

Validação do Modelo de Serre para Descrever Ondas de Submersão Geradas pela Intrusão de Massa Sólida em Meio Líquido

Geraldo de Freitas Maciel

Universidade Estadual Paulista - UNESP - Depto. Eng. Civil
Campus de Ilha Solteira - maciel@dec.feis.unesp.br

Maria Francisca do Nascimento

Univ. Estadual Paulista - UNESP - Prog. de Pós-Graduação em Eng. Civil - Depto. Eng. Civil
Campus de Ilha Solteira - maria@dec.feis.unesp.br

Recebido: 30/07/01 - revisão: 22/11/01 - aceito: 09/07/02

RESUMO

Tendo por objetivo validar um código de cálculo com base no modelo de Serre que descreva o fenômeno de ondas de submersão, são apresentados os resultados obtidos de uma série de ensaios experimentais realizados no laboratório de Hidráulica e Saneamento da Feis-Unesp. A simulação física, em laboratório, para representar a ação da massa sólida no meio líquido, é representada por bloco deslizando sobre rampa e incidindo em canal de onda. O modelo numérico foi desenvolvido com base nas equações da "classe Boussinesq" (sistema Serre). O modelo leva em consideração a aceleração vertical das partículas fluidas, trata os termos de derivadas de ordem superior, anteriormente desprezados por Boussinesq, de modo que na fase de geração, este modelo pode suportar fortes amplitudes relativas de ondas (vizinhanças do "breaking"). Os resultados obtidos, com os experimentos físicos realizados mostram-se compatíveis comparados com os resultados numéricos, que parecem não ultrapassar o percentual de 10% no erro das amplitudes máximas das ondas medidas no canal.

Palavras-chave: ondas; modelo de Serre; submersão.

INTRODUÇÃO

Sabe-se que o fenômeno de ondas gravitacionais (neste caso de submersão), ocasionadas por impacto de corpos sólidos em massas líquidas, tais como deslizamentos de terra ou rocha em reservatórios de barragem ou pelo movimento de embarcações em canais de navegação é de extrema preocupação para a engenharia de recursos hídricos, pois podem ocasionar sérios danos às estruturas civis, tais como a ruptura brusca ou gradual de barragens no 1º caso, ou o desmoronamento de margens de canais de navegação no 2º caso devido à ação de ondas que terminam por quebrar nestes taludes.

Apesar de pouca experiência e pequena magnitude destes eventos no Brasil, citados no 1º caso, (Furnas, MG; Paraibuna-Paraítinga, SP), a experiência passada mostra que massas rochosas instáveis podem se deslocar de encostas íngremes junto a corpos de água e por impacto gerar ondas de translação devastadoras causando danos significativos (Vajont, Itália; Baía de Lituya, Alaska; Chungar, Peru; etc.). No caso específico de deslizamentos de terra junto a reservatórios, a onda resultante poderá comprometer as estruturas da barragem, e em caso de "overtopping", causar danos à jusante ou ainda em casos extremos o colapso da própria barragem.

O caso de ondas geradas por movimentos de embarcações merece atenção destacando-se aqui, a polêmica hidrovia do Pantanal na região centro-oeste. Galinkin et al.

(2001) produziram um relatório de impacto ambiental sobre a situação atual do rio Paraguai e no que se refere a influência das ondas nas margens do rio dizem que "os comboios, que navegam com baixa velocidade, produzem ondas com níveis energéticos baixos, potencialmente pouco impactantes para as margens do rio. Na região de Cáceres-Foz do Jauru foram observados, no entanto, efeitos de ondas produzidas por lanchas voadeiras. Essas ondas agredem as margens previamente desnudadas de cobertura ciliar pela ação dos comboios atuando, portanto, sobre um meio alterado e fragilizado pela ação antrópica. Existem informes locais de que os empurreadores, quando isolados, produzem ondas altas. Não houve oportunidade de observar empurreadores nessas condições pela equipe da expedição... O efeito das ondas deve ser, também, objeto de maiores estudos."

Outro caso ocorrido recentemente e reportado por Loureiro (2001), diz que quatro pessoas da mesma família morreram em uma localidade perto de Cuiabá quando um barco de alumínio virou no rio Cuiabá em virtude das ondas causadas por uma lancha que trafegava em alta velocidade. "Estávamos cruzando o rio quando a lancha apareceu bem no meio. Eles vinham do lado direito. Quando vimos que estavam em alta velocidade, cheguei a acenar com o remo, pedindo para reduzir. Eles cruzaram bem na nossa frente, e passaram pelo lado esquerdo. Com o rede-moinho causado pela manobra, a água começou a entrar dentro do barco de alumínio, que não tinha motor". Futuramente, pode-se pretender a utilização das equações de



Figura 1. Formação do “splash”.

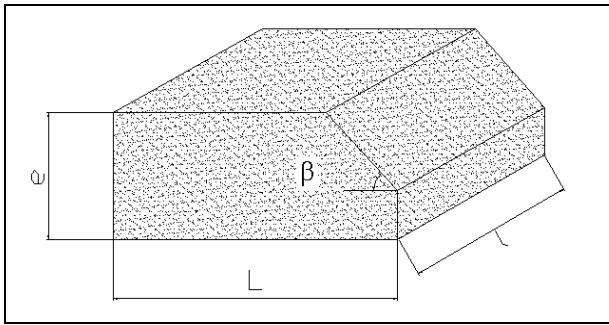


Figura 2. Geometria do bloco B1.

Serre em um estudo mais afinado desse fenômeno que auxiliaria, e em muito, na elaboração de um protocolo mais eficiente quando da investigação dos limites de velocidade e das dimensões das embarcações que trafegam em hidrovias do país.

Ainda no contexto das ondas de submersão, o objetivo desta comunicação é validar um código de cálculo com base no modelo de Serre (classe “Boussinesq”) que descreva o fenômeno. Para tanto, apresentamos os resultados obtidos de uma série de ensaios experimentais realizados no Laboratório de Hidráulica e Saneamento da Feis-Unesp que são confrontados sistematicamente com os numéricos obtidos a partir do modelo em tela.

As equações do sistema Serre para o cálculo das ondas de submersão foram obtidas, em uma forma generalizada, para uma geometria qualquer de canal, por Freitas Maciel (1993). A técnica implementada no modelo leva em consideração a onda gerada pela ação combinada da modificação da topografia do fundo quando da intrusão do sólido na massa líquida e pelo atrito lateral (sólido/líquido). O modelo em pauta considera os efeitos das acelerações verticais das partículas fluidas na massa líquida, admitindo as hipóteses de que a componente horizontal da velocidade é uniforme na vertical e a componente vertical da velocidade é linear entre o fundo e a superfície livre (condição de Boussinesq).

Para o caso particular de canal retangular, o sistema de equações de Serre se escreve da seguinte forma:

Tabela 1. Características dos corpos de prova.

	Blocos		
	B1	B2	B2
L (cm)	33,1	32,5	32,5
l (cm)	27,7	29,0	29,0
e (cm)	12,0	7,50	7,50
$\beta(^{\circ})$	40°	45°	45°
ρ_s/ρ_w	2,0	1,26	1,46
Massa (kg)	21,6	9,0	10,0
Volume (m^3)	$10,8 \times 10^{-3}$	$7,14 \times 10^{-3}$	$6,85 \times 10^{-3}$

L = comprimento; l = largura; e = espessura; β = ângulo da frente do bloco; ρ_s = massa específica do bloco; ρ_w = massa específica da água.

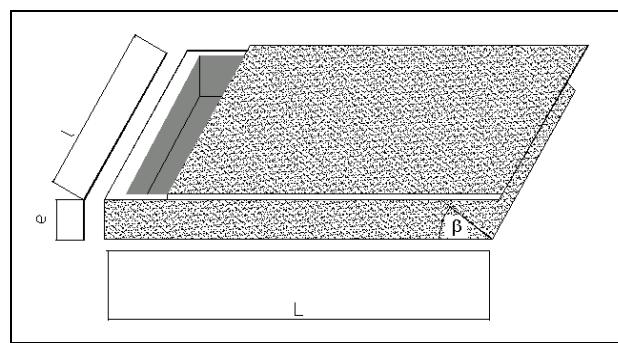


Figura 3. Geometria do bloco B2.

- Conservação da massa:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

- Conservação da quantidade de movimento:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial \left[hu^2 + \left(\frac{g+\beta}{2} + \frac{\alpha}{3} \right) \right]}{\partial x} = \\ - \left(g + \beta + \frac{\alpha}{2} \right) h \frac{\partial z_f}{\partial x} - gh \frac{(u - u_g) |u - u_g|}{C^2 R_h} \end{aligned} \quad (2)$$

onde h é a altura da lámina de água (m); u o componente horizontal da velocidade do fluido (m/s); u_g a velocidade da massa deslizante (m/s); g a aceleração da gravidade (m/s^2); z_f a cota do fundo (m); C o coeficiente de Chézy ($m^{1/2}s^{-1}$); R_h o raio hidráulico (m); α representa as acelerações verticais das partículas fluidas, na superfície livre, devido à curvatura das linhas de corrente (m/s^2); e β representa as acelerações devido às variações do fundo z_f (devido à intrusão de massa sólida) (m/s^2).

O monitoramento experimental das ondas geradas é feito através de sondas capacitivas colocadas ao longo do

Tabela 2. Cenário de queda com e/d = 0,30, x/d = 18, d = 25 cm (bloco B2).

Exp	ρ_s/ρ_w	Vimp (m/s)	Froude	$h_{4,5}$ exp (cm)	$h_{4,5}/d$	$h_{4,5}$ num (cm)	$h_{4,5}/d$	$\Delta\%$	Perfil
17	1,26	2,11	1,35	27,21	1,09	27,76	1,11	2,02	O-C
18	1,26	2,56	1,63	27,55	1,10	27,91	1,12	1,31	O-C
19	1,46	1,54	0,98	27,35	1,09	27,85	1,11	1,83	O-C
20	1,46	2,02	1,29	27,61	1,10	27,90	1,12	1,05	O-C
21	1,46	2,86	1,83	27,68	1,11	27,73	1,11	0,18	O-C

$h_{4,5}$ = altura de onda medida com a sonda a $x = 4,5$ m do ponto de impacto; O-C = onda de perfil tipo oscilatório-cnoïdal.

Tabela 3. Cenário de queda com e/d = 0,37, x/d = 22,5, d = 20 cm (bloco B2).

Exp	ρ_s/ρ_w	Vimp (m/s)	Froude	$h_{4,5}$ exp (cm)	$h_{4,5}/d$	$h_{4,5}$ num (cm)	$h_{4,5}/d$	$\Delta\%$	Perfil
08	1,26	1,81	1,29	23,04	1,15	22,70	1,14	1,50	O-C
09	1,26	2,33	1,66	22,60	1,13	23,04	1,15	1,95	O-C
10	1,26	2,78	1,98	23,36	1,17	23,62	1,18	1,11	O-C
11	1,26	3,10	2,21	23,36	1,17	23,84	1,19	2,05	O-C
12	1,46	1,82	1,30	23,30	1,17	23,22	1,16	0,34	O-C
13	1,46	2,83	2,02	23,44	1,17	23,60	1,18	0,68	O-C
14	1,46	2,34	1,67	23,36	1,17	23,68	1,18	1,37	O-C
15	1,46	3,24	2,31	23,36	1,17	23,40	1,17	0,17	O-C

Tabela 4. Cenário de queda com e/d = 0,48, x/d = 12, d = 25 cm (bloco B1).

Exp	ρ_s/ρ_w	Vimp (m/s)	Froude	$h_{3,0}$ exp (cm)	$h_{3,0}/d$	$h_{3,0}$ num (cm)	$h_{3,0}/d$	$\Delta\%$	Perfil
01	2,00	2,24	1,43*	29,63	1,19	28,05	1,12	5,33	C-S
02	2,00	2,36	1,35	29,58	1,18	28,81	1,15	2,60	C-S
03	2,00	3,35	2,14	29,67	1,19	29,64	1,19	0,10	C-S
04	2,00	2,24	1,43*	29,59	1,18	29,44	1,18	0,51	C-S
05	2,00	2,50	1,15	29,54	1,18	30,02	1,20	1,60	C-S
17	2,00	2,96	1,89	32,23	1,29	31,43	1,26	2,48	RS
19	2,00	3,23	2,06	31,47	1,26	32,38	1,30	2,81	RS
20	2,00	3,13	2,00	31,48	1,26	32,36	1,29	2,72	RS
21	2,00	3,08	1,97	31,53	1,26	31,16	1,25	1,17	RS

$h_{3,0}$ = altura de onda medida com a sonda a $x = 3,0$ m do ponto de impacto; C-S = onda de perfil tipo cnoïdal-solitário; RS = onda de perfil tipo ressalto suave; *Observam-se dois valores iguais do número de Froude para a mesma sequência de experimentos; isto deve ter ocorrido por erro de leitura provavelmente no experimento nº 1 que apresenta um resultado que não obedece à relação observada (altura relativa de onda por número de Froude), como poderá ser melhor visualizado na Figura 5.

Tabela 5. Cenário de queda com e/d = 0,50, x/d = 30, d = 15 cm (bloco B2).

Exp	ρ_s/ρ_w	Vimp (m/s)	Froude	$h_{4,5}$ exp (cm)	$h_{4,5}/d$	$h_{4,5}$ num (cm)	$h_{4,5}/d$	$\Delta\%$	Perfil
01	1,26	1,82	1,50	18,83	1,26	18,88	1,26	0,26	S
02	1,26	2,39	1,97	19,22	1,28	19,17	1,28	0,26	S
03	1,26	2,83	2,33	18,81	1,25	19,02	1,27	1,10	S
04	1,26	3,21	2,65	18,99	1,27	19,00	1,27	0,05	S
05	1,46	1,98	1,63	19,08	1,27	19,08	1,27	0,00	S
06	1,46	2,48	2,04	19,25	1,28	19,24	1,28	0,05	S
07	1,46	2,92	2,41	19,00	1,27	19,01	1,27	0,05	S

S = onda de perfil tipo “soliton”.

Tabela 6. Cenário de queda com $e/d = 0,60$, $x/d = 15$, $d = 20$ cm (bloco B1).

Exp	ρ_s/ρ_w	Vimp (m/s)	Froude	$h_{3,0}$ exp (cm)	$h_{3,0}/d$	$h_{3,0}$ num (cm)	$h_{3,0}/d$	$\Delta\%$	Perfil
06	2,00	2,24	1,60	26,10	1,31	24,01	1,20	8,01	C-S
07	2,00	2,70	1,93*	26,21	1,31	24,89	1,24	5,04	C-S
08	2,00	2,70	1,93*	26,37	1,32	25,56	1,28	3,07	R
09	2,00	2,70	1,93*	26,70	1,34	25,97	1,30	2,73	R
10	2,00	5,41	3,86	26,59	1,33	25,94	1,30	2,44	R
22	2,00	3,80	2,71	28,37	1,42	26,75	1,34	5,71	R
23	2,00	2,22	1,58	27,90	1,40	28,54	1,43	2,24	R
24	2,00	2,90	2,07	28,38	1,42	28,86	1,44	1,66	R
26	2,00	3,13	2,23	28,62	1,43	26,62	1,33	6,99	R

R = onda de perfil tipo ressalto; *Observam-se três valores iguais do número de Froude para a mesma seqüência de experimentos; isto deve ter ocorrido por erro de leitura provavelmente nos experimentos nº 8 e 9 que apresentam resultados que não obedecem à relação observada (altura relativa de onda por número de Froude), como poderá ser melhor visualizado na Figura 6.

Tabela 7. Cenário de queda com $e/d = 0,80$, $x/d = 20$, $d = 15$ cm (bloco B1).

Exp	ρ_s/ρ_w	Vimp (m/s)	Froude	$h_{3,0}$ exp (cm)	$h_{3,0}/d$	$h_{3,0}$ num (cm)	$h_{3,0}/d$	$\Delta\%$	Perfil
12	2,00	2,00	1,65*	21,09	1,41	20,59	1,37	2,37	R
13	2,00	2,12	1,75	21,65	1,44	21,57	1,44	0,37	R
14	2,00	2,25	1,85	22,03	1,47	23,24	1,55	5,21	R
15	2,00	1,69	1,39	22,49	1,50	27,16	1,81	17,19	R
16	2,00	2,00	1,65*	22,61	1,51	26,05	1,74	13,21	R
27	2,00	2,99	2,46	23,03	1,54	25,56	1,70	9,90	R
28	2,00	3,07	2,53	23,37	1,56	22,44	1,50	3,98	R
31	2,00	3,23	2,66	24,69	1,65	21,47	1,43	13,04	R

* Observam-se dois valores iguais do número de Froude para a mesma seqüência de experimentos; isto deve ter ocorrido por erro de leitura do campo de velocidade.

canal. A partir de um determinado nível de tensão na sonda, provocada por ação da onda, o sistema deslancha captando, ao longo do tempo, as oscilações da superfície livre. Um programa computacional de interface trata os sinais recebidos e os converte em alturas de onda.

Quanto à determinação do campo de velocidade da massa deslizante no meio líquido, a técnica da cinematografia é utilizada (filmadora JVC 3CCD, modelo KY27B). Uma estimativa das velocidades de impacto, associada ao campo de velocidade na zona de interação sólido-líquido, ou de geração, é um dado de suma importância para a boa inicialização do código de cálculo. Já a determinação do campo de velocidades orbitais das partículas fluidas em via da determinação do campo de aceleração da massa líquida, é obtido a partir de uma sonda ADV (*Anemometer Doppler Velocimeter*) de alta performance e ainda em testes de validação, cujos primeiros resultados ainda estão sendo analisados. Pretende-se, para uma segunda fase desse trabalho, discutir sobre a adaptabilidade do modelo em questão ao fenômeno tratado com base nestes dados.

APARATO EXPERIMENTAL

O aparato experimental é constituído por um canal de ondas 0,30 x 0,50 x 10,00 m, em estrutura metálica, com

paredes de vidro e apoiado numa estrutura de alvenaria com seis apoios. A montante do canal temos uma rampa de lançamento em ferro com 27° de inclinação. À jusante do canal dispusemos algumas colméias com o intuito de amortecer o efeito de reflexão das ondas geradas. Ao longo do canal foram posicionadas as sondas capacitivas para a aquisição dos dados de interesse que, através de um sistema de interface (placa analógico-digital), permitem realizar a aquisição de dados por via computacional, em tempo real.

Foram utilizados para os ensaios dois blocos indeformáveis; o primeiro bloco (B1) é feito de concreto com geometria fixada e de forma hidrodinâmica de modo a minimizar a perda de energia no momento do impacto no meio líquido, diminuindo assim, o efeito dominante e perturbador do "splash" (Figura 1). Colocamos o bloco sobre uma placa de apoio com quatro pequenas rodinhas (rolinhas) para efeito de minimização de atrito (Figura 2).

O segundo bloco (B2) construído em PVC apresenta uma geometria mais hidrodinâmica, pois possui um chanfro maior na sua ponta; e pode ser também constituído de uma tampa na parte superior que, quando aberta, seja preenchido com o material desejado de tal maneira que se varie sua massa específica (Figura 3). Deve-se já ressaltar que a "eventual influência" da massa específica do material deslizante na onda gerada não é tratada no escopo deste artigo.

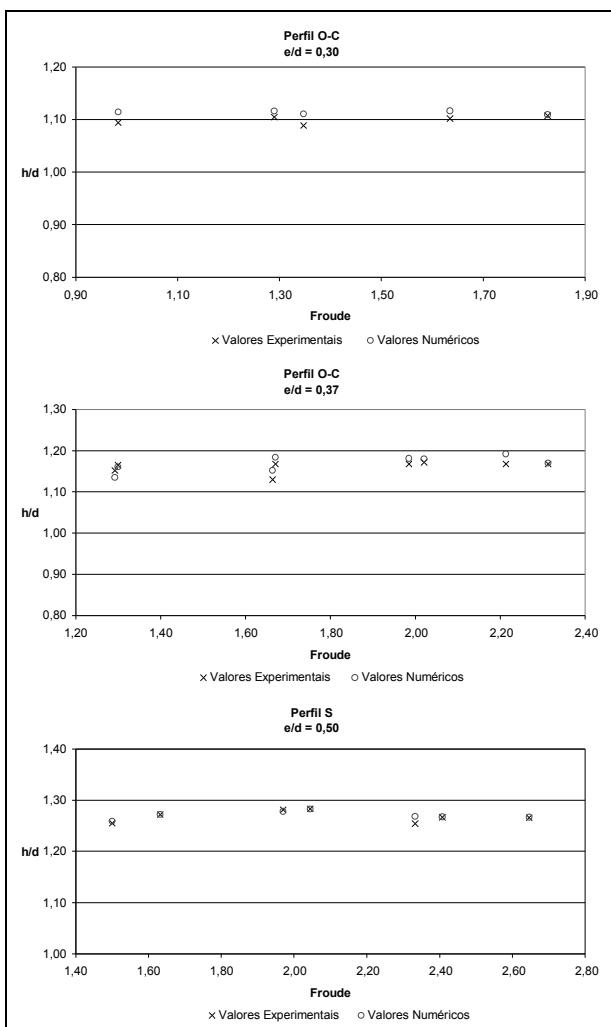


Figura 4. Comparação experimental e numérica - relação altura relativa de onda por número de Froude, bloco B2.

Os ensaios foram realizados para três lâminas de água distintas (d) = 15, 20 e 25 cm.

A distância de lançamento dos blocos (distância medida sobre a rampa até o nível de água) variou entre 10 e 150 cm, permitindo-nos assim variar a velocidade de impacto V_{imp} e, por conseguinte, o número de Froude ($F = V_{imp}/\sqrt{gd}$).

Para cada experiência, recuperamos as amplitudes máximas a 3,0 e 4,5 m em relação ao ponto de impacto do bloco com a massa líquida. Através da cinematografia, obtivemos o campo de velocidade $v(x)$ da massa sólida no meio líquido, notadamente da velocidade de impacto V_{imp} .

Os corpos de prova utilizados nos ensaios tinham as características descritas na Tabela 1.

BREVE RESUMO DA ANÁLISE DIMENSIONAL

O objetivo maior da análise dimensional é de simplificar e de orientar a experimentação física, procurando restringir, tanto quanto possível, o número de variáveis.

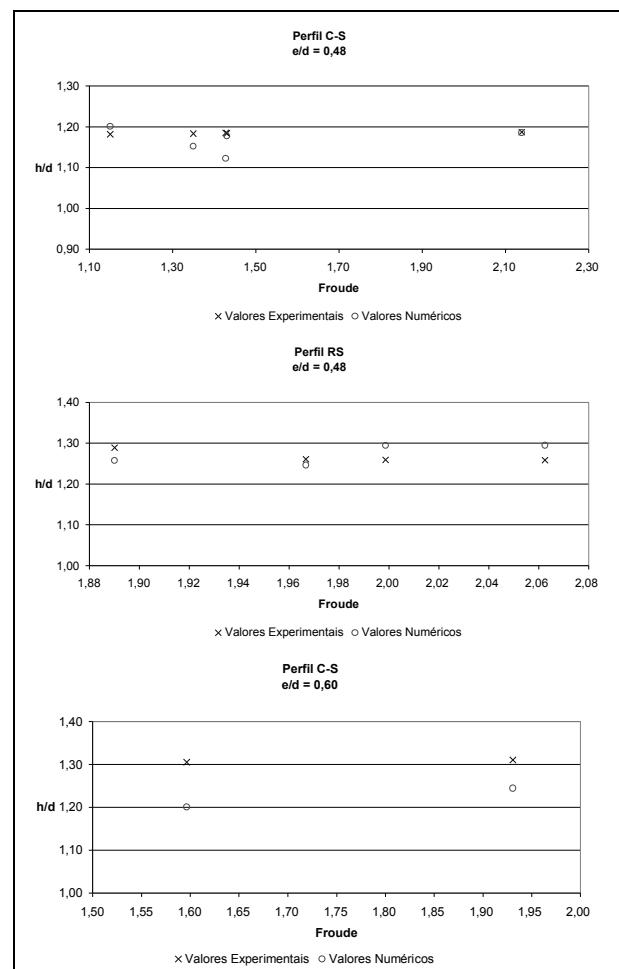


Figura 5. Comparação experimental e numérica – relação altura relativa de onda por número de Froude, bloco B1.

Em se tratando de experiência em canal com escoamento com superfície livre, perturbada pela ação de uma massa sólida, a estimativa de riscos decorrentes desse fenômeno de impacto depende, em primeira análise, da amplitude de onda gerada. Nesse contexto, os parâmetros importantes na determinação da altura de onda h são:

- comprimento do bloco (L);
- largura do bloco (l);
- espessura do bloco (e);
- velocidade de impacto do bloco com a água (V_{imp});
- distância de medição da onda em relação ao ponto de impacto (x);
- lâmina de água inicial no canal (d);
- ângulo da frente do bloco (β);
- declividade da rampa (θ);
- aceleração da gravidade (g);
- massa específica do bloco (ρ_s);
- massa específica da água (ρ_w);
- tempo de percurso da onda (t).

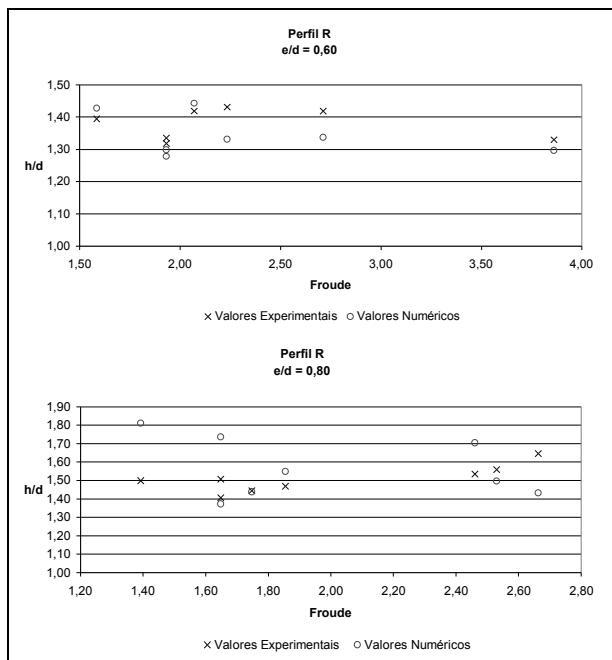


Figura 6. Comparação experimental e numérica – relação altura relativa de onda por número de Froude, bloco B1.

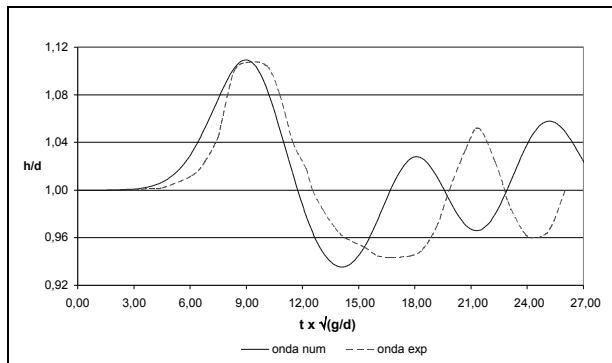


Figura 7. Perfil de onda para $e/d = 0,30$, Froude = 1,83, $x/d = 18$.

O parâmetro h pode assim ser escrito pela equação simbólica:

$$h = \varphi_{\text{exp}}(L, l, e, V_{\text{imp}}, x, d, \beta, \theta, g, \rho_s, \rho_w, t)$$

A análise dimensional nos leva a determinar uma função $\pi_{\text{exp}(h)} = h/d$ tal que:

$$\frac{h}{d} = \varphi_{\text{exp}}\left(\frac{L}{d}, \frac{l}{d}, \frac{e}{d}, F, \frac{x}{d}, \beta, \theta, \frac{\rho_s}{\rho_w}, t\sqrt{\frac{g}{d}}\right)$$

Para os ensaios realizados no canal de ondas da Feis-Unesp, com blocos indeformáveis, de massa específica e geometria constantes, observou-se que os parâmetros dominantes que controlam as alturas e o padrão de onda ge-

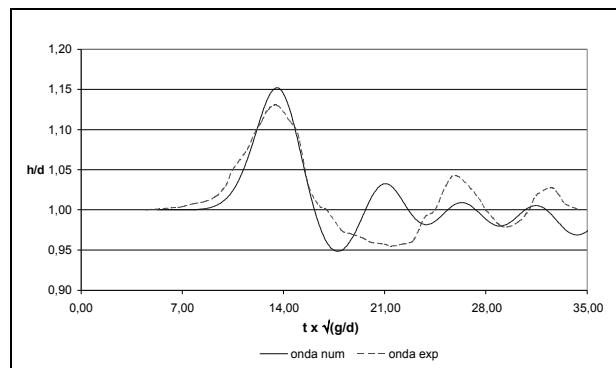


Figura 8. Perfil de onda para $e/d = 0,37$, Froude = 1,29, $x/d = 22,5$.

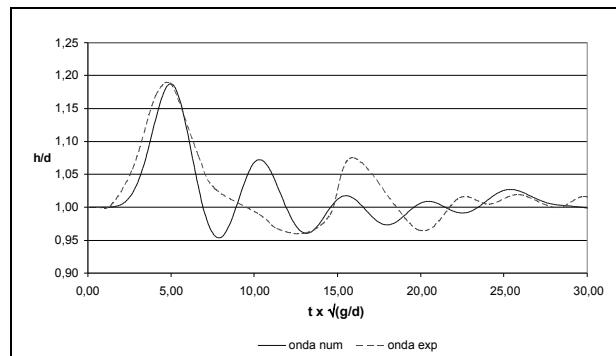


Figura 9. Perfil de onda para $e/d = 0,48$, Froude = 2,14, $x/d = 12$.

rada são a frente do deslizamento (espessura relativa do bloco) e o número de Froude. Dessa forma, em primeira aproximação, tem-se que a altura relativa de onda (h/d) poderá ser analisada como uma função que depende do número de Froude (F), da espessura relativa (e/d), das distâncias relativas de medição da onda em relação ao ponto de impacto (x/d) e o tempo relativo de percurso da onda ($t\sqrt{(g/d)}$).

Assim, temos que:

$$\frac{h}{d} = \varphi_{\text{exp}}\left(\frac{e}{d}, \frac{x}{d}, F, t\sqrt{\frac{g}{d}}\right)$$

Várias aproximações são possíveis para se determinar uma função experimental φ segundo o efeito dominante de certas grandezas, ou grupos adimensionais, em relação a outros. Na análise da semelhança entre modelos experimentais (reduzidos) e protótipos, num primeiro momento, seria necessário observar uma semelhança dos números de Froude e Reynolds ($R_e = d(\sqrt{gd})/v$, v = viscosidade cinemática do fluido), entretanto para o problema típico de superfície livre, como o tratado neste artigo, é necessário e suficiente verificar a semelhança dos números de Froude. Dessa forma, variando-se (e/d) e (x/d) os resultados podem ser analisados pela relação (h/d) em função de (F) e, na análise dos perfis de onda, pela relação (h/d) em função de ($t\sqrt{(g/d)}$).

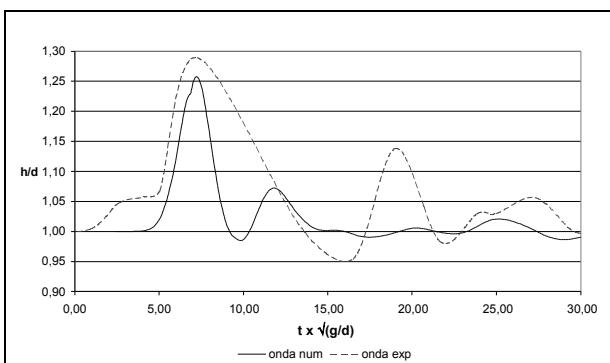


Figura 10. Perfil de onda para $e/d = 0,48$, Froude = 1,89, $x/d = 12$.

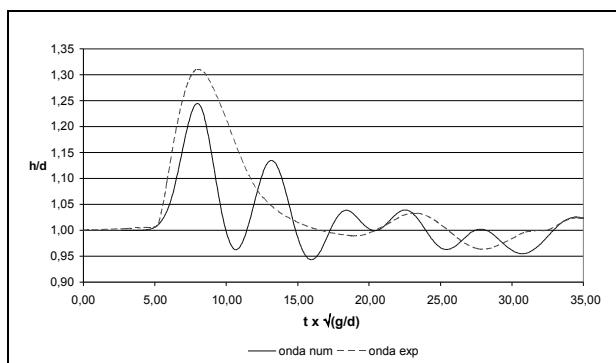


Figura 12. Perfil de onda para $e/d = 0,60$, Froude = 1,93, $x/d = 15$.

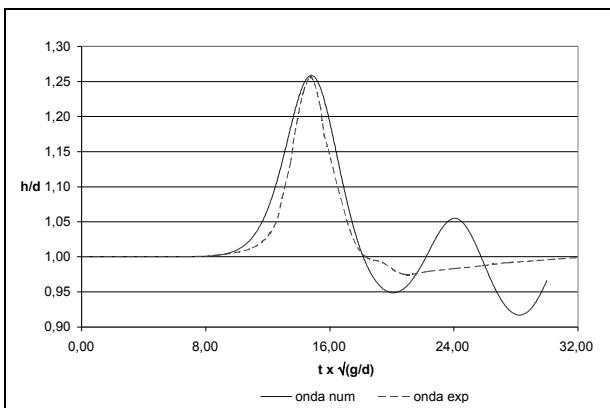


Figura 11. Perfil de onda para $e/d = 0,50$, Froude = 1,50, $x/d = 30$.

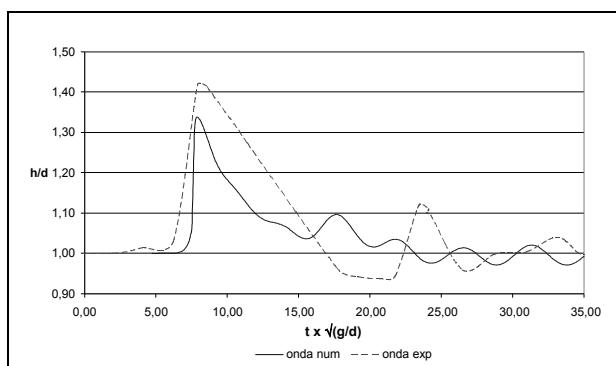


Figura 13. Perfil de onda para $e/d = 0,60$, Froude = 2,71, $x/d = 15$.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos são apresentados nas Tabelas 2 a 7. De uma maneira geral, os resultados das amplitudes máximas são bem reproduzidos pelo modelo de Serre, sobretudo à medida que a relação e/d cresce até atingir o valor 0,50. Para valores maiores que 0,50 obtivemos em média perfis representativos de ressaltos que não são reproduzidos pelo modelo de Serre. Para relações e/d baixas (0,30 e 0,37, bloco B2), obtivemos um perfil de onda “aparentemente” oscilatório-cnoïdal, para $e/d = 0,48$ (bloco B1) obtivemos um perfil “preferencialmente” cnoïdal-solitário, e para $e/d = 0,50$ (bloco B2) o perfil de onda se aproximava mais a um “soliton”. Ainda para $e/d = 0,48$ observamos que, para distâncias de lançamento superiores a 50 cm o perfil que era solitário passou a representar “aparentemente” ressaltos “suaves” (possuía uma frente de onda muito pouco íngreme e turbulenta). Para $e/d = 0,60$ (bloco B1) observamos também que, os primeiros experimentos para os quais a distância de lançamento era igual ou inferior a 20 cm, ainda obtivemos perfis solitários, e à medida que aumentávamos a distância de lançamento, todos os perfis passaram para o padrão de ressaltos. Para $e/d = 0,80$ (bloco B1) observamos apenas ressaltos. Ainda assim, nos experimentos, para os quais é viável a utilização

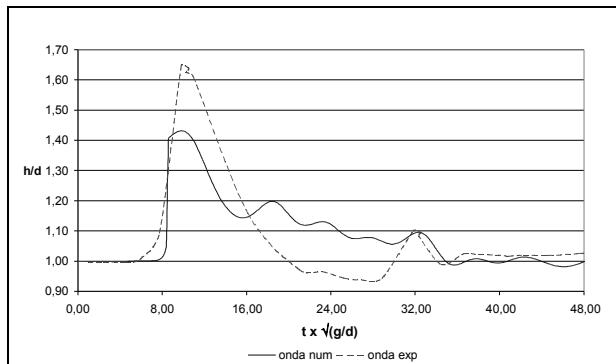


Figura 14. Perfil de onda para $e/d = 0,80$, Froude = 2,66, $x/d = 20$.

do modelo de Serre, os erros ($\Delta\%$) nas amplitudes máximas, são inferiores a 10% quando comparados aos resultados experimentais.

Podemos observar nos gráficos que relacionam o número de Froude com a altura de onda experimental e numérica, que à medida que aumenta a relação e/d e o número de Froude, a altura da onda obtida numericamente apresenta tendência a se aproximar mais da experimental, proporcionando um resultado satisfatório à medida que e/d aproxima-se do valor igual a 0,50, tanto com relação à altura de onda, Figura 4 e Figura 5 (perfil C-S), quanto à

forma do perfil de onda (Figuras 7, 8, 9, 11). Para $e/d = 0,48$ com perfil RS estas relações também se verificam, Figuras 5 (perfil RS) e 10. Para $e/d = 0,60$, tanto para os experimentos com características de perfil C-S como R, também é possível observar este fenômeno (Figuras 5 e 6), mas o perfil de onda já não é tão satisfatório (alguns se aproximam - Figura 13 - e outros fogem totalmente - Figura 12 - do perfil esperado). Para $e/d = 0,80$ os dados se apresentam (Figura 6) de maneira totalmente desordenada, ficando sua análise assim, fora da relação número de Froude por altura de onda observada nos demais. Esta "desordem" poderia ser justificada pelo fato que o modelo de Serre se mostra incapaz de reproduzir o fenômeno do ressalto hidráulico móvel. Dada a natureza parabólica do sistema Serre (1 - 2) fica "difícil" esperar que o ressalto hidráulico seja solução do problema. Nesses casos, o modelo "Shallow Water" clássico, tipo Saint Venant, de natureza estritamente hiperbólica seria mais adequado. No entanto, chamou-nos a atenção, sabendo da restrição do modelo de Serre, o fato de que alguns resultados descrevem ainda assim o perfil de onda tipo ressalto hidráulico (Figuras 13 e 14). Resultados estes que precisam ser ainda melhor investigados. De qualquer forma, o modelo Serre, conforme proposto no sistema de Equações (1) e (2), considera em seu desenvolvimento assintótico termos de derivadas de ordem superior, então desprezados por Boussinesq. Dessa maneira, o modelo em questão, poderia ainda ser utilizado na previsão de ondas na vizinhança do "breaking".

Podemos constatar que os resultados obtidos demonstram uma boa concordância entre as alturas de onda experimental e numérica sobretudo para a 1^a onda, apesar dos avanços de fase nas ondas subseqüentes. Estas ondas subseqüentes parecem surgir devido ao refluxo gerado pelo bloco sobre a rampa quando bate na água. A zona de geração é turbulenta, caótica, com geração natural do "splash", e notadamente de turbilhões na superfície superior e posterior do bloco, sobretudo na fase inicial do mergulho deste no meio líquido.

Pela análise dos resultados podemos observar a influência (na geração das ondas) das dimensões da massa sólida e a distância em que ela se encontra em relação ao meio líquido e o nível de água inicial. Quanto maior o nível de água inicial e menor a massa sólida e sua distância ao meio líquido a tendência é que sejam geradas ondas com perfil mais oscilatório-cnoïdal. A medida que diminui o nível de água e aumentam a massa e a distância as ondas progridem para perfis cnoïdais, "solitons" e ressaltos, respectivamente.

Os resultados apresentados nesta comunicação são os primeiros obtidos com o modelo de Serre tal como no sistema de Equações (1) e (2); para o qual a maior dificuldade encontrada diz respeito à leitura do campo de velocidade, dado de fundamental importância para a boa utilização do mesmo. A técnica da cinematografia é a mais indicada, mas apresenta ainda erros significativos no que tange à análise visual das distâncias percorridas pelos blocos - o monitor que utilizamos era reduzido - não proporcionando uma leitura mais apurada dos deslocamentos.

Isto é percebido nos resultados onde existem valores do número de Froude iguais, para distâncias diferentes o que demonstra erro no campo de velocidade. Mas, é possível predizer que o modelo de Serre proporciona uma boa convergência, pois se mostrou globalmente capaz de reproduzir um bom espectro de ondas, chegando até ao ressalto hidráulico móvel.

REFERÊNCIAS

- FREITAS MACIEL, G. (1993). Aplicação das equações da "classe Boussinesq" no estudo de ondas de gravidade geradas por impacto localizado. XIV CILAMCE - Congresso Ibero Latino Americano de Métodos Computacionais em Engenharia, São Paulo. *Anais*, vol. 3, p.656-664.
- GALINKIN, M. et al. (2001). *Retrato da navegação no alto rio Paraguai*. CEBRAC/ICV/WWF, Brasília, Brasil, p.50-51.
- LOUREIRO, J. P. (2001). Barco vira e quatro pessoas morrem. *Jornal Diário de Cuiabá*, edição n°9938, 01 de maio, Cuiabá, MT.

Water Waves Generated by Local Disturbance – Validity of Serre's Model

ABSTRACT

In order to investigate the validity of a numerical model based on Serre's equations (Boussinesq equations) describing water waves generated by local disturbance, this paper presents the results obtained in a series of experiments performed at the Hydraulics Laboratory. The physical simulation performed at the laboratory representing the action of the solid mass in the water is done by a block sliding on the ramp and plunging into wave canal. This numerical model takes into account the vertical acceleration of the particles and considers higher order derivative terms previously neglected by Boussinesq; thus in the generation zone, this model can support high relative amplitudes of waves (vicinity of the breaking phenomenon). The results obtained using those physical experiments are compatible with the numerical ones. These results present the maximum error of 10% of the maximum amplitudes of waves.

Key Words: waves; Serre's model; disturbance.