

Levantamento das Curvas do Comportamento Hidráulico do Mecanismo de Transposição de Peixes da UHE de Igarapava

Edna Maria de Faria Viana, Marco Túlio Corrêa de Faria, Carlos Barreira Martinez

Centro de Pesquisas Hidráulicas (CPH /EHR), (PPG-SMARH, PPG-MEC), UFMG

ednaviana@pop.com.br, mtfaria@demec.ufmg.br, martinez@cce.ufmg.br

Recebido: 01/04/08 – revisado: 08/10/08 – aceito: 13/03/09

RESUMO

O projeto de mecanismos de transposição de peixes (MTP), no Brasil, basicamente segue os parâmetros construtivos estabelecidos na Europa e na América do Norte. A determinação das condições de escoamento no sistema de tanques é passo fundamental para o sucesso de um projeto de MTP. Com o objetivo de trazer subsídios à análise e projeto de um MTP do tipo escada com ranhura vertical, esse trabalho apresenta um estudo experimental sobre as condições de fluxo em uma escada para peixes instalada na UHE Igarapava, localizada entre os estados de Minas Gerais e São Paulo. Além disso, no trabalho é apresentada uma discussão sobre a aplicabilidade das equações de escoamento clássicas empregadas no projeto desses mecanismos. Por facilidade construtiva, as dimensões dos tanques do protótipo da UHE Igarapava diferem dos parâmetros dimensionais geralmente utilizados em projetos de MTP executados no exterior. Um modelo reduzido do mecanismo de Igarapava é especialmente desenvolvido para esse estudo. São efetuadas comparações entre as medições das condições hidráulicas de funcionamento do mecanismo com as predições obtidas por meio do uso das equações de escoamento. A curva de correção dos parâmetros hidráulicos do mecanismo da UHE Igarapava é apresentada no trabalho.

Palavras Chave: mecanismo de transposição de peixes, comportamento hidráulico, UHE Igarapava

INTRODUÇÃO

Em todo o mundo tem sido observada a fragmentação dos rios por barragens (Morita e Yikot, 2006). Isso tem sido considerado a maior causa do declínio da população de salmão e trutas em países de clima temperado (Rodríguez *et al.* 2006). Esse fato tem sido evidente, também, nas comunidades de peixes brasileiros (Godinho, 1993).

Os peixes do sudeste brasileiro costumam ser divididos em dois grandes grupos, de acordo com o comportamento reprodutivo: migradores ou de piracema e não migradores (Godinho, 1993). Dourado, surubim, pirá e curimatã são peixes de piracema que, para fins reprodutivos, usualmente se deslocam rio acima. Esses peixes são geralmente de maior porte e de maior valor comercial do que as espécies não migradoras.

Com o intuito de minimizar o impacto sobre a ictiofauna, alguns estados brasileiros promulgaram leis que regulamentam a construção de mecanismos de transposição. Assim, em 1995, no Pará, foi promulgada a lei 5.886 que obriga a construção de escadas de peixes em barramentos no Estado. Em 1997, surgiram as leis 12.488, em Minas Gerais, e

9.798, em São Paulo. Dois anos depois, no estado do Espírito Santo, foi promulgado o Decreto Normativo 4.489-N.

Os sistemas utilizados para transposição de peixes em barramentos podem ser do tipo eclusa, elevador e escada para peixes.

As eclusas para peixes são sistemas semelhantes aos utilizados por navios. Esse tipo de sistema é equipado com duas câmaras interligadas que estão em comunicação com o reservatório e o canal de fuga por meio de comportas. Assim, os peixes são atraídos para a entrada da eclusa, por meio de um sistema que cria um escoamento com maior velocidade, conhecida como jato de atração, a comporta de jusante é fechada, e a comporta de montante começa a ser aberta para que a água encha a ligação entre as duas câmaras e chegue ao nível de montante. Os peixes se deslocam para o reservatório e a comporta de montante se fecha e a de jusante se abre iniciando todo o processo. A principal diferença entre a eclusa de navios e de peixes é que a segunda necessita de um jato de atração para induzir as diferentes espécies a entrarem no sistema.

Nos elevadores, os peixes são atraídos pelo jato de atração, para uma câmara onde a caçamba fica submersa. Em seguida uma comporta se fecha,

impedindo que os peixes retornem, e a caçamba é conduzida para o reservatório superior ou para caminhões tanques, que fazem o percurso até o reservatório.

As escadas são constituídas por um canal com declividade que permita o escoamento a uma velocidade de escoamento compatível com a capacidade de nado dos peixes. Esse canal é separado por anteparos formando um conjunto de tanques sequenciais. Os tipos mais comuns de escada são do tipo Denil, tanque com vertedor, canal natural e ranhura vertical. Os anteparos da escada do tipo Denil são inclinados em 45 graus e possuem uma abertura na região central. Esse tipo de escada é construído normalmente com grandes inclinações e, portanto, apresenta velocidades elevadas, tornando a escada seletiva do ponto de vista da passagem de diferentes espécies de peixes. No caso da escada do tipo tanque com vertedor, os anteparos podem ter aberturas e orifícios. Nesse sistema, os peixes têm de saltar, sobre o anteparo ou passar pelas aberturas enfrentando velocidades elevadas. A escada do tipo canal natural é considerada, por alguns biólogos e engenheiros, como um dos melhores mecanismos de transposição para peixes. Isso se deve à grande semelhança com um tributário e seus anteparos serem construídos com pedras e terra. No entanto, esse sistema necessita de grande área para sua instalação pelo fato do canal ter de ser construído com declividades muito pequenas. A escada do tipo ranhura vertical possui anteparos de diferentes formas inseridas em suas paredes. Como existe uma abertura entre esses anteparos, os peixes podem passar de um tanque para outro em diferentes alturas de lâmina de água e, assim, nadar em uma velocidade mais adequada a sua capacidade.

Além dos fatores hidrodinâmicos, a eficiência das passagens para peixes depende das características físicas e biológicas típicas das espécies de peixes migratórios. As velocidades do fluido nos orifícios e anteparos devem ser menores do que a velocidade de explosão do peixe ("burst speed") e a velocidade da água, no tanque, deve ser menor do que a velocidade de cruzeiro ("cruising speed") (Martinez *et al.*, 2000).

Os fatores hidrodinâmicos de uma escada com ranhura vertical dependem das características construtivas dos tanques da escada. Por motivos de facilidade de construção, os tanques do MTP da UHE Igarapava possuem dimensões básicas (comprimento e largura) diferentes das dimensões geralmente recomendadas pela literatura técnica internacional. Portanto, a utilização das equações clássicas para determinação das condições hidráulicas

de funcionamento do mecanismo deve ser avaliada com critério. Esse trabalho apresenta um estudo das condições de escoamento dos tanques do mecanismo instalado na UHE Igarapava por meio de medições realizadas em um modelo reduzido projetado especialmente para esse mecanismo. Além disso, o trabalho apresenta uma análise comparativa entre os valores de fluxo obtidos experimentalmente e as previsões calculadas por meio das equações clássicas. A curva de correção dos parâmetros hidráulicos da escada com ranhura vertical da UHE Igarapava é também apresentada no trabalho.

MTP DO TIPO RANHURA VERTICAL

Apesar desse tipo de escada ser utilizado desde a década de 1940, os estudos sobre o seu comportamento hidráulico somente foram iniciados por volta do final dos anos 1970. Em novembro de 1979, White e Larsen tentaram otimizar a estrutura desse tipo de MTP para uma melhor distribuição da perda de carga, da velocidade de saída e das velocidades internas, levando em consideração duas espécies de peixes migradoras, que pertenciam à região onde localizavam os barramentos de Turners Falls e Vernon, no rio Connecticut, EUA. Em outro estudo em modelos reduzidos, verificou-se que existem regiões no tanque onde a velocidade era superior, em até 15%, à velocidade do jato gerado nas ranhuras. Entretanto, os peixes conseguiam subir sem passar por essas velocidades elevadas (White e Pennino, 1980).

Em 1986, Rajaratnam, Vinne e Katopodis realizaram um estudo, onde se observou o comportamento hidráulico de uma escada de peixes do tipo ranhura vertical. Nesse estudo, eles utilizaram sete diferentes projetos de escada em quatro escalas (1:1; 1:5,33; 1:8; 1:16). Pela análise da altura da lâmina de água no decorrer do comprimento da escada, observou-se que o escoamento se comportava de forma uniforme, pois os valores eram praticamente iguais, e que a perda de carga de um tanque para outro se mantia com o mesmo valor. Segundo Rajaratnam *et al.* (1986), para esse tipo de escoamento uniforme, uma aproximação simples pode ser encontrada envolvendo a vazão e a declividade, como é mostrado na Equação 1.

$$b_0 y_0 \Delta x \gamma S_0 = \overline{\tau_0} m y_0 \Delta x \quad (1)$$

onde b_0 é a abertura entre os anteparos (m), τ_0 é a tensão de cisalhamento (N/m), m é uma variável que depende do tipo de escoamento ($m=1$ quando existe parede em um dos lados do escoamento, e $m=2$ para o escoamento é contornado por parede dos dois lados), S_0 é a declividade (m/m), y_0 é a altura da lamina no centro do tanque (m) e Δx é a distância entre os pontos na direção do comprimento do canal (m).

A tensão de cisalhamento pode ser escrita como mostrada pela Equação 2.

$$\tau_0 = C_f \frac{\rho V^2}{2} \quad (2)$$

onde C_f é o coeficiente de atrito, ρ é a massa específica (kg/m³) e V é a velocidade média (m/s).

Substituindo a tensão de cisalhamento na que. 1, obtém-se a Equação 3.

$$V^2 = \frac{2 b_0 S_0 g}{m C_f} \quad (3)$$

Se o coeficiente de atrito for constante, pode-se encontrar uma vazão adimensional Q_* por uma função linear de y_0/b_0 , como mostrado na Equação 4 (Rajaratnam *et al.*, 1986).

$$Q_* = \frac{Q}{\sqrt{g S_0 b_0^5}} = \frac{y_0}{b_0} \sqrt{\frac{2}{m C_f}} \quad (4)$$

Com esse resultado, os autores levantaram as equações de vazão adimensional para 7 projetos de MTP do tipo ranhura vertical, mostrados na Figura 1.

Para os sete diferentes projetos apresentados na Figura 1, são apresentadas as expressões para determinação da vazão adimensional, organizadas na Tabela 1, numeradas de Equação 5 a Equação 11.

Essas vazões adimensionais são utilizadas no levantamento das condições de funcionamento, das escadas do tipo ranhura vertical, nas etapas preliminares de projeto.

Outros parâmetros de análise importantes são a dissipação de energia nos tanques e o coeficiente de descarga. Essa dissipação não pode ser muito elevada para não desorientar os peixes. Considera-se que a dissipação não deve ser superior

a 0,191 kW/m³ (Bell, 1973). Pode-se calcular essa dissipação pela Equação 12.

Tabela 1 – Expressões para vazão adimensional (Rajaratnam *et al.* 1986)

Projeto	Vazão adimensional	Equação
1	$Q_* = 3,77 \frac{y_0}{b_0} - 1,11$	(5)
2	$Q_* = 3,75 \frac{y_0}{b_0} - 3,52$	(6)
3	$Q_* = 2,84 \frac{y_0}{b_0} - 1,62$	(7)
4	$Q_* = 5,85 \frac{y_0}{b_0} + 0,67$	(8)
5	$Q_* = 2,67 \frac{y_0}{b_0} - 0,52$	(9)
6	$Q_* = 2,71 \frac{y_0}{b_0}$	(10)
7	$Q_* = 2,91 \frac{y_0}{b_0} - 3,22$	(11)

$$k = \frac{Q \gamma \Delta h}{B L y_0} \quad (12)$$

onde γ é peso específico da água (N/m³), B a largura do tanque (m), L o comprimento do tanque, Δh perda de carga (m) e y_0 a altura média da lamina d'água (m).

O coeficiente de descarga é a razão entre a vazão real e a ideal que passa pelo sistema. Essa diferença existe pelo fato de ao escoar por aberturas ocorrer o fenômeno conhecido como *vena contracta*. Com isso a área da seção por onde o escoamento ocorre é inferior à área da abertura. Para se corrigir esse fenômeno tem-se o coeficiente de contração, que corresponde à razão entre a área real de escoamento e a área da abertura. Além disso, ao passar pela abertura ocorrem perdas por atrito, que devem ser contabilizadas, para isso tem-se o coeficiente de velocidade que relaciona a velocidade média real com a ideal desprezando-se o atrito. O coeficiente de descarga é o produto do coeficiente de contração e de velocidade, como mostra a Equação 13.

$$C_d = C_v \cdot C_c \quad (13)$$

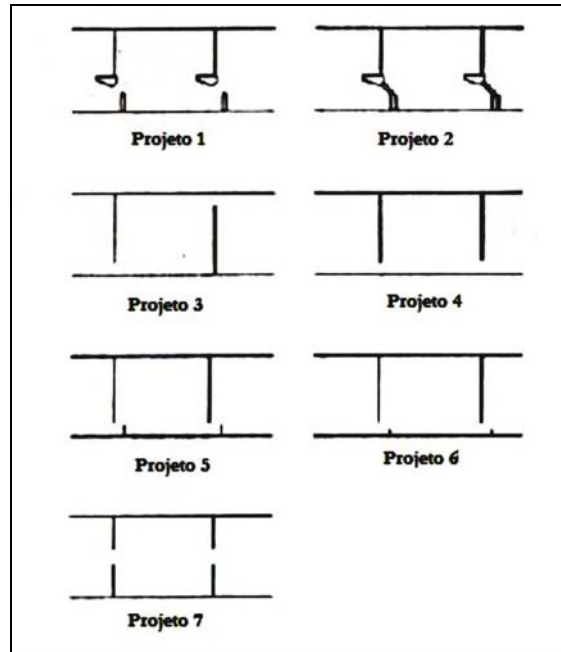


Figura 1 – Sete tipos de projetos de escada do tipo ranhura vertical (Rajaratnam *et. al.* 1986)

onde C_v é o coeficiente de velocidade e C_c é o coeficiente de contração.

Quanto mais próximo de 1 estiver o coeficiente de descarga, menor será a perda ocorrida por atrito e contração da área na passagem do escoamento pela abertura.

Segundo Clay (1961), para as ranhuras pode-se determinar o coeficiente de descarga pela Equação 14.

$$Q = C_d (b_0 \bar{y}) \sqrt{2g\Delta h} \quad (14)$$

onde y é a altura de lâmina de água na saída do tanque (m), Q é a vazão (m^3/s), b_0 é a abertura entre os anteparos (m), g é a aceleração da gravidade (m/s^2) e Δh é a diferença de altura no tanque (m).

Pelos estudos de Rajaratnam *et al.* (1986) para os projetos 1, 2 e 6 (ver figura 1), com valores y_0/b_0 de 2 a 10, a variação do coeficiente de descarga (C_d) fica entre 0,6 e 0,8.

A escada do tipo ranhura vertical é muito utilizada nos EUA (Bell, 1991). Rajaratnam, Katopodis e Salanki realizaram, em 1992, uma nova investigação propondo novas equações para mais 11 projetos da escada do tipo ranhura vertical. Além disso, foram investigadas diversas configurações de larguras e comprimentos para os tanques. Então,

observou-se que o desempenho da escada do tipo ranhura vertical não sofria alterações consideráveis, quando se mantinham os valores de comprimento próximos de $10b_0$ e de largura ao redor de $8b_0$ e esta relação foi considerada uma boa proposta e é utilizada geralmente nas escadas construídas nos EUA. Por meio deste estudo, pôde-se verificar que com o aumento do comprimento e com declividades maiores, a velocidade média nas ranhuras irá aumentar, influenciada pelo aumento de Δh . Este resultado mostra que os tanques mais curtos, por exemplo com $L = 5b_0$, resultam em um menor valor de coeficiente na equação de vazão adimensional e com maiores profundidades do que no caso de se utilizar um tanque de comprimento $L = 10b_0$. Isto acarreta um aumento no número de tanques e no aumento do custo do mecanismo. Definiu-se, então, que o comprimento de tanque na faixa de $L = 10b_0$ é o valor indicado para os tanques. Quando, nesse estudo, se manteve o comprimento fixo e variou-se a largura dos tanques, observou-se que para pequenas larguras a recirculação é elevada e o nível de turbulência aumenta. Este aumento pode dificultar a transposição dos peixes de um tanque para outro. Por isso, é aconselhável se utilizar uma largura aproximada de $8b_0$.

O MTP do tipo ranhura vertical construído na UHE de Igarapava foi projetado levando-se em consideração as pesquisas realizadas e descritas

anteriormente. Nesse caso, escolheu-se o arranjo do projeto 1. No entanto, por facilidades construtivas e redução de custos, o MTP de Igarapava foi construído com tanques quadrados com $7,5 b_0$ de largura e comprimento.

O estudo, objeto desse artigo, apresenta o resultado da investigação do comportamento do escoamento de um modelo reduzido do MTP de Igarapava, utilizando o mesmo procedimento experimental descrito por Rajaratnam *et. al.* (1986).

METODOLOGIA

Para a realização do estudo experimental apresentado nesse trabalho, utilizou-se um canal construído em acrílico em escala reduzida, 1:20, do protótipo de Igarapava. Esse sistema é constituído por dois reservatórios, um de montante e outro de jusante, ambos fabricados em fibra de vidro, interligados por um canal em acrílico, que representa 22 tanques do MTP do tipo ranhura vertical da UHE de Igarapava, como é mostrado na Figura 2.

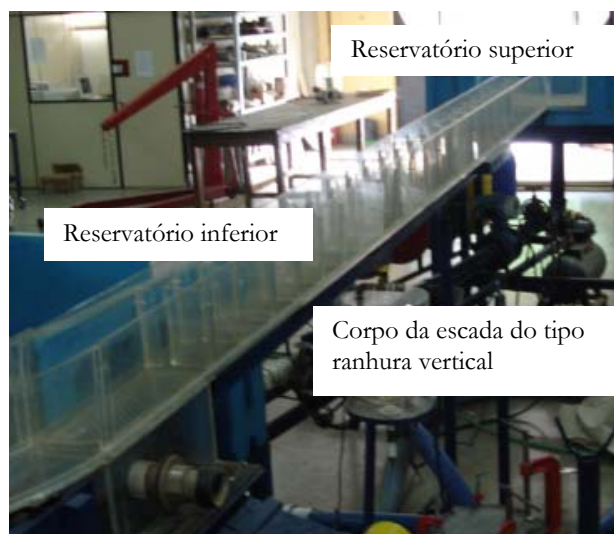


Figura 2 –Foto do modelo reduzido do MTP do tipo ranhura vertical da UHE de Igarapava

Cada tanque da escada tem 15 cm de comprimento e 15 cm de largura, separados por antepa-

ros de acrílico com abertura b_0 de 2 cm, geometricamente correspondente ao protótipo da UHE de Igarapava. O esboço do tanque pode ser observado na Figura 3.

O modelo reduzido é interligado a um sistema de bombeamento, mostrado na Figura 4, que possui controlador de vazão baseado em inversores de frequência (Cavazzana, 2007). Medidores de vazão eletromagnéticos são instalados no sistema para monitorar a vazão de alimentação do mecanismo.

Inicialmente, foi realizada uma verificação dos valores de vazão de projeto estabelecidos para o protótipo da UHE Igarapava, que deveriam variar entre $1,37 \text{ m}^3/\text{s}$ e $1,67 \text{ m}^3/\text{s}$. Entretanto, Viana *et. al.*, 2005, observaram, no protótipo, durante a realização do mapeamento do campo de velocidades na escada, que a vazão de operação estava na faixa de $1,12 \text{ m}^3/\text{s}$. Por conseguinte, optou-se pela utilização dos dados de vazão medidos no protótipo. Dessa forma, pela similaridade de Froude, utilizando-se uma escala 1:20 para o modelo, tem-se uma vazão de modelo de $0,63 \text{ l/s}$. Assim, selecionaram-se intervalos de teste iguais superiores e inferiores ao valor de $0,63 \text{ l/s}$, chegando aos valores para os ensaios em modelo apresentados na tab. 2:

Tabela 2- Vazões dos testes em modelo

Q (l/s)									
					0		0	0	
					,	0	,	,	
					6	,	7	8	0,
0,28	0,35	0,42	0,49	0,56	3	7	7	4	91

Observou-se que, devido à característica do sistema hidráulico, existia uma flutuação nas vazões durante os testes. Assim, para cada valor de vazão investigada foram realizadas dez leituras com o objetivo de minimizar as incertezas associadas à flutuação. Para cada vazão, foi medida a altura da lâmina d'água, utilizando uma ponta linimétrica, na entrada, na saída e no centro, em dez tanques. Os três primeiros tanques foram desprezados, com intuito de eliminar as interferências de montante. O mesmo foi feito à jusante, sendo desprezados os nove últimos tanques. Com os valores medidos dos níveis, pode-se determinar a perda de carga de um tanque para outro, seguindo o estabelecido no procedimento de teste realizado por Rajaratnam *et. al.* (1986).

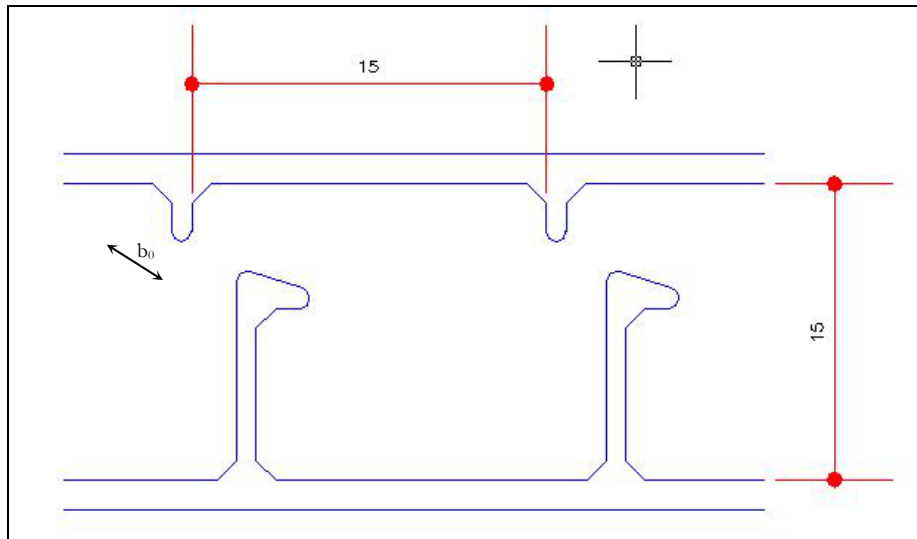


Figura 3 – Desenho esquemático de um tanque do modelo reduzido



Figura 4 – Bancada de bombeamento equipada com um sistema de controle de vazão e medidores de vazão

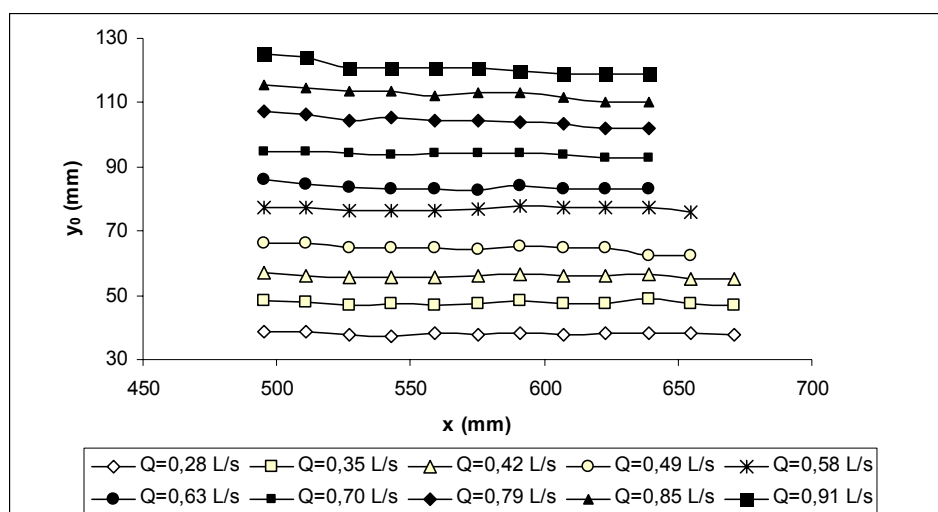


Figura 5 – Curvas dos valores medidos de nível nos tanques do modelo para as vazões de teste.

Tabela 3 – Valores estimados para os parâmetros hidráulicos nos testes do modelo de MTP

Q (l/s)	Q (m ³ /s)	y ₀ (m)	Q*	y ₀ /b ₀	m	C _f	y _e (m)	y _s (m)	D _h (m)	C _d	k (kW/m ³)
0,280	0,00028	0,038	6,452	1,915	2	0,088	0,037	0,044	0,007	0,875	21,631
0,350	0,00035	0,049	8,065	2,425	2	0,090	0,048	0,056	0,008	0,822	23,551
0,420	0,00042	0,057	9,678	2,840	2	0,086	0,056	0,064	0,008	0,855	24,453
0,490	0,00049	0,066	11,290	3,275	2	0,084	0,065	0,072	0,008	0,860	25,716
0,580	0,00058	0,078	13,364	3,900	2	0,085	0,077	0,086	0,009	0,802	29,120
0,630	0,00063	0,084	14,516	4,200	2	0,084	0,083	0,091	0,008	0,876	26,108
0,700	0,0007	0,095	16,129	4,740	2	0,086	0,093	0,102	0,009	0,827	28,274
0,790	0,00079	0,104	18,203	5,205	2	0,082	0,104	0,111	0,007	0,960	23,115
0,850	0,00085	0,113	19,585	5,665	2	0,084	0,111	0,119	0,008	0,901	26,115
0,910	0,00091	0,120	20,968	6,000	2	0,082	0,119	0,126	0,007	0,974	23,098

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Seguindo os passos descritos por Rajaratnam *et. al.* (1986), foram determinados os parâmetros hidráulicos da escada do estudo. Essas estimativas foram comparadas com os valores medidos em modelo.

A utilização da relação de vazão adimensional requer que o escoamento seja permanente. Di-

ante disso, compararam-se as leituras das alturas de lâmina d'água no centro do tanque, em toda a região de teste. Com isso, pôde-se construir a Figura 5, que mostra que as variações de altura de lâmina d'água, nos diferentes tanques, giram em torno de aproximadamente 1% da altura média. Esses resultados indicam que o escoamento era praticamente uniforme, acenando positivamente para o uso da equação de vazão adimensional para o modelo de escada em estudo.

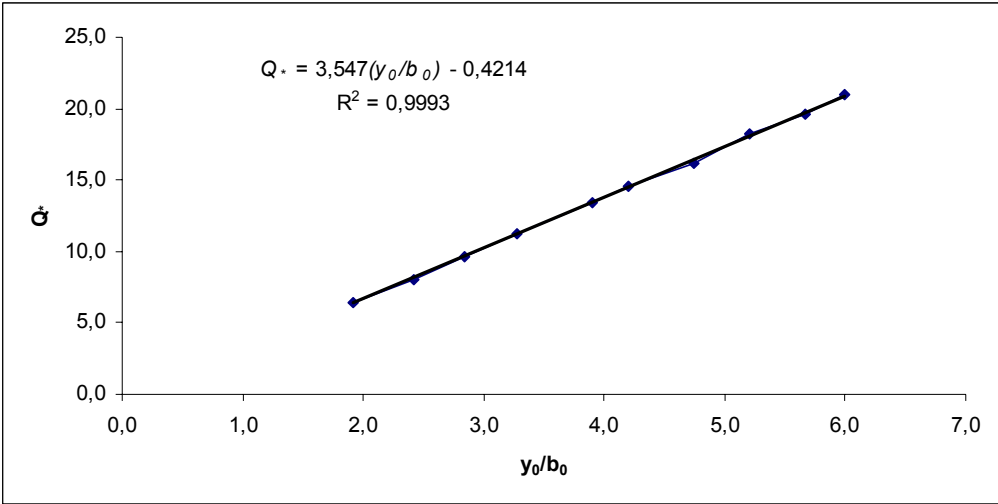


Figura 6 – Curva de vazão adimensional Q^* em função de y_0/b_0

Tabela 4 – Valores comparativos de vazão adimensional e as estimativas de erro

				Equação do teste realizado			Equação de Rajaratnam et al (1986)		
Q (m³/s) teste	y_0 (m)	b_0 (m)	y_0/b_0	Q^*	Q (m³/s)	erro (%)	Q^*	Q (m³/s)	erro (%)
0,0003	0,038	0,020	1,915	6,371	0,00028	-1,249	6,110	0,00027	-5,30
0,0004	0,049	0,020	2,425	8,180	0,00036	1,432	8,032	0,00035	-0,40
0,0004	0,057	0,020	2,840	9,652	0,00042	-0,263	9,597	0,00042	-0,83
0,0005	0,066	0,020	3,275	11,195	0,00049	-0,845	11,237	0,00049	-0,48
0,0006	0,078	0,020	3,900	13,412	0,00058	0,357	13,593	0,00059	1,71
0,0006	0,084	0,020	4,200	14,476	0,00063	-0,278	14,724	0,00064	1,43
0,0007	0,095	0,020	4,740	16,391	0,00071	1,625	16,760	0,00073	3,91
0,0008	0,104	0,020	5,205	18,041	0,00078	-0,891	18,513	0,00080	1,70
0,0009	0,113	0,020	5,665	19,672	0,00085	0,444	20,247	0,00088	3,38
0,0009	0,120	0,020	6,000	20,861	0,00091	-0,512	21,510	0,00093	2,59

Após essa primeira etapa, foram levantadas as alturas na entrada, centro e saída dos tanques, para cada vazão, que permitiram a determinação de todas as variáveis relevantes para a análise do escoamento, em escadas do tipo ranhura vertical, mostrada na Tabela 3, de acordo com Rajaratnam *et. al.* (1986).

Pela Tabela 3, pode-se observar que o coeficiente de atrito médio é de 0,085, com um desvio padrão de aproximadamente 3%. Essa pequena variação dos valores dos coeficientes de atrito é um

bom indicativo da aplicabilidade de equação de vazão adimensional.

Confirmada a aplicabilidade da equação de vazão adimensional no mecanismo em estudo, construiu-se a curva que relaciona a vazão adimensional (Q^*) em função da razão adimensional entre a altura da lâmina d'água no centro do tanque e a abertura entre os anteparos (y_0/b_0), como pode ser visto na Figura 6. Nessa figura, mostra-se a equação obtida pelo ajuste da curva de vazão adimensional. Além disso, pode-se observar pela Tabela 3 que o coeficiente de descarga para o modelo do MTP de

Igarapava fica entre 0,8 e 0,97, patamar superior ao valor estimado por Rajaratnam *et al.* (1986) para o projeto 1 (entre 0,6 a 0,8). Isso indica que as perdas provocadas pela passagem na abertura, no sistema com tanque quadrado, é menor que aquelas do tanque padrão descrito pelo autor como mais eficiente.

Por meio da Figura 6, observa-se que a equação de vazão adimensional, para o modelo de MTP de Igarapava ($Q_s = 3,547(y_o/b_o)^{-0,4214}$), se difere um pouco daquela definido por Rajaratnam *et al.* (1986) para o mesmo projeto construtivo, que corresponde a $Q_s = 3,77(y_o/b_o)^{-1,11}$.

Diante disso, decidiu-se encontrar o erro no levantamento da vazão que escoou pela escada do tipo ranhura vertical, com parâmetros construtivos semelhante aos do mecanismo da UHE de Igarapava, utilizando-se as equações de vazão obtidas nesse trabalho e no estudo de Rajaratnam *et al.* (1986). Foram utilizados os dados de altura de lâmina d'água levantados experimentalmente, para cada vazão, e a largura da abertura da ranhura do modelo. Esses valores foram inseridos nas duas equações de vazão adimensional. Em seguida, utilizou-se a Equação 4 para a determinação da diferença de valores de vazão obtidos pelas duas equações. Os dados dessa comparação podem ser observados pela Tabela 4.

Analisando-se a Tabela 4, observa-se que o erro, na determinação da vazão, ao se utilizar a equação específica para o MTP da UHE de Igarapava, varia entre 0,26 % e 1,63 %, onde 70% dos valores possuem erro inferior a 1%. Utilizando-se a equação descrita por Rajaratnam *et al.* (1986), esse valor varia entre 0,48 % e 5,3 %. Pode-se observar, também, que somente 30% dos valores o erro são inferiores a 1%, 70 % das vazões levantadas possuem erro superior a 1,4 %.

CONCLUSÃO

Ao se analisarem os erros devido à utilização das equações definidas por Rajaratnam, *et al.* (1986), observa-se uma diferença de até 5,3 % em relação à vazão real medida. Esse valor pode ser considerado como aceitável, pois os parâmetros da geometria da escada não seguiu exatamente o proposto pelo referido autor em 1986. A diferença de geometria explica a defasagem de resultados, e pode ser considerada como a principal causa nas diferenças encontradas nos parâmetros tabelados. Devido ao fato da defasagem dos resultados ser pequena, acredita-se que a utilização, dessas equações, no pro-

jeto do tipo 1 de escadas com ranhuras verticais, com tanques de dimensões diferentes das estudadas, não ocasione defasagem de resultados significativas. Desta forma, sugere-se a expansão desse tipo de trabalho para os demais 17 tipos de projetos de escadas de ranhura vertical, cujas equações foram levantadas por Rajaratnam, *et al.* (1986). Isso possibilitará a delimitação de valores de defasagem para as equações em função da modificação de parâmetros da geometria dos tanques. Esse trabalho será útil para projetos de novos mecanismos desse tipo quando os parâmetros construtivos indicados por Rajaratnam *et al.* (1986) não forem seguidos pelos projetistas.

Além disso, uma análise mais profunda deve ser realizada quanto ao coeficiente de descarga. Esse trabalho mostra que para a escada com tanques quadrados, como a do mecanismo da UHE Igarapava, obteve-se melhor desempenho do que aquele encontrado para tanques com largura de $8 b_o$ e comprimento de $10 b_o$. Nos estudos de Rajaratnam *et al.* (1986), os valores encontrados de coeficiente de descarga, para a escada do projeto 1, estavam entre 0,6 e 0,8. Já nos tanques quadrados, os valores encontrados ficaram entre 0,8 e 0,97, mostrando que o sistema com esta forma promove uma perda menor do que aos sistemas construídos com dimensões consideradas padrão. É importante levar em consideração esse fato, pois, a velocidades na ranhura vertical para configurações quadradas é maior se comparada com os tanques retangulares. Assim, sugere-se fortemente que nos projetos, de mecanismos de transposição de peixes do tipo ranhura vertical, se leve sempre em consideração a capacidade natatória dos peixes a serem transpostos pelo sistema.

AGRADECIMENTOS

Centro de Pesquisas Hidráulicas e Recursos Hídricos (CPH) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

REFERÊNCIAS

- BELL, M. C., Fisheries Handbook of Engineering Requirements and Biological Criteria, Corps of Engrs., North Pacific Div., Portland, Oreg., 490 pp., 1973;

- BELL, M.C., *Fisheries Handbook of engineering Requirements and Biological Criteria*, U.S. Army Corps of Engineers, North Pacific Division, Portland, 1991;
- CLAY, C.H., *Design of Fishways and Other Facilities*. Dept. of Fisheries of Canada, Ottawa, 301 pp., 1961 – Apud RAJARATNAM, N., VINNE, V.D., KATOPODIS, C., *Hydraulics of Vertical Slot Fishways*, Journal of Hydraulic Engineering, vol. 112, n. 10, Outubro de 1986;
- CAVAZZANA, E, Rastreamento Robusto de Perfis de Pressão ou de Vazão em uma Bancada de Testes Hidráulicos via Controle de Torque em Modos Deslizantes, Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG, 2007
- ESPÍRITO SANTO, Decreto Normativo 4.489-N, de 15/07/99, do Estado do Espírito Santo, Regulamenta a implantação de mecanismo de transposição para peixes, 1999;
- GODINHO, A.L. *E os peixes de Minas em 2010* Ciência Hoje, 16(91): 44-49, 1993;
- MARTINEZ, C. B., JUNHO, R. A. C., GODINHO, A. L., MACEDO, A. A., *Mecanismo de Transposição de Peixes*, II Simpósio Brasileiro Sobre Pequenas e Médias Centrais Hidrelétricas. Canela, Rio Grande do Sul, Brasil 2000;
- MINAS GERAIS, Lei 12.488, de 9/4/1997 do Estado de Minas Gerais, Torna obrigatória a construção de escadas para peixes de piracema em barragem edificada pelo estado, 1997;
- MORITA, K., YOKOTA, A., *Population viability of stream-resident salmonids after habitat fragmentation: a case study with white-spotted charr (Salvelinus leucomaenis) by an individual based model*, Ecol. Modell, 115, 85-94, 2002 – in Rodríguez, T.J., Agudo, J.P., Mosquera, L.P., e González, E.P., *Evaluating vertical-slot fishway designs in terms of fish swimming capacities*, Ecological Engineering, 27, p.37-48, 2006;
- PARÁ, Lei 5.886, de 5/04/1995, do Estado do Pará, Torna obrigatório a construção de escadas de peixes em barramentos, 1995;
- RAJARATNAM, N., VINNE, V.D., KATOPODIS, C., *Hydraulics of Vertical Slot Fishways*, Journal of Hydraulic Engineering, vol. 112, n. 10, Outubro de 1986;
- RAJARATNAM, N., KATOPODIS, C. e SALANKI, S., *New Designs for Vertical Slot Fishways*, Canadian Journal of Civil Engineering, n. 19, Ottawa, Canada, 1992;
- RODRÍGUEZ, T.J., AGUDO, J.P., MOSQUERA, L.P., e GONZÁLEZ, E.P., *Evaluating vertical-slot fishway designs in terms of fish swimming capacities*, Ecological Engineering, 27, p.37-48, 2006;
- SÃO PAULO, Lei Nº 9.798, de 7 de outubro de 1997, *Dispõe sobre a construção de escadas para peixes em barragens edificadas em cursos de água de domínio do Estado*, 1997;
- VIANA, E. M. F., *Mapeamento do Campo de Velocidades em Mecanismo de Transposição de Peixes do Tipo Ranhura Vertical em Diferentes Escalas*, Tese de doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG, 2005;
- WHITE, D.K. e PENNINO, B.J., *Connecticut River Fishways: Model Studies*, Journal of Hydraulic Engineering, 106(7), 1980;
- WHITE, D.K. e LARSEN, J., *Hydraulic Model Study of the Proposed Vernon Dam Fish Passage Facility*, Report n 59-79/M14LF, Alden Research Laboratory, Worcester Polytechnic Institute, Holden, Mass., April, 1979;

Survey of Hydraulic Behavior Curves of Fishway Mechanisms at Igarapava HPP

ABSTRACT

The design of fishway mechanisms in Brazil has basically followed the design requirements and characteristics commonly used in Europe and North America. The determination of the flow conditions in the pool system is a fundamental step for successful fishway design. In order to provide information for the design of vertical slot fishways, this work deals with an experimental study on the flow conditions of the fishway mechanism installed in Igarapava Dam, located at the border between Minas Gerais and São Paulo. A scale model of this mechanism is specially devised to study its behavior. Moreover, this work presents an analysis about the applicability of the classical flow equations employed in the fishway design. For convenience of construction, the dimensions of the tanks used in the prototype of the Igarapava Dam are different from those generally used in fishway design. Estimates computed for the dimensionless flow rates are compared with measurements performed on the prototype. The fitted curve for the hydraulic parameters of the Igarapava fishway is also presented in this work.

Keywords: fishway mechanism, hydraulic behavior, Igarapava HPP.