

## **Superfície Livre de Escoamentos Turbulentos em Canais: Vertedores em Degraus e Ressalto Hidráulico**

**André Luiz Andrade Simões, Rodrigo de Melo Porto**

*Departamento de Engenharia Hidráulica e Saneamento – EESC/USP*

*simoes@sc.usp.br, rodrigo@sc.usp.br*

**Harry Edmar Schulz**

*Departamento de Engenharia Hidráulica e Saneamento – EESC/USP*

*Núcleo de Engenharia Térmica e Fluidos – EESC/USP*

*heschulz@sc.usp.br*

*Recebido: 28/07/11 - revisado: 19/10/11 - aceito: 22/05/12*

---

### **RESUMO**

*Neste trabalho são apresentados resultados de estudos experimentais sobre o comportamento da superfície livre de escoamentos em um canal em degraus e de um ressalto hidráulico. A metodologia proposta envolve a aquisição de dados da posição instantânea da interface ar-água com alta frequência por meio de ultrassom. Com tal proposta foi possível avaliar perfis médios da superfície livre, grandezas características contidas em tais perfis (posição de início da aeração, profundidade no início da aeração, comprimento de transição, entre outras) e quantidades que caracterizam a turbulência junto à superfície livre (intensidade turbulenta e número de Strouhal). O método empregado forneceu excelentes resultados para os escoamentos monofásicos e bifásicos. Foi possível estabelecer relações entre variáveis como posições de início da aeração, profundidades que compõem o perfil médio, inclusive profundidades médias máximas e profundidades máximas. Os resultados referentes à turbulência revelaram regiões de crescimento e de decaimento da turbulência, tendo sido obtidas relações que permitiram avaliar uma das constantes do modelo de turbulência k-ε, em sendo válida a aplicação deste modelo para a interface.*

**Palavras-chave:** Ressalto hidráulico. Turbulência. Vertedor em degraus.

---

### **INTRODUÇÃO**

O interesse científico sobre os comportamentos das variáveis de campo que caracterizam escoamentos em canais em degraus e os atrativos econômicos vinculados ao uso de tais estruturas como parte de sistemas extravasores de barragens têm motivado a realização de pesquisas sobre o tema há décadas em diferentes instituições nacionais e internacionais. No Brasil, até 2008, foram desenvolvidos pelo menos dez trabalhos acadêmicos sobre canais e vertedores em degraus, como pode ser visto em Simões (2008, p.7) e atualmente há duas teses sendo elaboradas na Escola de Engenharia de São Carlos. Os trabalhos em desenvolvimento abordam a simulação numérica de escoamentos em vertedores em degraus com o uso de códigos livres e o estudo experimental, numérico e teórico de tais escoamentos. Nos textos produzidos a partir de estudos experimentais, alguns autores destacaram que há grande dificuldade em medir a posição da linha da água

sobre os degraus, sobretudo após o início da aeração (TOZZI, 1992, p.82; POVH, 2000, p.89; SANAGIOTTO, 2003, p.63). O mesmo ocorre com o ressalto hidráulico, sobretudo na posição do rolo.

Este trabalho teve como objetivo estudar o comportamento da superfície livre de escoamentos em um canal em degraus com relação 1V:1H entre as faces verticais e horizontais e degraus com  $s=0,05$  m, em que  $s$ =altura do espelho do degrau; e de um ressalto hidráulico estabelecido em um canal retangular e horizontal com o uso de medidores de distância ultrassônicos. Entre os objetivos específicos relacionados, pode-se destacar: (a) estudo sobre a superfície livre em termos médios e flutuações; (b) estudo sobre a posição de início da aeração e profundidade em tal posição; (c) estudo sobre a forma do perfil médio da superfície livre do escoamento monofásico e do escoamento bifásico que ocorre no canal em degraus; (d) identificação de profundidades características que compõem o perfil médio; (e) estudo acerca da turbulência junto à superfície livre

(objetivos específicos para ambos os casos: canal em degraus e ressalto hidráulico).

## CANAL EM DEGRAUS

### Descrição geral e metodologia

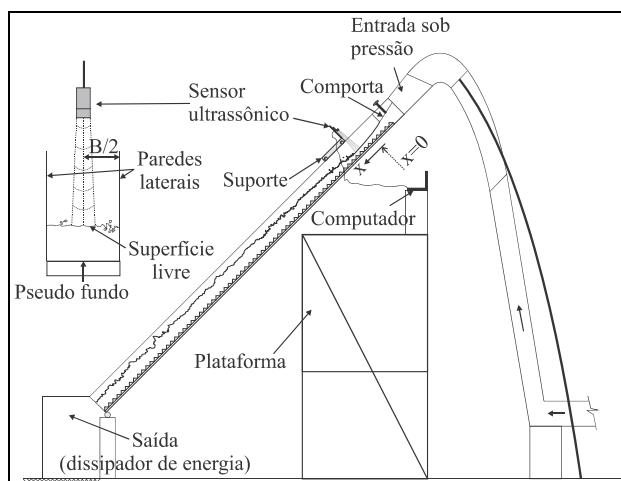
Os resultados experimentais apresentados neste item do trabalho foram obtidos no Laboratório de Hidráulica Ambiental da Escola de Engenharia de São Carlos (Universidade de São Paulo). Os experimentos foram realizados em um canal com as seguintes características: (1) Largura  $B = 0,20\text{ m}$ ; (2) Comprimento igual a  $5,0\text{ m}$ , tendo sido utilizados  $3,5\text{ m}$  para as medidas feitas com o sensor ultrassônico; (3) Ângulo do pseudo fundo em relação à horizontal:  $\alpha = \operatorname{tg}^{-1}(s/l) = 45^\circ$ ; (4) Dimensões dos degraus:  $s = l = 0,05\text{ m}$  ( $s$  = altura do espelho do degrau e  $l$  = comprimento do patamar do degrau); (5) Entrada pressurizada, controlada por uma comporta (Fig. 1). A medição de vazão foi realizada com um vertedor retangular de parede delgada situado no canal de restituição e um medidor de vazão eletrromagnético.

A posição da superfície livre foi medida com o uso de sensores ultrassônicos. A utilização de sensores deste tipo foi realizada por Lueker *et al.* (2008), um estudo no qual um dos objetivos foi medir a posição da superfície livre do escoamento em um modelo físico do vertedor auxiliar da Barragem Folsom, que possui um trecho em degraus, no Laboratório St. Anthony Falls da Universidade de Minnesota. Um trabalho adicional que empregou sondas acústicas foi o de Murzyn e Chanson (2009), para a medição da posição da superfície livre de ressaltos hidráulicos. Os autores citados, aos quais se pode adicionar Chanson, Aoki e Maruyama (2002) e Kucukali e Chanson (2008) mencionam possíveis diferentes profundidades medidas com as sondas, e que mais pesquisas são necessárias para generalizar o seu uso. O presente estudo adota uma metodologia para o uso prático das sondas na obtenção da profundidade média do escoamento. O valor obtido foi conferido com a visualização lateral, efetuada pela parede de vidro.

Os sensores ultrassônicos utilizados no presente estudo emitem ondas com frequência de  $50\text{ kHz}$  a partir de um emissor/receptor com diâmetro igual a  $3,7\text{ cm}$ . As ondas emitidas formam um tronco de cone com ângulo de abertura que pode variar de  $15^\circ$  a  $20^\circ$ , de acordo com o fabricante. Testes realizados neste trabalho mostraram que os ângulos

podem ser menores, próximos de  $7^\circ$ . O sensor mede o tempo entre a emissão da onda ultrassônica e a detecção de sua parte refletida pelo obstáculo, fornecendo a distância correspondente, determinada com a velocidade do som no ar igual a  $343\text{ m/s}$ . Uma vez conhecidas as posições do obstáculo em função do tempo, são obtidas também as suas velocidades, denotadas aqui por  $W$  (derivada temporal da posição). A resolução do equipamento é igual a  $1\text{ mm}$  e o emissor também é o receptor, o que limita a taxa de amostragem a  $50\text{ Hz}$  porque o sensor precisa alternar entre as funções de emissão e recepção dos sinais. Para calcular a altura de escoamento, inicialmente era medida a distância desde o emissor até a superfície de uma placa plana de acrílico apoiada sobre o pseudo fundo. Com a espessura da placa e as distâncias fornecidas pelo sensor para a posição da superfície livre, pôde-se determinar a distância desde o pseudo fundo até a interface. Esta placa servia também como um alvo, possibilitando o posicionamento do emissor/receptor em  $B/2$  (Fig.1) com o auxílio de um laser. As distâncias até o alvo (placa de acrílico) foram verificadas empregando-se um medidor de distâncias a laser e réguas. O uso de um inclinômetro digital auxiliou na verificação do paralelismo entre o plano formado pelo sensor e o pseudo fundo. Como procedimento experimental, um dos sensores acústicos era posicionado sobre um suporte capaz de se deslocar ao longo do canal, como pode ser visto na Figura 1, que também ilustra o aparato experimental. A posição  $x=0$  está situada  $15,7\text{ cm}$  a jusante da comporta. Esta coordenada foi escolhida como a posição corresponde à primeira posição a partir da qual a parede situada no início do canal não provocava interferências no sensor. Para a maior parte dos experimentos, no trecho inicial, onde ocorre o escoamento monofásico, eram realizadas medições a cada  $5\text{ cm}$  e, a partir da posição  $60\text{ cm}$ , foram adotados espaçamentos de  $10\text{ cm}$ . Estas distâncias decorrem da forma observada da superfície da água, com variações mais pronunciadas na parte inicial e foram consideradas adequadas para os propósitos deste trabalho após testes preliminares. Para cada posição longitudinal foram realizadas medições com tempo e taxa de amostragem iguais a  $120\text{ s}$  e  $50\text{ Hz}$ , que correspondem à melhor combinação nas atuais condições experimentais e também atende ao critério sugerido por Lopardo (1986), citado em Trierweiler (2006) de utilizar  $60\text{ s}$  para medidas feitas com  $50\text{ Hz}$ . Os valores aqui utilizados resultam em  $6000$  amostras para cada uma das posições longitudinais e  $246000$  medidas ao longo dos  $3,5\text{ m}$  do canal. Considerando os  $18$  experimentos, foram realizadas  $4428000$  medidas. O segundo

sensor teve como utilidade medir a posição da superfície livre a montante do vertedor de parede delgada com o intuito de calcular a carga hidráulica média e, em seguida, a vazão. As vazões e demais condições experimentais relacionadas a cada um dos experimentos encontram-se na Tabela 1.

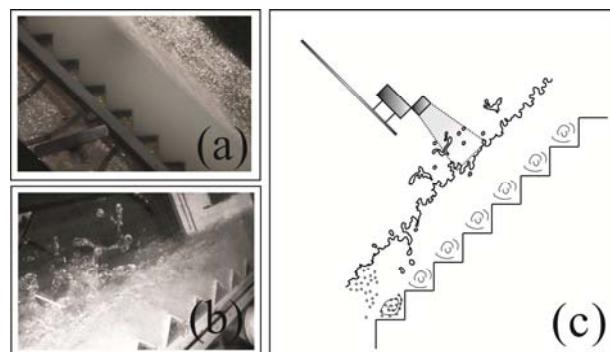


**Figura 1 - Desenho esquemático do canal em degraus e da instrumentação utilizada nos experimentos**

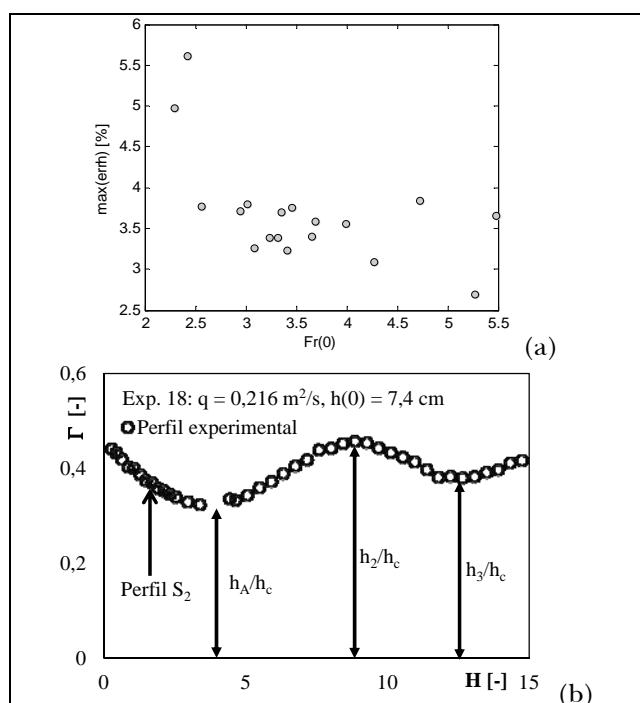
**Tabela 1 – Dados gerais sobre os experimentos**

Nº	Experimento	$Q$ [m <sup>3</sup> /s]	Perfil	$q$ [m <sup>2</sup> /s]	$h_c$ [m]	$s/h_c$ [-]	$h(0)$ [m]
1	Exp. 2	0.0505	S <sub>2</sub>	0.252	0.187	0.268	0.103
2	Exp. 3	0.0458	S <sub>2</sub>	0.229	0.175	0.286	0.101
3	Exp. 4	0.0725	S <sub>2</sub>	0.362	0.238	0.211	0.106
4	Exp. 5	0.0477	S <sub>2</sub>	0.239	0.180	0.278	0.087
5	Exp. 6	0.0833	S <sub>3</sub>	0.416	0.261	0.192	0.092
6	Exp. 7	0.0504	S <sub>2</sub>	0.252	0.187	0.268	0.089
7	Exp. 8	0.0073	S <sub>2</sub>	0.0366	0.051	0.971	0.027
8	Exp. 9	0.0074	S <sub>2</sub>	0.0368	0.052	0.967	0.024
9	Exp. 10	0.0319	S <sub>2</sub>	0.159	0.137	0.364	0.058
10	Exp. 11	0.0501	S <sub>3</sub>	0.250	0.186	0.269	0.06
11	Exp. 14	0.0608	S <sub>2</sub>	0.304	0.211	0.237	0.089
12	Exp. 15	0.0561	S <sub>2</sub>	0.280	0.200	0.250	0.087
13	Exp. 16	0.0265	S <sub>2</sub>	0.133	0.122	0.411	0.046
14	Exp. 17	0.0487	S <sub>2</sub>	0.244	0.182	0.274	0.072
15	Exp. 18	0.0431	S <sub>2</sub>	0.216	0.168	0.298	0.074
16	Exp. 19	0.0274	S <sub>2</sub>	0.137	0.124	0.402	0.041
17	Exp. 20	0.0360	S <sub>2</sub>	0.180	0.149	0.336	0.068
18	Exp. 21	0.0397	S <sub>2</sub>	0.198	0.159	0.315	0.071

Simbologia:  $Q$  = vazão obtida com o vertedor;  $q$  =  $Q/B$ ;  $h_c$  = profundidade crítica;  $h(0)$  profundidade do escoamento em  $x = 0$ . S<sub>2</sub> e S<sub>3</sub> correspondem às formas dos perfis médios da superfície livre (ver Chow, 1959, p.226).



**Figura 2 – Estrutura da superfície livre:** (a,b) Imagens obtidas em experimentos desta pesquisa; (c) ilustração do cone formado pelo ultrassom e spray detectado pelo sensor (Fonte: Simões, 2011).



**Figura 3 – (a) Erros relativos máximos correspondentes aos dezoito experimentos, em que:  $\text{err}_h = 100 \frac{\|h^{(1)} - h^{(2)}\|}{h^{(2)}}$ ,  $h^{(i)}$  = valor médio obtido com o sensor acústico,  $i = 1$  (amostra original),  $i = 2$  (amostra sem valores discrepantes) e  $\text{Fr}(0) = q/(gh(0)^3)^{1/2}$ ; (b) Perfil médio experimental correspondente ao Exp.18, expresso com os adimensionais  $\Gamma = h/h_c$  e  $H = z/h_c$ . (em que  $z = x \text{sen} \alpha$ ).**

A determinação da posição da superfície livre é complexa devido a sua estrutura altamente irregular, sobretudo a jusante do ponto de início da aeração. Um dos problemas relacionados ao uso do sensor acústico é a detecção de gotas e volumes de

líquido ejetados da superfície, como ilustrado na Figura 2. A Fig. 2a corresponde aproximadamente àquilo que é captado pela visão humana, sem artifícios óticos. Trata-se de uma imagem obtida sem o uso de *flash* e com tempo de exposição igual a 1/4 s. Como resultado, obtém-se uma fotografia que é composta pela sobreposição das imagens capturadas neste intervalo. A Fig. 2b corresponde a uma imagem instantânea da superfície livre, obtida com tempo de exposição igual a 1/40 s e com o uso de *flash*. A Fig. 2c ilustra esquematicamente a detecção do líquido sobre a superfície livre. Constatou-se que a detecção de gotas e volumes ejetados influencia pouco as medidas dos perfis médios, como apresentado na Figura 3a, que contém os erros relativos calculados utilizando as profundidades médias das amostras originais e das amostras corrigidas. A comparação foi realizada seguindo um critério adequado de rejeição de dados, no qual as correções foram efetuadas aplicando-se uma vez o critério padrão adotado em diagramas de caixa ou *box plots*, como descrito em Simões *et al.* (2010b). Menciona-se também que o percentual máximo de amostras rejeitadas foi igual a 8,3%, para o Exp. 5. A Figura 3b contém um exemplo de perfil médio da superfície na passagem do escoamento monofásico para bifásico, obtido experimentalmente. Como pode ser visto, há inicialmente a formação de um perfil  $S_2$ , conforme terminologia clássica empregada por Chow (1959, p.226) e Henderson (1966), entre outros, cujo termo coincide com a posição de início da aeração superficial. Em seguida, as profundidades médias compõem uma forma ondulada do escoamento bifásico. De acordo com Matos (2000), observações visuais através das paredes laterais e cálculos realizados com  $h_{90}$  também indicam a ocorrência de um perfil ondulado ( $h_{90}$ =profundidade para fração de vazios igual a 90%).

### **Estudo Experimental: Resultados**

#### *Posição de início da aeração*

A posição de início da aeração foi definida com base no ponto de mínimo que caracteriza a extremidade final do perfil  $S_2$ . Mesmo em experimentos que apresentaram certo grau de dispersão, buscou-se este mínimo, ainda que, neste caso, haja certo grau de aproximação. A primeira relação investigada envolve as variáveis  $L_A/k$  e  $F_r^*$  ( $F_r^* = q/(gk^3 \operatorname{sen}\alpha)^{1/2}$ ) e o uso de uma função do tipo potência. A variável  $L_A$  é definida na Figura 4a, assim como as demais empregadas neste item. Percebe-se, na mencionada figura, que  $L_A$  é a distância entre a

seção de início de aeração e a seção em  $x=0$ . Resultados experimentais de Boes (2000), Chanson (2000), Boes e Hager (2003) e Sanagiotto (2003), por exemplo, mostram que a relação entre a posição de início da aeração e  $F_r^*$  é bem representada por meio de uma potência. Esta tendência também foi observada neste trabalho para  $L_A/k$  e  $F_r^*$ , representada pela equação 1, que possui coeficiente de correlação igual a 0,91. Constatou-se também uma boa correlação entre  $L_A/k$  e  $h(0)/k$  e  $Re(0)$  (número de Reynolds em termos do diâmetro hidráulico, em  $x=0$ ), equação 2, com coeficiente de correlação igual a 0,98, como pode ser visto na Fig.4b.

$$\frac{L_A}{k} = 1,61 F_r^{*1,06}, \quad (1)$$

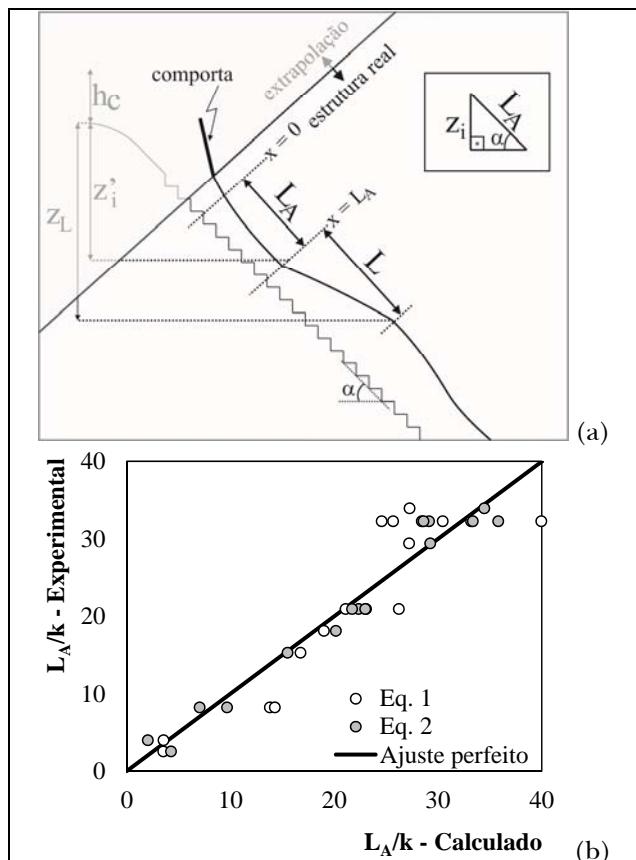
$$\begin{aligned} \frac{L_A}{k} = & 699,97 F_r^{*-6,33} + 34,22 \left[ \frac{h(0)}{k} \right]^{0,592} + \dots \\ & - 49,45 Re(0)^{-0,0379}. \end{aligned} \quad (2)$$

As faixas de validade experimental para as equações 1 e 2 são:  $2,09 \leq F_r^* \leq 20,70$ ,  $0,69 \leq h(0)/k \leq 2,99$  e  $1,15 \cdot 10^5 \leq Re(0) \leq 7,04 \cdot 10^5$ .

Em termos de sentido físico, a equação 1 mostra que o comprimento que coincide com o perfil  $S_2$  nos presentes experimentos aumenta em aumentando a velocidade desse escoamento (mantendo a abertura da comporta e aumentando a vazão, o comprimento aumenta, mostrando coerência entre a equação 1 e a observação). Por outro lado, a equação 2 mostra tendência aparentemente contrária, o que não é esperado fisicamente. Mas, nesse caso, o parâmetro geométrico  $h(0)$  é estabelecido como consequência da vazão e da abertura impostas. A facilidade de sua medida sugere o seu uso, sendo a sua conveniência demonstrada pela alta correlação obtida. Mas trate-se de uma grandeza “secundária”, ou seja, que depende de outras grandezas de controle, como vazão e abertura da comporta. Esta variável adequase às situações de vertedores controlados por comportas. O primeiro ajuste apresentado, equação 1, pode ser reescrito com os adimensionais  $z_i/s$  e  $F$  ( $z_i = L_A \operatorname{sen}\alpha$ ), sendo  $F$  o número de Froude utilizado por Boes e Hager (2003) na forma  $F = q/(gs^3 \operatorname{sen}\alpha)^{1/2}$ . Verifica-se facilmente que  $F_r^* = F / (\cos^3 \alpha)^{1/2}$ . O coeficiente de correlação para estes adimensionais é o mesmo obtido para os adimensionais encontrados na equação 1. A equação seguindo uma “lei de potência” resultante,

válida para as mesmas condições das aproximações precedentes, é:

$$\frac{z_i}{s} = 1,397 F^{1,06}. \quad (3)$$



**Figure 4 - Definições das variáveis relacionadas ao início da aeração (a) e comparação entre dados medidos e calculados com as equações 1 e 2 (b).**

Uma equação similar, proposta por Boes (2000), e expressa como  $\frac{z_i}{s} = 4,69 F^{0,84}$ , possui coeficientes diferentes da equação 3 por envolver uma dimensão diferente ( $z_i'$ ). O mesmo ocorre com a equação apresentada por Boes e Hager (2003),  $\frac{z_i'}{s} = 5,9 F^{0,8}$ . Para comparar os resultados experimentais com as previsões dessas equações empíricas, a equação 3 foi modificada substituindo  $z_i$  por  $z_i'$  (ver Figura 4a). Para tanto, utilizou-se a equação da energia escrita entre a seção com escoamento crítico (Seção 1, representada pelo subscrito “c”) e a seção inicial dos experimentos (Seção 2, em  $x = 0$ , representada por (0)). A forma empregada neste trabalho inclui o uso da equação de Darcy-Weisbach com valores

médios para o raio hidráulico e velocidade, assim como realizado por Boes (2000). A equação resultante é similar à proposta por Boes (2000, p.126), exceto em relação ao uso do coeficiente de Coriolis, assumido como unitário neste trabalho.

$$(z_c - z(0)) = \frac{h(0) \cos \alpha + \frac{h_c^3}{2h(0)^2} - \frac{3}{2} h_c}{1 - f \frac{h_c^3(h(0) + h_c)}{(h_c h(0))^2} \frac{(B + h_c + h(0))}{B}}. \quad (4)$$

Nota-se que o cálculo de  $z_i'$  requer o conhecimento do fator de resistência,  $f$ . Os valores utilizados para este adimensional são aqueles calculados com base na solução analítica da curva  $S_2$ , apresentada por Simões *et al.* (2010a). Como resultado desta metodologia, a equação obtida possui coeficiente de correlação 0,98 e tem a seguinte forma:

$$\frac{z_i'}{s} = 3,19 F^{0,837}, \quad (5)$$

em que  $z_i' = z_i + z_c z(0)$ . A equação 5 é válida para os mesmos intervalos precedentes.

Conclui-se que a equação 5 fornece valores menores em relação aos calculados com a equação de Boes (2000, p.126) e a equação de Boes e Hager (2003). Duas possíveis razões podem ser destacadas para justificar tais diferenças: (1) O método empregado para o cálculo do fator de resistência e (2) a definição do início da aeração. Esses autores definiram a posição de início da aeração como aquela onde há 1% de ar no pseudo-fundo. A definição empregada neste trabalho corresponde à posição final do perfil  $S_2$ . Utilizando a equação de Boes e Hager (2003) é possível relacionar essas duas posições por meio da equação 6. O início da aeração com 1% de ar junto ao fundo ocorre em uma posição aproximadamente igual a 1,85 vezes a posição final do perfil  $S_2$ .

$$\frac{z_i')_{1\%}}{z_i)_{S_2}} = \frac{1,85}{F^{0,037}}, \quad (6)$$

em que  $z_i')_{1\%}$  é aqui definido como a distância usada na equação de Boes e Hager (2003) e  $z_i)_{S_2}$  é a distância usada na equação 5. Note-se que a diferença evidenciada pela equação 6 é coerente com a experimentação, uma vez que a aeração do fundo ocorre

a jusante do ponto de início de aeração superficial, que corresponde ao final do perfil  $S_2$ .

#### Profundidades no início da aeração

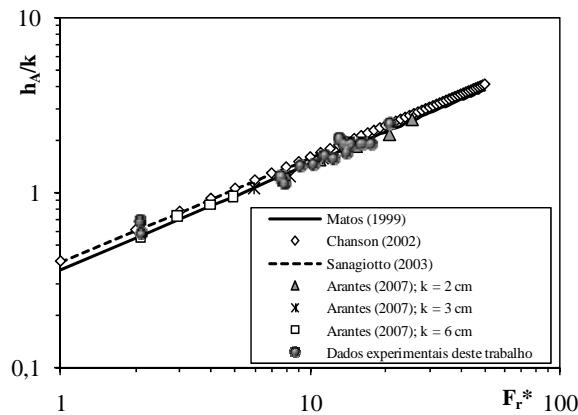
Assim como no caso anterior, o uso de potências foi adequado para representação da profundidade do escoamento no início da aeração, definida como a profundidade na posição final do perfil  $S_2$ . As equações 7 e 8 representam os ajustes obtidos, com coeficientes de correlação iguais a 0,97 e 0,98, respectivamente. A Figura 5 mostra que há excelente concordância entre os dados obtidos com ultrasom e os dados de diferentes autores. As observações anteriormente feitas, concernentes à dependência física para com as variáveis envolvidas, bem como à possibilidade de uso de  $h(0)$  em vertedores com comportas, também se aplicam para as equações 7 e 8.

$$\frac{h_A}{k} = 0,363 F_r^{*0,609}, \quad (7)$$

$$\frac{h_A}{k} = 0,791 F_r^{*-6,98} + 1,285 \left[ \frac{h(0)}{k} \right]^{0,567} + \dots \quad (8)$$

$$- 19,56 \text{Re}(0)^{-0,322}.$$

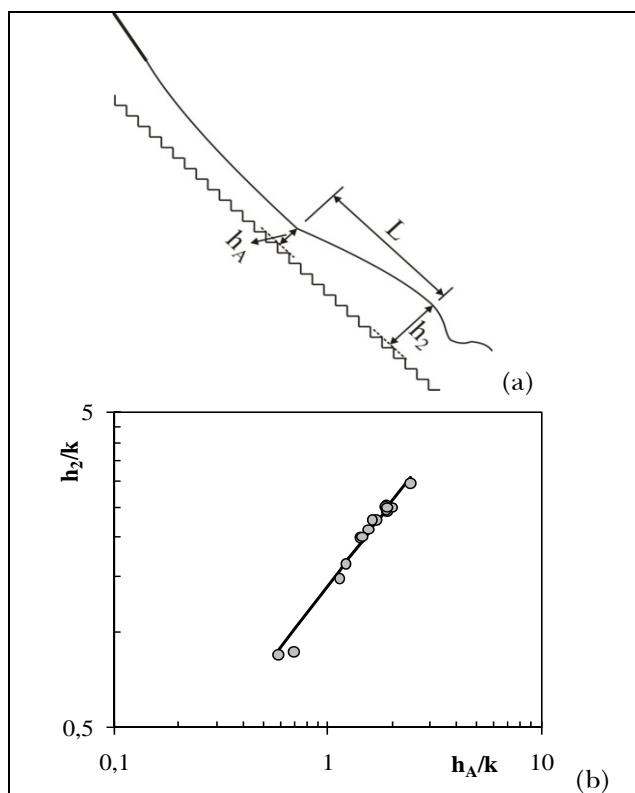
As faixas de validade experimental para as equações 1 e 2 são:  $2,09 \leq F_r^* \leq 20,70$ ,  $0,69 \leq h(0)/k \leq 2,99$  e  $1,15 \cdot 10^5 \leq \text{Re}(0) \leq 7,04 \cdot 10^5$ .



**Figura 5 – Profundidade na posição de início da aeração definida com base no final do perfil  $S_2$ : comparação com dados experimentais e numéricos de diferentes pesquisadores.**

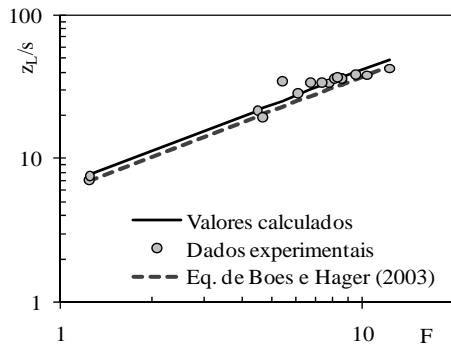
#### Transição ao escoamento bifásico

Os experimentos revelaram que os valores médios de profundidades formam um perfil da superfície livre com uma região decrescente ( $S_2$ ) seguida de uma zona com profundidades crescentes até um máximo a partir do qual há uma forma ondulada, como ilustrado nas Figuras 3b e 6a. O valor máximo imediatamente após o final da segunda região é denotado com  $h_2$ . O comprimento de transição, por sua vez, é representado por  $L$  e corresponde ao comprimento entre  $h_A$  e  $h_2$ , paralelo ao pseudo fundo. Buscou-se inicialmente a correlação entre  $h_A/k$  e  $h_2/k$ . O uso de uma potência, indicada na equação 9, conduziu a um ajuste marcante, como pode ser visto na Figura 6b. A equação 9 produziu um coeficiente de correlação de 0,99. Schulz e Simões (2011) e Simões *et al.* (2011a) apresentaram modelos físico-matemáticos que relacionam o comprimento de transição com adimensionais que caracterizam o escoamento (Froude,  $h_2/k$ ). Adicionalmente, Schulz, Lobosco e Simões (2011) utilizaram parte desses modelos na previsão teórica da forma da superfície livre do escoamento aerado.



**Figura 6 – (a) Definição da profundidade  $h_2$  e do comprimento de transição  $L$ ; (b) Relação entre  $h_A/k$  e  $h_2/k$**

$$\frac{h_2}{k} = 1,408(h_A/k)^{0,879}. \quad (9)$$



**Figura 7 – Posição de início da aeração  $z_L/s$  em função de  $F$ .**

O comprimento de transição entre a última seção do perfil  $S_2$  e a primeira seção do escoamento bifásico foi aqui caracterizado a partir das medidas com ultrassom e de uma hipótese para o escoamento bifásico. Esta variável (comprimento de transição) é relevante porque caracteriza uma região ainda desprotegida em função da ausência de ar junto ao fundo. Tal afirmação constitui uma hipótese fundamentada em observações visuais e na evidência física de que o ar que é incorporado através da superfície transita horizontalmente uma distância (comprimento de transição) antes de chegar ao fundo do canal. A hipótese aqui utilizada é de que a expansão da profundidade que caracteriza a evolução do escoamento bifásico começa no ponto de início de aeração superficial (ponto mínimo da curva  $S_2$ , anteriormente mencionado) e termina no primeiro ponto de profundidade máxima,  $h_2$ , do escoamento bifásico (a expansão máxima é considerada ocorrer quando a bolha de ar que atravessou a superfície atinge o fundo do canal). Esse término da transição evidentemente precisa ser verificado por meio de medições de frações volumétricas de ar junto ao fundo. Note-se que a expansão máxima, considerando uma frente de fração de vazios uniforme, de fato ocorre quando esta frente atinge o fundo. Apesar da necessidade de medidas da fração de vazios, é apresentada uma análise para a quantificação do comprimento de transição aqui medido. Foram adicionados comprimentos de transição aos valores de  $z'_i$  correspondentes, permitindo definir novas posições de início da aeração. Os parâmetros adimensionais obtidos foram  $(z'_i + L_{sen\alpha})/s = z_L/s$  e  $F$ , que levaram à equação 10, com coeficiente de correlação igual a 0,95. A Figura 7 ilustra o compor-

tamento desse ajuste em relação aos dados experimentais e a equação de Boes e Hager (2003).

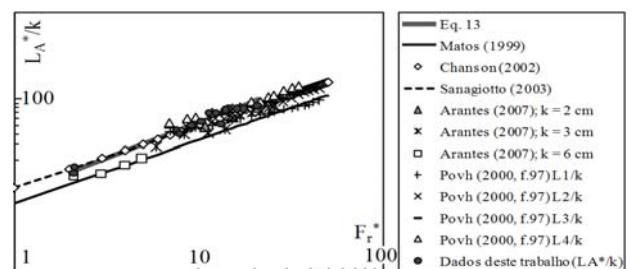
$$\frac{z_L}{s} = 6,4F^{0,81}. \quad (10)$$

As equações de Boes (2000) e Boes e Hager (2003) permitem relacionar  $z_L/s$  com a posição da fração de vazios de 1% no fundo do canal. Os resultados obtidos são:

$$\frac{z'_i}{z_L} = 0,73F^{0,03}, z'_i: \text{Boes (2000)}, \quad (11)$$

$$\frac{z'_i}{z_L} = \frac{0,92}{F^{0,01}}, z'_i: \text{Boes e Hager (2003)}. \quad (12)$$

As equações 6, 11 e 12 mostram que, considerando o início da aeração superficial e o início da aeração do fundo (1% de fração de vazios no fundo), as formas de análise aqui seguidas são coerentes com os resultados anteriores da literatura. Como ilustrado na Figura 7, as semelhanças em relação à equação de Boes e Hager (2003) mostram que  $z_L$  avalia aproximadamente a posição onde há 1% de ar junto ao fundo. Os dados também foram utilizados para relacionar  $L_A^*/k$  com  $F_r^*$ , sendo  $L_A^* = z'_i / \operatorname{sen}\alpha$ . O resultado obtido foi a equação 13 (com coeficiente de correlação 0,95), cujo comportamento é ilustrado na Figura 8 em comparação aos dados de outros pesquisadores. De forma geral, nota-se uma boa concordância da equação 13 com a maior parte dos resultados dos pesquisadores citados na legenda da figura, em especial com os resultados de Povh (2000), correspondentes ao comprimento  $L_4/k$  (diferentes  $L_i$  correspondem a diferentes definições para a posição de início da aeração, segundo o estudo experimental de Povh, 2000), Chanson (2002) e Sanagiotto (2003), embora estes correspondam a 1V:0,75H.



**Figura 8 – Nova posição de início da aeração: comparação com dados de diferentes autores.**

$$\frac{L_A^*}{k} = 8,4F^{0,81}. \quad (13)$$

### Profundidades máximas

Neste item são apresentados valores para as profundidades máximas adimensionalizadas em relação à profundidade crítica ( $\max(\Gamma)$ ) e suas relações com outras variáveis dos escoamentos estudados no canal em degraus. Inicialmente apresentam-se as relações obtidas entre  $\max(\Gamma)$  e  $h_A/h_c$ ,  $h_2/h_c$  e  $h_3/h_c$  (em que:  $h_3$  = profundidade do primeiro vale da onda, após  $h_2$ ). As equações 14 a 16 apresentam tais relações, lineares em todos os casos. Os valores máximos foram obtidos a partir dos perfis médios.

$$\max(\Gamma) = 1,27 \frac{h_A}{h_c} + 0,0454, \quad (14)$$

$$\max(\Gamma) = 1,09 \frac{h_2}{h_c} - 0,0202, \quad (15)$$

$$\max(\Gamma) = 1,48 \frac{h_3}{h_c} - 0,111. \quad (16)$$

Os coeficientes de correlação são 0,84, 0,96 e 0,92, respectivamente, devendo ser observados os seguintes intervalos de validade:  $0,31 < h_A/h_c < 0,47$ ,  $0,41 < h_2/h_c < 0,60$ ,  $0,36 < h_3/h_c < 0,49$ .

Considerando o número de Reynolds na posição inicial,  $Re(0)$ , e o adimensional  $s/h_c$ , as equações 17 e 18 foram obtidas para  $\max(\Gamma)$ , com coeficientes de correlação 0,87 e 0,85, respectivamente.

$$\max(\Gamma) = -3 \times 10^{-7} Re(0) + 0,651, \quad (17)$$

$$\max(\Gamma) = 0,215(s/h_c) + 0,421. \quad (18)$$

As faixas de validade para essas equações são:  $1,1 \cdot 10^5 < Re(0) < 7,0 \cdot 10^5$  e  $0,21 < s/h_c < 0,97$ .

Com o intuito de localizar os valores máximos ao longo do escoamento, foram calculadas as relações entre  $\max(\Gamma)$  e  $H$  e  $\max(\Gamma)$  e  $H-z_i/h_c$  (distância entre a posição de início da aeração superficial e a posição correspondente ao valor máximo). As equações 19 e 20 correspondem a esses ajustes e possuem coeficientes de correlação de 0,86 e 0,83 respectivamente. A equação 20 é especialmente útil porque fornece a localização da profundidade máxima a partir do ponto de início da aeração. Assu-

mindo que esses resultados são aplicáveis a estruturas sem comportas é possível calcular a profundidade máxima após o início da aeração com a equação 20.

$$\max(\Gamma) = 0,0084H + 0,407, \quad (19)$$

$$\max(\Gamma) = 0,0074(H - z_i/h_c) + 0,445. \quad (20)$$

As faixas de validade para essas equações são:  $7,36 < H < 27,35$  e  $3,35 < (H - z_i/h_c) < 24,62$ .

As relações apresentadas até aqui foram estabelecidas com as “profundidades médias máximas” dos perfis médios da superfície livre, a jusante do ponto de início da aeração. Devido às oscilações da superfície livre em torno dos valores médios, estes evidentemente não são os máximos instantâneos medidos. Uma vez que os valores médios são obtidos dos valores instantâneos, foi possível analisar comparativamente esses valores e estabelecer uma relação linear entre os valores máximos obtidos com perfis médios,  $\max(\Gamma)$ , e os máximos medidos, denotados por  $\max(\Gamma^*)$ . A equação que relaciona essas quantidades é apresentada a seguir, com coeficiente de correlação de 0,98.

$$\max(\Gamma^*) = 2,0 \max(\Gamma) - 0,275. \quad (21)$$

A equação 21 é válida para  $0,42 < \max(\Gamma) < 0,64$ , e mostra que a profundidade máxima pode ser aproximadamente igual a  $h_c$ . Para o intervalo de validade de  $\max(\Gamma)$  observa-se que a máxima altura medida varia entre  $0,565h_c$  e  $1,01h_c$ , o que indica que a ordem de grandeza de  $h_c$  é seguida para a ejeção de gotas. Essa constatação é de importância prática, sendo útil para o dimensionamento das alturas dos muros laterais. O dimensionamento realizado a partir de profundidades equivalentes de água e frações de vazios médias depende do fator de resistência adotado, como pode ser visto em Simões *et al.* (2010), Simões *et al.* (2011b). A metodologia desenvolvida neste trabalho proporciona mais uma alternativa para avaliar a altura dos muros laterais, válida para vertedores em degraus com  $\alpha = 45^\circ$  e os demais intervalos citados anteriormente.

### Intensidade turbulenta, energia cinética turbulenta e análise espectral

Este item é dedicado à análise dos sinais  $h=h(x,t)$  e obtenção de informações sobre a turbulência na superfície livre. Os cálculos foram realizados a partir das amostras com velocidades verticais

W, sem rejeição de amostras. Os valores de W são aqueles fornecidos pelo sensor, como descrito anteriormente. A intensidade turbulenta é definida de acordo com Hinze (1975, p.4) e Brodkey (1967, p.269) e a intensidade relativa foi calculada com  $V_c = (gh_c)^{1/2}$ :

$$w' = \sqrt{\overline{w^2}} \text{ e } ir = w'/V_c, \quad (22)$$

em que  $w'$  é a intensidade das flutuações turbulentas,  $w = W - \overline{W}$ .

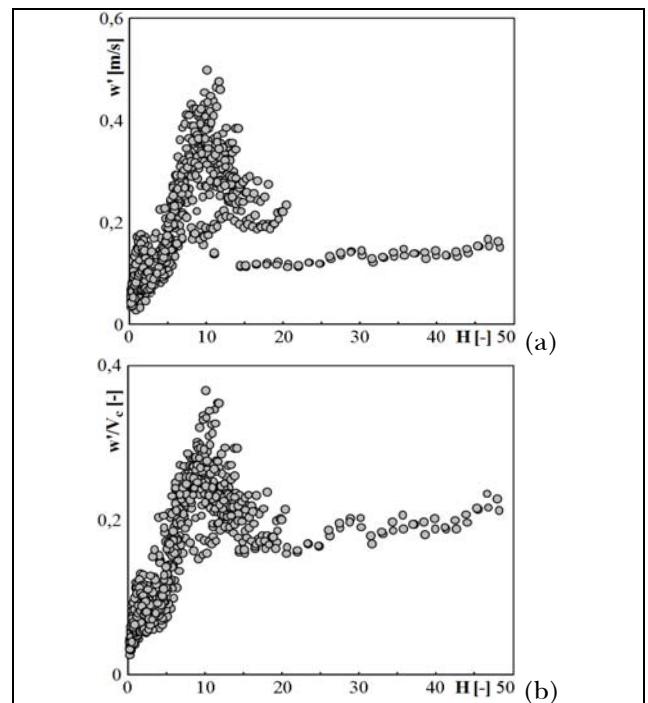
A intensidade turbulenta definida pela equação 22 é considerada, neste trabalho, igual à componente vertical da intensidade turbulenta na superfície livre. Além da intensidade turbulenta, foram calculados valores para a energia cinética turbulenta a partir das informações experimentais disponíveis. A energia cinética turbulenta por unidade de massa,  $k_e$ , é definida como a metade do traço do tensor de Reynolds, i.e.,  $k_e = \overline{u_i u_i} / 2$  (em que  $u$  = flutuação e está-se usando a convenção da soma de Einstein).

Se a turbulência for isotrópica o tensor de Reynolds possui componentes diferentes de zero apenas na diagonal principal. O elipsóide, para turbulência isotrópica, é reduzido a uma esfera deixando de existir variações quando são realizadas rotações do sistema de coordenadas e reflexões com respeito aos planos coordenados. Deste modo, as componentes da diagonal principal passam a ser iguais e a energia cinética turbulenta assume a seguinte forma (escrita em termos de  $w$  ou  $w'$ ):

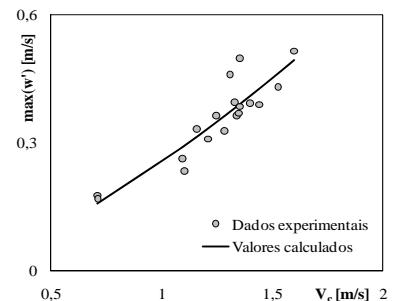
$$k_e = \frac{3}{2} \overline{w^2} = \frac{3}{2} w'^2. \quad (23)$$

No presente estudo sabe-se que a turbulência não é isotrópica, ou seja, as evoluções horizontais das gotas não são iguais às evoluções verticais. Entretanto, mantém-se a forma da equação 23 por ser proporcional à energia cinética vertical. A Figura 9 contém a distribuição das intensidades turbulentas (dimensional e adimensional) para todos os experimentos com perfis  $S_2$ . Pôde-se concluir que o comportamento da intensidade turbulenta consiste em um trecho crescente para  $H < 10$ , aproximadamente, e uma região com valores decrescentes para  $H > 10$ . A intensidade relativa condensou as informações de forma interessante e apresenta o mesmo comportamento, evidenciando um crescimento relativamente pouco íngreme para  $H > 25$ . Em  $H=10$

ocorre a máxima intensidade turbulenta e é iniciado o decaimento desta quantidade estatística. Tal decaimento termina em  $H=25$ , como pode ser visto na Figura 9b.



**Figura 9 – Intensidades turbulentas para todos os experimentos com perfis  $S_2$ :** (a) Intensidade em função da posição adimensionalizada  $H = z/h_c$ ; (b) intensidade relativa em função da posição  $H$ .

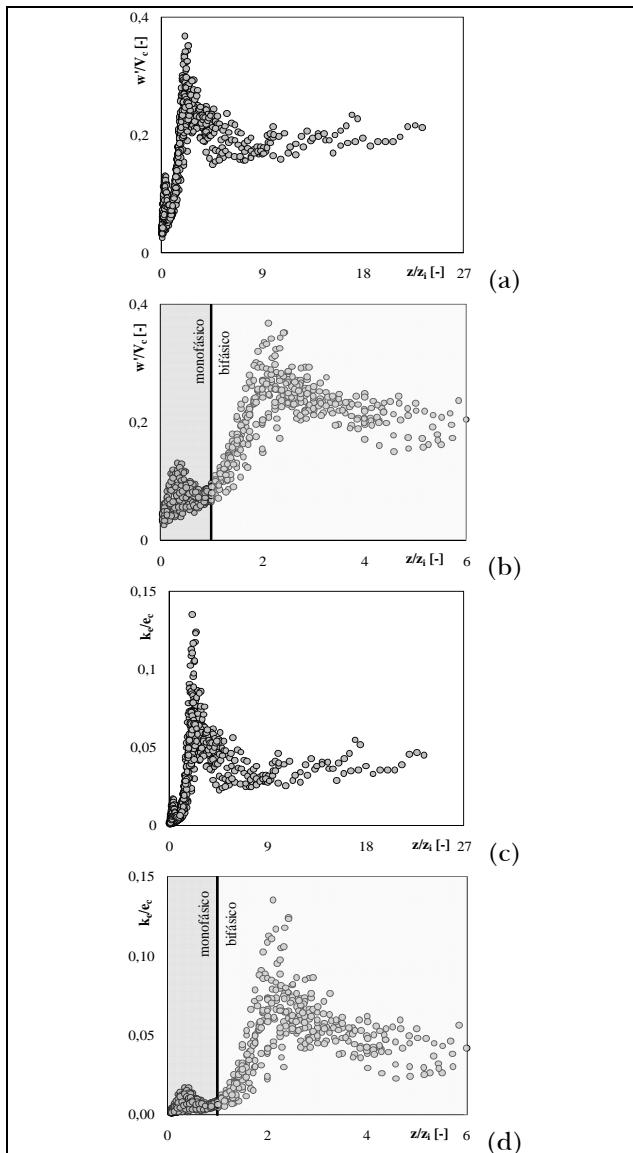


**Figura 10 – Valores máximos para a intensidade turbulenta**

Cada experimento, inclusive aqueles com perfis  $S_3$ , possui um valor máximo para a intensidade turbulenta. Esses valores apresentaram boa correlação com as velocidades críticas correspondentes. A equação empírica 24 relaciona  $\max(w')$  com  $V_c$ , apresentando um coeficiente de correlação entre

dados medidos e calculados de 0,90. A Figura 10 ilustra a distribuição dos pontos em torno da curva representada pela equação 24. Estão atrelados a esta equação os seguintes limites:  $0,157 < w' < 0,493$  e  $0,71 < V_c < 1,60$ .

$$\max(w') = 0,255V_c^{1,41}. \quad (24)$$



**Figura 11 – Intensidade relativa da energia cinética turbulenta em função da posição vertical adimensionalizada com a posição de início da aeração definida com o final do perfil S<sub>2</sub>:** (a,c) Todos os resultados e (b,d) Parte inicial, com destaque para a posição de início da aeração ( $z/z_i = 1$ ).

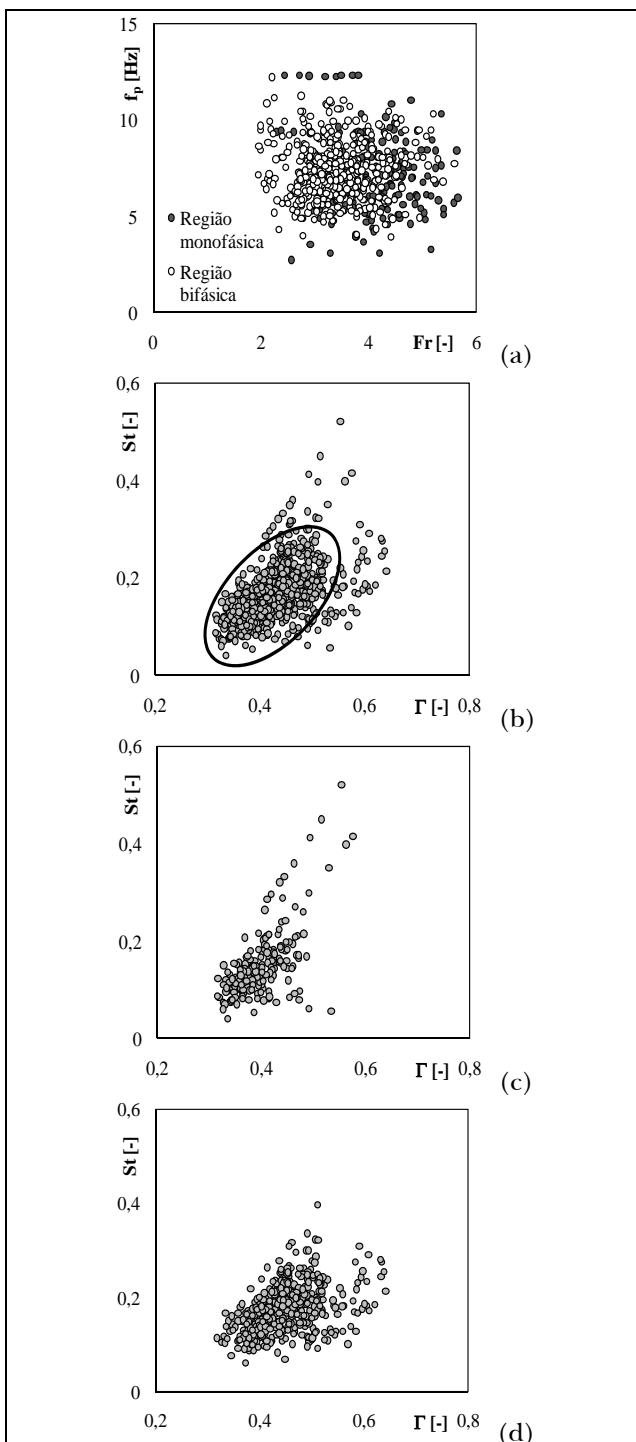
As intensidades relativas e a energia cinética turbulenta adimensionalizada com a energia crítica por unidade de massa ( $e_c = 1,5gh_c$ ) foram analisadas em função de  $z/z_i$ . Nas Figuras 11a,b,c,d, observa-se que há quatro regiões diferentes para tais grandezas: (1) Região de crescimento ao longo do canal para a porção monofásica; (2) Decaimento ao longo do canal até a posição  $z/z_i=0,9$ ; (3) Crescimento que se desenvolve até  $z/z_i=2,11$  e (4) Decaimento ao longo da região bifásica.

Considerando o intervalo  $2,5 < z/z_i < 14$ , foi possível ajustar uma lei de potência do tipo  $k_e = a(z/z_i)^{-n}$ , com  $n = 0,46$  e coeficiente de correlação de 0,72. Utilizando a terminologia padrão do modelo  $k_e-\epsilon$ , define-se o coeficiente  $C_{\epsilon 2} = (n+1)/n$ . O valor deste coeficiente (constante) para o intervalo mencionado resultou igual a 3,17, cerca de 1,7 vezes o valor padrão de 1,92 (RODI, 1993). Note-se que esta avaliação mostra ser possível associar valores a parâmetros característicos do modelo  $k_e-\epsilon$ , embora não explique a sua aplicação a interfaces bifásicas dispersas (situação física descrita).

Com o uso da transformada rápida de Fourier e os dados experimentais originais foi possível calcular as frequências dominantes ( $f_p$ ) existentes nos fenômenos, a partir das derivadas temporais de  $h$ , consideradas aproximadamente iguais à velocidade vertical da superfície ( $W$ ). Sendo  $f_p$  a freqüência de pico, o número de Strouhal é escrito de acordo com a equação 25. A Figura 12a contém os resultados correspondentes a  $f_p$  em função do número de Froude. Percebe-se que não há correlação entre essas grandezas. A Figura 12b relaciona o número de Strouhal com o adimensional  $\Gamma$  (que é igual a  $Fr^{2/3}$ ). Nota-se que não há boa correlação, embora se perceba uma formação aproximadamente elipsoidal para parte dos pontos. As Figuras 12c e 12d correspondem à Figura 12b, mas para os escoamentos monofásico e bifásico de forma separada, respectivamente. Apenas dois experimentos presentes na Figura 12c indicam uma possível relação linear. Isso ocorreu devido a uma freqüência aproximadamente constante. Portanto ainda não se pode determinar as freqüências dominantes a partir de medidas de parâmetros hidráulicos mais simples.

$$St = \frac{hf_p}{V}, \quad (25)$$

em que:  $V(x) = q/h(x)$ , sendo  $q$  = vazão específica e  $h(x)$  as profundidades médias.



**Figura 12 – Resultados da análise espectral:** (a) frequências de pico em função do número de Froude ( $Fr = V/(gh)^{0.5}$ ); (b) Número de Strouhal em função de  $\Gamma = h/h_c$  para todos os experimentos e regiões aeradas e não aeradas, (c) pontos para a região monofásica e (d) para o escoamento bifásico.

## RESSALTO HIDRÁULICO

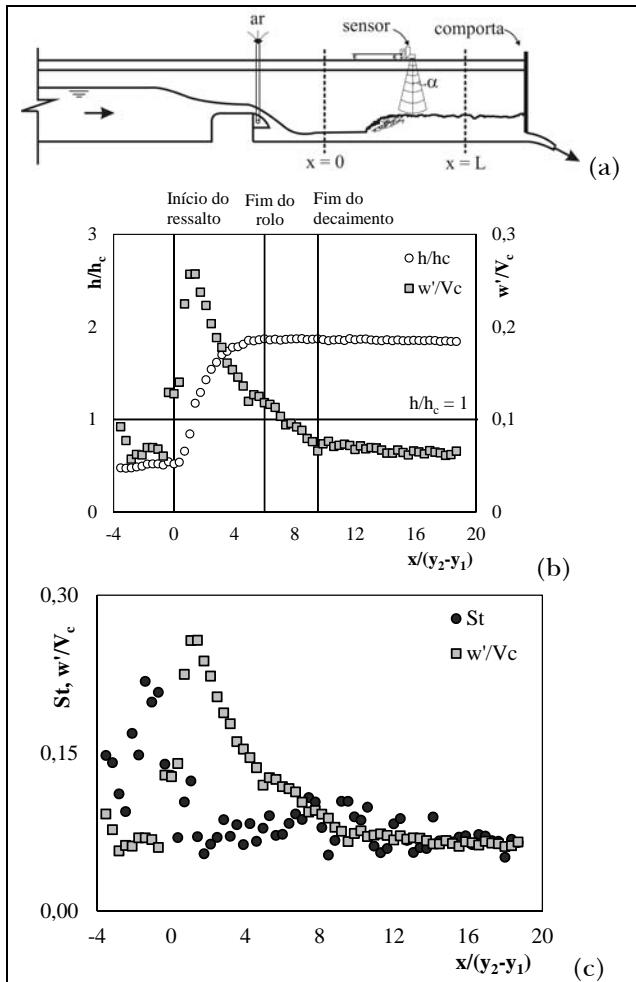
### Metodologia e resultados

No âmbito deste estudo foi também conduzido um experimento a fim de obter informações sobre a superfície livre de um ressalto hidráulico com  $Fr_l=3$ . A razão deste estudo sequencial está no uso de ressaltos em bacias de dissipação, construídas no pé de vertedores escalonados. O sensor acústico utilizado foi o mesmo empregado nas medições realizadas no canal em degraus, com freqüência de amostragem igual a 50 Hz, 2000 amostras/posição e 67 posições ao longo do canal. Nesta caso, este tempo de aquisição mostrou-se adequado para o ressalto hidráulico estudado após testes preliminares (no ressalto estudado a formação se gotas foi consideravelmente inferior em relação aos experimentos no canal em degraus). A Figura 13a apresenta um desenho esquemático do canal empregado, retangular e com largura de 41 cm. A vazão foi obtida através de um vertedor triangular e da equação de Thompson. Embora o escoamento no canal em degraus seja supercrítico ao longo de toda a sua extensão, o que não ocorre com o ressalto hidráulico, constatou-se que em ambos os casos o aumento da intensidade turbulenta está atrelado à entrada de ar por meio da superfície livre.

Alguns resultados experimentais e numéricos relacionados ao estudo do referido ressalto hidráulico foram publicados por Simões *et al.* (2010b). Neste trabalho os dados apresentados pelos referidos autores foram utilizados para calcular as intensidades turbulentas relativas. O perfil médio da superfície livre e o comportamento da intensidade turbulenta relativa são apresentados nas Figuras 13b,c. Como pode ser notado na Figura 13b,  $w'/V_c$  assumiu um valor máximo na região de intensa recirculação do ressalto hidráulico e aproximadamente coincidente com a posição em que ocorre a profundidade crítica, o que são características que apontam esta medida como adequada para localizar o rolo e obter informações de sua agitação. Entre o ponto de máximo e  $x/(y_2-y_1)$  igual a 11,64, o comportamento de  $w'/V_c$  pode ser descrito por meio da seguinte equação (com coeficiente de correlação igual a 0,97):

$$w'/V_c = 0,378[x/(y_2-y_1)]^{-0,678}. \quad (26)$$

Com a equação 26 é obtido  $C_{\varepsilon 2} = 1,74$ , valor inferior ao encontrado para o canal em degraus.



**Figura 13 – Resultados experimentais sobre a posição da superfície livre de um ressalto hidráulico:** (a) desenho esquemático do canal e sensor empregado; (b) intensidade turbulenta relativa ao longo do ressalto hidráulico e perfil médio da superfície livre; (c) Número de Strouhal,  $St$ , e intensidade turbulenta relativa..

A Figura 13c contém os números de Strouhal obtidos para o ressalto estudado, calculados com  $h(0)$  e  $V(0)$ . As frequências dominantes obtidas possuem a mesma ordem de grandeza daquelas apresentadas por Murzyn e Chanson (2009). Nota-se também que  $St = w'/V_c = 0,07$  para  $9,52 < x/(y_2-y_1) < 18,7$ . Se  $x/(y_2-y_1) = 9,52$  for considerado o final do ressalto, obtém-se um comprimento adimensional  $L_j/(y_2-y_1) = 9,52$  para  $Fr_1 = 3,0$  ( $y_2$  é o conjugado subcrítico e  $y_1$  o supercrítico). Com essa definição estabelece-se que o ressalto hidráulico termina na posição a partir da qual a intensidade turbulenta junto à superfície livre é independente da posição ao longo do canal. Com o perfil médio da superfície

livre também foi possível calcular o comprimento do rolo do ressalto, tendo sido obtida a seguinte relação:  $L_r/(y_2-y_1) = 6$ . Marques *et al.* (1997) realizaram medições de pressões com transdutores instalados no fundo do canal e definiram o fim do ressalto como a posição a partir da qual não há variações expressivas do coeficiente de curvose. Como resultado, os referidos autores obtiveram  $L_j/(y_2-y_1) = 8,5$ , valor relativamente próximo ao calculado nesta pesquisa. O comprimento do rolo definido neste trabalho coincidiu com aqueles obtidos por Lopardo (1986) e Marques *et al.* (1997), isto é,  $L_r/(y_2-y_1) = 6$ . Embora não tenham sido medidas flutuações de pressão no presente estudo, é interessante mencionar que a região de maiores flutuações de velocidade parece sobrepor-se à região de maiores flutuações de pressão obtida, por exemplo, por Lopardo (1986), localizada entre  $1,75(y_2-y_1)$  a  $2,00(y_2-y_1)$ .

## CONCLUSÕES

Foram apresentados resultados de estudos experimentais relacionados a escoamentos em um canal com um fundo em degraus e a um ressalto hidráulico. Concluiu-se que a sonda acústica ultrassônica empregada possibilita medir profundidades médias bem definidas e profundidades instantâneas que caracterizam adequadamente a turbulência do meio. Para os escoamentos no canal em degraus, os perfis médios indicaram a ocorrência de perfis  $S_2$  e perfis  $S_3$  bem definidos, posições de início da aeração superficial que correspondem ao final do perfil  $S_2$ , profundidades características ( $h_A$ ,  $h_2$ ,  $h_3$  e valores máximos), a forma ondulada para a região bifásica e o comprimento de transição entre o escoamento monofásico e o escoamento bifásico. A metodologia utilizada, portanto, mostrou ser altamente útil para obter informações hidráulicas vinculadas a escoamentos complexos. Concluiu-se que a posição de início da aeração depende do número de Froude em termos da altura de rugosidade de acordo com uma potência, assim como constatado por diversos pesquisadores que estudaram o tema. Verificou-se também que tal posição pode ser adequadamente relacionada com  $h(0)/k$  e  $Re(0)$ . A posição de início da aeração definida com base no final do perfil  $S_2$  e extrapolada de acordo com Boes (2000) corresponde aproximadamente à posição onde há 1% de ar junto ao fundo quando somada ao comprimento de transição. Isso aponta para a conveniência do uso da presente metodologia (mais

simples) na quantificação do comprimento de transição. Comparações com dados de outros pesquisadores também levaram a excelentes concordâncias para a profundidade na posição de início da aeração.

A profundidade média máxima está linearmente relacionada com as profundidades médias características dos perfis da superfície livre, com o adimensional  $s/h_c$ , com o número de Reynolds  $Re(0)$  e com a posição ao longo do canal. Concluiu-se que a profundidade média máxima é aproximadamente igual à metade do valor máximo obtido com o sinal oriundo do sensor ultrassônico. Análises estatísticas dos valores instantâneos das velocidades verticais permitiram identificar regiões de crescimento e decaimento da turbulência no escoamento ao longo do canal em degraus e do ressalto hidráulico. As zonas de decaimento ocorreram de acordo com leis de potência, condição que levou a avaliação de uma das constantes do modelo  $k_c$ - $\epsilon$  relacionada a um termo fonte presente no modelo. Para o caso de escoamentos em degraus, o valor médio conduziu a uma constante aproximadamente 1,7 vezes maior que o valor padrão. Para o ressalto hidráulico, a mesma constante resultou inferior, porém, mais próxima do valor padrão (menciona-se que não se verificou a aplicação do modelo  $k_c$ - $\epsilon$  para fases dispersas). Finalmente, cabe mencionar que também foi possível identificar frequências dominantes e calcular números de Strouhal para os escoamentos no canal em degraus e para o ressalto hidráulico. As conclusões acerca dos comprimentos do ressalto e do rolo se alinham com valores calculados a partir de flutuações de pressões apresentados por Marques *et al.* (1997), indicando que a presente metodologia também pode ser convenientemente adotada para esse tipo de estudo.

## AGRADECIMENTOS

Ao CNPq, CAPES e FAPESP. Ao técnico Alcino de Paula, da EESC, pelo auxílio durante a organização e realização dos experimentos no canal com fundo em degraus.

## REFERÊNCIAS

- ARANTES, E. J. *Caracterização do escoamento sobre vertedouros em degraus via CFD*. 2007. 206 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
- BOES, R. *Zweiphasenströmung und Energieumsetzung an Grosskaskaden*. 2000. 309 f. Tese (Doutorado) – Instituto Federal Suíço de Tecnologia - Laboratório de Hidráulica, Hidrologia e Glaciologia, Zurich, 2000.
- BOES, R.M.; HAGER, W.H. Two-Phase flow characteristics of stepped spillways. ASCE, *Journal of Hydraulic Engineering*. v.129, n.9, p.661-670, 2003.
- BRODKY, R.S. *The phenomena of fluid motions*. Brodkey Publishing, 1967. 752 p.
- CHANSON, H. *The hydraulics of stepped chutes and spillways*. A. A. Balkema, 2002. 384 p.
- CHANSON, H., AOKI, S.; MARUYAMA, M. Unsteady Air Bubble Entrainment and Detrainment at a Plunging Breaker: Dominant Time Scales and Similarity of Water Level Variations. *Coastal Engineering*, v. 46, n.2, p. 139-157, 2002.
- CHOW, V.T. *Open-channel hydraulics*. Reprint of the 1959 Edition, McGraw Hill Book Company, Inc.. The Blackburn Press, 1959. 680 p.
- HENDERSON, F. M. *Open Channel Flow*. New York: MacMillan, 1966.
- HINZE, J.O. *Turbulence*. McGraw-Hill, 2<sup>a</sup> ed., 1975. 790 p.
- KUCUKALI, S.; CHANSON, H. Turbulence measurements in the bubbly flow region of hydraulic jumps. *Experimental Thermal and Fluid Science*, n.33 p. 41–53, 2008.
- LOPARDO, R.A. Apunte sobre flutuaciones macroturbulentas de presión, medici análisis y aplicación al ressalto hidráulico. In: Apostila do curso de Turbulência, Cavitação e Aeração de Fenômenos Hidráulicos. São Paulo, 1986. 45 p.
- LUEKER, M.L., MOHSENI, O., GULLIVER, J.S.; SCHULZ, H.E. AND CHRISTOPHER, R.A. *The Physical Model Study of the Folsom Dam Auxiliary Spillway*

System, *Project Report 511, University of Minnesota, SAFL*. Prepared for Associates California Engineers LLC and Sacramento District of the U.S. Army Corps of Engineers, 2008. 208 p.

MARQUES, M.G.; DRAPEAU, J.; VERRETTE, J-L. Flutuação de pressão em um ressalto hidráulico. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.2, n.2, p. 45-52, 1997.

MATOS, J.S.G. *Emulsionamento de ar e dissipação de energia do escoamento em descarregadores em degraus*. Research Report, IST, Lisbon, Portugal, 1999.

MATOS, J. Hydraulic design of stepped spillways over RCC dams. *Proc., Int. Workshop on Hydraulics of Stepped Spillways*. VAW, ETH Zurich, H.-E. Minor and W.H. Hager, eds., Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp. 187-194, 2000.

MURZYN, F.; CHANSON, H. Free-surface fluctuations in hydraulic jumps: Experimental observations. *Experimental Thermal and Fluid Science*, v. 33, p.1055-1064, 2009.

TOZZI, M. J. *Caracterização/comportamento de escoamentos em vertedouros com paramento em degraus*. 1992. 302 f. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.

POVH, P.H. Avaliação da energia residual a jusante de vertedouros em degraus com fluxos em regime skimming flow. 2000. 142 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2000.

RODI, W. *Turbulence Models and Their Application in Hydraulics*. International Association for Hydraulic Research Monograph. 3a ed, Taylor & Francis, 1993. 124 p.

SANAGIOTTO, D.G *Características do escoamento sobre vertedouros em degraus de declividade 1v:0,75h*. 2003. 137 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

SCHULZ, H.E.; SIMÕES, A.L.A. Equacionamento alternativo para comprimentos de transição: analogias com equações básicas de Fenômenos de Transporte. *Relatório: LTR Report 1/I/11*, 2011. Disponível em : <http://vertedoresemdegraus.blogspot.com.br/2011/03/desenvolvimento-da-superficie-livre-em.html>.

SCHULZ, H.E.; LOBOSCO, R.J.; SIMÕES, A.L.A. (2011). Multiphase analysis of entrained air in skimming flows along stepped chutes. Fifth Int. Conf. on Advanced Computational Methods in Engineering (ACOMEN), Liège, Belgium, 14-17 November. University of Liège, 2011. Disponível em: [http://www.ltas.ulg.ac.be/acomen2011/NewWebSite/docs/Abstracts/Fluvial\\_hydraulics/Fluvial%20hydraulics10.pdf](http://www.ltas.ulg.ac.be/acomen2011/NewWebSite/docs/Abstracts/Fluvial_hydraulics/Fluvial%20hydraulics10.pdf)

SIMÕES, A.L.A.; SCHULZ, H.E.; PORTO, R.M. Stepped and smooth spillways: resistance effects on stilling basin lengths. *Journal of Hydraulic Research*, v.48, n.3, p.329-337, 2010a.

SIMÕES, A.L.A.; SCHULZ, H.E.; PORTO, R.M. (2010b). Simulação numérica e verificação experimental da posição da superfície livre de um ressalto hidráulico em um canal retangular. *XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Punta del Este, Uruguay, Nov, 2010b.

SIMÕES, A.L.A.; SCHULZ, H.E.; PORTO, R.M.; DARZÉ, M.S. Discussão acerca de diferentes métodos para o pré-dimensionamento de vertedores em degraus. *X Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste*, 2010.

SIMÕES, A.L.A. Considerações sobre a hidráulica de vertedores em degraus: metodologias adimensionais para pré-dimensionamento. 2008. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008. 258 p.

SIMÕES, A.L.A. Escoamentos em canais e vertedores com o fundo em degraus: desenvolvimentos experimentais, teóricos e numéricos. Relatório de Pesquisa. 2011. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011. 157 p.

SIMÕES, A.L.A.; SCHULZ, H.E.; PORTO, R.M. Transition length between water and air-water flows on stepped chutes. *6th International Conference on Computational and Experimental Methods in Multiphase and Complex Flow*. Wessex Institute of Technology, UK, 2011a.

SIMÕES, A.L.A.; SCHULZ, H.E.; PORTO, R.M. Stepped and smooth spillways: resistance effects on stilling basin lengths (Discussão de Takahashi, M. e Ohtsu, I.). *Journal of Hydraulic Research*, 2011b.

TRIERWEILER , E. F. N. Avaliação do Campo de Pressões em Ressalto Hidráulico Formado a Jusante de uma Comporta com Diferentes Graus de Submergência. 2006. Dissertação (Mestrado). Instituto de Pesquisas Hidráulicas – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.

***Turbulent Free Surface Flows in Channels: Stepped Chute and Hydraulic Jump***

**ABSTRACT**

*This paper presents results of experimental studies on the behavior of free surface flows in a stepped chute and in a hydraulic jump. The proposed methodology involves the acquisition of high frequency data by means of ultrasonic sensors. This proposal allowed to assess mean profiles of the free surface, characteristic quantities of the profiles (inception point, depth at the inception point, transition length, etc.) and quantities that characterize the turbulence near the free surface. The method provided excellent results for the monophasic and biphasic flows. It was possible to establish relationships between different variables such as the inception points of aeration, mean depths, and maximum depth. The results concerning the turbulence regions showed growth and decay of turbulence. Evaluations of constants related to the turbulence model  $k-\varepsilon$  were also obtained.*

**Key-words:** *Hydraulic jump, turbulence, stepped chute*