

## **Estabelecimento de Parâmetros Hidráulicos para Escadas de Peixes do Tipo Ranhura Vertical Baseados em Características de Espécies Neotropicais**

**Hersília de Andrade e Santos**

*Departamento Acadêmico de Engenharia Civil - CEFET/MG*

*hersilias@yahoo.com.br.*

**Paulo dos Santos Pompeu**

*Departamento de Biologia – UFLA*

*pompeu@ufla.br,*

**Carlos Barreira Martinez**

*Centro de Pesquisas Hidráulicas (CPH) / Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGMEC), UFMG*

*martinez@cce.ufmg.br*

*Recebido: 21/02/08 – revisado: 22/09/08 – aceito: 07/03/09*

---

### **RESUMO**

*De forma a minimizar os impactos gerados pelo barramento de cursos d'água, a engenharia propõe a construção dos mecanismos de transposição como forma de manter a migração da fauna de peixes local. Entre os dispositivos que permitem a passagem para montante, as escadas são as estruturas mais empregadas. Essas se constituem em canais hidráulicos com estruturas de dissipação de energia, de forma a criar condições favoráveis de escoamento para a passagem de espécies alvo. Assim, a configuração dessas estruturas deve atender às demandas da ictiofauna local, como velocidade e capacidade de suporte de turbulência. No modelo ranhura vertical, a inclinação e a abertura da ranhura são os dois principais parâmetros que influenciam a velocidade do escoamento e o comprimento da estrutura. Por outro lado, os parâmetros construtivos da escada são condicionados pela capacidade natatória dos peixes. Assim, com base nas características biométricas de três espécies migradoras neotropicais, foram obtidos os valores ideais para a abertura da ranhura. Além disso, utilizando-se da capacidade natatória das mesmas espécies, foi obtido, através de dois métodos diferentes, o valor da velocidade máxima do escoamento em função do comprimento da escada. Verificou-se que a tomada de decisão quanto a quais espécies constituem alvo da transposição pode alterar significativamente o volume do canal, uma vez que se torna necessário mais ranhuras para dissipar energia no canal, o que ressalta a importância de estudos prévios da ictiofauna para embasamento dessa decisão.*

**Palavras-chave:** *mecanismos de transposição, escadas para peixes, ranhura vertical e capacidade natatória.*

---

### **INTRODUÇÃO**

Desde as mais remotas civilizações, os cursos d'água têm sofrido os efeitos da ação antrópica, direta ou indiretamente. Interrupções como as provocadas pelas barragens causam enormes danos à biota local, afetando diretamente as espécies migradoras que necessitam deslocar-se ao longo do rio em alguma fase de seu ciclo de vida. Para solucionar esse problema ambiental, foram desenvolvidas estruturas hidráulicas que permitem ao peixe a transposição desses obstáculos. Conhecidas como mecanismos de transposição de peixes (MTP), tais estruturas passaram a ser amplamente utilizadas em todo do mundo.

No Brasil, a construção desses dispositivos foi impulsionada por algumas leis estaduais. Entretanto, avaliações recentes de tais mecanismos têm revelado uma alta seletividade, principalmente para escadas de peixes (Agostinho *et. al.*, 2007) que se basearam em modelos desenvolvidos em países da América do Norte e Europa (Quirós, 1989).

O projeto de escadas para peixes consiste no estabelecimento de estruturas de dissipação de energia, internas ao canal, de forma a atender às necessidades das espécies que farão o seu uso.

Objetivando a simplificação do dimensionamento das escadas e, conseqüentemente, a popularização do procedimento, foram estabelecidas relações entre as principais variáveis hidráulicas, o que possibilita a inferência inicial de apenas alguns

parâmetros. No caso das escadas do tipo ranhura vertical, três variáveis hidráulicas devem ser estabelecidas inicialmente: abertura da ranhura ( $b_o$ ), altura da lâmina d'água ( $y_o$ ) e inclinação da escada ( $S_o$ ), sendo as duas primeiras relacionadas às características da ictiofauna, e a última, relacionada às características do obstáculo a ser transposto (figura 1).

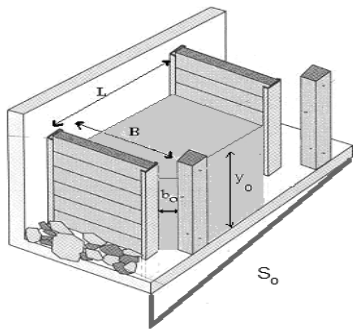


Figura 1- Variáveis hidráulicas das escadas do tipo ranhura vertical

A abertura  $b_o$  é o local onde ocorre a passagem do escoamento dentro da escada. O estabelecimento desse parâmetro permite a determinação das outras dimensões da piscina (Rajaratnam, Van der Vinne e Katopodis, 1986), L e B, através das

relações obtidas em escoamentos com condições ótimas de dissipação de energia (Tabela 1).

A determinação da condição ótima de dissipação de energia é baseada em espécies de peixes de clima temperado, não existindo estudos para espécies neotrópicas. O mesmo se aplica aos valores de abertura,  $b_o$ , e de profundidade mínima,  $y_o$ , que dependem da largura do peixe e do comportamento natatório de cada espécie na coluna d'água, respectivamente. Assim, são propostos na literatura valores de abertura da ranhura entre 15 e 17 cm e uma profundidade mínima de 50 cm para as trutas, enquanto para o salmão,  $b_o$  varia entre 30 e 60 e  $y_o$  entre 75 e 130 cm (Gebler, 1991 e Larinier, 1992).

A inclinação das escadas  $S_o$  (figura 2) é determinada pelo arranjo do impedimento a ser transposto. No entanto, devido à influência desse parâmetro na velocidade do escoamento, que por sua vez deve ser compatível com a do peixe, é aconselhado que a inclinação não seja muito alta, estando entre 10 e 15 % (Katopodis, 1992 e Larinier 2002).

A determinação das três variáveis,  $b_o$ ,  $y_o$  e  $S_o$ , permite a obtenção da vazão da escada além da velocidade máxima e da dissipação de energia, cujos valores devem ser comparados com os demandados pelos peixes do local (Larinier, 2002).

Dados sobre a capacidade natatória de algumas espécies neotrópicas foram recentemente

Tabela 1 - Modelos de escadas do tipo ranhura vertical

	$Q_* = 3,77 \left( \frac{y_o}{b_o} \right)$		$Q_* = 2,98 \left( \frac{y_o}{b_o} \right)$
	$Q_* = 3,75 \left( \frac{y_o}{b_o} \right)$		$Q_* = 3,21 \left( \frac{y_o}{b_o} \right)$
	$Q_* = 2,84 \left( \frac{y_o}{b_o} \right)$		$Q_* = 2,89 \left( \frac{y_o}{b_o} \right)$
	$Q_* = 5,85 \left( \frac{y_o}{b_o} \right)$		$Q_* = 3,59 \left( \frac{y_o}{b_o} \right)$

FONTE: Rajaratnam, Van der Vinne e Katopodis, 1986

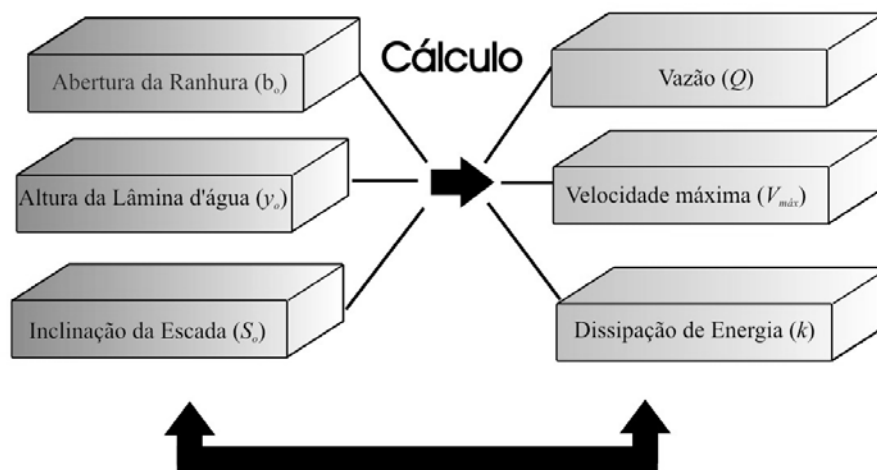


Figura 2- Fluxograma do dimensionamento de uma escada do tipo ranhura vertical

obtidos (Santos, Pompeu e Martinez, 2007; Santos, Pompeu e Martinez, 2008). No entanto, ainda faltam informações sobre os reais valores de turbulência suportados por essas espécies.

O processo de verificação do atendimento à demanda de velocidade é bastante complexo, uma vez que são necessárias suposições quanto ao tipo de velocidade que o peixe irá desenvolver dentro da escada. Estas últimas podem ser classificadas em sustentáveis, se mantidas por períodos superiores a 200 minutos; prolongadas, se mantidas entre 200 minutos e 20 segundos, e de explosão, se mantidas em períodos inferiores a 20 segundos (Beamish, 1978).

Com o estabelecimento dos valores iniciais de  $b_o$ ,  $y_o$  e  $S_o$ , caso não haja o atendimento de uma das duas condições (velocidade ou dissipação de energia), devem ser estabelecidos novos valores até que se obtenha o atendimento das demandas (Figura 2).

Assim, a partir do estudo de capacidade natatória das espécies *Pimelodus maculatus* (mandi-amarelo), *Prochilodus costatus* (curimatá ou curimba) e *Leporinus reinhardtii* (piauí-três-pintas) foi estabelecida a abertura  $b_o$  necessária para a passagem dessas espécies em uma escada do tipo ranhura vertical, e determinado o tipo de velocidade a se adotar no processo de verificação. Além disso, como a mudança nas variáveis  $b_o$  e  $S_o$  influencia diretamente na velocidade do escoamento e nas dimensões do dispositivo, foram quantificadas essas influências de

forma a alertar para a importância do dimensionamento baseado em características das espécies de peixes locais.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Velocidade do escoamento em escadas

O dimensionamento de uma escada para peixes consiste na adequação hidráulica de um canal às características biológicas da ictiofauna local. Entre essas características está a chamada capacidade natatória dos peixes, cujo valor determina parâmetros hidráulicos principalmente em escadas. Nelas, a transposição do desnível é realizada ativamente pelo peixe através da natação.

No entanto, a capacidade natatória pode ser classificada de forma variada de acordo com a velocidade desenvolvida. Assim, durante o processo de dimensionamento de uma escada, qual velocidade de natação adotar? Dentro do perfil de velocidades das escadas, qual delas utilizar como fator limitante mediante a sua igualdade com a velocidade do peixe? Vários pesquisadores, desde biólogos a engenheiros, propuseram metodologias de forma a adequar escadas e bueiros (*culverts*) às necessidades da ictiofauna, com base nos diferentes tipos de velocidade natatória.

### Método de Jones, Kiceniuk e Bamford, 1974 (uso da velocidade crítica)

A chamada velocidade prolongada crítica foi utilizada como critério para determinação da velocidade da água em escadas e bueiros (*culverts*) por Jones, Kiceniuk e Bamford (1974) e posteriormente analisada por Peake (2004). Primeiramente definida e empregada por Brett (1964), a velocidade crítica corresponde à velocidade máxima ( $U_{max}$ ) que um peixe poderia manter num escoamento cuja velocidade é aumentada ( $\Delta U$ ) num período de tempo predeterminado ( $t_f$ ). Como a fadiga do peixe muitas vezes não ocorre no final desse período, uma interpolação é feita com o tempo ( $t_f$ ) que o mesmo nadou dentro intervalo. Assim, a velocidade crítica é dada pela EQ. 1:

$$V_{crit} = U_{max} + \frac{t_f}{t_i} \times \Delta U \quad (1)$$

Este método de determinação da velocidade dentro de uma escada iniciava-se com a determinação da velocidade crítica para um dado comprimento do peixe. Supondo que seu valor era de 50 cm/s, e o mesmo foi obtido em testes cujo incremento de tempo era igual a 10 minutos, caso a escada a ser construída tivesse 50 metros de comprimento, o peixe deveria percorrê-la num tempo de 10 minutos (igual ao incremento de tempo). Assim, a velocidade total (em relação a um referencial parado) que o peixe deveria desenvolver seria de 8,3 cm/s (50 metros / 10 minutos). Subtraindo da velocidade crítica o valor encontrado (50 cm/s – 8,3 cm/s), chegaria-se a velocidade máxima do canal (41,7 cm/s).

O intervalo de tempo escolhido para determinação da velocidade crítica deve ser próximo ao tempo real que um peixe levaria para percorrer a escada ou o *culvert* a ser dimensionado. Considerando que, principalmente para espécies neotropicais, as informações sobre velocidade crítica são escassas, é possível através de correlações entre características do ensaio, obter valor de velocidade crítica referente a um tempo de intervalo diferente daquele utilizado no teste experimental (Farlinger e Beamish, 1977). Entretanto, este estudo é aplicável apenas para valores de incremento de tempo entre 5 e 60 minutos.

A determinação da velocidade máxima do escoamento com base na velocidade crítica do peixe ainda é utilizada no dimensionamento de muitos MTP. Entretanto, a suspeita da subestimação da

capacidade natatória medida em túneis hidrodinâmicos levou pesquisadores como Peake (2004) a reavaliar tal procedimento e concluir que ele não é um procedimento adequado para o dimensionamento de *culverts* considerando a velocidade de certas espécies.

### Método de Katopodis, 1992 (uso da velocidade prolongada)

Para projetos de grandes MTP são necessários critérios menos conservativos, uma vez que o custo construtivo dos mesmos aumenta com o seu tamanho e com a subestimação da velocidade do peixe. Além disso, é necessário avaliar as condições comportamentais e fisiológicas para a determinação da velocidade máxima do escoamento dentro do MTP.

O método proposto por Katopodis (1992) considera, além das velocidades de nado, os tempos de fadigas obtidos em laboratórios para as mesmas. Assim, esse método utiliza a velocidade prolongada cujo procedimento consiste em forçar o peixe a nadar em um escoamento de velocidade fixa. Durante essa natação, é marcado o tempo de permanência (indicado pela sua fadiga) neste escoamento.

Esse procedimento se inicia com a adimensionalização da velocidade de nado ( $U$ ) e do tempo de fadiga ( $t$ ) através das EQ. 2 e 3, onde  $F_f$  é a velocidade adimensionalizada,  $t^*$  o tempo adimensionalizado,  $g$  a gravidade e  $l$  o comprimento do peixe (Katopodis, 1992):

$$F_f = \frac{U}{\sqrt{gl}} \quad (2)$$

$$t^* = t \sqrt{\frac{g}{l}} \quad (3)$$

Em seguida, tem-se a maximização da distância percorrida pelo peixe, que por sua vez é o resultado da relação entre a diferença de velocidade (nadada e da água) e o tempo gasto (Santos, Pompeu e Martinez, 2007).

O objetivo principal desse método é obter curvas que relacionem a distância percorrida pelo peixe e a velocidade da água (Figura 3).

Conhecendo-se o provável comprimento da escada e tamanho do peixe “referência”, chega-se à velocidade do escoamento.

No entanto, é importante salientar que neste tipo de análise o peixe deve manter a velocidade

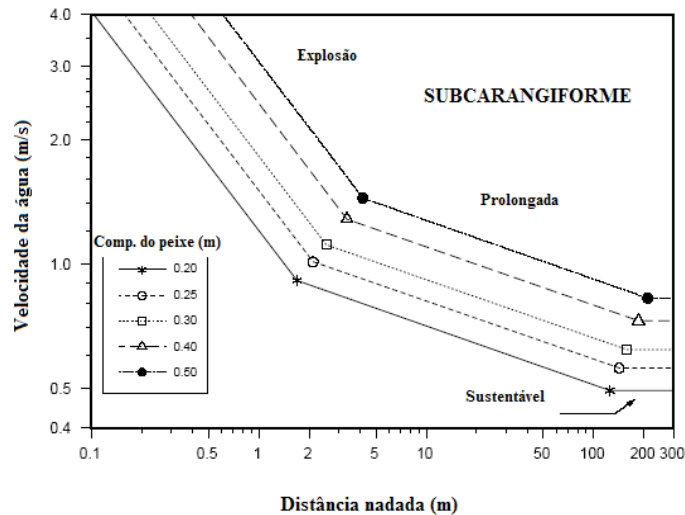


Figura 3 – Gráfico da velocidade do escoamento x distância para o grupo dos nadadores subcarangiformes.  
FONTE: Katopodis, 1992. 37p.

constante ao longo do percurso. Assim, o uso da velocidade de explosão só ocorre em escadas muito curtas, e quanto maior seu comprimento, menor deverá ser a velocidade de seu fluxo. No entanto, é praticamente impossível garantir que o peixe usará somente um tipo de velocidade de nado durante seu percurso.

Trabalhos recentes utilizam este método, avaliando pontualmente a velocidade do escoamento, ou seja, ao invés de se comparar a velocidade máxima dentro da escada, compara-se as velocidades máximas obtidas por trecho nas ranhuras (Teijreiro *et al.*, 2006).

#### Avaliação das alterações nos parâmetros hidráulicos

A abertura da ranhura ( $b_o$ ), altura da lâmina d'água ( $y_o$ ) e inclinação da escada ( $S_o$ ) são três variáveis hidráulicas que estabelecem, em uma escada para peixes, a vazão, a velocidade máxima e a dissipação de energia do sistema. Alterações nos valores dessas variáveis, principalmente na abertura e na inclinação, causam mudanças significativas nas características hidráulicas do canal.

Para quantificar essas mudanças, foram projetadas 7 escadas para vencer um desnível de 10 metros, onde foram atribuídos valores para  $b_o$  e  $S_o$ . Os valores de largura ( $B$ ) e comprimento ( $L$ ) das piscinas foram obtidos pela relação da EQ. 4 e EQ. 5.

$$L = 7,5b_o \quad (4)$$

$$B = 8b_o \quad (5)$$

Os valores da abertura da ranhura e da inclinação, bem como as relações entre as dimensões das piscinas, foram estabelecidos a partir das respectivas dimensões da escada da UHE de Igarapava ( $b_o = 0,40$  m e  $S_o = 0,06$  m/m), primeira escada do tipo ranhura vertical a ser implantada no Brasil. Procurou-se, na escolha dos cenários, fixar uma das variáveis e alterar a outra.

Ressalta-se que para análise das variações nas características hidráulicas, escolheu-se a velocidade máxima do escoamento. Este parâmetro foi obtido através da EQ. 6, que relaciona o mesmo com a diferença de cotas entre as ranhuras ( $\Delta h$ ).

$$\Delta h = \frac{V_{\max}^2}{2g} \quad (6)$$

## RESULTADOS

### Velocidade do Escoamento

#### Método de Jones, Kiceniuk e Bamford (1974)

Segundo esse critério, um peixe utilizando uma escada como a de Igarapava, de 300 metros de comprimento, deveria desenvolver velocidade total de 1m/s (300 metros/5 minutos). Estudos de tele-

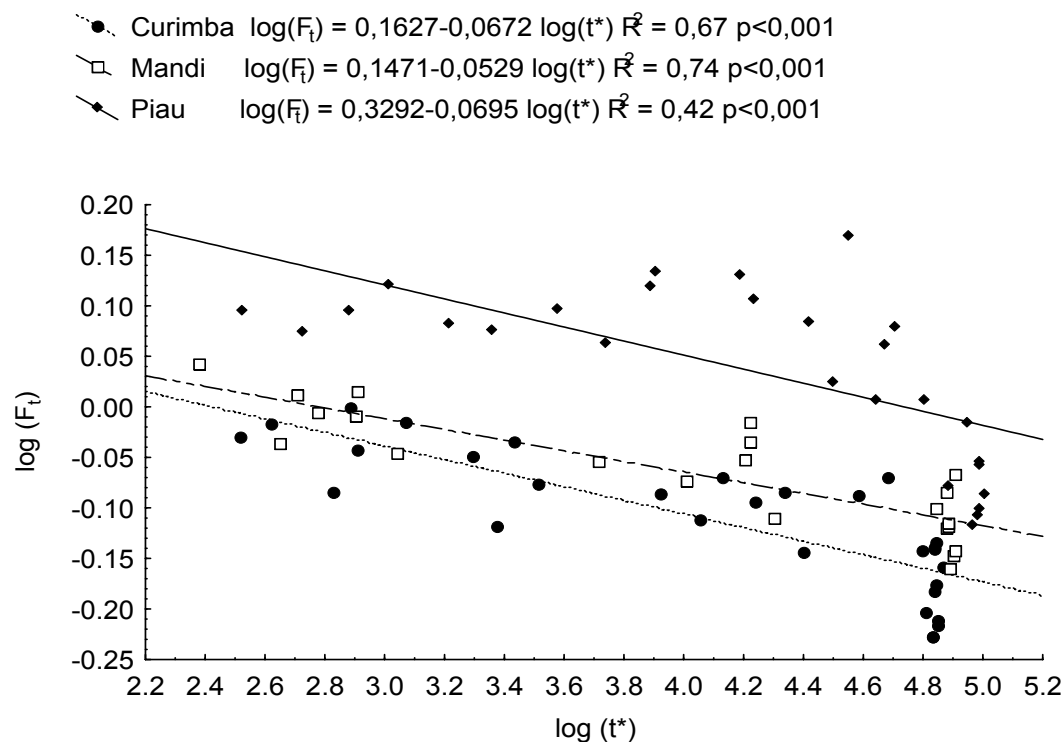


Figura 4 – Ajuste para os valores adimensionalizados de velocidade ( $F_t$ ) e tempo de fadiga ( $t^*$ )

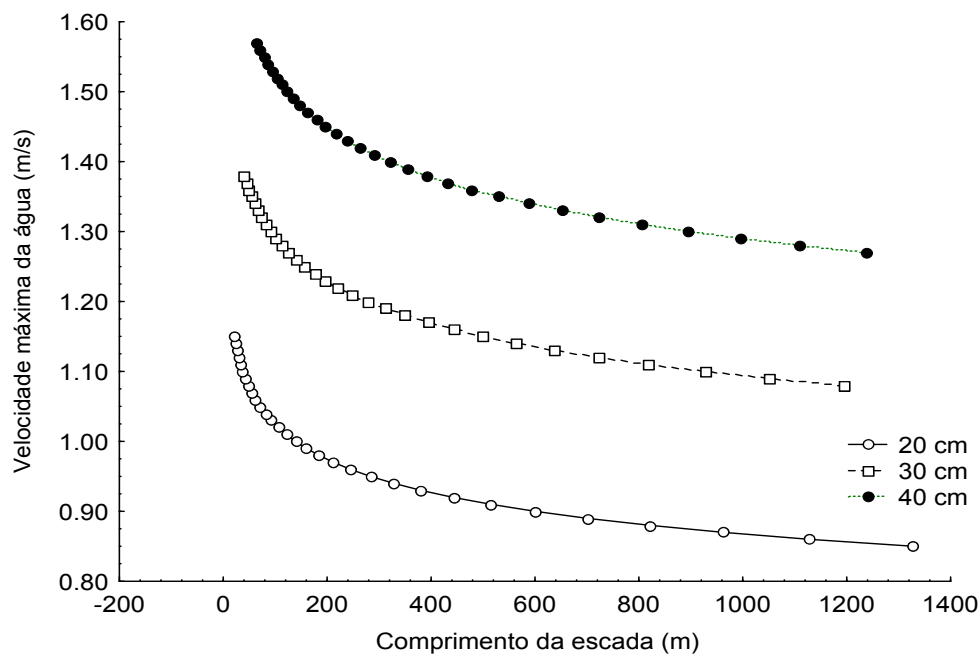
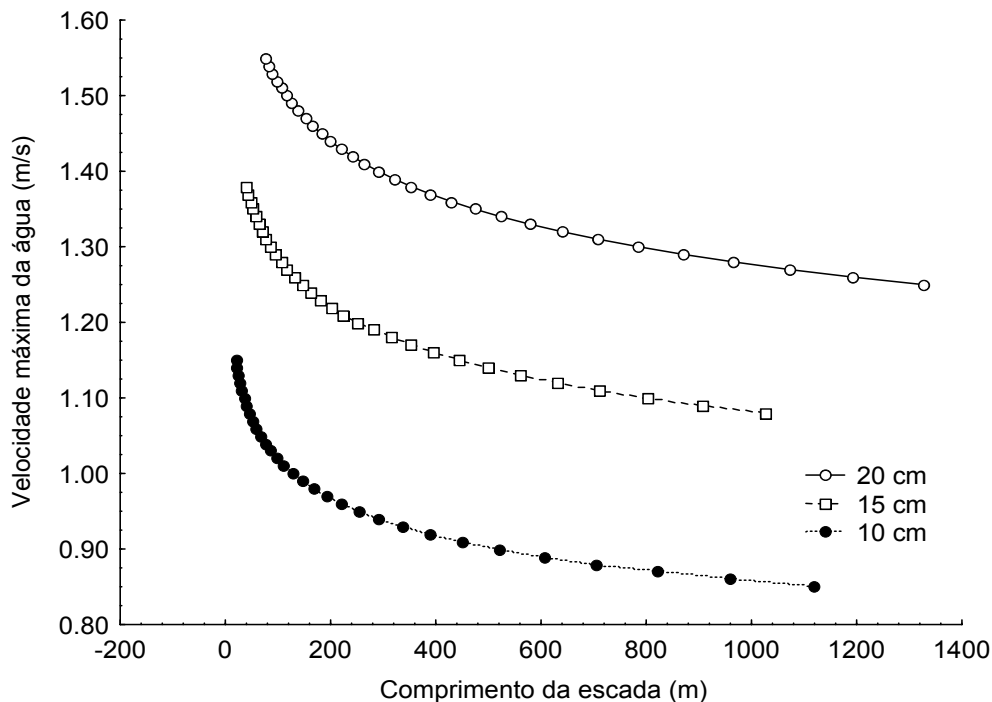


Figura 5 – Velocidade máxima da água em função do comprimento da escada e do comprimento total do peixe para indivíduos de *Prochilodus costatus* (curimba)

Tabela 2 – Equações para as três espécies estudadas

Espécie	Equações de velocidade e tempo adimensionalizados	Relações entre velocidade da água ( $\varepsilon$ ) e distância nadada (F)
Curimba	$F_t = 2,13t^{*-0,0695}$	$\varepsilon = 6,47F^{-13,88}$
Mandi	$F_t = 1,45t^{*-0,0672}$	$\varepsilon = 12,08F^{-17,90}$
Piau	$F_t = 1,40t^{*-0,0529}$	$\varepsilon = 1444,50F^{-13,39}$

Figura 6 – Velocidade máxima da água em função do comprimento da escada e do comprimento total do peixe para indivíduos de *Leporinus reinhardtii* (piauí)

metria na escada de Igarapara revelaram que o tempo médio de passagem da espécie *Prochilodus lineatus* é de 3,5 horas (Silva, 2004), indicando que tal método de dimensionamento não deve ser utilizado para escadas com grandes comprimentos.

A partir das curvas de velocidade crítica chegou-se que, neste modo de natação, um piauí com o tamanho de primeira maturação (16 cm) nada 1,32 m/s, enquanto o mandi (23 cm) nada 1,47 m/s, e a curimba (29 cm), 1,23 m/s.

Portanto, a velocidade máxima do escoamento para o piauí deveria ser 0,32 m/s, para o mandi, 0,47 m/s, e para a curimba, 0,23 m/s.

#### Método de Katopodis (1992)

Com os dados de velocidade prolongada foram obtidos gráficos para os valores de velocidade e tempo de fadiga adimensionalizados (Figura 4).

A partir das equações ajustadas com os dados adimensionalizados (Tabela 2), obteve-se as relações entre a velocidade da água ( $\varepsilon$ ) e distância nadada (F). Com base nas equações mostradas na Tabela 2, foi calculada a velocidade máxima dentro de uma determinada escada com o comprimento X para diversos comprimentos dos peixes (Figuras 5 a 7).

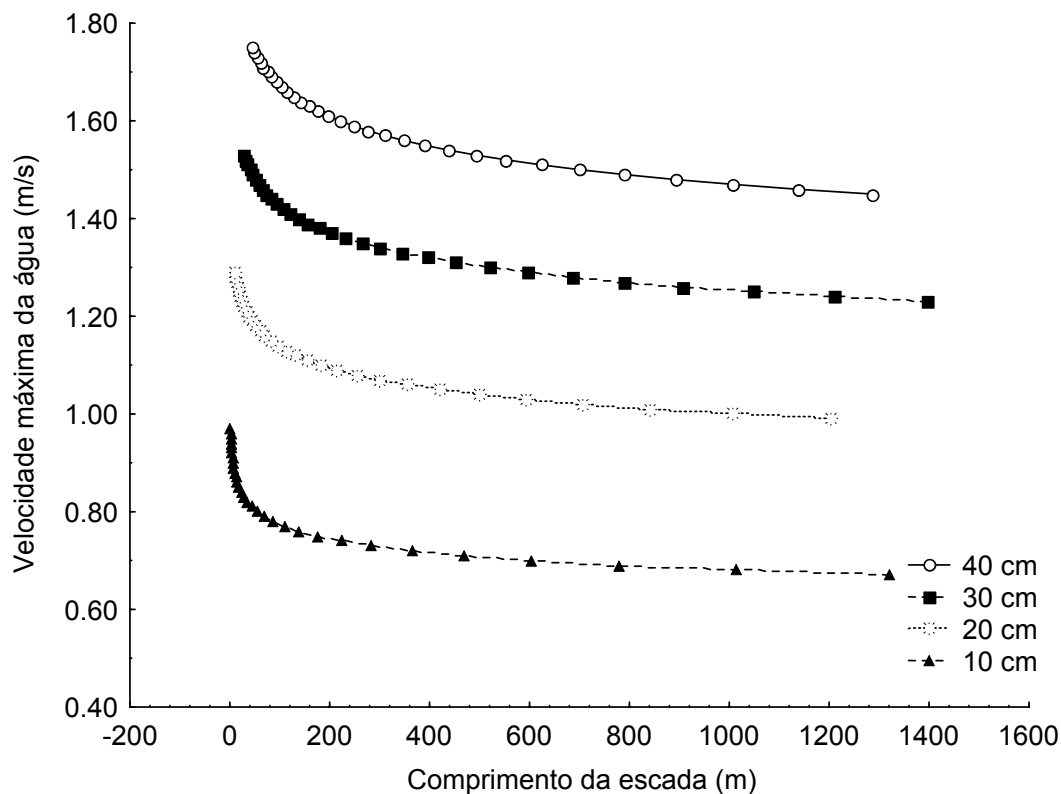


Figura 7 – Velocidade máxima da água em função do comprimento da escada e do comprimento total do peixe para indivíduos de *Pimelodus maculatus* (mandi)

Tabela 3- Velocidade máxima do escoamento pelos dois métodos para uma escada com 300 metros de comprimento.

Espécies	Método de Jones, Kiceniuk e Bamford, 1974 (uso da velocidade crítica)	Método de Katopodis, 1992 (uso da velocidade prolongada)
<i>Prochilodus costatus</i> (curimba)	0,23	1,17
<i>Pimelodus maculatus</i> (mandi)	0,47	1,16
<i>Leporinus reinhardtii</i> (piauí)	0,32	1,22

Assim, uma escada com o comprimento de 300 metros, como a existente na UHE Igarapava (Minas Gerais), deve ter uma velocidade máxima no escoamento de 1,16 m/s para permitir a passagem de um mandi com o comprimento de primeira ma-

turação (16 cm). No caso do piauí, essa velocidade seria de 1,22 m/s, e no caso da curimba, de 1,17 m/s (Tabela 3).



Tabela 4- Comprimentos padrão e larguras máximas de três espécies de peixes.

Espécies	Comprimento Máximo para espécie (cm)	Padrão * Largura máxima correspondente ao comp. padrão (cm)	$b_0$ adotado em relação a largura máxima (cm)
<i>Prochilodus costatus</i> (curimba)	42	5,20	15
<i>Pimelodus maculatus</i> (mandi)	36	8,08	15
<i>Leporinus reinhardtii</i> (piauí)	17	2,26	10

FONTE: \* Reis, Kullander e Ferraris, 2003

Tabela 5 - Cenários de Escadas do tipo ranhura vertical calculados

	Inclinação $S_0$ (m/m)	Comprimento da Piscina B (m)	Desnível entre Piscinas	Abertura da ranhura $b_0$ (m)	$y_0$ (m)	Largura da Piscina-L (m)	Comprimento da Piscina – B (m)
1	0,14	71,43	0,448	0,4	1,50	3,00	3,20
2	0,1	100,00	0,320	0,4	1,50	3,00	3,20
3	0,08	125,00	0,256	0,4	1,50	3,00	3,20
4	0,06	166,67	0,192	0,4	1,50	3,00	3,20
5	0,06	166,67	0,288	0,6	1,50	4,50	4,80
6	0,06	166,67	0,144	0,3	1,50	2,30	2,40
7	0,06	166,67	0,072	0,15	1,50	1,10	1,20

Tabela 5 - Cenários de Escadas do tipo ranhura vertical calculados (cont.)

Vazão unitária da Piscina - $Q^*$	Vazão da Piscina - $Q$ (m³)	Velocidade Máxima (m/s)	Potência dissipada (kW)	Dissipação de energia (W/m³)	Quantidade de tanques	Volume do canal (m³)	Volume por tanque (m³)
13,0	1,54	2,96	6,79	472	21	302	14,4
13,0	1,31	2,51	4,10	285	30	432	14,4
13,0	1,17	2,24	2,93	204	38	547	14,4
13,0	1,01	1,94	1,90	132	51	734	14,4
8,3	1,78	2,38	5,03	155	34	1102	32,4
17,7	0,67	1,68	0,95	114	68	563	8,3
36,6	0,24	1,19	0,17	87	135	267	2,0

Obs: Espessura das paredes do canal de 15 cm

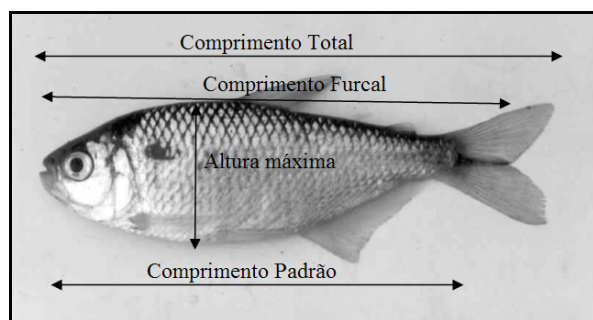


Figura 7 – Exemplo de dados biométricos do peixe

### Abertura mínima

Através da análise dos dados biométricos (Figura 7) dos indivíduos testados foram realizadas regressões entre largura e comprimento padrão do peixe (Figura 8). Com base no comprimento máximo fornecido pela literatura, chegou-se a largura máxima para cada espécie, que condiciona a mínima abertura da ranhura ( $b_0$ ). Para esse cálculo considerou-se a largura do peixe e o espaço necessário para a batida da cauda (Tabela 4).

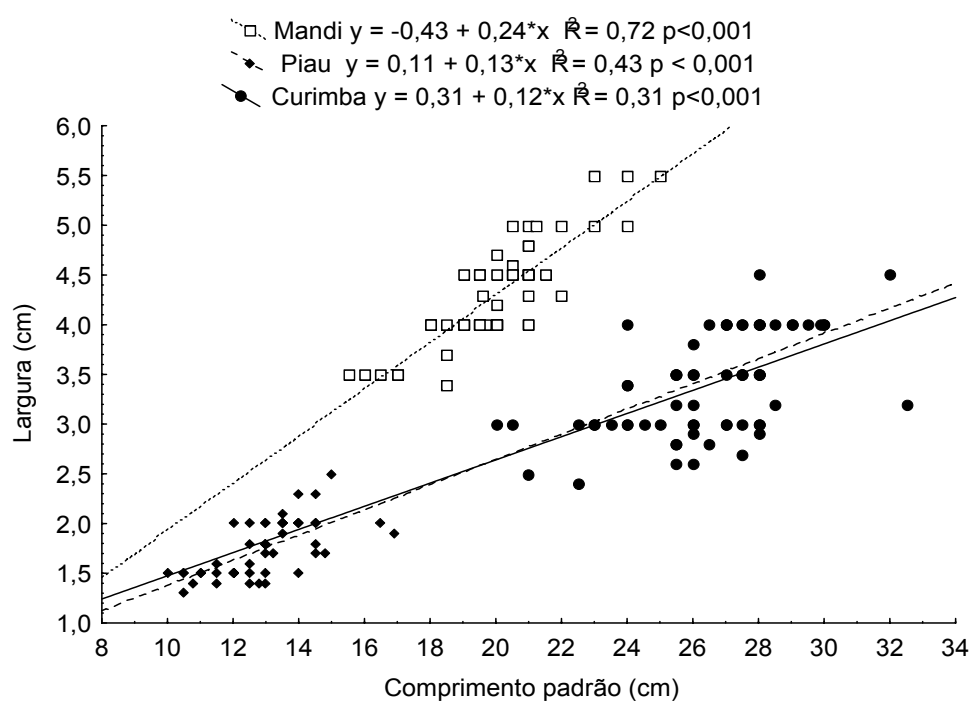


Figura 8- Relações entre comprimento padrão e largura para as três espécies.

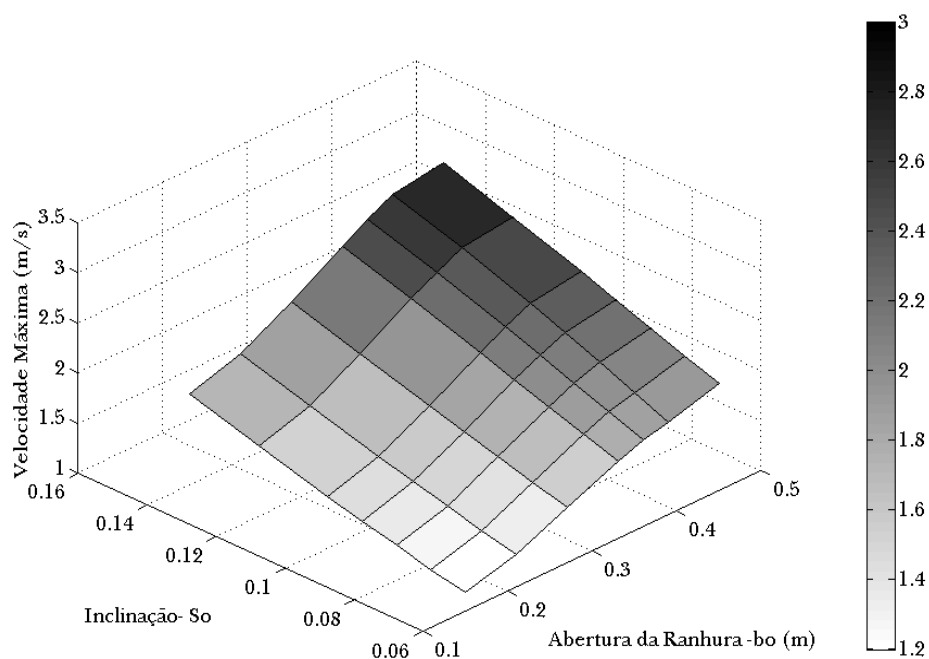


Figura 9- Relações entre velocidade máxima, abertura da ranhura e inclinação da escada.

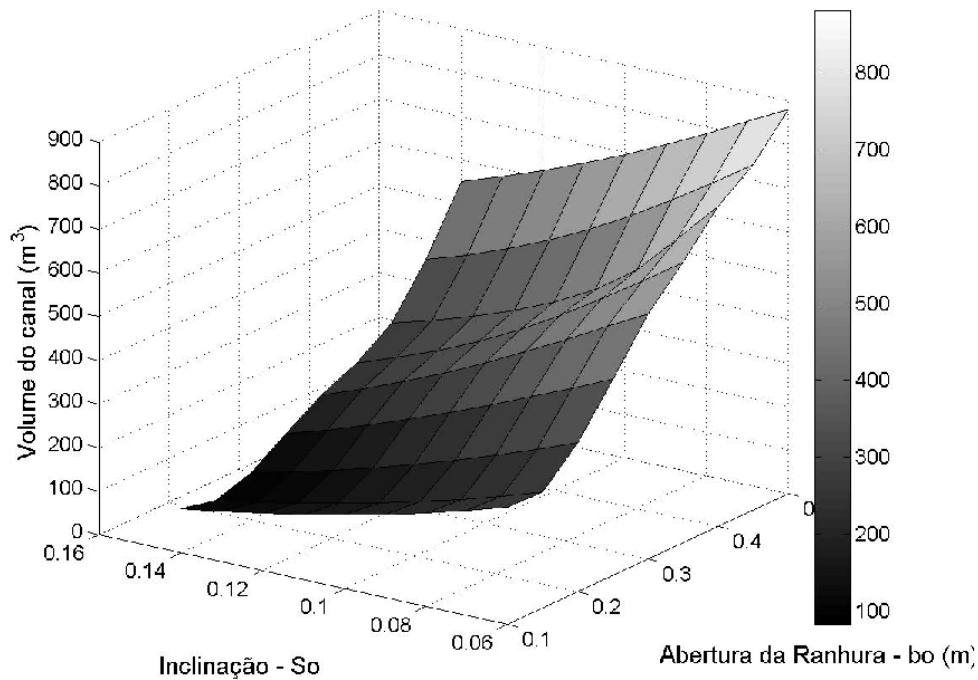


Figura 10- Relações entre volume do canal, abertura da ranhura e inclinação da escada.

Para o cálculo da amplitude do batimento da cauda utilizou-se o número de Strouhal, normalmente visualizado na natação dos peixes, bem como valores de velocidade e frequência médios (Triantafyllou e Triantafyllou, 1995).

#### Relação entre os parâmetros hidráulicos para escadas do tipo ranhura vertical

Utilizando-se do método de dimensionamento de escadas do tipo ranhura vertical proposto por Rajaratnam et. al. (1986), foram calculados o número de piscinas, o desnível da lâmina ( $\Delta H$ ) da água e a velocidade máxima do escoamento para cada cenário (Tabela 5).

Assim, a declividade é o fator que mais contribui para o aumento da velocidade máxima do canal e para a redução no volume de água no canal. A influência destes parâmetros pode ser verificada nas superfícies das Figuras. 9 e 10.

## DISCUSSÃO

O processo de dimensionamento dos mecanismos do tipo escada depende diretamente da metodologia adotada. Observou-se uma variação de 60 a 80% entre os valores do método de Jones, Kiceniuk e Bamford (1974) e de Katopodis (1992). Consequentemente, como a velocidade influencia os parâmetros construtivos de qualquer canal, o custo da construção das escadas poderia variar bastante dependendo do método empregado.

Para as espécies avaliadas, o método de Jones, Kiceniuk e Bamford (1974) forneceu os menores valores de velocidades do escoamento, mas cabe salientar o pouco significado biológico do método. Os valores de velocidade máxima do escoamento obtidos para a curimba e o piau, espécies cuja capacidade natatória é prolongada para o tamanho de primeira maturação, apresentaram uma diferença de 39%. Soma-se a isto, o fato da velocidade fornecida pelo método para o mandi, espécie de fundo, ser maior do que as demais espécies. Portanto, o uso

da velocidade crítica em dimensionamentos de MTP deve se limitar a estruturas mais simples, principalmente aquelas cujos custos de implantação sejam baixos, como os bueiros (culverts), visto que a mesma parece apresentar resultados pouco coerentes.

Tanto o método de Jones, Kiceniuk e Bamford (1974) quanto o de Katopodis (1992) são baseados na suposição de o que peixe usaria um determinado tipo de velocidade natatória durante a transposição de uma escada. Entretanto, estudos recentes mostraram que os peixes mantêm a mesma taxa de deslocamento, independente do valor da velocidade da água, maximizando seu deslocamento e nadando a uma velocidade referencial considerada "ótima" (Castro-Santos, 2005). Dessa forma, os próximos estudos sobre projeto de escadas para peixes devem contemplar a variabilidade esperada em torno desta velocidade ótima além dos custos desta variação em termos da distância nadada (Castro-Santos, 2005).

Os parâmetros hidráulicos como abertura da ranhura e inclinação das escadas influem diretamente na seletividade desses mecanismos, uma vez que pequenas alterações nos mesmos podem provocar mudanças substanciais no escoamento, que passa a ser evitado por determinadas espécies. O aumento da abertura da ranhura de 10 cm para 15 cm, em uma escada com inclinação de 6%, causa um incremento de 12% no valor da velocidade máxima da água.

Entretanto, é a inclinação do mecanismo que mais influencia o parâmetro velocidade máxima do escoamento.

Portanto, o conhecimento das características das espécies neotropicais, além da melhor adequação dos mecanismos de transposição, também pode permitir uma redução de custos de implantação desses dispositivos, na medida que propiciam tomadas de decisões.

Assim, utilizando como exemplo de aplicação o dispositivo da UHE Igarapava, primeira escada do tipo ranhura vertical construída no Brasil, verificou-se, em estudos recentes, que as espécies *Pimelodus maculatus* (mandi-amarelo), *Leporinus octofasciatus* (piauí-flamengo) e *Prochilodus lineatus* (curimbatá) são as que mais utilizam o mecanismo (Vono *et al.*, 2004). Apesar de não serem exatamente as mesmas espécies estudadas no presente artigo, elas apresentam características semelhantes por serem do mesmo gênero. O porte dessas espécies é médio, atingindo comprimento total máximo, no caso da curimbatá, de aproximadamente 45 cm. Esse comprimento, de acordo com o estudo biométrico da curimbatá do São Francisco, indicaria a necessidade de

uma abertura da ranhura de no máximo 15 cm. Entretanto, a escada da UHE Igarapava apresenta uma abertura de 40 cm, adotada para atender a passagem da espécie *Zungaro jahu* (jaú). A passagem desta espécie pelo dispositivo é muito rara, podendo ser adotada a transposição manual (sem mecanismo) para a mesma, enquanto as demais espécies utilizariam a escada.

A necessidade muito específica de algumas espécies pode levar a uma incompatibilidade de atendimento de demandas em conjunto. Assim, faz-se necessária a adoção de espécies alvo que seriam priorizadas no processo de transposição. O sucesso das estruturas e tecnologias de passagem de peixes depende da compreensão da migração dessas espécies alvo e do comportamento natatório, bem como das preferências hidráulicas e de habitat antes do projeto e da construção do mecanismo (Odeh e Haro, 2000).

Recentemente, novas ferramentas passaram a ser utilizadas na fase de projeto dos mecanismos de transposição, visando uma adequação hidráulica e econômica da estrutura. Assim, a simulação numérica, onde o escoamento dentro de estruturas hidráulicas pode ser previamente levantado, vem ganhando campo no estudo de escadas e bueiros (Feurich, Boubée, e Rutschmann, 2007; Kopeinig, Boubée, e Rutschmann, 2007). Entre as vantagens dessa ferramenta está a determinação do campo de velocidades e o levantamento dos pontos críticos de passagem de peixes relacionados à determinada configuração do mecanismo.

Independentemente do avanço nas técnicas de dimensionamento de mecanismos de transposição de peixes, ressalta-se a importância do uso dos métodos de Jones, Kiceniuk e Bamford (1974) e Katopodis (1992), aplicados à ictiofauna neotropical, uma vez que, pela praticidade, propiciam a popularização de métodos construtivos eficientes.

O conhecimento das características migratórias e natatórias das espécies locais permanece sendo a chave para a eficiência do dispositivo, devendo outras importantes espécies migratórias ser contempladas, como as do gênero *Salminus* (dourados) e *Pseudoplatystoma* (surubins).

## REFERÊNCIAS

- AGOSTINHO, C. S. ; AGOSTINHO, A. A. ; PELICICE, F.; ALMEIDA, D. A. E MARQUES, E. E. Selectivity of fish ladders: a bottleneck in Neotropical fish move-

- ment. *Neotropical Ichthyology*, v.5, n. 2, p. 205-213, 2007
- BEAMISH, F. W. H. Swimming capacity. In: HOAR, W. S. ; RANDALL D. J., 1978, *Fish Physiology*, 1. ed. Londres: Academic Press, 1978. v. 7, cap. 2, p. 101-187.
- BRETT J. R. The respiratory metabolism and swimming performance of young Sockeye Salmon. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, n. 21 (5):p. 1183-1226, 1964
- CASTRO-SANTOS, T. Optimal swim speeds for traversing velocity barriers: an analysis of volitional high-speed swimming behavior of migratory fishes. *The Journal of Experimental Biology*, v. 208, p. 421-432, 2005
- FARLINGER, S.; BEAMISH, F. W. H. Effects of time and velocity increments on the critical swimming speed of Largemouth Bass (*Micropterus salmoides*) *Transaction american fisheries society*, n. 106, v. 5, p. 436- 439, 1977.
- FEURICH, R. ; BOUBÉE, J.; RUTSCHMANN, P. (2007) Optimising flow patterns in culverts of varying size to facilitate the upstream passage of small fish. In: Sixth International Symposium on Ecohydraulics, 2007, *Annals of the...Christchurch*, Nova Zelândia 2007 CD-Rom
- GEBLER, R. J. *Naturgemässe Bauweisen von Sohlenbauwerken und Fischaufstiegen zur Vernetzung der Fliessgewässer*, 1991, 145 f., Tese de Doutorado, Universität Karlsruhe, Karlsruhe, Alemanha, 1991.
- JONES, D. R.; KICENIUK, J. W. ; BAMFORD, O. S. Evaluation of the swimming performance of several fish species from the Mackenzie River, *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, v. 31 (10), p. 1641-1647, 1974
- KATOPODIS, C. *Introduction to Fishway Design*. Winnipeg: Freshwater Institute, 1992. 67p.
- KOPEINIG, T.; BOUBÉE, J. ; RUTSCHMANN, P. Numerical study of flow through a culvert – investigation on various modifications using a 3D turbulent Navier-Stokes code, In: Sixth International Symposium on Ecohydraulics, 2007, *Annals of the...Christchurch*, Nova Zelândia 2007 CD-Rom
- LARINIER, M. Passes à bassins successifs, prébarrages et rivières artificielles, *Bulletin Fr. Pêche Piscic.*, v. 326 e 327, p. 45-72, 1992
- LARINIER, M. Fishways- General considerations. In: LARINIER M.; TRAVADE F.; PORCHER J. P. (org.), *Bulletin Fr. Pêche Piscic.*, v. 364, 2002, cap. 4, p 21-27.
- ODEH, M.; HARO. A., Developments in Fish Passage Engineering and Biology. In: ODEH, M. (org.) *Advances in Fish Passage Technology: Engineering Design and Biological Evaluation*, Bethesda: American Fisheries Society, 2000, cap. 1, p. 1-11.
- PEAKE, S. An evaluation of the use of critical swimming speed for determination of culvert water velocity criteria for smallmouth bass, *Transaction american fisheries society*, v. 133, p. 1472-1479, 2004
- QUIRÓS, R. *Structures assisting the migrations of non-salmonid fish: Latin America*. Copescal Technical Paper n. 5, Roma, FAO, 1989, p.
- RAJARATNAM, N., VAN DER VINNE, G. e KATOPODIS, C. Hydraulics of vertical slot fishways. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 112, p. 909-927, 1986
- REIS, R.E.; KULLANDER, S.O.; FERRARIS Jr., C.J. *Check list f the freshwater fishes of South and Central America*. Porto Alegre: EDIPUCRS. 2003, 742p.
- SANTOS, H. A.; POMPEU, P. S. ; MARTINEZ, C. B. Swimming performance of the migratory Neotropical fish *Leporinus reinhardtii* (Characiformes: Anostomidae) *Neotropical Ichthyology*, v.5, n. 2, p. 139-146, 2007
- SANTOS, H. A.; POMPEU, P. S.; MARTINEZ, C. B. Swimming performance of the freshwater neotropical fish: *pimelodus maculatus*. *Brazilian Journal of Biology*, v. 68, n. 2, no 2008.
- SILVA, L. G. M. *Migração de mandis-amarelos Pimelodus maculatus e curimbas Prochilodus lineatus no rio Grande, bacia do Alto Paraná*, 2004. 63 f., Dissertação (Mestrado em em Zoologia de Vertebrados) - Pontificia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.
- TEIJEIRO, T.; PUERTAS, J.; PENA, L.; PEÑA, E. Evaluating vertical-slot fishway designs in terms of fish swimming capabilities. *Ecological Engineering*, v. 27, p. 37-48, 2006.
- TRIAANTAFYLLOU, M. S.; TRIANTAFYLLOU, G. S. An efficient swimming machine. *Scientific American*, v. 272 , p. 40 – 46, 1995.
- VONO, V.; BIZZOTTO, P. M.; GODINHO, H. P.; GODINHO, A. L.; KYNARD, B. Fish passage at the Igarapava Fish Ladder, River Grande, Brazil. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON THE BIOLOGY OF FISH, 2004, *Annals of the ... Manaus: American Fisheries Society* 2004. p. 1-5.

### ***Establishing Hydraulic Parameters for Vertical Slot type Fish Ladders Based on the Characteristics of Neotropical Species***

#### **ABSTRACT**

*In order to reduce the impact of dams, engineering proposes to build fish passages, mechanisms which allow local fish migration. Fish ladders are the most popular type of fish passage built to provide passage upstream.. They consist in a hydraulic channel with slots for energy dissipa-*

*tion in order to create specific flow to meet the needs of fish. Thus, this flow should have specific values of maximum velocity and turbulence. In the vertical slot fish ladder, the slope and slot width are the main factors to change the flow velocity and the fish ladder length. On the other hand, these constructive factors depend on the fish swimming capability. Based on biometric aspects of three neotropical species, slot width values were obtained. The same procedure was performed to obtain the maximum velocity values using data on the swimming capability of these species. It was concluded that additional studies on South American fish fauna should be performed to define these fish ladder parameters.*

**Keywords:** *transposition mechanisms, fish ladders, vertical slot and swimming capability.*