

IV-023 - MODELAGEM NUMÉRICA E ANALÍTICA DO ESCOAMENTO NO SISTEMA EXTRAVASOR DA BARRAGEM JOANES II – REGIÃO METROPOLITANA DE SALVADOR

Renata Silveira Fraga⁽¹⁾

Eng. Civil pela Universidade Federal da Bahia (UFBA), 1989. Mestre em Engenharia Hidráulica, pela Universidade de São Paulo (USP), 1998. Especialista em Segurança de Barragens, pela Universidade Federal da Bahia (UFBA), 2016. Analista de Saneamento na Embasa, Empresa Baiana de Águas e Saneamento S.A.

André Luiz Andrade Simões⁽²⁾

Eng. Civil pela Universidade Salvador (UNIFACS), 2006. Mestre em Engenharia Hidráulica e Saneamento, pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP), 2008. Doutor em Engenharia Hidráulica e Saneamento, pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP), 2012. Professor Adjunto na Escola Politécnica da UFBA, Departamento de Engenharia Ambiental. e-mail: andre.simoes@ufba.br

Endereço⁽¹⁾: Rua Archibaldo Baleeiro, 120 ap. 104 – Ed. Paraíso Residencial - Rio Vermelho – Salvador – BA - CEP: 41.940-110 - Brasil - Tel: (71) 3365-7504 - e-mail: renata.fraga@embasa.ba.gov.br

RESUMO

Neste trabalho são apresentadas contribuições numéricas, teóricas e dados obtidos em campo, relacionados ao sistema extravasor da Barragem Joanes II, estrutura que compõe parte do Sistema Integrado de Abastecimento de Água de Salvador-BA. As equações de conservação de massa e de Navier-Stokes com médias de Reynolds, escritas para escoamento multifásico, através do modelo não homogêneo, foram resolvidas em conjunto com o modelo de turbulência k-ε em um domínio bidimensional que inclui o vertedor, a comporta, os canais e a bacia de dissipação. Considerando a dissipação de energia, as equações de conservação de massa e a 1ª lei da termodinâmica foram empregadas na forma integral para modelagem do problema. Os dados obtidos em campo possibilitaram a calibração, em protótipo, da equação proposta para cálculo do coeficiente de vazão do vertedor, em função da abertura das comportas. As soluções numéricas obtidas indicam a localização de pressões médias máximas, assim como a distribuição espacial da posição da superfície livre, tendo capturado o ressalto hidráulico na bacia de dissipação.

PALAVRAS-CHAVE: Extravasor, comportas, ressalto hidráulico.

INTRODUÇÃO

Os extravasores ou vertedores são estruturas implantadas em barragens, cuja função é descarregar as vazões excedentes para jusante do reservatório, evitando o galgamento da barragem na passagem da onda de cheia. A concepção do conjunto extravasor (vertedor e bacia de dissipação) depende do local onde será implantado, devendo ser escolhido, para cada caso, o conjunto mais adequado sob os aspectos hidráulico e econômico. Os principais aspectos que devem ser analisados na definição da concepção do conjunto extravasor são: o tipo de barragem (terra, enrocamento ou concreto), layout da barragem, características topográficas e geológicas locais, vazão específica de projeto e níveis de água de montante e jusante. O projeto da estrutura extravasora, sob o aspecto hidráulico, deve partir da premissa de um elevado coeficiente de vazão (eficiência hidráulica) e proporcionar a restituição do escoamento ao leito natural do rio de forma semelhante às condições naturais anteriores à implantação da obra, de maneira a evitar erosão à jusante da bacia de dissipação e o rompimento da estrutura.

A escolha por vertedores providos de comportas justifica-se em função da vazão de cheia a ser descarregada e da flexibilidade operacional, possibilitando, inclusive, a manutenção de volumes de espera para controle de cheias.

A Barragem Joanes II localiza-se na Região Metropolitana de Salvador e sua função é regularizar vazões para atendimento das demandas do Sistema Integrado de Salvador, Simões Filho e Lauro de Freitas, maior sistema operado pela Embasa, Empresa Baiana de Águas e Saneamento. A vazão regularizada pela Barragem de

Joanes II corresponde a $3,0 \text{ m}^3/\text{s}$, equivalente a cerca de 30% da demanda média atual do sistema integrado. A vazão de cheia, com período de recorrência $TR = 2100$ anos, corresponde a $530 \text{ m}^3/\text{s}$.

O presente trabalho foi desenvolvido seguindo as vias numérica, teórica e experimental. No primeiro caso, foi realizada simulação do escoamento em um domínio bidimensional semelhante ao sistema extravasor mencionado. Como fruto deste estudo, apresenta-se também a modelagem teórica do escoamento sob comportas, a partir das equações propostas por Chanson (1993) e a calibração, em protótipo, do modelo teórico, a partir de medições de vazões a jusante da estrutura extravasora da Barragem de Joanes II, ilustrada na Figura 1.

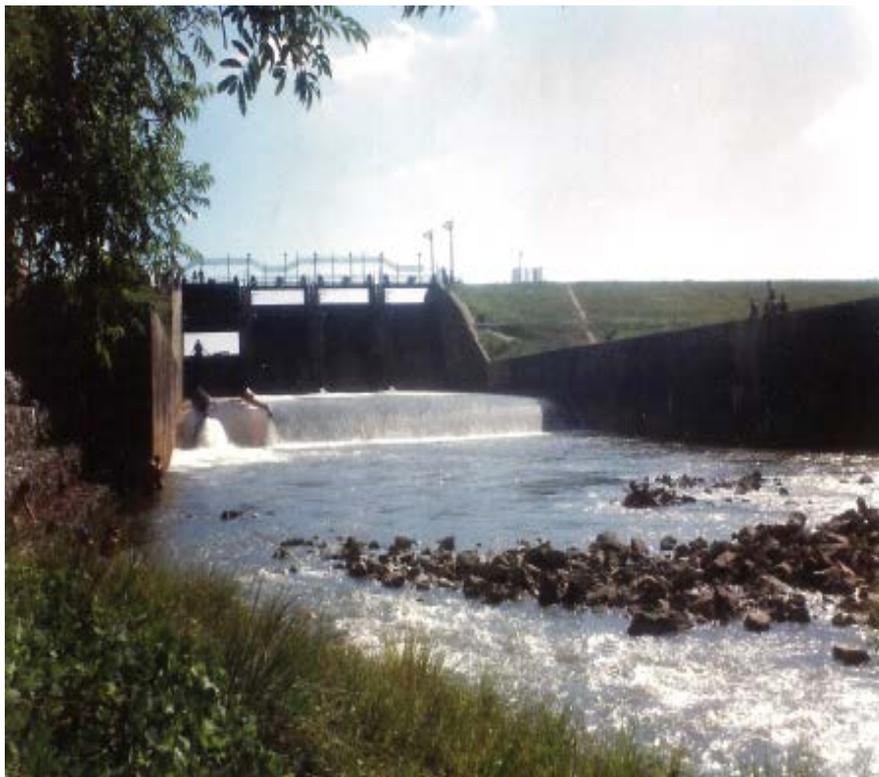


Figura 1: Barragem Joanes II
Fonte: Embasa – Empresa Baiana de Águas e Saneamento S.A.

METODOLOGIA

O trabalho foi desenvolvido conforme as seguintes etapas:

- Descrição do Referencial Teórico;
- Proposição de equação analítica para determinação do coeficiente de descarga do vertedouro da Barragem Joanes II;
- Aplicação do modelo analítico às medições em protótipo;
- Estudo numérico bidimensional

REFERENCIAL TEÓRICO

A determinação da vazão escoada por vertedores operando com aberturas parciais de comportas é de fundamental importância para a operação segura de barragens. Segundo Clemmens et al (2003, *apud* Arauz, 2005), a complexidade na determinação da vazão escoada sob abertura parcial está na dificuldade em determinar a forma da superfície livre à jusante da comporta, no caso de escoamento livre. O escoamento que se aproxima da abertura sob a comporta apresenta linhas de corrente convergentes com curvaturas que

persistem a jusante da comporta (1ª Lei de Newton) produzindo uma seção contraída, em geral denominada como “vena contracta”. A dificuldade em determinar o coeficiente de contração C_c é resultado das diversas configurações do escoamento através do orifício de grandes dimensões, incluindo a influência da forma do canal de aproximação e de pilares a jusante. O WES (1977) afirma que o coeficiente C_c é significativamente influenciado pelo ângulo formado pela comporta e o fundo do canal extravasor.

O cálculo da vazão escoada por uma comporta parcialmente aberta é feito, usualmente, através da introdução de um coeficiente de vazão, para considerar as perdas de carga e corrigir a hipótese adotada de que os vetores velocidade são perpendiculares à seção do orifício.

Segundo o USBR (1987), a descarga sobre um vertedor, com abertura parcial das comportas, é semelhante à descarga sobre um orifício de grandes dimensões, podendo ser calculada por meio da seguinte expressão:

$$Q = \frac{2}{3} C_d A_0 \sqrt{2g} \left(H_1^{\frac{3}{2}} - H_2^{\frac{3}{2}} \right) \quad (1)$$

Em que:

Q = vazão escoada;

A_0 = área do orifício;

H_1 = carga em relação à borda inferior do orifício;

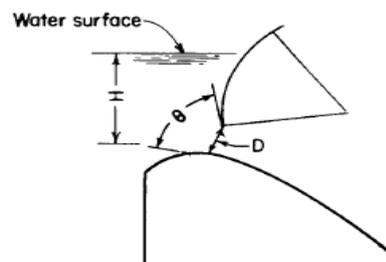
H_2 = carga em relação à borda superior do orifício;

A expressão (1) foi desenvolvida a partir da integração da vazão elementar, através de uma fresta de altura infinitesimal. Segundo Porto (2006), esta equação é válida para orifícios de grandes dimensões, nos quais a carga sobre o centro de gravidade do orifício é menor do que três vezes a dimensão vertical do mesmo. Segundo o mesmo autor, para cargas superiores, os resultados obtidos com a equação 1 se aproximam dos resultados calculados com a formulação dos orifícios de pequenas dimensões. Tal formulação é recomendada no trabalho clássico “Hydraulic Design Criteria” (WES, 1977, 311-1 a 311-5), escrita a seguir:

$$Q = C_d G_o B \sqrt{2gH} \quad (2)$$

Em que, G_o = menor distância desde a quina inferior do arco (comporta) até a superfície do vertedor, B =largura da comporta, H = carga hidráulica em relação ao centro da abertura sob a comporta, C_d = coeficiente de vazão. O procedimento para determinação do coeficiente de vazão, C_d , e da abertura G_o em função da abertura vertical em relação à crista do vertedouro é descrito na referência citada e foi empregado neste trabalho para cálculo das vazões em função da abertura.

A Figura 2 apresenta os coeficientes de vazão C_d em função do ângulo de abertura da comporta.



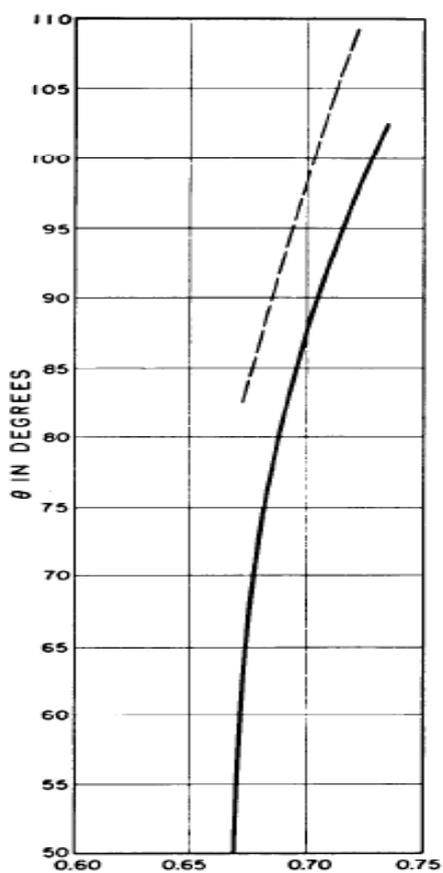


Figura 2: Coeficiente de vazão C_d em função do ângulo de abertura da comporta (WES,1977)

Influência de Muros e Pilares

Muros e pilares são estruturas que compõem o vertedor, principalmente quando estes são controlados por comportas. Quando estas estruturas possuem uma forma que produz contrações laterais sobre o escoamento, a largura efetiva difere da largura real do vertedor. A largura efetiva, na crista do vertedor, pode ser descrita pela expressão (3), desenvolvida pelo WES (1977).

$$L_e = L_0 - 2(NK_p + K_a)H_0 \quad (3)$$

Em que:

L_e = largura efetiva da crista;
 L_0 = largura real da crista;
 N = número de pilares;
 K_p = coeficiente de contração do pilar;
 K_a = coeficiente de contração lateral;
 H_0 = carga total sobre a crista.

Segundo WES (1977), os coeficientes de contração variam em função das seguintes características: forma dos muros e pilares, posicionamento do bordo de ataque do pilar em relação à crista do vertedor, carga de operação, velocidade de aproximação, operação de comportas adjacentes e direção do escoamento em relação ao vertedor.

Coefficiente de contração lateral (K_a)

Conforme estudos em modelos reduzidos, realizados pelo WES (1977), o valor de K_a corresponde a 0,1, para barragens com seção adjacente em concreto, e 0,2, para barragens com seção adjacente em terra. Estes valores são indicados quando as direções do escoamento e do eixo do vertedor estão alinhadas. A Figura 4 apresenta a variação do coeficiente lateral K_a em função da relação entre a carga total e o raio do muro de aproximação H_0/R_a , para barragens com seção adjacente em concreto. A Figura 4 apresenta a variação do coeficiente lateral K_a em função da relação entre a carga total e o raio do muro de aproximação H_0/R_a , para barragens com seção adjacente em terra.

Os gráficos das Figuras 4 e 5 apresentam valores de K_a , em função das características de projeto. É importante ressaltar que a topografia da região de aproximação exerce forte influência na direção do escoamento e nos valores de K_a . Os valores obtidos nos gráficos devem ser utilizados nos cálculos preliminares, como uma estimativa inicial do coeficiente de contração lateral. Para valores mais precisos, recomenda-se estudo detalhado em modelo reduzido.

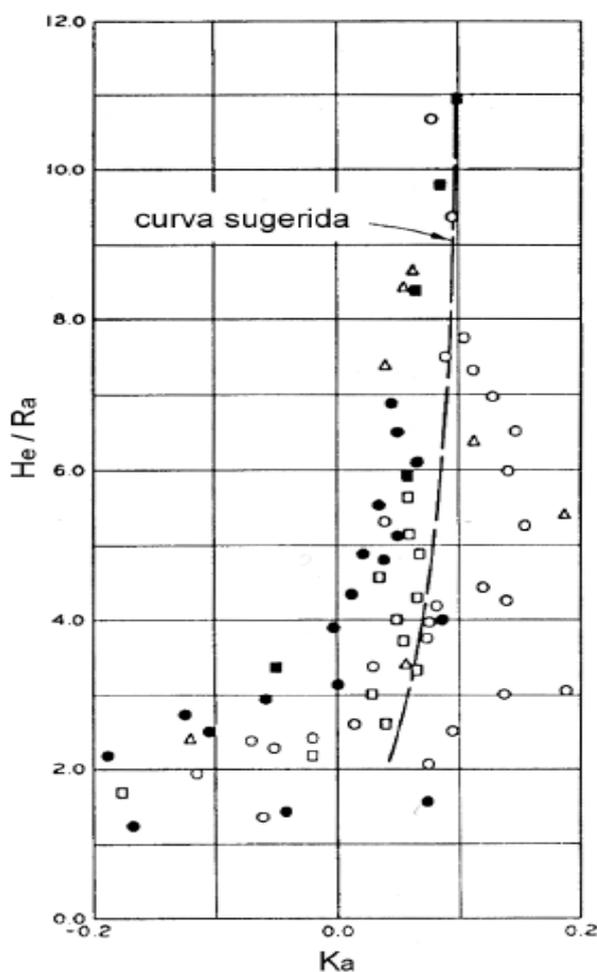


Figura 3: Coeficiente de contração lateral K_a função da relação H_0/R_a – Barragens com seção adjacente em concreto (WES, 1977)

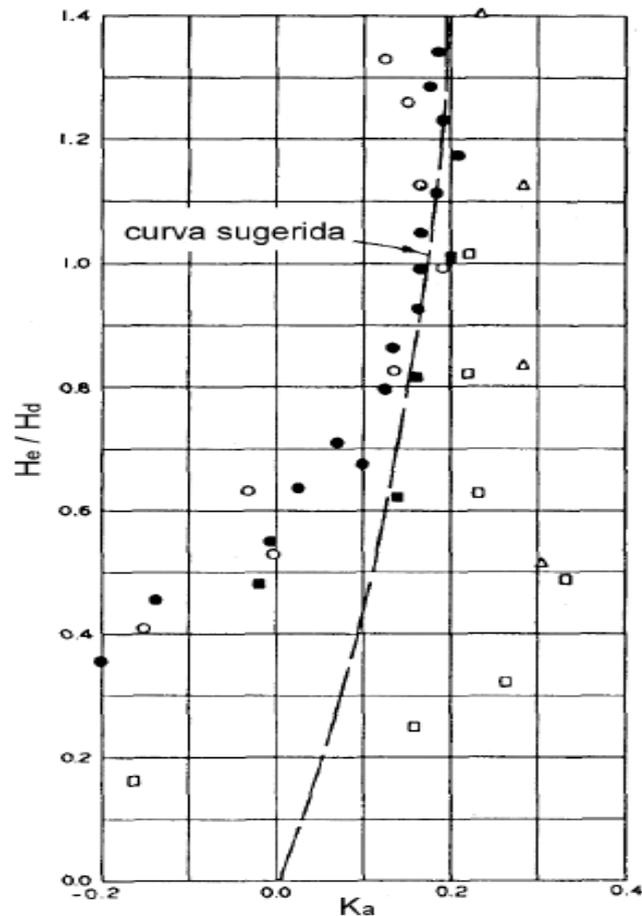


Figura 4: Coeficiente de contração lateral K_a função da relação H_0/H_d – Barragens com seção adjacente em terra (WES, 1977)

Coeficiente de contração do pilar (K_p)

O valor aproximado para o coeficiente de aproximação do pilar K_p , segundo Creager e Justin (1950, apud Arauz, 2005) é 0,1 para pilares espessos, 0,04 para pilares com aproximação afinada e 0,035 para pilares redondos.

Estes valores se aplicam para pilares com espessura igual a um terço da carga sobre o vertedor, quando as comportas adjacentes estão abertas. Quando as comportas adjacentes estão fechadas, sugere-se um aumento de 2,5 vezes no coeficiente de contração do pilar (WES, 1977). A Figura 5 apresenta o coeficiente de contração K_p para diferentes formas de bordo do ataque do pilar, conforme proposto pelo WES (1988), quando a velocidade de aproximação é desprezável e as comportas adjacentes estão abertas. Observa-se que o pilar do tipo 4 é mais favorável em função da forma geométrica, com baixos valores do coeficiente K_p . Entretanto, não é recomendável para elevados valores de H_0 , em razão da possibilidade de descolamento e desenvolvimento de pressões negativas elevadas, junto ao pilar.

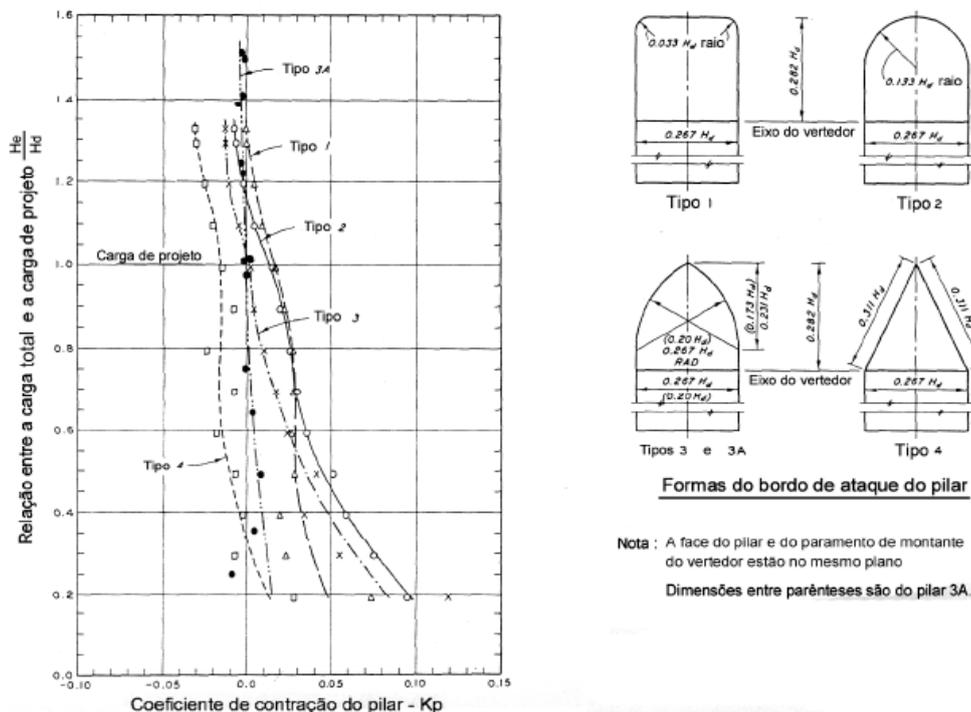


Figura 5: Efeito da forma do pilar sobre o coeficiente de contração K_p (WES, 1977)

TRATAMENTO ANALÍTICO

Estudo do coeficiente de vazão das comportas da Barragem Joanes II

Empregando a metodologia descrita em WES (1977), foram calculados coeficientes de vazão para diferentes ângulos de abertura das comportas da barragem Joanes II. A Tabela 1, a seguir, contém os resultados obtidos para Y_L (distância vertical desde a crista até a face inferior da comporta) entre 0,1 m e 1,0 m. Seguindo a metodologia da referência citada, o coeficiente de vazão deve ser calculado com o método gráfico que contém a curva sugerida a partir de dados experimentais (gráfico 311-1, WES, 1977). Calculou-se um polinômio de grau três para interpolação dos pontos da referida curva sugerida pela WES (equação 4 a seguir), com $R^2 = 0,9997$ e erro relativo máximo em relação à curva original igual a 0,125%. Os valores de C_d (p3) apresentados na última coluna foram determinados com este polinômio. Note-se que os quatro primeiros valores de C_d foram extrapolados devido ao domínio da curva sugerida pelo WES (1977).

$$C_d = a\beta^3 + b\beta^2 + c\beta + d \quad (4)$$

Nesta equação, $a = 2,933 \cdot 10^{-7}$; $b = -3,878 \cdot 10^{-5}$; $c = 1,918 \cdot 10^{-3}$; $d = 6,362 \cdot 10^{-1}$; β em graus. Validade: $X/h_d = 0,1$ a $0,3$ (conforme WES, 1977) e β entre $49,86$ e $100,84$.

É válido ressaltar que a curva sugerida pela WES para o cálculo de C_d em função de β foi determinada entre pontos experimentais que apresentam significativa dispersão em seu entorno. Empregando o método dos mínimos quadrados foi obtida a formulação a seguir (Equação 5), com $R \sim 0,75$ e distribuição de pontos em relação à reta de ajuste exato conforme Figura 7. O desvio relativo máximo entre a curva sugerida pela WES (1977), apresentada na Figura 3, e este polinômio é de 0,83%. Os resultados para C_d calculados foram apresentados na Tabela 1 como C (p2).

$$C_d = a\beta^2 + b\beta + c \quad (5)$$

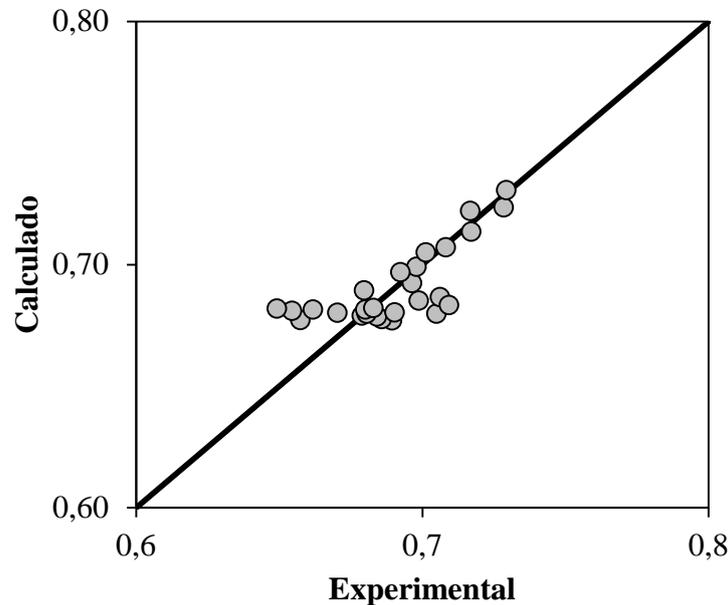


Figura 6: Comparação entre dados experimentais (WES, 1977) e polinômio desenvolvido neste trabalho.

Tabela 1 – Cálculo do coeficiente de descarga C_d por meio dos polinômios p3 (grau 3) e p2 (grau 2)

Y_L [m]	$Y_T - Y_L$ [m]	$\text{sen}\alpha$	α	$R_G \cos\alpha$	X_L [m]	X_L/h_d	Y_L/h_d	Do gráfico 311-3 [m]			
								Classe	X_R	Y_R	R
0,1	2,75	0,63953	-0,6939	3,30568	0,66432	0,139	0,021	III	-0,4775	-6,4506	6,48883
0,2	2,65	0,61628	-0,664	3,38637	0,58363	0,122	0,042	III	-0,4775	-6,4506	6,48883
0,3	2,55	0,59302	-0,6348	3,4623	0,5077	0,106	0,063	II	-0,2387	-6,3456	6,35036
0,4	2,45	0,56977	-0,6062	3,53377	0,43623	0,091	0,084	II	-0,2387	-6,3456	6,35036
0,5	2,35	0,54651	-0,5782	3,60104	0,36896	0,077	0,105	II	-0,2387	-6,3456	6,35036
0,6	2,25	0,52326	-0,5507	3,66436	0,30564	0,064	0,126	II	-0,2387	-6,3456	6,35036
0,7	2,15	0,5	-0,5236	3,72391	0,24609	0,052	0,147	II	-0,2387	-6,3456	6,35036
0,8	2,05	0,47674	-0,4969	3,77988	0,19012	0,040	0,168	II	-0,2387	-6,3456	6,35036
0,9	1,95	0,45349	-0,4707	3,83243	0,13757	0,029	0,188	II	-0,2387	-6,3456	6,35036
1	1,85	0,43023	-0,4448	3,88169	0,08831	0,018	0,209	II	-0,2387	-6,3456	6,35036

$X_L - X_R$ [m]	$Y_L - Y_R$ [m]	$R + G_0$ [m]	G_0 [m]	X [m]	X_c [m]	X_c/h_d	Y_c [m]	Mc [-]	atgMc	β rad	β graus	C (p3) [-]	C (p2) [-]
1,14179	6,55063	6,64939	0,16057	0,02757	0,63675	0,13336	-0,0574	-0,1669	-0,1654	0,71154	40,7685	0,670	0,680
1,0611	6,65063	6,73475	0,24592	0,03875	0,54488	0,11412	-0,0431	-0,1462	-0,1452	0,76163	43,6383	0,670	0,678
0,74644	6,64558	6,68737	0,33701	0,03762	0,47009	0,09845	-0,0328	-0,1289	-0,1282	0,80776	46,281	0,671	0,678
0,67497	6,74558	6,77927	0,42891	0,0427	0,39353	0,08242	-0,0236	-0,1109	-0,1104	0,85417	48,9401	0,672	0,677
0,60769	6,84558	6,87251	0,52215	0,04617	0,32279	0,0676	-0,0163	-0,0937	-0,0934	0,8992	51,5205	0,672	0,677
0,54438	6,94558	6,96689	0,61653	0,04817	0,25747	0,05392	-0,0108	-0,0773	-0,0771	0,94299	54,0292	0,673	0,677
0,48483	7,04558	7,06225	0,71189	0,04887	0,19722	0,04131	-0,0066	-0,0616	-0,0615	0,98565	56,4737	0,674	0,678
0,42885	7,14558	7,15844	0,80808	0,04841	0,14171	0,02968	-0,0036	-0,0465	-0,0465	1,02735	58,863	0,675	0,678
0,37631	7,24558	7,25535	0,90499	0,04694	0,09063	0,01898	-0,0016	-0,0318	-0,0318	1,06831	61,2096	0,676	0,679
0,32705	7,34558	7,35286	1,0025	0,04459	0,04372	0,00916	-0,0004	-0,0171	-0,0171	1,10892	63,5366	0,677	0,681

Notas: Valores obtidos com $H_d = 4,77$ m, $X_T = 3,97$ m, $Y_T = 2,85$ m, $R_G = 4,3$ m.

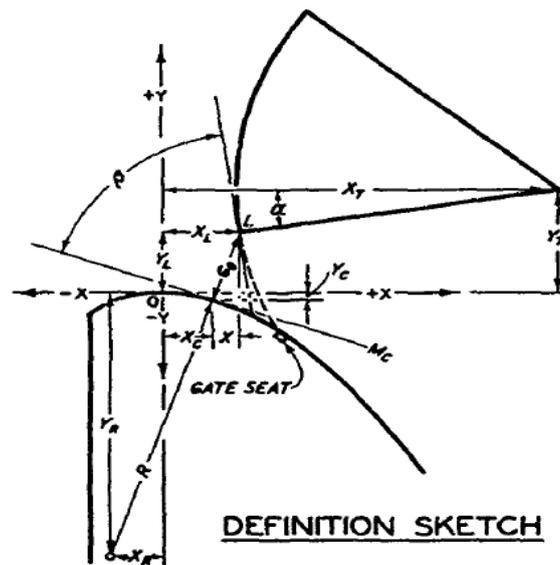


Figura 7: Definições das grandezas empregadas (adaptado de WES (1977))

APLICAÇÃO DO MODELO ANALÍTICO ÀS MEDIÇÕES EM PROTÓTIPO

A verificação do modelo analítico para determinação do coeficiente de descarga do sistema extravasor, representado pelas equações (4) e (5), foi efetuada por meio de medições das vazões descarregadas sob as comportas da Barragem Joanes II, para diversas aberturas.

Entre os dias 22 e 23 de maio de 2015 foi implantada uma (01) estação fluviométrica e realizadas sete (07) medições de descarga líquida, velocidades e respectivas profundidades da lâmina d'água, à jusante da bacia de dissipação (região de escoamento subcrítico).



Figura 8: Medições de vazão à jusante do extravasor da Barragem Joanes II
Fonte: Embasa

Tabela 2: medições de vazão efetuadas à jusante do canal extravasor da Barragem Joanes II

Medição N°	SEÇÃO	Cota média(m)	Vazão (m³/s)	Área (m²)	Largura (m)	Profund. média(m)	Velocidade média (m/s)
1	A	3,75	16,392	69,94	25,00	2,80	0,234
2	A	4,39	29,583	86,22	27,00	3,19	0,343
3	A	4,63	36,761	96,38	28,70	3,36	0,381
4	A	4,82	48,383	101,67	29,00	3,50	0,476
5	A	4,83	53,694	98,33	29,40	3,34	0,546
6	A	5,12	74,516	104,13	30,00	3,47	0,716
7	A	5,16	79,467	109,53	32,80	3,34	0,726

Dados do protótipo (Barragem Joanes II)

A Barragem Joanes II é uma barragem de terra, com vertedor lateral provido de 4 comportas, cujas principais características são:

- $N.A_{max}$ (m) = 30,00;
- $N.A_{min}$ (m) = 24,90;
- Cota da soleira do vertedor (m) = 26,00;
- Volume total (hm³) = 129
- Volume útil (hm³) = 85
- Bacia de dissipação: por ressalto hidráulico, tipo I, conforme classificação do USBR;
- Cota do fundo da bacia de dissipação (m) = 17,00;
- Declividade do canal extravasor (rápido) = trecho 1 (8,63 metros) = 46%, trecho 2 (34,72 metros) = 2,9%, trecho 3 (10,72 metros) = 36,38%;
- Largura de cada comporta (m) = 6,90;
- Largura total da bacia de dissipação (m) = 31,83.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 3 apresenta os coeficientes de vazão experimentais, calculados para diferentes vazões escoadas sob as comportas, por meio da equação (2), bem como os coeficientes de descarga C_d analíticos, calculados por meio do polinômio p_2 , expresso na equação (5), considerando aberturas das comportas variando de 0,1 metro a 1,0 metro.

Tabela 3 - Estimativa dos coeficientes de vazão experimental e teórico

Abertura da comporta (a) (m)	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,70	1,00
Ângulo beta (graus)	40,7685	43,6383	46,2810	48,9401	51,5205	56,4737	63,5366
número de comportas abertas	4,00	4,00	3,00	3,00	3,00	3,00	2,00
vazão medida na seção (m3/s)	16,392	29,583	36,761	48,383	53,694	74,516	79,467
vazão estimada por setor (m3/s)	4,098	7,396	12,254	16,128	17,898	24,839	39,734
NA montante (m)	29,91	29,91	29,91	29,91	29,91	29,9	29,9
Cota da soleira do vertedor (m)	25,86	25,86	25,86	25,86	25,86	25,86	25,86
H ₁ (m)	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05	4,04	4,04
H ₂ (m)	3,95	3,85	3,75	3,65	3,55	3,34	3,04
A _{setor} (m ²)	0,670	1,340	1,989	2,652	3,315	4,641	6,779
H médio (m)	3,99800	3,94800	3,89800	3,84800	3,79800	3,68800	3,53800
C _d experimental	0,691	0,628	0,705	0,700	0,626	0,629	0,704
C _d teórico	0,680	0,678	0,677	0,677	0,677	0,678	0,681
Δ (%)	-1,647	7,426	-3,955	-3,432	7,569	7,156	-3,358

A Figura 9 apresenta o gráfico da variação do coeficiente de descarga C_d em função da variação da abertura das comportas.

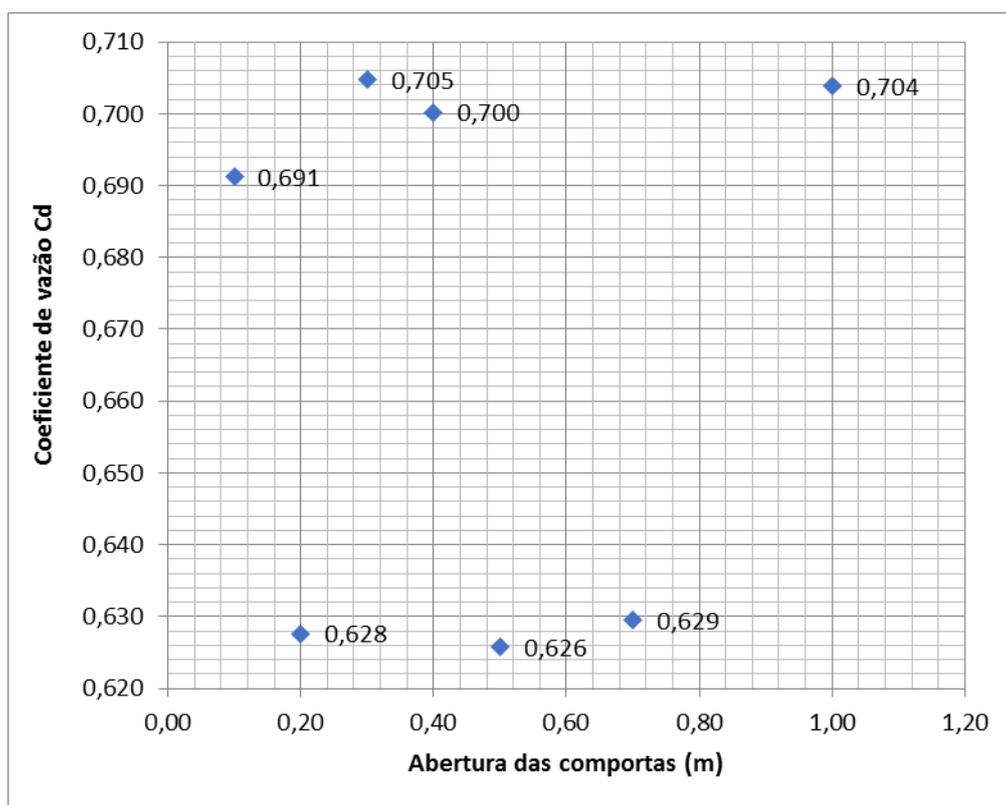


Figura 9: Coeficiente de vazão C_d em função da abertura das comportas

Os coeficientes de descarga C_d experimentais apresentaram valores compreendidos entre 0,626 e 0,704. Comparando os valores de C_d , calculados, por meio da equação (2), para as vazões medidas em protótipo (experimentais), com os valores calculados com o polinômio p_2 , verifica-se que as diferenças entre os valores está compreendida entre 1,65% e 7,57%.

ESTUDO NUMÉRICO BIDIMENSIONAL

A etapa final do trabalho consistiu em realizar simulações numéricas do escoamento no sistema extravasor. O modelo foi aplicado para simular o escoamento na estrutura extravasora da Barragem Joanes II, considerando abertura das comportas de 1,00 metro (2 comportas abertas). Foi assumida a hipótese de escoamento bidimensional e empregado o modelo de turbulência $k-\epsilon$. Considerando os dados da Tabela 3, para uma abertura da comporta igual a 1,0 m, o número de Reynolds à saída da comporta, calculado com o diâmetro hidráulico, resulta próximo de 934.106. Esse elevado valor, em conjunto com a teoria de Kolmogorov (Lesieur, 2008), mostra que o número de graus de liberdade desse escoamento turbulento é da ordem de 1015, valor indicativo para o grau de refinamento da malha quando se pretende resolver as equações de conservação de massa e Navier-Stokes sem as médias de Reynolds, isto é, com o que se denomina Simulação Numérica Direta ou DNS, acrônimo do inglês Direct Numerical Simulation. Em outros termos, a malha computacional deveria ter esse um refinamento correspondente ao número de graus de liberdade mencionado para que os menores turbilhões fossem capturados com a simulação numérica. Trata-se de uma opção inviável com os computadores disponíveis, que são capazes de simular escoamentos em malhas com alguns milhões de elementos, no máximo.

Considerando o exposto no parágrafo anterior, deve-se utilizar modelos de turbulência para que a exigência de resolver todo o espectro da turbulência seja abandonado. Com o modelo de turbulência, como aquele citado, os turbilhões são modelados ao invés de serem resolvidos. O clássico modelo $k-\epsilon$ está entre os modelos mais empregados e possui nível intermediário entre os existentes. É um modelo de duas equações, a saber: (1) Uma equação diferencial parcial para a energia cinética turbulenta, k ; (2) uma segunda equação diferencial parcial para a taxa de dissipação de energia por unidade massa, ϵ . O seu desenvolvimento, hipóteses, e formulação é fruto do trabalho de diversos pesquisadores, como apresentado em Rodi (2000) e Simões (2012).

As equações de Navier-Stokes e conservação de massa formam um sistema de equações diferenciais parciais com características mistas e sem solução analítica conhecida até o momento. Desse modo, torna-se necessário o uso de métodos numéricos para obtenção de soluções. Neste trabalho foi empregado um código com esquema de volumes finitos em um domínio bidimensional, conforme ilustrado na Figura 16. À entrada do domínio, a montante da comporta, fixou-se a profundidade e velocidade média; junto à saída foi fixada a altura de escoamento e a distribuição de pressões como hidrostática; as laterais são condições de contorno de simetria (uma vez que o escoamento é assumido bidimensional, como em um canal largo); no topo são utilizadas extrapolações que representam condição de contorno para uma região aberta e o contorno sólido possui rugosidade absoluta equivalente semelhante à do concreto, 0,15 mm. A malha gerada possui 442.725 elementos e 890.092 nós. A representação do escoamento bifásico (ar e água) foi feita com o modelo multifásico não homogêneo cuja característica é a de compartilhar apenas o campo de pressões entre as fases. Maiores detalhes sobre a formulação matemática podem ser vistos em Simões (2012). Sendo mais robusto que o modelo homogêneo (que compartilha todas as variáveis de campo), ele foi adotado devido às características do problema, que inclui escoamento subcrítico (a montante da comporta), escoamento supercrítico, ressalto hidráulico (na bacia de dissipação) e escoamento subcrítico à saída do domínio computacional.

A malha adotada possibilitou a captura da superfície livre com boa resolução, como ilustrado nas Figuras 13 a 15, a seguir. Nota-se que o escoamento supercrítico à jusante da comporta, no canal do sistema extravasor, é seguido de um ressalto hidráulico afogado na bacia de dissipação para as condições simuladas. O ressalto é identificado pela mudança de regime (supercrítico para subcrítico) e apresenta campo de velocidades com a recirculação esperada (grande turbilhão denominado rolo do ressalto hidráulico). Um segundo resultado relevante, obtido com a solução numérica, é o campo de pressões, isto é, $p=p(x,y)$. Note-se que a distribuição de pressões à montante da comporta é praticamente hidrostática. À jusante, há regiões com baixas pressões e, no início da bacia de dissipação ocorre uma região com pressões elevadas devido à forma da transição. Havendo formação de bolhas vaporosas ou gasosas à montante desse ponto, o transporte das mesmas até a referida região pode ocasionar colapsos (o fenômeno da cavitação) e conseqüente danos ao concreto. Trata-se

de um indicativo para que durante as inspeções periódicas seja dada especial atenção a essa parte do dissipador de energia. A Figura 17(c) contém a distribuição adimensional de pressões ao longo da superfície do vertedor, indicando regiões com pressões positivas e negativas. Observa-se que o comportamento geral dos resultados numéricos segue aquele indicado por WES (1977).

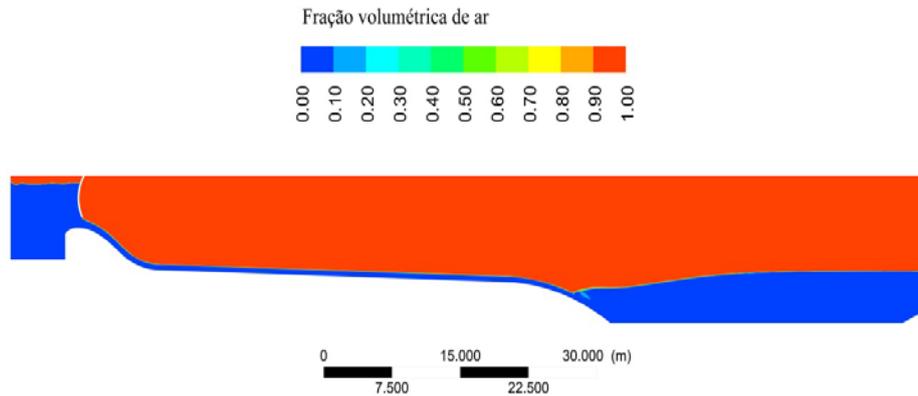


Figura 10: Campo de fração volumétrica das fases água e ar

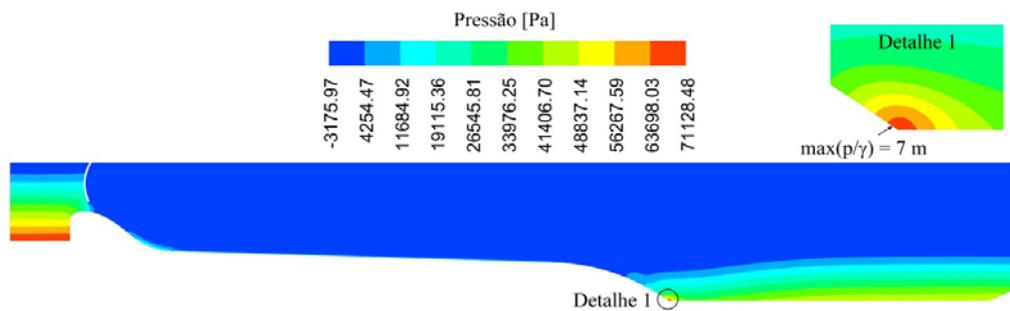


Figura 11: Campo de pressões no sistema extravasor

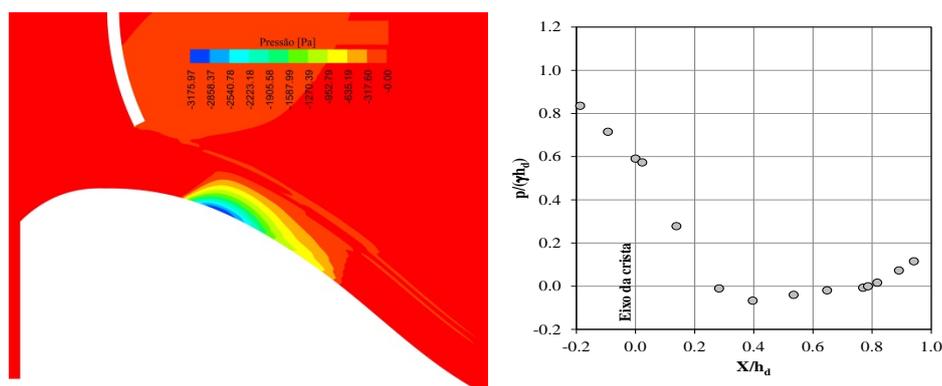


Figura 12: Distribuição de pressões adimensional ao longo do perfil do vertedor

CONCLUSÕES

O coeficiente de vazão, em função da abertura das comportas, calculado por meio do polinômio p_2 , apresentou pequenas diferenças em relação ao coeficiente de vazão obtido experimentalmente, em protótipo (diferenças menores que 10%). Com este polinômio, é possível construir uma curva de vazões escoadas para diferentes aberturas das comportas. O modelo proposto poderá subsidiar a operação segura da barragem nos eventos de cheias e na prevenção de inundações das áreas à jusante, pois permite a determinação, confiável, das vazões descarregadas em função da abertura das comportas.

A solução numérica das equações de Navier-Stokes com médias de Reynolds e o modelo de turbulência adotado possibilitou identificar a localização de pressões médias máximas, sendo este um resultado relevante para a segurança da estrutura, pois é um indicativo para realização de inspeções localizadas. A distribuição adimensional de pressões sobre a crista padrão apresenta resultado consistente com aqueles obtidos pela via experimental e publicados pelo WES (1977).

Trabalhos que avancem a partir deste podem explorar maior número de medições em campo, incluindo medições experimentais da posição da superfície livre e realização de registros fotográficos com câmeras de alta velocidade. Com isso, torna-se possível identificar eventual incorporação de ar, flutuações da superfície livre e adequação dos muros laterais projetados, além de comportamentos localizados nas proximidades das comportas e pilares. Recomenda-se também a realização de simulações numéricas com malhas mais refinadas e simulações tridimensionais da parte inicial do sistema extravasor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ARAUZ, I.J. (2005) **Vertedor de superfície e escoamento sob comportas**, Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
2. CHANSON, H. (2004) **The hydraulics of open channel flow: an introduction**, Elsevier Butterworth-Heinemann, second edition.
3. CHOW, V.T. (1959) **Open-channel hydraulics**, New York, McGraw-Hill.
4. LESIEUR, M. (2008) **Turbulence in fluids**, 4th ed. Springer. 558 p.
5. PORTO, R.M (2006) **Hidráulica Básica**, EESC-USP, São Carlos, 4ª edição.
6. RODI, W. (2000). **Turbulence models and their application in hydraulics: a state-of-art review**. IAHR/AIRH. Taylor & Francis, 3th ed., second print., 104 p.
7. SIMÕES, A. L. A. (2008) **Considerações sobre a hidráulica de vertedores em degraus – Metodologias adimensionais para pré-dimensionamento**, Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, USP.
8. SIMÕES, A.L.A.; SCHULZ, H.E.; PORTO, R.M. (2010). **Stepped and smooth spillways: resistance effects on stilling basin lengths**. Journal of Hydraulic Research v.48, n.3, p.329-337.
9. WES Estados Unidos, (1977) **Hydraulic design criteria**, U.S. UNITED STATES ARMY ENGINEER.
10. U.S. DEPARTMENT OF INTERIOR, BUREAU OF RECLAMATION (1987) **Design of small dams**, third edition.