemente contraventadas e enrijecidas, os quais são localizados na extremidade superior dos painéis móveis, solidários à chapa metálica que constitui o paramento de montante da Barragem, bem como à crista metálica dos painéis;
- Declividade da laje de concreto do piso a montante da Barragem. A declividade inicial de 1:20 provoca uma expansão da corrente líquida pouco antes da mesma atingir a Barragem. Segue-se uma contra-declividade de 1:5 a montante e junto à Barragem, que tem por finalidade concentrar os filetes líquidos sobre a Barragem Móvel com o objetivo de uniformizar os agentes hidráulicos que vão atuar nos painéis da estrutura;
- Pequenos anteparos de concreto com dispositivo de vedação (batente de chumbo ou madeira), colocados na laje do piso da Barragem;
- Folga de alguns centímetros, existente entre a parte inferior dos painéis móveis e a laje do piso da estrutura;
- A extensão total da Barragem será fracionada em trechos de 5,50m contendo os painéis móveis modulados, cada trecho possuindo um par de mancais apoiados em pequenos montantes de concreto solidários a pilares convencionais de concreto;

- Grade grossa metálica submersa colocada no piso a montante ao longo de toda a extensão da Barragem e destinada a proteger os painéis móveis, nas ocasiões de enchente, de possíveis impactos de material sólido volumoso transportado pelos escoamentos mais energizados.

As pesquisas realizadas na década de 50 identificaram as seguintes limitações:

- Os estudos e pesquisas foram desenvolvidos com o canal de ensaios de pequeno porte com declividade nula (escoamento sub-crítico; tranqüilo; fluvial); as condições de apoio logístico operacional foram mais modestas;
- As erosões de calhas fluvial na região sob influência da Barragem estudada não chegaram a ser pesquisadas mais detalhadamente, visto que o leito do rio Cachoeira é rochoso;
- Apesar dos painéis do barramento atenderem satisfatoriamente ao controle dos N.A's de montante, como referido nas pesquisas iniciais, constatando-se, assim, o efeito estável de regularização pretendida com a Barragem armada, na posição de transição e tombada, verificou-se, no entanto, que o sistema dinâmico apresentava visíveis vibrações, pequenas deformações e flutuações de pressão que não chegavam a afetar o funcionamento hidráulico da mesma quanto aos valores médios observados. São fenômenos normais em estruturas leves e flexíveis sujeitas a esforços dinâmicos vibratórios, tanto mais significativos quanto maior a esbeltez da estrutura, sua menor inércia e os "braços de alavanca" maiores;
- Não foram, também, pesquisados com maior profundidade a influência do transporte sólido em suspensão e por arrastamento de fundo no comportamento dos painéis móveis em operação; tais influências poderão ser importantes para os serviços de manutenção e conservação desses painéis. Os estudos anteriores se limitaram à verificação qualitativa dos arrastes pela corrente fluvial de pedras maiores, galharias e material flutuante sobre os painéis móveis;
- As pesquisas foram realizadas para as condições de controle do escoamento específicas do rio Cachoeira, na cidade de Itabuna, BA.

CAPÍTULO 1

A ocupação antrópica da Bacia a partir dos empreendimentos (AÇÃO; Desenvolvimento da Bacia) tende com o tempo a afetar suas características naturais físicas e ambientais (REAÇÃO; Impactos Ambientais), devido à necessidade da regularização hidrológica dos recursos hídricos disponíveis. O incremento dos processos erosivos das encostas e calha fluvial e a deterioração da cadeia alimentar suportada pela Bacia são alguns exemplos, dentre vários que persistem, das conseqüências dessa ocupação (impactos ambientais) sobre o ecossistema da Bacia.

Como resultado destes impactos ambientais sobre a Bacia, verifica-se, gradativamente, uma alteração do regime das suas disponibilidades hídricas, em quantidade (sensível redução do rendimento hidrológico promovido pelas perdas d'água e desperdícios; incremento dos processos de inundação nas enchentes) e em qualidade (poluição hídrica). Os coeficientes indicadores do regime hidrológico dos cursos d'água (coeficientes de enchente "P"; de estiagem "p"; de amplitude máxima "m") tendem ao longo do tempo, devido às atuações impactantes geradas pelo ser humano, a se afastar da unidade, assim como os indicadores sedimentológicos de qualidade de água (Sólidos Totais; Sólidos Dissolvidos; Sólidos em Suspensão), inorgânicos (pH e Metais Pesados) e orgânicos (DBO²⁰₅; Nitratos; Nitritos; etc.) tornarem-se também gradativamente alterados, em comparação com os teores de um curso d'água natural equivalente, porém sem contaminação.

Por outro lado, o recurso natural "água" representa a principal fonte de insumos para instalação dos empreendimentos (água útil: para uso industrial; para agroindústrias; para geração de energia e navegação fluvial; para abastecimento e lazer) e para manutenção do equilíbrio biótico das cadeias vitais inerentes à Bacia.

Existe, portanto, a conveniência em ajustar o regime hídrico dos cursos d'água afetados por atuações antrópicas, tornando-o o mais regular possível. Seja qual for a modalidade do uso / controle da água (água útil, a necessária para instalação dos empreendimentos produtivos e para manutenção da estabilidade ambiental da Bacia; ou a água nociva relacionada à poluição, ao encharcamento do solo e aos escoamentos de enchente), a regularização fluvial representa, ao longo do tempo, uma das formas de ajustar os escoamentos dos cursos d'água para melhorar a operacionalidade no uso das riquezas naturais disponíveis na Bacia. Isso se realiza otimizando processos de ajustamento de deflúvios mínimos ou mesmo de intermitência de deflúvios disponíveis (secas, em períodos de

estiagem) e de inundações (enchentes, em períodos chuvosos), com a conseqüente melhora do rendimento hidrológico promovido pelo manejo hídrico na Bacia.

As intervenções antrópicas na calha fluvial a partir da utilização da Barragem Móvel Automática objetivam atender à melhoria da operacionalidade do curso d'água (fluvio-morfologia; declividade dos N.A.'s; níveis d'água e vazões escoadas), resultando, ao longo do tempo, na progressiva otimização gradual dos Coeficientes de Perenidade dos cursos d'água (P, p, m) e do rendimento hidrológico da Bacia (rH), facultando:

- tendência a maximização das vazões em períodos de estiagem;
- ao aumento do tempo de concentração do escoamento de calha fluvial;
- tendência a minimização das vazões de pico de cheia, com o fim de controlar as inundações e aumentar o tempo de base do hidrograma efluente;
- a minimização de perdas d'água por evaporação, com a redução da área exposta (bacia hidráulica) a processos evaporativos;
- ao reforço de acumulação de água nos mantos porosos localizados nas margens, principalmente para situações de baixas e médias vazões. Esta água acumulada ao longo do tempo favorece o efeito de reservação nos períodos de estiagem, ajustando, assim, gradativamente, o regime de calha fluvial, no sentido de reforçar vazões mínimas nas estiagens;
- ao aumento do tempo de acumulação dos escoamentos de calha fluvial;
- ao aumento do tempo de propagação dos escoamentos de enchente.

Do ponto de vista ambiental, a regularização do regime hídrico baseada na intervenção da calha fluvial por Barragem Móvel Automática apresenta as seguintes características mais importantes:

- em períodos chuvosos, a estrutura opera afogada (desarmada), pouco interferindo nos escoamentos de enchente;
- pouco afeta condicionantes relacionados à hidrobiologia e sedimentologia do curso d'água;
- tende a estabilizar os processos erosivos marginais da calha fluvial no estirão fluvial remansado pela estrutura, atuando favoravelmente à vegetação ciliar e às acumulações hídricas marginais.
- tende a favorecer o regime hidrossedimentológico do curso d'água;
- minimiza perdas d'água e desperdícios.

As obras de regularização em longo estirão fluvial são constituídas por Barragens Móveis Automáticas em série (em "cascata"), com alturas reduzidas, contidas no leito menor do rio e implantadas principalmente nos trechos fluviais médio e inferior da rede

potamográfica, cuja localização vai depender do perfil longitudinal do curso d'água. Elas, quando armadas, tendem a controlar o escoamento retendo-o o maior tempo possível dentro da calha fluvial (aumento do tempo de acumulação do escoamento de calha). Estas obras diferem das Barragens tradicionais, pois naquelas só há o controle automático e predominante dos N.A.'s nas condições mais freqüentes de deflúvios de pequeno e médio porte do ano hidrológico; para as grandes vazões de enchente, com N.A.'s maiores, elas tendem a operar afogadas pelo escoamento (desarmadas), promovendo menor efeito regularizador dos N.A., não gerando, assim, grandes áreas inundadas (bacia hidráulica) expostas a processos evaporativos. Atuando como pequenas obras civis capazes de controlar escoamentos mais freqüentes e impactantes, minimizando vazões de "pico", elas realizam, com menor custo de implantação e ambiental, efeito global favorável quanto ao manejo hídrico na calha fluvial, como mostrado na ESTAMPA 4. Acresce que, o sistema em série ("cascata") das Barragens Móveis Automáticas, reiteramos, pouco afeta o corte hidrobiológico e sedimentológico dos escoamentos fluviais. Além disso, tal "cascata" tende a estabilizar os processos erosivos marginais no estirão fluvial sob sua influência.

1.1- Pesquisas em modelos hídricos dinâmicos

Será exposto de forma sucinta o desenvolvimento dos estudos experimentais realizados em Modelo Reduzido de estrutura individual da Barragem Móvel Automática e do seu Sistema de Proteção de Erosão a Jusante. Para tal, aproveitou-se, de uma forma geral, os estudos e pesquisas desenvolvidos anteriormente, mormente nos aspectos básicos iniciais relacionados às teorias da análise dimensional e semelhança dinâmica, bem como aos conceitos genéricos pesquisados e suficientemente esclarecidos nas atividades já relatadas.

Para os estudos de caracterização do comportamento hidráulico da estrutura, foi adotado um Modelo na Escala 1:5, sendo reproduzido, no mesmo, cerca de meio vão da Barragem Móvel Automática com o encontro marginal da margem esquerda.

Os estudos realizados em Modelo Físico consistiram na caracterização da operacionalidade da Barragem Móvel Automática e na definição das obras de proteção contra erosão devido ao manejo dos escoamentos fluviais pela estrutura.

O comportamento hidráulico da estrutura foi observado para diferentes situações de curvas-chave a jusante, de modo a se verificar a performance do funcionamento hidráulico da obra para uma faixa de variação das cotas de N.A.'s de controle de jusante do empreendimento e de vazões afluentes sob regularização de N.A.'s a montante (escoamento de calha). As condições de contorno dos ensaios (INPUT) foram, portanto, as vazões

afluentas a montante da estrutura com níveis d'água regularizados, e as Curvas-Chave de jusante.

Foram ajustados arbitrariamente cinco Curvas-Chave com altimetrias distintas, verificando-se que somente as três inferiores se mostraram compatíveis com a operação automática do barramento.

Para cada uma dessas três Curvas-Chave compatíveis de jusante, foi ajustado, no Modelo, trem de vazões (15 vazões), de acordo com a disponibilidade hídrica da Praça de Ensaio, sendo medidos (OUTPUT):

- nível d'água de montante (NA_M);
- nível d'água de jusante (NA_J);
- desnível montante-jusante (ΔNA);
- perda de carga provocada pelo Sistema (Δh);
- ângulos de tombamento da Barragem Móvel ($\hat{A}ng.$);
- oscilação de pressão em pontos característicos dos painéis móveis do barramento.

O lay-out do sistema de instrumentação com a utilização dos sensores e os dispositivos de aquisição dos dados está mostrado esquematicamente na FIGURA 1.

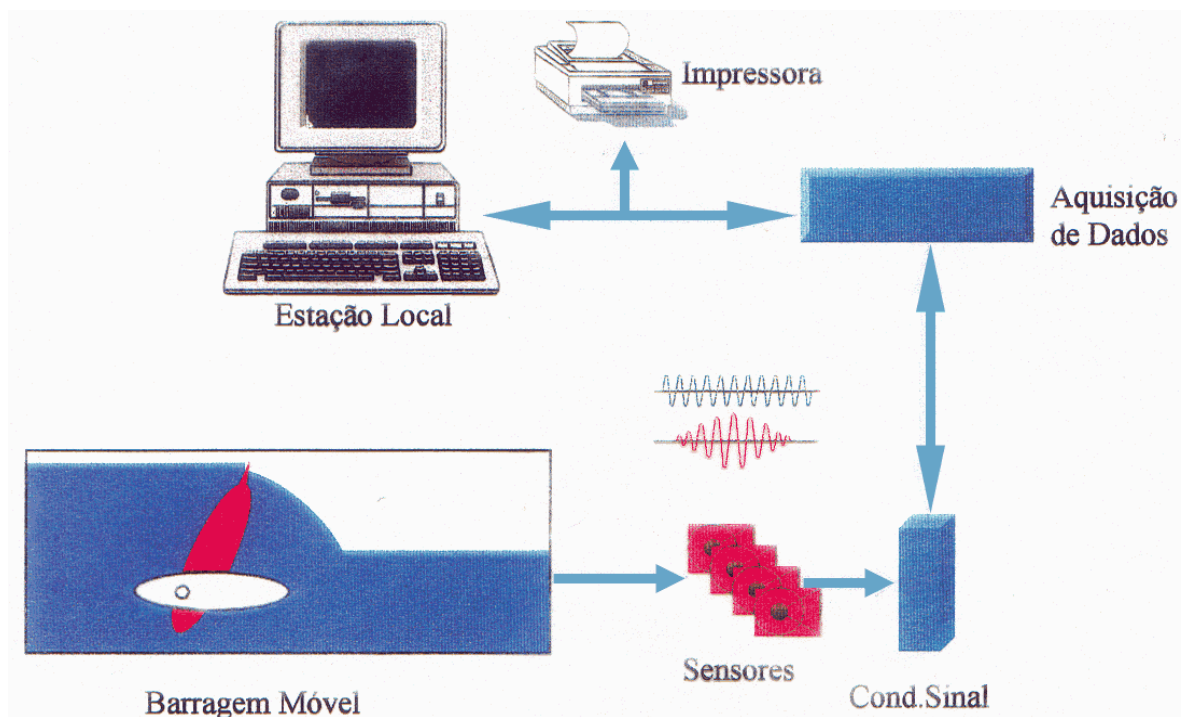


FIGURA 1- Layout do sistema de instrumentação para aquisição dos dados medidos nos ensaios em modelo reduzido da Barragem Móvel Automática.

Com base nos dados levantados nos ensaios, foram determinadas perdas de carga e rendimentos percentuais de dissipação de energia (%e) para diferentes situações operativas do sistema.

A realização de análise das curvas-características obtidas com os dados medidos (NA_M , NA_J , ΔNA , Δh , $\hat{A}ng.$), para cada situação de Curva-Chave a jusante, levou à seleção de algumas vazões características (em número de 4) que caracterizam faixas de funcionamento hidráulico da estrutura.

Para estas vazões, e para as três curvas-chave de jusante selecionadas, levantou-se os N.A's em seções localizadas a jusante da estrutura, bem como a distribuição das velocidades das respectivas correntes líquidas (escoamentos).

Os dados determinados no Modelo, possibilitaram a definição posterior, não considerada no presente trabalho, das seguintes Curvas Características da Barragem Móvel Automática válidas para cada curva-chave a jusante: $q \times NA_M$; $q \times NA_J$; $q \times \Delta NA$; $q \times \Delta h$; $q \times \hat{A}ng.$, $q \times \%e$, onde q representa a vazão por metro de largura efetiva do barramento ensaiado, seja: $m^3/s.pml$ ou $m^3/s.m$.

1.2. Características Construtivas e Operacionais do Modelo

Conforme referido, os estudos experimentais foram realizados em Modelo Reduzido Bidimensional na Escala 1:5, sem distorção, representando cerca de meio vão global das estruturas, como indicado na ESTAMPA 5 e nas FOTOS 1, 2, 3 e 4 em anexo.

O Modelo foi projetado, construído, implantado e operado de acordo com a Teoria da Semelhança Mecânica, sendo obedecida a Semelhança de Froude entre o Modelo e o Protótipo.

Com os estudos anteriores realizados na década de 1950 nas escalas 1:10 e 1:20, torna-se importante na pesquisa atual operar o Modelo com escala geometricamente maior (denominador menor). Desta forma, o “efeito de escala” será minimizado e os estudos e pesquisas relativos às flutuações de pressão, ângulos de tombamento, etc., serão melhor identificados pelo fato dos agentes promotores desses efeitos paralelos serem ampliados de forma mais confiável com o Protótipo. A escolha desta escala está compatível com as conveniências operacionais da Praça de Ensaios onde está instalado o Modelo.

O Modelo, com área efetiva total coberta de cerca 45 m^2 , apresenta as seguintes características operacionais, construtivas e de dimensões (ESTAMPA 6):

- Canal de Ensaios e órgãos de apoio com seção retangular, com largura de 1m, altura do topo das paredes laterais de 4,0m a 2,85m e comprimento total de 25,5m;

- Canal de Medição com Vertedor Bazin (1,10 x 0,35 m) na sua extremidade de montante, com seção retangular do canal de 1,10m x 0,70m e comprimento do canal de 7,4 m, tendo capacidade de medição de cerca de 125 l/s;
- tranquilização no limite de montante do Canal de Ensaios através de três fileiras de colméias de tijolos perfurados (Canal de Aproximação);
- Comporta retangular metálica basculante instalada a jusante, para controle dos N.A's no Canal de Ensaios, com dimensões de 1,0 x 1,2 m;
- Caixa de Fundo Móvel, localizada a jusante da Barragem, para estudos de erosão, com dimensões horizontais de 1m x 2 m;
- Tubulação de Alimentação das vazões afluentes com $\varnothing = 0,40\text{m}$ com registro de controle e "by pass" destinado ao seu refinamento operativo;
- Canal geral de retorno do escoamento para o Reservatório de Acumulação do Laboratório de Hidráulica;
- Dispositivos elétricos de apoio à circulação hídrica, a iluminação das áreas de ensaio e a alimentação dos componentes elétricos e eletrônicos.

O fundo dos escoamentos no Canal de Ensaios com extensão útil de cerca de 10m e seção transversal de 1m x 1,5m foi reproduzido na cota arbitrária ZERO, sendo o RN do Modelo implantado no topo de uma das paredes laterais. O material de construção utilizado foi: - concreto armado, alvenaria de tijolo e trechos de uma das paredes laterais de plexiglass (material transparente) com armações em quadros metálicos devidamente esquadrejados.

A modelagem da estrutura foi feita levando em conta as características geométricas da Barragem Móvel Automática apresentada na ESTAMPA 7 definida, de início, nas pesquisas realizadas na década de 1950, cujos componentes do corpo da estrutura estão indicados na ESTAMPA 2. A estrutura modelada, conforme a ESTAMPA 7, representa a Alternativa Ø a ser otimizada através dos ensaios.

O modelo da Barragem Móvel com os materiais de construção referidos (mesmo c.g.) ficou apoiado em mancais de apoio (rolamentos) do eixo de rotação, assentados nos pilares esquerdo e direito. O escoamento nas proximidades da estrutura ficou encaixado a partir da ombreira que simula a seção de encaixamento do rio, na margem esquerda. A configuração implantada no modelo (ESTAMPA 5) representa pouco menos de meio vão das estruturas, com crista de cerca de 2,0m de extensão (Protótipo).

A altura do corpo da estrutura em relação ao fundo do escoamento no canal de ensaios (cota ZERO) é de 1,25m (Protótipo), existindo no fundo do barramento ranhuras (folga) equidistantes com dimensão de 0,50 x 0,02 m (Protótipo), de modo a facilitar o trânsito do material sólido de menor diâmetro e arenoso carregado pelo escoamento, atuando

parcialmente como passo de descarga sólida desses sedimentos. A altura dos lemes acima da crista da Barragem reforça a altura total da estrutura, que passa a ser de cerca de 2m no protótipo.

Note-se que para a escala adotada para o modelo (1:5), as equações de transferência para as grandezas observadas permitem caracterizar hidraulicamente o protótipo de acordo com a teoria da semelhança dinâmica. De acordo com essa teoria e considerando o mesmo modelo, devidamente adaptado, com outra escala geométrica, digamos (1:10), os mesmos processos operativos adotados nos estudos em laboratório facultarão outros números para o protótipo duas vezes maior levando em conta as mesmas equações de transferência. Seja, por exemplo: - passando da altura do barramento 1,25m (esc. 1:5) para 2,50m (esc. 1:10), o mesmo modelo, apropriadamente ajustado, poderá ser aproveitado para representar protótipo maior. Devido a essa particularidade, há uma certa flexibilidade favorável no uso dos resultados obtidos nos estudos e pesquisas realizadas, devendo, no entanto, serem tomados cuidados com os ajustes geométricos do modelo e com o “efeito de escala”, que é tanto maior quanto menor a escala do modelo.

Na lateral esquerda do canal de ensaios, na seção de encaixamento da estrutura, foi implantado o encontro (ombreira) da margem esquerda, modelado no local, com 0,60m de largura e 3,95m de comprimento (dimensões no modelo). Do ponto de vista hidráulico, ele encaixará o escoamento afluente à estrutura da Barragem Móvel Automática, e, do ponto de vista estrutural e geotécnico, terá a função de conformar a margem e servir de apoio para o eixo de rotação da estrutura. A largura útil do Canal de Ensaios nesta seção (seção de encaixamento) é de cerca de 0,40m (Modelo), e de 1,00m (Modelo) fora da área de encaixamento (ESTAMPA 5).

As características das dimensões mais sugestivas do conjunto Barragem Móvel Automática e Encontro Marginal, conforme instalada no Modelo, são (ESTAMPA 5):

- Barragem (sem os lemes) com 0,25m de altura e 0,40m de largura, apoiada em dois apoios extremos através de eixo de rotação embutido aproximadamente na cota do centro de gravidade da Barragem (Modelo);
- Encontro Marginal (Ombreira) cerca de 0,60m de largura; 1,0m de altura; e cerca de 4,0m de comprimento (Modelo);
- Largura do Canal de Ensaios de 1m fora da área de encaixamento (Modelo);
- Largura do Canal de cerca de 0,40m na área de encaixamento (Modelo);
- Fundo Básico do Canal de Ensaios na cota ZERO;
- Caixa de fundo móvel a jusante da estrutura, com enchimento de pedrisco (material de fundo móvel, não coesivo), até a cota ZERO.

CAPÍTULO 2- METODOLOGIA

A pesquisa foi desenvolvida segundo a seguinte seqüência:

- a) ajustes operativos da estrutura visando aperfeiçoar seu desempenho genérico;
- b) determinação de três curvas-chave compatíveis de controle do escoamento a jusante da Barragem;
- c) pesquisas para determinação das obras de proteção de erosão a jusante da estrutura;
- d) pesquisas para caracterização do funcionamento hidráulico da estrutura.

A Barragem Móvel Automática, alternativa inicial modelada e pesquisada na década de 50, mereceu, nesta pesquisa atual, atenção especial quanto à análise das características de vibração identificadas nos estudos anteriores, conforme mencionado no item 2.3. Nesse sentido, os estudos iniciais atuais indicados em (a) procuraram minimizar as características de vibração da estrutura, através de ajustamentos tentativos de alguns componentes do barramento e do posicionamento do eixo de rotação do barramento, bem como do centro de gravidade do perfil da estrutura, que se mostrou parâmetro significativo. As tentativas nesses ajustes operativos demandaram várias corridas de água e modificações adequadas em alguns componentes do barramento móvel, embora mantidos os conceitos operativos básicos definidos desde as pesquisas desenvolvidas na década de 1950.

A etapa seguinte (b) teve por objetivo identificar faixas de N.A's a jusante compatíveis com as características operacionais no protótipo da estrutura. Os condicionantes ditados pela Curva-Chave do curso d'água afetam o automatismo operacional do barramento.

Os estudos de erosão (c) visaram identificar qualitativamente as características da cratera de erosão provocada pelo escoamento efluente à estrutura de modo a definir o tipo de geometria e de proteção de fundo a se adotar levando em conta ajustar os processos erosivos regressivos nesta região de jusante sujeita a fortes instabilidades de escoamento. Tais processos são devidos aos esquemas hidráulicos dos ajustamentos hidrodinâmicos promovidos pela Barragem, que afetam as características dos escoamentos fluviais locais encaixados na calha do rio.

A caracterização hidráulica da estrutura (d) teve por objetivo analisar, para um trem de vazões afluentes à estrutura, a sua performance quanto à regularização do NA_M ; as influências que os níveis d'água provocam no tombamento e armação da estrutura; as características operativas da estrutura; as tendências de flutuação de pressão no corpo do barramento (painéis móveis); e a distribuição dos escoamentos sobre a estrutura.

2.1- Ajustamentos da Estrutura

Os ensaios atuais de ajustamento operativo tiveram por objetivo não só confirmar os condicionantes funcionais básicos (estudo da década de 1950), bem como otimizar índices operacionais e minimizar as vibrações nos painéis móveis da Barragem Móvel Automática. A estrutura inicial, reiteramos, corresponde a Alternativa definida nos ensaios realizados na década de 1950, conforme ESTAMPA 7. Eles consistiram em colocar no Modelo um trem de quinze vazões específicas (q) variando de 0,250 m³/s.m a 3,500 m³/s.m, com a comporta de controle do NA_J toda arriada, sendo verificado ao longo dos ensaios (várias corridas de água) as características qualitativas de tombamento e de vibração da Barragem .

Os ensaios realizados a partir da Alternativa inicial caracterizaram situações de alguma instabilidade hidrodinâmica do barramento, as quais foram minimizadas por interações através de ajustamentos tentativos no posicionamento do centro de gravidade da estrutura original, em cuja proximidade passa o eixo de rotação da estrutura original, e no balanceamento da estrutura, através do prolongamento em chapa metálica da parte inferior do paramento de montante e no ajuste da forma e da área de exposição dos lemes; também através de manejo tentativo de chapas metálicas do painel móvel.

Na ESTAMPA 8 apresentamos a configuração final da Barragem Móvel Automática melhor ajustada do ponto de vista operacional. Esta atuação de ajustamento concluiu pelos seguintes condicionantes hidráulicos genéricos mais significativos:

- Tombamento (aumento do ângulo de abertura) gradual e progressivo da estrutura com o aumento da vazão afluyente, criando melhor condição de desarme da estrutura;
- Com a redução da vazão afluyente, a estrutura tende à posição de armada (redução do ângulo de abertura), o que se dá também de forma gradual, progressiva e mais lenta;
- Durante as fases de tombamento (desarme) e armação dos painéis móveis da estrutura, foram verificados ligeiros processos de lenta vibração dos mesmos, o que é admissível e de certa forma pode até ser considerado como favorável à lubrificação das caixas dos mancais de apoio do eixo de rotação.

Note-se que os condicionantes qualitativos acima referidos são genéricos, enquanto que os quantitativos poderão e deverão ser ajustados levando em conta dados específicos relativos a cada empreendimento a implantar (seção de encaixamento do barramento; Curva-Chave de jusante).

2.2- Determinação das Curvas-Chave de Controle dos Níveis D'Água de Jusante

Esta pesquisa de fundamental importância, realizada com a estrutura operacionalmente otimizada, buscou identificar faixas de N.A.'s de controle do escoamento a jusante que definirão, no Protótipo, diferentes posicionamentos das linhas d'água dos fluxos repostos à calha fluvial de jusante, visando caracterizar situações hidráulicas diferenciadas quanto ao regime do curso d'água. Justifica-se, assim, a realização de ensaios experimentais com diferentes Curvas-Chave de controle dos níveis d'água de jusante (NA_J) e que, juntamente com a vazão afluente (q , em $m^3/s.m$), representarão as ENTRADAS (INPUTS) aos ensaios de caracterização hidráulica do empreendimento.

A situação "A" corresponde a Curva-Chave a jusante com a comporta de controle de jusante toda arriada (referência da Curva-Chave na cota 0,35m; Protótipo). Os N.A.'s sob interferência desta Curva-Chave serão os mais baixos do curso d'água natural.

Buscou-se identificar novas situações de controle do escoamento a jusante para uma situação do NA_J mais elevado. Desta forma, elevou-se a comporta de jusante de modo a se obter Curva-Chave com referência em cota maior (0,64m; Sit. E; Protótipo). Para essa Curva-Chave, testou-se o trem de vazões (q) de 0,25 $m^3/s.m$ a 3,50 $m^3/s.m$ (15 vazões). Verificou-se que a estrutura tendia ao tombamento a medida que as vazões aumentavam (aumento de enchente); no entanto, com a redução da vazão (decréscimo do processo de enchente), a estrutura não tendia, com a mesma facilidade, às condições originais de armação. O mesmo critério foi adotado para nova Curva-Chave com referência na cota de 0,57m (Protótipo; Sit. D), observando-se os mesmos efeitos, ou seja, a estrutura tendia ao tombamento com o aumento da vazão afluente, porém ela não retornava à posição inicial armada da maneira suave e uniforme com as vazões decrescentes de calha, como verificado na Sit. A (Curva-Chave mais baixa).

Prosseguindo a pesquisa, determinou-se a Curva-Chave a jusante com a referência na cota 0,49m (Sit. C), ensaiando-se o mesmo trem de vazões. Para as condições de níveis d'água de jusante relativas a esta Curva-Chave, considerando-se o trem de vazões (q) de 0,25 $m^3/s.m$ até 3,50 $m^3/s.m$, verificou-se que a estrutura desarmava com o aumento de vazão, e retornando à posição de armada (vertical) com o decréscimo de vazão. Esta situação (situação "C" – da Curva-Chave de jusante com referência na cota 0,49m) correspondeu à situação extrema, tida como favorável, de controle do escoamento de jusante. Nestas condições (Sit. C), os N.A.'s aceitáveis de jusante são os mais elevados.

A posição intermediária (situação "B"), que corresponde a Curva-Chave com referência na cota 0,41m, caracterizou uma situação média aproximada de N.A.'s de jusante.

Verificou-se que, para o mesmo trem de vazões (q) de 0,25 m³/s.m até 3,50 m³/s.m, a estrutura da Barragem Móvel Automática armava (acréscimo de vazões afluentes) e desarmava (decréscimo de vazões afluentes) normal e automaticamente, tal como nas Sits. C e A.

Na ESTAMPA 9 apresentamos o posicionamento relativo dos controles hidráulicos a jusante, caracterizando as Curvas-Chave adotadas para o escoamento, em composição com a altimetria do eixo de rotação da Barragem Móvel Automática. Desta forma, será possível ajustar adequadamente o posicionamento altimétrico do eixo de rotação dos painéis móveis do barramento em relação à Curva-Chave do estirão fluvial do curso d'água a ser controlado. Isso se fazendo através de ajustamento topográfico da seção de encaixamento da Barragem no seu local de implantação, cerca de algumas poucas dezenas de metros a montante da seção da Curva-Chave.

A pesquisa do controle dos N.A's de jusante concluiu:

- a) que o posicionamento altimétrico do eixo de rotação da Barragem se encontra relacionado com a Curva-Chave no local da implantação da mesma;
- b) que a vazão de referência q_R ou Q_R é aquela que dá início do tombamento da Barragem armada (Vazão de Projeto). Ela indicará, na Curva-Chave a jusante, a cota do NA_{JR} (nível d'água de referência na Curva-Chave), que deverá ser compatibilizada com a cota do eixo de rotação do barramento. Tal nível de referência na Curva-Chave deverá situar-se abaixo da cota do eixo de rotação referido;
- c) que o posicionamento aproximado mais adequado para o nível de referência da Curva-Chave em relação a altura do corpo da Barragem, H_B , de cerca de 1,25m, atenda a relação H_{JR} / H_B variando entre 0,100 e 0,212; H_{JR} é o desnível altimétrico entre a cota do eixo de rotação do barramento e o nível de referência da Curva-Chave;
- d) que o posicionamento altimétrico do eixo de rotação da Barragem seja determinado com base na vazão de referência Q_R ou $q_R = Q_R / L$, correspondente, reiteramos, ao início do tombamento dos painéis móveis (Vazão de Projeto). Note-se que, para um mesmo Q_R , pode-se variar q_R de acordo com L ;
- e) que, para a vazão de referência q_R , e atendendo uma generalização preliminar e aproximada, o desnível entre a cota do eixo de rotação da Barragem e o nível de referência do rio a jusante (Curva-Chave) atenda a relação: $H_{JR} / H_B \cong 0,156 \pm 0,056$, sendo o maior valor o mais favorável ao tombamento / armação dos painéis móveis da Barragem. Os dados e valores referidos, obtidos das pesquisas em

modelo reduzido na escala 1:5, fornecem uma informação aproximada, válida para ante-projetos, quando muito para projetos básicos. Deverão ser verificados em estudos em modelo reduzido para cada caso particular de projetos executivos levando em conta os dados topo-batimétricos da calha / terreno marginal e hidrossedimentológicos locais.

2.3 – Obras de Proteção de Erosão a Jusante da Estrutura

Os ensaios para caracterização dos processos erosivos a jusante da estrutura foram realizados para vazão afluyente máxima admitida à estrutura ($q = 3,500 \text{ m}^3/\text{s.m}$), com a comporta de jusante toda arriada, o que corresponde à situação “A”, representando o limite superior dos ensaios sob o ponto de vista de análise da erosão e de dissipação de energia promovidas pela Barragem Móvel Automática. Estes ensaios tiveram por objetivo avaliar as tendências de erosão a jusante da estrutura, para, a partir das características geométricas e de resistência da calha fluvial, propor intervenções que irão minimizar possíveis processos erosivos que possam afetar a fundação do barramento, ou a segurança operativa da estrutura hidráulica.

As características construtivas do Modelo na área a jusante da estrutura dispõe de caixa contendo material de fundo móvel não coesivo (pedrisco ou qualquer outro), possibilitando definir qualitativamente as características geométricas das tendências erosivas provocadas pelo escoamento efluente da estrutura, sob ensaio devidamente controlado.

As corridas d’água foram realizadas com a estrutura da Barragem devidamente ajustada, e, conforme mencionado, para o nível mais baixo da comporta de controle do N.A. de jusante (situação “A” de curva-chave; situação mais desfavorável).

As características iniciais das pesquisas de erosão identificadas no Modelo a jusante da estrutura foram:

- tempo de ensaio: 60 minutos (2:15 horas; Protótipo);
- cratera de erosão (Protótipo):
 - comprimento: 9,50m;
 - largura: 2,00m;
 - profundidade: 0,50m.
- vazão afluyente (q): $3,5 \text{ m}^3/\text{s.m}$;
- NA_j compatível com a curva-chave de jusante de acordo com a situação “A”.

Como o comprimento do processo erosivo foi extenso, e, levando em conta maior segurança operacional, testamos a seguinte simulação de obra a jusante da estrutura:

- Laje horizontal de 4,0m de extensão (Protótipo), imediatamente a jusante da estrutura;
- ao final desta laje, manteve-se fundo móvel não coesivo;
- condições de ensaio:
 - curva-chave de jusante compatível com a situação “A”;
 - vazão afluyente (q): 3,5 m³/s.m;
 - tempo do teste: 2:15 horas (Protótipo).
- cratera de erosão a jusante da laje:
 - comprimento: 6m;
 - largura: 2m;
 - profundidade: 0,75m.

O teste de erosão realizado a partir da substituição de pedrisco por brita 4 (pedra com $\varnothing_{\text{médio}} \cong 25\text{cm}$; Protótipo) a jusante da laje, para $q = 3,5 \text{ m}^3/\text{s.m}$ e para duração de 6:45hs, caracterizou praticamente a eliminação dos processos erosivos a jusante da estrutura. Assim, a configuração final das obras de proteção dos processos erosivos a jusante da Barragem Móvel fica constituída de laje imediatamente a jusante da estrutura, com extensão longitudinal de 4,0m, e fundo de pedra jogada e arrumada com $\varnothing_{\text{méd.}} \cong 25\text{cm}$ imediatamente a jusante da laje, com extensão longitudinal de 6,5m, e profundidade de 1,5m, conforme ESTAMPA 10, que representa o sistema completo constituído pelo barramento ajustado mais as obras de controle de erosão a jusante da estrutura. Para outras Barragens Móveis com H_B distintas da ensaiada ($H_B = 1,25\text{m}$), todas as grandezas geométricas da fossa de controle de erosão e o $\varnothing_{\text{méd.}}$ das pedras de enchimento deverão ter dimensões homólogas em relação à fossa ensaiada.

2.4– Ensaio de Caracterização Hidráulica da Estrutura

As estruturas ensaiadas representam a configuração final do barramento devidamente ajustada, considerando, também, as obras de controle de erosão a jusante.

As pesquisas de caracterização hidráulica deste Sistema foram realizadas a partir do levantamento de algumas grandezas hidráulicas, tendo por objetivo:

- analisar qualitativamente a operacionalidade do Sistema;
- ajustar correlações (Curvas Características Hidráulicas) que identifiquem a performance do Sistema, as quais serão utilizadas no dimensionamento deste;

- analisar qualitativamente as características do escoamento afetado pelo barramento.

Do ponto de vista metodológico, foi adotado o seguinte critério:

- a) pesquisa no Modelo, do trem de vazões (q ; em $m^3/s.m$) de 0,250; 0,375; 0,500; 0,625; 0,850; 1,000; 1,100; 1,250; 1,375; 1,500; 1,625; 2,000; 2,000; 3,000; 3,500 para as situações “A”, “B”, “C” de curva-chave de jusante, sendo medidas as seguintes grandezas (ver posição das seções de medição ao longo do Canal de Ensaio; ESTAMPA 11: - nível d’água a montante (NA_M) medido no Posto de Montante; nível d’água a jusante (NA_J) medido no Posto de Jusante; desnível montante-jusante (ΔNA); ângulo de tombamento do barramento ($\hat{A}ng.$); perda de carga (Δh) entre as seções H e I; flutuações de pressão em 5 pontos (P1 a P5) instalados no barramento (ver ESTAMPA 14);
- b) análise qualitativa, por situação de controle do NA_J (Curvas-Chave de jusante “A”; “B”; “C”), avaliando a tendência de variação das grandezas levantadas no Modelo a partir do tombamento, a medida que varia a vazão (q) afluyente à estrutura;
- c) seleção de vazões características ($q = 0,25; 0,85; 1,625; 3,5 m^3/s.m$) para faixas de funcionamento típicas do barramento;
- d) para as 4 vazões características selecionadas, relativas às faixas típicas de tombamento do barramento, foi levantado o perfil dos N.A.’s, assim como a distribuição das velocidades do escoamento de restrição a jusante da estrutura nas Seções A a G (ver ESTAMPA 11).

Nas ESTAMPAS abaixo relacionadas, apresentamos as informações dos levantamentos no Modelo, conforme metodologia anteriormente referida:

- ESTAMPA 11: Croquis com o Posicionamento das Seções onde Foram Medidas as Grandezas Hidráulicas Inerentes à Pesquisa ao Longo do Canal de Ensaio;
- ESTAMPA 12.1: Valores das Grandezas Hidráulicas Medidas no Modelo – Curva-Chave de Jusante “A”;
- ESTAMPA 12.2: Valores das Grandezas Hidráulicas Medidas no Modelo – Curva-Chave de Jusante “B”;
- ESTAMPA 12.3: Valores das Grandezas Hidráulicas Medidas no Modelo – Curva-Chave de Jusante “C”;
- ESTAMPA 13: Dados Característicos dos NA’s em Seções de Medição Localizadas a Jusante do Barramento – Curva-Chave de Jusante “A”; Curva-Chave de Jusante “B”; Curva-Chave de Jusante “C”;
- ESTAMPA 13.1: Gráfico das Linhas D’água a Jusante da Barragem Móvel;

- ESTAMPA 14: Croquis do Posicionamento dos Sensores de Pressão Instalados no Corpo do Barramento;
- ESTAMPA 15.1: Análise Comparativa da Variação de Pressão em Sensores Instalados no Barramento – Curva-Chave de Jusante “A”;
- ESTAMPA 15.2: Análise Comparativa da Variação de Pressão em Sensores Instalados no Barramento – Curva-Chave de Jusante “B”;
- ESTAMPA 15.3: Análise Comparativa da Variação de Pressão em Sensores Instalados no Barramento – Curva-Chave de Jusante “C”;

As condições operativas ao tombamento dos painéis móveis na fase de transição estão razoavelmente caracterizadas, permitindo a definição das grandezas hidráulicas (N.A.'s ; vazões; ângulos de tombamento; variação das pressões no paramento de montante), levando em conta a vazão de tombamento e a curva-chave de jusante (regime do curso d'água). Quanto ao rearmamento dos painéis móveis nos períodos descendentes das ondas de cheia (que são mais demorados), os ensaios verificaram a redução gradativa da angularidade dos painéis móveis com pequenas oscilações, semelhantemente à fase de tombamento, embora com mais lentidão; nota-se, no entanto, movimentação pouco mais brusca ao final da fase de armação com o painel móvel praticamente armado na posição normal, onde ele fica estabilizado com inclinação para jusante de cerca de 25° , sendo esta considerada a angularidade de zero graus para início de tombamento dos painéis móveis. Note-se que, nessa situação de armação do barramento, é importante a existência de bom arejamento imediatamente a jusante, imposto não só pelo acabamento da crista metálica dos painéis, como, principalmente, pelos lemes regularmente espaçados no topo da Barragem Móvel. No processo de restabelecimento das condições normais de aeração a jusante quando na armação dos painéis, formam-se bolsões de ar instáveis de acordo com as condições de ajustamento dos escoamentos de reposição; tais condições tendem a promover lentas oscilações nos painéis a medida que eles se verticalizam, retornando ao posicionamento normal de Barragem Armada.

CAPÍTULO 3- RESULTADOS

Com base nos dados característicos levantados, conforme ESTAMPAS 12.1 a 12.3, foi desenvolvida análise comparativa das tendências de variação das principais grandezas obtidas nos ensaios realizados no modelo, para as Curvas-Chave de Jusante “A”, “B” e “C”, configurando as Situações A, B e C..

Os dados obtidos possibilitaram indicar conclusões genéricas a respeito do sistema hidráulico constituído pela Barragem Móvel Automática e estruturas de proteção de erosão a jusante.

São os resultados mais sugestivos da pesquisa realizada, com $H_B = 1,25\text{m}$, no protótipo, a seguir resumidos:

- a) A performance do barramento além do controle do NA_M , no que tange ao seu funcionamento, é função da vazão em trânsito no curso d’água e do NA_J , que depende da Curva-Chave de jusante no local da Barragem Móvel. O desnível (H_{JR}) corresponde a diferença entre a cota do eixo de rotação dos painéis móveis e a cota do controle hidráulico a jusante exercido pela Curva-Chave do curso d’água no início do tombamento. Tal desnível, relacionado à definição altimétrica do posicionamento da Barragem, está na faixa de cerca de 0,125 a 0,265 m, com o controle hidráulico da Curva-Chave sempre abaixo do eixo de rotação dos painéis.
- b) O ângulo de tombamento do barramento, função da vazão em trânsito e do NA_J , caracterizado pela Curva-Chave de jusante, cria condições pouco variáveis nos escoamentos controlados a montante (variação de NA_M) e mais instáveis e turbulentos imediatamente a jusante (variação de NA_J) da estrutura. Este funcionamento do barramento caracteriza o empreendimento, a grosso modo, com as seguintes faixas de vazões em $\text{m}^3/\text{s.m}$, para as Curvas-Chave de jusante “A”, “B” e “C”:

- $q \leq$ cerca de $0,850 \text{ m}^3/\text{s.m} \Rightarrow$ barramento praticamente armado;
- $0,850 < q \leq$ cerca de $1,375 \text{ m}^3/\text{s.m} \Rightarrow$ barramento na transição; fase inicial;
- $1,375 < q \leq$ cerca de $1,625 \text{ m}^3/\text{s.m} \Rightarrow$ barramento na transição; fase final;
- cerca de $1,625 < q \leq 3,500 \text{ m}^3/\text{s.m} \Rightarrow$ barramento tombado.

Devido à conjugação complexa de esforços hidráulicos sobre o corpo e lemes da Barragem Móvel, verifica-se significativa sensibilidade operacional dos painéis móveis; daí a dificuldade em caracterizar valores absolutos repetitivos para situações de funcionamento do

barramento, resultando, assim, na conveniência em serem consideradas faixas operativas representativas dos fenômenos observados. Note-se, outrossim, que o sensoramento da angularidade dos painéis móveis indica zero grau de inclinação com os painéis armados apoiados no fundo do canal; nessa posição inicial estável, a inclinação do painel para jusante é de cerca de 25° em relação a vertical.

c) Durante as pesquisas realizadas (ensaios), para cada faixa de vazão específica acima referida (que define as fases operativas do barramento), foram selecionadas as seguintes vazões representativas do escoamento: 0,250 m³/s.m; 0,850 m³/s.m; 1,625 m³/s.m; e 3,5 m³/s.m. Para estas vazões foram determinadas as características do escoamento afetado pela estrutura (velocidades; N.A.'s; vazões; etc.). De forma aproximada, elas são, reiteramos:

- $q = 0,250 \text{ m}^3/\text{s.m} \Rightarrow$ painel armado;
- $q = 0,850 \text{ m}^3/\text{s.m} \Rightarrow$ painel tendente ao início da transição;
- $q = 1,625 \text{ m}^3/\text{s.m} \Rightarrow$ painel tendente ao final da transição;
- $q = 3,5 \text{ m}^3/\text{s.m} \Rightarrow$ painel tombado e afogado.

Tais vazões selecionadas por metro linear de barramento (m³/s.m) definem aspectos sugestivos do funcionamento da Barragem Móvel Automática em seu processo operativo. Elas foram determinadas por observação direta, no Modelo, através de corridas de água variadas e repetitivas, com o fim de caracterizar parâmetros de interesse funcional da estrutura a serem utilizados para fins de estudos e projetos genéricos.

d) Conforme referido em (b) e (c), a performance hidráulica operacional do barramento depende do ângulo de tombamento (angularidade), que varia em função da vazão em trânsito e da Curva-Chave de jusante. Esta performance hidráulica é avaliada com base nas grandezas hidráulicas: NA_M , NA_J , ΔNA , Δh , $\hat{\text{Ang}}$. O ângulo de tombamento ($\hat{\text{Ang}}$) do barramento foi considerado como parâmetro operativo indicando, aproximadamente, as seguintes faixas de vazões que definem estados de funcionamento característicos:

- CURVA-CHAVE “A” (mais baixa):

$q \leq \sim 0,850 \text{ m}^3/\text{s.m}$ (Barragem praticamente armada)

$\sim 0,850 < q \leq \sim 1,625 \text{ m}^3/\text{s.m}$ (situação de transição)

$q > \sim 1,625 \text{ m}^3/\text{s.m}$ (Barragem tendente a tombada)

- CURVA-CHAVE “B” (intermediária):

$q \leq \sim 0,850 \text{ m}^3/\text{s.m}$ (Barragem praticamente armada)

$\sim 0,850 < q \leq \sim 1,500 \text{ m}^3/\text{s.m}$ (situação de transição)

$q > \sim 1,500 \text{ m}^3/\text{s.m}$ (Barragem tendente a tombada)

- CURVA-CHAVE “C” (mais elevada):

$q \leq \sim 0,850 \text{ m}^3/\text{s.m}$ (Barragem armada)

$\sim 0,850 < q \leq \sim 2,000 \text{ m}^3/\text{s.m}$ (situação de transição)

$q > \sim 2,000 \text{ m}^3/\text{s.m}$ (Barragem tombada)

É importante realçar que os ensaios realizados, para as situações de transição, quando o ângulo de tombamento determinado por sensoramento tende a ir a cerca de 55° ou pouco mais (seja: cerca de 80° ou pouco mais, em relação a vertical), as vazões de início e fim do processo inicial de controle do N.A. são de cerca de $0,85 \text{ m}^3/\text{s.m}$ e final da ordem de $1,5 \text{ m}^3/\text{s.m}$ a $2,0 \text{ m}^3/\text{s.m}$. O início do tombamento é praticamente o mesmo com os painéis armados; no final desse tombamento inicial dos painéis, as vazões dependem do posicionamento da Curva-Chave variando de $1,5 \text{ m}^3/\text{s.m}$ a cerca de $2 \text{ m}^3/\text{s.m}$ para a situação C (mais elevada). Reiteramos que nessa última situação, já com os painéis totalmente afogados, o ângulo de tombamento tende a continuar a crescer de maneira lenta a medida que o afogamento aumenta, fato que pode ser atribuído a influência do posicionamento da Curva-Chave a jusante do barramento no processo operativo dos painéis móveis, além de outros fatores menos significativos.

e) Nas faixas de vazões indicadas, verifica-se a seguinte tendência de variação das grandezas hidráulicas para as curvas-chave “A”, “B”, “C”:

e.1) Barragem Armada: à medida que as vazões do escoamento aumentam a partir de um valor mínimo (fim de estiagem), existe uma tendência de pequeno aumento do NA_M controlado a partir da crista vertente dos painéis móveis. Para um determinado NA_J (curva-chave de jusante), gera-se, assim, um desnível montante/jusante (ΔNA), desnível esse que tende a promover o lento tombamento dos painéis a medida que a vazão cresce, com o correspondente aumento gradativo do ângulo de tombamento (lento e gradual desarme da barragem). Esta situação inicial se dá para q da ordem de $0,850 \text{ m}^3/\text{s.m}$, ou seja: - até atingir a ordem de grandeza desta vazão (q), o escoamento afluente tende a aumentar lentamente o

ângulo de tombamento e, também, NA_M ; NA_J ; ΔNA e Δh tendem a ser afetados. Na fase de Barragem Armada, foram observadas as seguintes características:

- Até a descarga próxima do início de tombamento (q app. $0,85 \text{ m}^3/\text{s.m}$), a Barragem permanecerá praticamente armada, tendendo a lento desarme; a continuidade das vazões através da estrutura se fará parte sobre a crista e entre os lemes do barramento (funcionando como vertedouro), permitindo franco arejamento a jusante; outra parte da vazão de transposição escoará sob o corpo da Barragem, funcionando como descarga de fundo, pela folga de alguns centímetros entre a laje de fundo e a extremidade inferior do corpo do barramento, permitindo, assim, continuidade relativa do transporte de material sólido de menor diâmetro e arenosos, e de algumas características hidrobiológicas do curso d'água; bem como uma terceira parcela de vazão através do conduto hidráulico ajustado no paramento de montante dos painéis móveis que descarrega, a jusante, sob a curvatura da crista desses painéis (vide ESTAMPA 2);
- Neste estado de funcionamento, com o aumento de q , as forças provenientes das pressões estáticas e dinâmicas do escoamento, tendem a promover nos painéis um momento de tombamento (em relação ao eixo de rotação), que tende a se opor ao momento de endireitamento, o qual provem principalmente da atuação do contra-peso (vide ESTAMPA 2);
- O paramento de jusante do barramento está sujeito a pressão atmosférica, em virtude dos lemes localizados na crista da barragem fracionarem a lâmina vertente, fazendo com que haja franco arejamento no espaço compreendido entre o paramento de jusante da barragem e esta lâmina vertente ventilada.

e.2) Situação Operativa de Transição: a partir da vazão superior a cerca de $q = 0,850 \text{ m}^3/\text{s.m}$, o desnível (ΔNA) afeta o escoamento controlado pelo barramento, tendendo a gerar aumento mais acentuado do ângulo de tombamento da estrutura móvel; assim, o desarme da mesma se dá de forma mais rápida. Como consequência dessa maior variação da angularidade, percebem-se pequenas oscilações dos NA_M ; NA_J ; ΔNA ; Δh . Esta situação hidráulica operacional do barramento (transição) se dá para vazões dos escoamentos na faixa aproximada de $0,850 < q < 1,625 \text{ m}^3/\text{s.m}$ (curva-chave "A"); $0,850 < q < 1,500 \text{ m}^3/\text{s.m}$ (curva-chave "B") e $0,850 < q < 2,000 \text{ m}^3/\text{s.m}$ (curva-chave "C"). Esta faixa de ligeiras oscilações do escoamento sobre a estrutura móvel mantém o efeito regularizador dos NA_M 's,

e representa certa instabilidade operativa. A fase de transição do funcionamento do barramento é caracterizada:

- Pelo aparecimento de fenômenos secundários, como, por exemplo, a formação de bolsões de ar imediatamente a jusante da Barragem. Estes bolsões de ar tendem a se reduzir com o aumento das vazões em trânsito, ao mesmo tempo que o barramento tomba pouco mais rapidamente, com a conseqüente pequena redução da cota do NA_M e elevação do NA_J , em virtude da maior facilidade do escoamento.
- Nesta fase de transição de funcionamento do barramento, observou-se uma lenta oscilação da rotação do eixo, sem movimentos bruscos. Tal fato, de acordo com os fabricantes, é favorável à lubrificação dos rolamentos da caixa dos mancais de apoio.
- O escoamento próximo ao paramento de jusante da Barragem é muito afetado pelas reposições de vazões promovidas pelos painéis móveis, que são influenciados pelas Curvas-Chave de jusante (situações A, B, C). Ao longo de um pequeno estirão imediatamente abaixo da Barragem, o entrecchoque e ajustamentos dos escoamentos irregulares, nessa fase de transição, impõem uma espécie de “inchamento” do fluxo da massa hídrica misturada com ar, conduzindo a maiores lâminas d’água que as promovidas pelo controle efetivo das Curvas-Chave. Essa situação caracteriza o fenômeno de ajustamento energético imposto aos escoamentos de jusante por esse tipo original de obra hidráulica destinada a regularização de níveis d’água (NA_M) em estirões fluviais.
- Uma característica notável dessa obra hidráulica inovadora consiste na estabilidade hidrodinâmica dos painéis móveis operando no regime de transição: - em qualquer situação de angularidade para um dado q , mesmo que os painéis sejam afastados artificialmente de sua posição de equilíbrio dinâmico, ao largá-los livremente, eles retornarão automaticamente ao seu posicionamento original através de lentas e decrescentes oscilações até se estabilizarem novamente na mesma situação inicial.

e.3) Barragem Tombada: a terceira fase hidráulica-operacional caracteriza uma condição em que o barramento está com efeito obstrutivo tendente ao mínimo. Nesta fase, o maior ângulo de tombamento do barramento totalmente envolvido pelo escoamento, passa a ter menor influência sobre as características hidráulicas dos fluxos, uma vez que os vãos de abertura na

seção de encaixamento da Barragem Móvel passam a propiciar maior capacidade para escoar maiores vazões (q). Da mesma forma, as grandezas hidráulicas relacionadas a NA_M , NA_J e ΔNA passam a variar também de forma lenta e gradual com o aumento da vazão em trânsito (q). A perda de carga (Δh), a partir desta fase, tem a influência predominante da energia de velocidade sobre a de pressão, uma vez que os desníveis (ΔNA) tendem a reduzir-se com o aumento da vazão, caracterizando uma situação de afogamento pleno do barramento. Esta fase se dá para $q > 1,625 \text{ m}^3/\text{s.m}$ (curva-chave “A”), $q > 1,500 \text{ m}^3/\text{s.m}$ (curva-chave “B”) e $q > 2,000 \text{ m}^3/\text{s.m}$ (curva-chave “C”). Na fase da Barragem tombada, os painéis móveis operam totalmente envolvidos pelo escoamento, havendo a ocorrência pouco freqüente de reduzidos bolsões de ar estacionários ou não. Os lemes instalados na crista do corpo do barramento tendem a facultar maiores ângulos de tombamento ao mesmo tempo que imprimem ligeira oscilação no corpo da Barragem. Nas maiores vazões de enchente, as pesquisas verificaram que (ΔNA) tende a se reduzir, promovendo, nas grandes cheias, maiores afogamentos dos painéis tombados tendendo, praticamente, a não modificarem os níveis naturais de enchentes. Isso significa que, nas grandes vazões, a Barragem Móvel tem efeito obstrutivo mínimo ou mesmo desprezível. Nestas condições, deverão ser considerados o regime natural hidrossedimentológico do curso d’água e seus condicionantes fluviomorfológicos e ocupacionais das áreas marginais. As planícies de fundo de vale tomadas pelas águas altas (cheias), definindo o leito maior do curso d’água, na pior das hipóteses, conterão os deflúvios de extravasamento, como costuma acontecer. Há, no entanto, forte possibilidade da “cascata” de barramentos móveis, em seu conjunto, reduzirem as vazões de “pico” pelo efeito do controle dos tempos de propagação de cheias e de acumulação de calha. É um estudo que pode ser realizado através da utilização do Operador Hidrológico denominado Fator de Admitância dos estirões que compõem a Rede Hidrográfica.

- f) Em virtude do painel do barramento tombar de forma gradual com o aumento da vazão em trânsito (q), é mantida a montante uma regularização razoável do NA_M , verificando-se, outrossim, a medida que ΔNA diminui, o aparecimento de um ressalto ondulado imediatamente a jusante do barramento, o que demonstra a tendência de minimização da energia específica dos escoamentos manejados pela estrutura hidráulica que controla as vazões (q), o que é favorável.
- g) Nas ESTAMPAS 15.1 a 15.3 apresentamos as tendências evolutivas na distribuição das pressões, em função das vazões em trânsito (q), observadas nos sensores P1 a P5 instalados (ESTAMPA 14.0) nos painéis móveis, considerando-se as Curvas-

Chave a jusante “A”, “B” e “C”. Considera-se importante configurar, mesmo de forma aproximada, como a estrutura móvel funciona, mormente em algumas condições críticas, como, por exemplo: - no início do processo de tombamento e durante a transição, após os painéis móveis armados. Nestas fases, os escoamentos afetam e são afetados pela estrutura de maneira complexa, definindo condições operativas de difícil compreensão. Intuitivamente sentimos que as pressões positivas no paramento de montante do barramento móvel, devem representar esforços significativos que vão influenciar as curvas características do barramento, enquanto que as negativas (sucções) são mais atuantes no paramento de jusante devido ao predomínio da pressão atmosférica conjugada com sugestiva instabilidade de massas de água e ar que tendem a se estabilizar a medida que o escoamento se propaga para jusante. As pressões pontuais nestes 5 locais escolhidos estrategicamente foram determinadas de maneira aproximada com referencial arbitrário e por metodologia eletrônica, para atender a facilidades operativas visando analisar aspectos comparativos. A variação, com o escoamento, destas pressões pontuais representa uma curva contínua caracterizando valores observados de pressão em diferentes estágios de funcionamento dos painéis móveis do barramento. Portanto, para fins comparativos, as curvas relativas aos sensores P1 a P5 foram transformadas em valores médios pontuais P_M representativos do fenômeno, conforme se verifica nas ESTAMPAS 15.1 a 15.3. Para facilitar uma análise comparativa desses valores médios correspondentes aos sensores P1 a P5, organizamos a TABELA 1 a seguir. Tal pressão média pontual obtida em cada sensor, representa uma pressão uniforme equivalente a série temporal válida para as condições operativas dos painéis móveis resultantes da variação do escoamento q em trânsito no barramento (na faixa de 0,25 a 3,50 $m^3/s.m$), válidas para as situações de jusante A, B, C. Convém notar que essas determinações com água corrente nos ensaios implicaram em várias alterações e adaptações no modelo, onde é muito difícil definir um referencial em unidade de pressão convencional; como interessou realizar somente análises comparativas, nos contentamos em aceitar um referencial arbitrário que facilitasse as observações programadas.

TABELA 1- Valores da pressão média pontual válida para cada sensor, representativa das variações de pressão devidas aos escoamentos q variando de 0,25 a 3,50 m³/s.m

SENSOR PIEZOMÉTRICO	Pressão Relativa Média (P_M) (unidade arbitrária de sinais eletrônicos nos sensores)		
	Curva-chave “A”	Curva-chave “B”	Curva-chave “C”
P1	675	615	720
P2	600	375	380
P3	350	420	415
P4	750	560	675
P5	150	175	175

Apesar das dificuldades nessas determinações com água corrente e com os painéis em movimento, constata-se que para a situação da curva-chave A, de jusante, o barramento é operado em melhores condições (curva-chave mais baixa), tal como demonstrado no sub-item h a seguir.

h) A análise preliminar dos valores da TABELA 1, válidos de $q = 0,25 \text{ m}^3/\text{s.m}$ a $q = 3,50 \text{ m}^3/\text{s.m}$ e para as situações relativas às Curvas-Chave de jusante, variando os N.A.'s entre 0,125 e 0,265 m abaixo do eixo de rotação e para as vazões de tombamento considerando os sensores instalados no barramento segundo o posicionamento na ESTAMPA 14, faculta, entre outras, as seguintes observações mais sugestivas:

- Que a área do paramento de montante do barramento móvel sujeito a pressões maiores está localizada na região do sensor P4 abaixo do eixo de rotação da Barragem para situação da Curva-Chave A mais baixa;
- Contrariamente, a área do barramento onde se verificou menor pressão corresponde à região do sensor P5 localizado na extremidade dos lemes, também para a situação da Curva-Chave A;
- A maior diferença de pressão média ($P4 - P3$) acontece na situação da Curva-Chave A, fato indicativo de “torque” mais adequado à operação de tombamento.
- A maior diferença de pressão média ($P1 - P3$) se dá na situação A, isso significando tendência a esforços de tombamento mais enérgicos.
- A maior área de pressão média P2 na extremidade inferior da crista do corpo da barragem mostra que na situação A configura-se melhor efeito genérico de reação ao tombamento dos painéis móveis, fato que favorece estabilidade operacional à barragem.

- O somatório do conjunto das 5 pressões médias de P1 a P5 ($\sum_1^5 p$) mostra, pelas ESTAMPAS 15.1 a 15.3, que tal conjunto de valores é maior para a Curva-Chave A, querendo isso sugerir que, para essa condição operacional, a Barragem Móvel atua com mais eficiência no aproveitamento regularizador dos NA_M 's do curso d'água.
- Que o NA_J (Curva-Chave de jusante) tem influência sugestiva na distribuição das pressões no corpo do barramento. Dentre algumas possíveis interpretações, aquela que nos parece, provavelmente, a mais plausível pode corresponder a situações da maior lâmina d'água a jusante conduzirem a menores diferenças de pressões positivas nos painéis móveis, além de afetarem binários (esforços compondo binários responsáveis pela angularidade dos painéis móveis), tornando-os menos atuantes.
- Que o ângulo de tombamento dos painéis móveis, como consequência, pode ser influenciado pelas situações das Curvas-Chave de jusante. Quanto menores as lâminas d'água abaixo do barramento (situação A), deverá ser ligeiramente maior a angularidade no tombamento dos painéis móveis.

As observações acima referidas reforçam a conveniência em operar a Barragem Móvel com Curva-Chave de controle a jusante em torno da situação A.

- i) Com referência aos estudos iniciais em modelos reduzidos realizados na década de 1950 (Laboratório Hidrotécnico Saturnino de Brito, 1956), embora as condições das pesquisas tenham sido outras, os resultados gerais são coerentes com as pesquisas atuais, embora com pequenas diferenças provenientes dos objetivos a serem alcançados. Na década de 1950 pesquisou-se o perfil dos painéis móveis a partir de um projeto inicial do extinto DNOS, que funcionou mal; o perfil pesquisado de então foi verificado para ser utilizado no rio Cachoeira, BA, na cidade de Itabuna, visando atender problema sanitário e paisagístico (não foi construído). A pesquisa atual teve o objetivo de, a partir deste perfil original devidamente otimizado, fornecer informações operativas genéricas da Barragem a fim de serem utilizadas para qualquer curso d'água ou canal aberto, a partir do conhecimento do seu regime e de uma Curva-Chave de referência destinada ao projeto hidráulico da obra civil. A praça de ensaios, o apoio logístico, a instrumentação, os esquemas e planos de pesquisa foram

distintos, realçando-se o auxílio do sensoramento eletrônico atual que foi adaptado para determinações em painéis móveis operando em água corrente e em situações hidráulicas diferenciadas, o que é, também, procedimento original. É importante, nas condições atuais do conhecimento da problemática, esclarecer que o posicionamento altimétrico da Barragem Móvel bem como a situação do centro de gravidade dos seus painéis móveis e a definição da Curva-Chave de controle indicando, notadamente, a altimetria da Vazão de Projeto (q_p) que promove o processo de tombamento inicial dos painéis móveis sejam, entre outras, as grandezas básicas destinadas a desenvolver projetos executivos desse tipo original de obra hidráulica destinada a controlar os escoamentos de calha fluviais. Por essas razões e por medida de segurança operativa, torna-se conveniente, assim, realizar estudos em Modelo Físico dessa obra civil inovadora, em projetos específicos.

3.1- RESUMO DAS ATIVIDADES DE SENSORAMENTO ELETRÔNICO

Na FIGURA 1 está apresentado o Lay-Out do Sistema de instrumentação com a utilização dos sensores e os dispositivos para aquisição dos dados medidos nos ensaios em Modelo Reduzido da Barragem Móvel Automática.

O material documentário de natureza eletrônica é farto, repetitivo e, em grande parte, de complexa correlação com os condicionantes hidráulicos de interesse para as pesquisas realizadas. Além disso, face à natureza dos experimentos – água corrente com sedimentos; modelo esbelto; painéis móveis – as dificuldades na obtenção dos dados nos ensaios obrigaram a atuações inovadoras e algumas originais. Apesar da complexidade operacional, a utilização do sensoramento eletrônico permitiu determinações significativas tais como: distribuição e flutuações de pressão no barramento; angularidade dos painéis móveis, distribuição de NA's; medição de vazão, e outras. Daí, termos optado pela apresentação sucinta dessa matéria, visto que o objetivo básico dos estudos e pesquisas consiste da determinação, análise e obtenção de resultados operacionais de natureza hidráulica.

Os equipamentos eletrônicos foram especificados pelo pessoal técnico da Engenharia Eletrônica da UERJ, e listados chegando-se à TABELA 2. Instalou-se o Modelo no Canal de Ensaio, onde foram realizadas várias corridas d'água a fim de verificar questões relacionadas com a ambientação, erosão e centro de gravidade do modelo no Canal. Além desses sensores, posicionamos mais dois sensores de nível ultrasônicos, um a montante do Canal e outro a

jusante. Passou-se então a calibrá-los junto ao computador utilizando o software Supervisorio Elipse. Esses sensores abrangem a região do curso d'água de instalação do barramento.

Os sensores foram ligados às entradas analógicas do equipamento 3 a 3 e realizados ensaios com os sensores e supervisórios ELIPSE. Tomaremos como exemplo os micro sensores 11 do corpo frontal superior do modelo e o micro sensor 14 do Leme Frontal. Os valores de tensões medidos serão transformados em unidades de medidas do ELIPSE a serem calibrados posteriormente como foi feito com os sensores de nível ultrasônicos. Foi observado que em vazio o sensor de Leme (14) – gerava um sinal de 280 unidades de carga até o valor máximo de 300 unidades sendo bem pressionado; o outro sem carga, de 1000 unidades, com carga de 1800 unidades. Foi feito o ensaio em Modelo com água e os valores dos sensores foi modificado para mais.

TABELA 2– Sensores eletrônicos utilizados no Projeto.

Item	P/N Catálogo RS	QTD	Descrição
1	286-558	40	Pressure Transducer 0 – 5 Psi
2	646-707	10	PDRC 820 Series 2 Bar
3	256-461	04	Optical Shaft Encoder 1000 PPR
4	185-9982	03	Data Flow Compact Transmitter
5	646-555	02	Transducer AC – 25
6	986-0114	04	Sensores de Temperatura
7	317-780	06	Linear Position Sensor 5K
8	285-784	10	Piezo Eletric Bimorf Element
9	304-267	03	Linear Hall Effect Switch I.C.
10	151-237	05	RT Curve Matched Thermistor(NTC) 10K
11	256-90	04	Latching Hall Effect Swintch I.C.
12	317-954	05	LM 35 DZ – Temperature Sensor
13		03	LV 400 Level Distance Transmitters no Contact Ultrasonic

A pressão exercida pela água sobre o sensor do corpo do barramento é máxima em 2400 unidades quando a água está um pouco acima da crista do corpo do barramento; quando o modelo desarma o valor da pressão alivia para 1900 unidades.

O sensor 14 do Leme indicou pressão mínima até o modelo desarmar; então a sua pressão aumentou. Convém destacar algumas observações sugestivas:

1. É necessário instalar um filtro ativo em cada micro sensor para atenuar os ruídos indesejáveis e diminuir a oscilação do sinal.
2. Caso haja conveniência para os estudos e pesquisas hidráulicas, será necessário estabelecer um método de calibragem e aferição do sinal de pressão medido com a finalidade de permitir determinações sensorizadas em valores absolutos. Devido as condições locais (água corrente; modelo em movimento) tal metodologia deverá ser pouco sensível e de difícil manipulação.
3. Tomar cuidado para que a ponta dos cabos não entrem em contato com a água e, por precaução, instalar os sensores apenas depois que todas as instalações e fiações estiverem completadas e verificadas.
4. As determinações realizadas através dos circuitos eletrônicos sensorizados se mostraram de importância sugestiva para a definição de flutuações de pressão / vibração e para a indicação da angularidade dos painéis móveis. Facultaram, outrossim, bom embasamento para confirmar níveis d'água determinados com os equipamentos hidráulicos de medição.

Após os acertos desenvolvidos no modelo através de ajustes e otimizações realizados no Canal de Ensaio, instalou-se um terceiro sensor de nível ultrasônico no canal do vertedouro de medição que alimenta os ensaios, onde é medida a carga hidráulica e a vazão (Vertedouro Bazin).

Além de outros fatores menos significativos, as atividades relacionadas com os circuitos de sensoramento implantados no modelo e Canal de Ensaio mostraram:

1. O sensor de nível foi instalado diretamente no Canal sem nenhum tubo de atenuação. O sensor de jusante devido a irregularidades da água projetada muita fuga de sinal.
2. As funções de transferência utilizadas podem sofrer alterações dependendo do sensor utilizado. Por exemplo, uma simples mudança na tensão da fonte de alimentação utilizada nos sensores pode ocorrer diferença na leitura (12V).
3. A água gera perturbações nos sinais mesmo em equipamentos que fiquem fora d'água, sendo favorável a existência de filtros ativos para melhorar a leitura do sinal.
4. Necessidade de um terra comum a todos equipamentos, fontes CLP para eliminar flutuação do sinal.
5. Cuidado extremo com os cabos de comunicação e sensores internos no modelo.

CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A Barragem Móvel Automática constitui obra hidráulica inovadora com aplicabilidade indicada para solucionar problemas relacionados à navegação interior, à sub-irrigação, ao controle de níveis d'água com o fim de atender a tomadas d'água e derivações de deflúvios, a corrigir regimes de rios ou canais, a favorecer a correção de condicionantes sedimentológicos e hidrobiológicos em cursos d'água, bem como a afetar favoravelmente maiores tempos de acumulação de calha e de propagação de intumescências em períodos chuvosos. Além disso, verificou-se qualitativamente nos estudos em modelo os efeitos favoráveis de aeração da água a jusante provocada pela operação da Barragem Móvel Automática, tendendo a gerar melhoria da qualidade da água nos aspectos sanitários e ecológicos (forte arejamento); estes efeitos ambientais favoráveis da implantação de Barragens Móveis Automáticas irão, desta forma, promover influência positiva dentro da área do saneamento ambiental, favorecendo as atividades de captação de água para fins de abastecimento público, e recuperação ambiental do ecossistema hídrico natural (fauna e flora).

Levando em consideração as importantes questões de operação, manutenção e conservação (OMC) desta obra hidráulica inovadora, há algumas ponderações preliminares a apresentar:

- a) A operação da obra devidamente dimensionada e construída é, basicamente automática necessitando simplesmente da atuação de pessoal com experiência em manobras de “stop-logs” e com capacidade para verificar condições operativas normais, através de registros convencionais (sensorizados ou não) de instrumentação de monitoramento, e eventuais atividades de possíveis ajustes de funcionamento em situações operativas que possam facultar resultados favoráveis;
- b) A manutenção do barramento impõe maiores cuidados. A limpeza e o controle permanente de grades e órgãos operativos da Barragem, principalmente dos painéis móveis, mancais/eixo de rotação, e lemes, devem ser realizados de maneira rotineira e confiável. A totalidade dessas atuações de manutenção deverão ser registradas e apropriadas com o fim de compor parcelas de custeio do empreendimento;
- c) A conservação da Barragem deverá prever, de tempos em tempos e em épocas oportunas, a desativação programada de cada um dos módulos-parcela de 5,5m de extensão da Barragem Móvel, com o fim de restaurá-lo e verificar suas características construtivas tendo a finalidade de ser mantida, com eficiência, a

operacionalidade da Barragem. Observações especiais deverão ser providenciadas em relação aos órgãos de controle e dissipação de energia, aos encontros junto às margens, às atuações de rotina e de monitoramento, e ao estirão fluvial afetado pela operação do sistema.

Conforme demonstrado ao longo dos estudos desenvolvidos, as pesquisas em modelo reduzido e posteriores análises ambientais dos resultados obtidos, definiram a caracterização de um tipo inovador de obra civil - Barragem Móvel Automática - para aplicações objetivas e de baixo custo, com impactos ambientais mínimos, não afeta o regime hidrossedimentológico do rio e não gera consumo de energia. Pelo contrário, com a implantação de um Projeto Piloto a ser desenvolvido objetivando a regularização dos níveis d'água fluviais ao longo do ano hidrológico, podem ser realizadas pesquisas adicionais utilizando a Barragem Móvel Automática, com o fim de se analisar a possibilidade da geração de energia hidrelétrica com a implantação deste empreendimento hidráulico; esta energia poderia ser produzida durante o período em que a barragem estivesse armada (o que corresponde a mais de 75% do ano hidrológico – período de águas baixas até médias altas), bastando, para isso estudar-se a implantação de turbinas adequadamente localizadas no espaço existente entre os módulos de Barragem Móvel Automática, já que existe diferença de níveis d'água entre montante e jusante, e vazão de escoamento. Poderão ser também previstas a implantação de eclusas de navegação nestes espaços existentes entre os módulos de Barragem Móvel Automática, ou com a utilização de canal lateral ao eixo do barramento.

A aplicação deste projeto de pesquisa pode se dar nas seguintes áreas de atuação: sub-irrigação de áreas agrícolas de fundo de vale, como seria o caso, por exemplo, das terras irrigadas da Bacia de Campos, no Estado do Rio de Janeiro; navegação fluvial; operação regular de tomadas d'água e/ou obras de derivação; controle de erosão / deposição / desbarrancamentos de calhas fluviais; controle de dessecamento excessivo do solo de fundo de vale; controle de poluição térmica e de prismas de salinidade de cursos d'água naturais; controle hidrobiológico e sanitário de escoamentos fluviais; composições estéticas / urbanísticas de paisagens.

Com relação à transferência para o setor produtivo, o Projeto pode ser aplicado por órgãos oficiais e privados:

- para sub-irrigação: usineiros no Rio de Janeiro, Pernambuco, etc., visando melhoria na produtividade da cana-de-açúcar;
- para o setor hidroviário: visando implantar tirante d'água condizente com o calado de embarcações. Possíveis interessados: Ministério dos Transportes;

Departamento Nacional de Águas e Energia; Comitês de Estudos Integrados de Bacias Hidrográficas; etc.

- para controle de singularidades hidrossedimentológicas em rios e canais. Possíveis interessados; Ministério de Recursos Hídricos e Meio Ambiente; Comitês de Estudos Integrados de Bacias Hidrográficas; Empresas que realizem atuações relacionadas à tomadas d'água, derivações, controle de prismas de salinidade, além de outras importantes atividades dentro da Engenharia Sanitária e Ambiental.

Desta forma, levando em conta todos os fatores abordados, concluímos que a implantação de um sistema integrado de Barragens Móveis Automáticas implantadas “em cascata” ao longo da rede potamográfica pode levar à melhoria geral do ecossistema natural, tanto na valorização dos mananciais de água fluviais, quanto na capacidade de auto-depuração dos rios em relação às fontes de poluição pontuais e difusas, contribuindo para o aumento da biodiversidade ecológica do ecossistema da bacia hidrográfica, no melhor aproveitamento dos recursos hídricos fluviais pelo ser humano, na possibilidade do aproveitamento racional da energia hidráulica natural do rio, e gerando a regularização de níveis d'água para utilização em diferentes empreendimentos humanos, contribuindo, assim, para o processo de desenvolvimento sustentável na bacia hidrográfica, aonde as comunidades humanas vivem e da qual elas dependem para a sua sobrevivência.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CHADWICK, Andrew & MORFETT, John. *Hydraulics in Civil and Environmental Engineering*. & E & FN SPON, London, 1999.
2. DAKE, Jonas M. K. *Essentials of Engineering Hydraulics*. Wiley - Interscience, New York, 1972.
3. HENRY, J. Glynn & Heinke, Gary W. *Environmental Science and Engineering*. Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 1996.
4. Laboratório Hidrotécnico Saturnino de Brito. *Barragem Móvel Automática*. II Congresso Geral de Transportes. Porto Alegre, RS, 1956.
5. LIU, David H. F. & Lipták, Béla G. *Environmental Engineers' Handbook*. Lewis Publishers, New York, 1997.
6. KUPCHELLA, Charles E.; Hyland, Margaret C.; “*Environmental Science – Living Within the System of Nature*”, 3ª Edição, Editora P. Hall, 1992.
7. MANAHAN, Stanley E. *Environmental Science and Technology*. Lewis Publishers, New York, 1997.
8. NEBEL, Bernard J., WRIGHT, Richard T., “*Environmental Science*”, 6ª Edição, Editora P. Hall, 1998.
9. NETTO, Azevedo & Alvarez, G. A. *Manual de Hidráulica*. 7ª edição revista e complementada. Editora Edgard Blücher Ltda. São Paulo, 1996.
10. NEVES, Eurico T. *Curso de Hidráulica*. Editora globo, São Paulo, 1989.
11. PORTO, Rodrigo de Melo. *Hidráulica Básica*. 2ª Edição. Editora EESC-USP. São Carlos, 2001.
12. OTTONI, Adacto B. *Tecnologia do Manejo Hídrico em Bacias Hidrográficas visando sua Valorização Sanitária e Ambiental*. Tese de Doutorado – Escola Nacional de Saúde Pública – ENSP / FIOCRUZ / MINISTÉRIO DA SAÚDE, Rio de Janeiro, 1996.

ANEXOS

Anexo 1 – Vista de montante para jusante do modelo sem água.



Anexo 2 - Vista de jusante para montante do modelo sem água





Anexo 3 – Vista do modelo da Barragem Móvel Automática armada



Anexo 4 – Vista do modelo da Barragem Móvel Automática tombada