

## **SIMULAÇÃO DE INSTABILIDADE HUMANA EM INUNDAÇÕES: PRIMEIRAS CONSIDERAÇÕES**

*Jairo Rotava<sup>1\*</sup> & E.M.Mendonça<sup>2</sup> & Vladimir Caramori B. Souza<sup>3</sup>*

**Resumo** – A avaliação dos mecanismos e forças que provocam a instabilidade humana em correntes de água pode ser útil para a estimativa do nível de vulnerabilidade de um indivíduo, ou grupo, expostos à ameaças na forma de enchentes. Este trabalho é a primeira etapa para desenvolvimento de uma técnica de avaliação da instabilidade ou mobilidade de pessoas em corrente de água através de simulação em ambiente seco. São avaliados os mecanismos físicos e as forças que influenciam na movimentação e equilíbrio de um corpo submerso dentro de uma corrente de água, desenvolvendo-se uma equação para determinação do produto crítico  $h.v_c$  (sendo  $h$  a profundidade da água e  $v$  a velocidade do escoamento) e comparando os resultados com dados experimentais. Os resultados preliminares indicam que o produto crítico não é constante com a profundidade e sofre influência importante do empuxo e coeficiente de atrito.

**Palavras-Chave** – instabilidade humana; inundações; simulação;

### **HUMAN INSTABILITY IN FLOOD FLOWS SIMULATION: FIRST STEPS**

**Abstract** – The evaluation of forces and mechanisms that cause human instability in flood flows can be useful for estimating the level of vulnerability of an individual or group exposed to the threat in the form of flood flows. According to submerged objects under flood flows, this work is a step toward developing a technique for assessing instability and mobility of people in the water stream through simulation. The physical mechanisms and forces that influence the movement and fall are evaluated. The critical depth-velocity  $h.v_c$  is calculated from the same model and compared with experimental data. Results and equations suggests that the critical depth-velocity is not constant for different depths.

**Keywords** – human instability; flooding; flood flow simulation;

### **INTRODUÇÃO**

A construção de uma metodologia para simulação das forças e mecanismos que agem sobre uma pessoa exposta a uma enchente ou inundação requer primeiramente um modelo matemático representativo que possa oferecer ao menos os dados iniciais como o valor de forças presentes nesta situação e quais são as condições críticas a partir do qual é fisicamente impossível uma pessoa permanecer em equilíbrio estável.

Muitos autores propõem uma relação entre profundidade  $h$  e velocidade  $v$ , através de uma combinação que indica a possibilidade de uma pessoa ser levada à instabilidade (Jonkman e Penning-Rowell, 2008). A relação crítica normalmente é representada pelo produto entre essas duas variáveis e representada por um Índice de Perigo ( $h.v_c$ ).

<sup>1</sup> Departamento de Hidráulica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. email: jairo.rotava@gmail.com

<sup>2</sup> Departamento de Hidráulica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo

<sup>3</sup> Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas. e-mail: vcaramori@yahoo.com

O primeiro estudo experimental foi apresentado por Abt *et al.* (1989) em uma série de testes nos quais pessoas e blocos eram colocados em um experimento de laboratório para determinação de qual velocidade e profundidade da água provocavam a queda dos mesmos. A partir deste estudo foi derivada uma equação empírica, equação (1), para estimar o valor crítico de  $h \cdot v_c$  para o qual uma pessoa teria comportamento instável.

$$h \cdot v_c = 0,0929(e^{0,001906 Lm+1,09})^2 \quad (1)$$

onde  $h \cdot v_c$  é o produto crítico de velocidade  $v$  [m] e profundidade  $h$  [m] a onde existe grandes chances de queda;  $L$  é a altura da pessoa [m] e  $m$  é o peso [kg].

Outros estudos (Karvonen *et al.* 2000; Lind *et al.*, 2004; Suetsugi, 1998) avaliaram o produto  $h \cdot v_c$  e concluíram que para pessoas os valores críticos variam de 0,6 m<sup>2</sup>/s até 2 m<sup>2</sup>/s. Abt *et al.* (1989) avaliando blocos monolíticos haviam chegado a valores muito mais conservadores, da ordem de 0,3 m<sup>2</sup>/s. Nesses trabalhos há variação na superfície onde ocorre o escoamento (Tabela 1).

Tabela 1 - Dados de testes experimentais em instabilidade humana. Adaptado de Jonkman e Penning-Rowse (2008)

Referência	Superfície	Condições	Pessoas	Resultados
Abt <i>et al.</i> (1989)	Grama, concreto, aço.	$v = 0,36 \sim 3,05 \text{ m/s}$ $h = 0,42 \sim 1,2 \text{ m}$	$m = 41 \sim 91 \text{ kg}$ $L = 1,51 \sim 1,91 \text{ m}$	Média $h \cdot v_c = 1,33 \text{ m}^2/\text{s}$ Desvio padrão $h \cdot v_c = 0,28 \text{ m}^2/\text{s}$
Karvonen <i>et al.</i> (2000)	Grade de aço escorregadia	$v = 0,6 \sim 2,75 \text{ m/s}$ $h = 0,3 \sim 1,1 \text{ m}$	$m = 48 \sim 100 \text{ kg}$ $L = 1,60 \sim 1,95 \text{ m}$	Média $h \cdot v_c = 0,96 \text{ m}^2/\text{s}$ Desvio Padrão $h \cdot v_c = 0,16 \text{ m}^2/\text{s}$

Desta forma o objetivo deste trabalho é apresentar um modelo simples para determinação das forças desenvolvidas por uma corrente de água em uma pessoa, e a partir deste modelo, estimar a condição limite  $h \cdot v_c$  para qual seria impossível uma pessoa permanecer de forma estável. Os valores de condição limite encontrados são comparados com dados experimentais da literatura.

## METODOLOGIA

As chances de uma pessoa ser desequilibrada e arrastada por uma corrente de água dependem de diferentes variáveis como terreno local, visibilidade, condições da pessoa, entre outros (Lind *et al.*, 2004).

A literatura identifica dois mecanismos que podem causar instabilidade humana em correntes de água: instabilidade de momento (tombamento) e instabilidade por fricção. Tombamento acontece quando a força de arrasto excede o momento devido ao peso do corpo e gira a pessoa provocando a queda. Instabilidade de fricção ocorre quando a força de arrasto é maior que a força de atrito entre o pé e a superfície de apoio, arrastando a pessoa corrente abaixo (Jonkman *et al.*, 2005), conforme esquema do modelo utilizado, apresentado na Figura 1.

Para efeito de simplificação o corpo humano é modelado como um bloco retangular, com dimensões e pesos similares ao de uma pessoa, tendo algumas diferenças. Enquanto o bloco é passivo, uma pessoa pode se mover e alterar as distâncias e ângulos do problema. Abt *et al.* (1989) consideram o bloco monolítico uma estrutura extremamente conservadora para estimativa de um corpo humano em uma corrente de água.

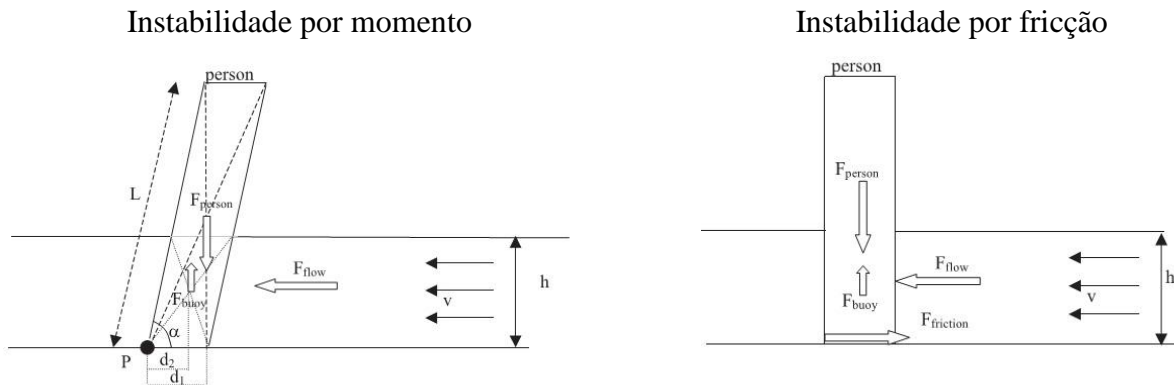


Figura 1 - Modelo de corpo humano para estudo de instabilidade. Adaptado de Jonkman e Penning-Rowcell (2008)

A partir da Figura 1, a distância  $d1$  é a distância entre o ponto de apoio ( $P$ ) e o centro de massa [ $m$ ] (igual a  $\cos(\alpha) L$ );  $d2$  é a distância do ponto de apoio ( $P$ ) até o ponto de aplicação da força de empuxo [ $m$ ];  $F_{buoy}$  é a força vertical realizada pelo empuxo [ $N$ ].  $F_{flow}$  é a força horizontal de arrasto causada pelo fluxo do fluido [ $N$ ];  $F_{friction}$  é a força de atrito entre a pessoa e a superfície [ $N$ ];  $F_{person}$  é a força vertical realizada pelo peso da pessoa [ $N$ ];  $h$  é a profundidade da água [ $m$ ];  $L$  é a altura da pessoa [ $m$ ];  $P$  é o ponto de apoio da pessoa;  $v$  é a velocidade da água [ $m/s$ ] e  $\alpha$  é o ângulo entre a pessoa e o fluxo de água [graus].

A estrutura de equações adotada neste trabalho baseia-se na proposta de Jonkman e Penning-Rowcell (2008), com pequenas modificações, e o mecanismo de queda avaliado é o de instabilidade por fricção. A principal modificação aqui proposta é a inclusão da força de empuxo na equação (3). Foi escolhido o modelo de instabilidade por fricção por ser mais simples, e por ser a última condição limitante, ou seja, sem atrito não importa se existem outros mecanismos de queda, e é impossível permanecer imóvel no local. Qualquer outro mecanismo de queda deve necessariamente acontecer antes desta condição de falta de atrito. As seguintes fórmulas são utilizadas para o peso  $F_{person}$  e empuxo  $F_{buoy}$ :

$$F_{person} = mg \quad (2)$$

$$F_{buoy} = \rho V_c g \quad (3)$$

onde  $\rho$  é o peso específico do fluido em questão [ $kg/m^3$ ];  $V_c$  é o volume submerso da pessoa [ $m^3$ ];  $g$  é a aceleração devido a gravidade [ $m/s^2$ ].

A força de atrito é uma relação entre o peso, empuxo e coeficiente de atrito  $\mu$  [adimensional]. A inclusão do termo  $F_{buoy}$  na equação é a principal modificação no equacionamento se comparado com o trabalho original de Jonkman e Penning-Rowcell (2008) que se resumia a utilizar somente o peso no cálculo do atrito:

$$F_{friction} = \mu(F_{person} - F_{buoy}) \quad (4)$$

A força de arrasto, que já engloba as componentes de força devido a diferença de pressão e arrasto por viscosidade do fluido, é dada por:

$$F_{flow} = 0.5\rho C_D B h v^2 \quad (5)$$

onde  $B$  é a largura média do corpo exposto na normal do fluxo [m];  $C_D$  é o coeficiente de arrasto [adimensional]:

O volume de corpo submerso pode ser estimado por (válido para  $h \leq L$ ):

$$V_C = \frac{hm}{L\rho_{person}} \quad (6)$$

onde  $\rho_{person}$  é a densidade média de uma pessoa [ $kg/m^3$ ]. A equação (6) foi derivada assumindo o corpo como um bloco retangular homogêneo, de forma que o centro de massa está na metade da altura da pessoa, o que é razoável, já que o centro de massa de uma pessoa está aproximadamente a 55% da altura (Hellebrandt *et al.*, 1938). Assumindo distribuição de massa uniforme e densidade do corpo constante, o volume do corpo submerso nada mais é que a proporção entre a parte submersa pela a altura da pessoa ou bloco ( $h/L$ ), multiplicado pelo volume total da pessoa, o mesmo que sua massa dividida pela densidade do corpo ( $m/\rho_{person}$ ).

Uma condição interessante para análise é o ponto em que a força de arraste é igual ou maior que a força de atrito disponível. A partir deste ponto existe escorregamento e eventual queda da pessoa, ou seja, este pode ser considerado como ponto crítico, a partir do qual não é possível uma pessoas permanecer em equilíbrio. Esta curva de pontos é gerada determinando qual é a velocidade máxima  $v$  para dada altura  $h$ , na qual o força de arrasto  $F_{flow}$  é igual à força de atrito  $F_{friction}$  - equação (7). Esta curva pode ser adotada como o pior caso, visto que sem atrito suficiente é fisicamente impossível permanecer parado na corrente de água. A equação (7) é similar a apresentada em Jonkman e Penning-Rowsell (2008) mas com a inclusão do termo de empuxo:

$$0.5\rho C_D B h v^2 = \mu(F_{person} - F_{buoy}) \quad (7)$$

### Definição dos parâmetros

Para calcular as forças geradas pelo fluído na pessoa é necessário estimar o valor de alguns parâmetros. Além de valores como peso e altura da pessoa, velocidade e altura da água, outros fatores como o coeficiente de atrito  $\mu$ , coeficiente de arrasto  $C_D$ , largura equivalente  $B$  e as densidades  $\rho$  e  $\rho_{person}$  precisam ser definidos.

Endoh e Takahashi (1995) apresentam a medida do coeficiente de atrito  $\mu$  para diferentes tipos de superfície. Os valores variam de 0,38 para concreto coberto por lama até 1,12 para concreto rugoso. Eles sugerem  $\mu = 0,4$  como uma valor conservador para uma primeira análise. Jonkman e Penning-Rowsell (2008) utilizam  $\mu = 0,5$  em seus cálculos, valores que podem representar concreto escorregadio devido presença de lama, ou aço escorregadio.

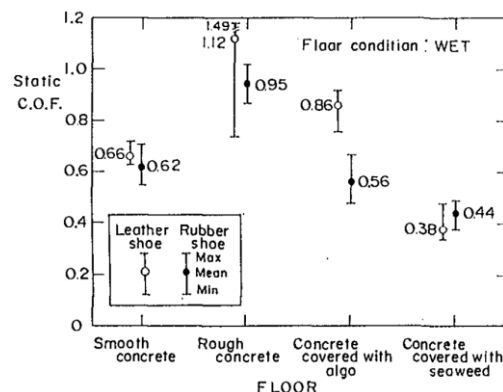


Figura 2 - Coeficiente de atrito para diferentes superfícies. Fonte: Endoh e Takahashi (1995)

O valor de  $C_D$  adotado por Jonkman e Penning-Rowcell (2008) é de 1,1, que é o mesmo valor médio utilizado por Endoh e Takahashi (1995). Em Fox e McDonald (1988) é apresentado um gráfico com a variação do coeficiente de arrasto com a razão de uma placa finita, normal ao escoamento, com número de Reynolds  $Re > 1000$ . Os valores estão na faixa de 1 a 1,5 para uma grande variação do aspecto da placa. Portanto considerar o valor adotado de 1,1 parece ser uma aproximação razoável.

Sabendo que o corpo humano tem uma densidade similar a da água (Jonkman e Penning-Rowcell, 2004), adotou-se  $\rho_{person}$  igual a  $\rho$ . Os demais parâmetros utilizados são os mesmos utilizados em Jonkman e Penning-Rowcell (2008), com exceção do parâmetro B - largura média do corpo: o valor original era de 0,4 m o que parece representar pessoas muito grandes. Julgou-se mais adequado utilizar o valor de 0,3 m, que parece ser um valor melhor de referência. Entretanto é válido pesquisar novos valores ou forma de representações mais adequados da geometria do corpo humano.

Tabela 2 - Valores utilizados no modelo.

Descrição	Valor
Massa pessoa - m	75 kg
Altura - L	1,75 m
Gravidade - g	9,81 m/s <sup>2</sup>
Constante de arrasto - Cd	1,1
Largura média do corpo - B	0,3 m
Coefficiente de atrito - $\mu$	0,5
Densidade fluido - $\rho$	1000 kg/m <sup>3</sup>
Densidade pessoa - $\rho_{person}$	1000 kg/m <sup>3</sup>

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3 apresenta os valores calculados para a força de empuxo pela profundidade. O modelo assume uma pessoa como um bloco homogêneo, portanto não é surpresa que a relação entre a profundidade e a força realizada seja linear. Para o modelo adotado, se 50% da pessoa estiver submersa, a força de empuxo será de 50% do peso, ou seja, a força de empuxo máxima é o próprio peso da pessoa, e varia linearmente com a profundidade da água, até a altura máxima da pessoa.

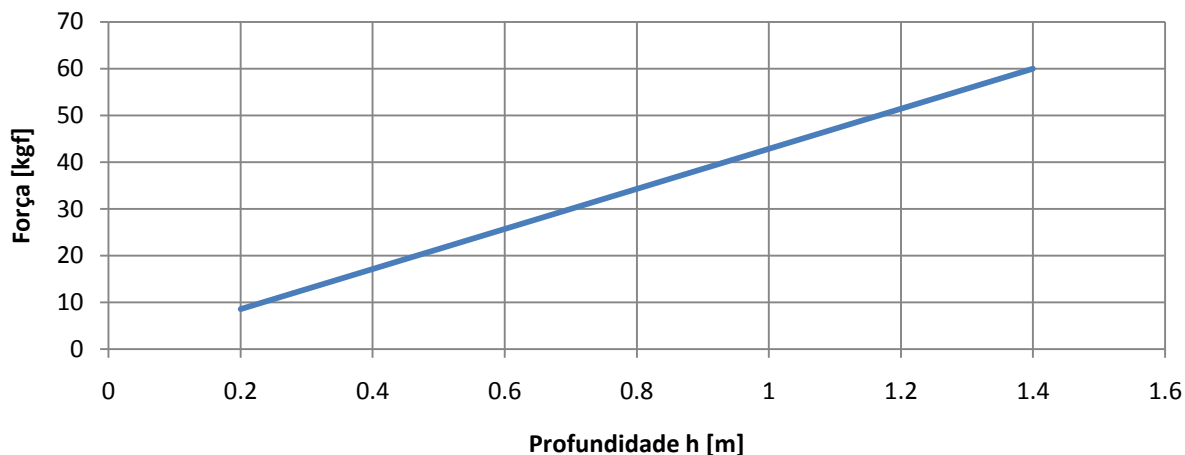


Figura 3 - Força de empuxo realizado no corpo.

O principal efeito da força de empuxo é empurrar a pessoa para cima, ou seja, diminuir a força resultante peso-empuxo aplicada sobre a superfície de apoio. A força de empuxo  $F_{buoy}$  varia com a altura  $h$  da corrente de água. Pela equação (4), quanto maior a força de empuxo menor será a força de atrito disponível. Este comportamento pode ser observado melhor na Figura 4. Segundo a Figura 3 para a faixa de profundidade avaliada ( $h = 0 \sim 1,4$  m) a força de atrito atinge até 60 kgf.

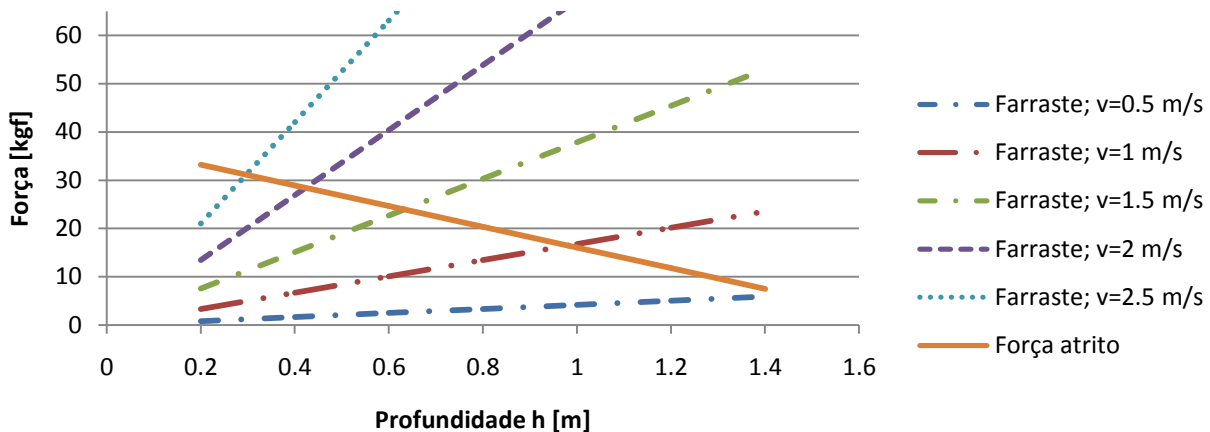


Figura 4 - Força de arraste no corpo. Curva de força de atrito mostra limiar a partir do qual a pessoa escorrega por falta de atrito, para coeficiente de atrito  $\mu = 0,5$ .

As curvas apresentadas na Figura 4 representam a força de arraste esperada para um sistema definido pelos dados da Tabela 2. Observa-se que a força de arraste aumenta com o aumento da profundidade e da velocidade da água. A força de arraste  $F_{flow}$  é de até 65 kgf para as condições avaliadas.

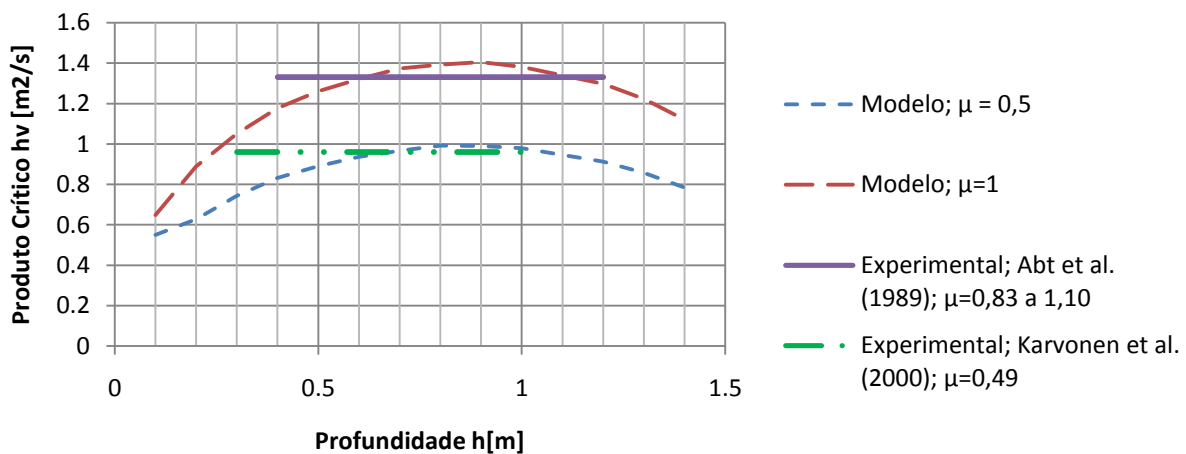


Figura 5 - Produto crítico  $h \cdot v_c$  para diferentes coeficientes de atrito  $\mu$  e dados experimentais. Os valores experimentais são valores médios.

A curva com nome de força de atrito é a força de atrito máxima, calculada a partir da equação (4), para uma pessoa com as características apresentadas na Tabela 2. A partir do momento que a força de arraste for maior que a força de atrito é impossível para uma pessoa não ser arrastada pela corrente de água. Esta é a condição crítica, ou seja, a partir deste ponto é impossível que um pessoa ou objeto submerso com características similares permaneça imóvel na corrente. Mesmo assumindo que existam outros mecanismo que causem instabilidade, eles terão pouca influência se

acontecerem em condições de profundidade e velocidades além das condições delimitadas pela curva força de atrito. Analisando a Figura 4 podemos estimar a partir de qual profundidade e velocidade existe escorregamento: para uma dada velocidade a força de arraste aumenta com a profundidade. A partir de uma certa profundidade a força de arraste é maior que a força de atrito, e a pessoa escorrega junto com a corrente.

A Figura 5 mostra a curva do produto crítico  $h \cdot v_c$ , ponto onde a força de arrasto  $F_{flow}$  é igual a força de atrito  $F_{friction}$  para diferentes profundidades. A apresentação do produto crítico  $h \cdot v_c$ , ao invés da velocidade  $v$ , foi escolhida para permitir a comparação dos dados teóricos com os dados experimentais de outros estudos, como uma forma de avaliar se os números gerados são representativos experimentalmente. Na Figura 5 são apresentadas as curvas do produto crítico  $h \cdot v_c$ , assim como os valores médios encontrados pelos estudos de Abt *et al.* (1998) e Karvonen *et al.* (2000). As curvas teóricas são calculadas para uma faixa de 0,2 a 1,4 m e para diferentes coeficientes de atrito  $\mu$ , utilizando a equação (7):

A partir da Figura 5 é possível fazer alguns comentários:

- Os valores teóricos estão próximos dos valores experimentais nas profundidades avaliadas nos experimentos da literatura, aproximadamente entre 0,5 a 1m de profundidade;
- valor crítico  $h \cdot v_c$  depende do coeficiente de atrito da superfície;
- valor crítico  $h \cdot v_c$  não é constante com a variação da profundidade;

O tipo de superfície e o coeficiente de atrito tem influência na determinação de um produto crítico. A diferença entre os valores de  $h \cdot v_c$  obtidos por Abt *et al.* (1989) e Karvonen *et al.* (2000) pode ser explicada pelo coeficiente de atrito da superfície utilizada em cada experimento. Jonkman e Penning-Rowsell (2008) apresentam que em Abt *et al.* (1989) o coeficiente de atrito variava de 0,83 a 1,10, enquanto que em Karvonen *et al.* (2000) o coeficiente de atrito era 0,49. A mesma diferença pode ser observada nas curvas teóricas com os coeficientes de atrito de 0,5 e 1.

Os valores críticos variam com a altura  $h$ . Os estudos experimentais anteriores sugerem que o produto crítico  $h \cdot v_c$  pode ser assumido constante para diferentes profundidades e velocidade da corrente de água. A Figura 5 sugere um comportamento diferente: o produto crítico varia com a profundidade e coeficiente de atrito. Na região de profundidade entre 0,5 e 1 m os valores teóricos e experimentais são compatíveis, mas para profundidade inferiores a 0,5 m e maiores que 1 m o produto crítico diminui, ou seja, a faixa segura é menor. A verificação deste comportamento e suas incertezas podem ser confirmado com dados experimentais, em especial para validação dos valores fora da faixa de profundidade de 0,5 a 1 m.

## CONCLUSÃO

Os dados preliminares indicam boa compatibilidade do modelo com as medidas experimentais da literatura de outros autores. A inclusão da força de empuxo, que não era levada em consideração em outros trabalhos, se mostrou simples e gerou bons resultados. Para pequenas profundidades a força de empuxo tem pouca influência, mas a partir de um certo limiar de profundidade o empuxo altera consideravelmente a força de atrito disponível e diminui o produto crítico  $h \cdot v_c$ . Daí, recomenda-se que outros estudos avaliem estes critérios e suas incertezas.

Os estudos preliminares indicam que o produto crítico  $h \cdot v_c$  varia com a profundidade, e que talvez não seja adequado considerar este valor constante, como assumido em estudos anteriores. Os resultados também sugerem que o coeficiente de atrito tem grande importância nos mecanismos de instabilidade, apesar deste não ser utilizado nas formulações empíricas encontradas. Assim, sugere-

se que a resistência ao escoamento seja detalhada em simulações de enchentes e como se relacionam com o produto crítico  $h \cdot v_c$ .

Os resultados ainda sugerem que pode ser possível trabalhar com termos adimensionais como profundidade relativa (profundidade/altura da pessoa) e força relativa (força/peso da pessoa), embora ainda sejam necessários mais estudos para a verificação da validade e utilidade destes termos. Estas primeiras considerações podem servir para apoiar sistemas de suporte à decisão ao incorporar previsões de  $h \cdot v_c$  tanto em sistemas de alerta antecipado em tempo real, assim como auxiliar em cenários de planejamento para os mapas de riscos e evacuação em zonas frequentemente inundáveis.

### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio de CNPq 161693/2012-1, CNPq PQ 307637/2012-3, FAPESP FAPESP-PFMC 2008/58161-1 "Assessment of Impacts and Vulnerability to Climate Change in Brazil and Strategies for Adaptation Options", FINEP/ MAPLU2 – Manejo de Águas Pluviais no Meio Urbano e Casadinho/PROCAD (UFAL-EESC/USP) "Monitoramento avançado de processos biotecnológicos e qualidade ambiental".

### REFERÊNCIAS

- ABT, S.R.; WITTLER, R.J.; TAYLOR, A.; LOVE, D.J. (1989). *Human Stability in a High Hazard Flood Zone*. Water Resources Bulletin 25(4), pp. 881-890.
- ENDO, K.; TAKAHASHI, S. (1995). *Numerically Modelling Personnel Danger on a Promenade Breakwater due Overtopping waves*. In Proceedings of the XXIVth International Conference on Coastal Engineering (ICCE), Kobe, Japan, pp. 1016-1029.
- FOX, R.W.; MCDONALD, A.T (1988). *Introdução à mecânica dos fluidos*, Guanabara, pp 393.
- HELLEBRANDT, F.A.; TEPPER, R.H.; BRAUN, G.L. (1938). *Location of the Cardinal Anatomical Orientation Planes Passing Through the Center of Weight in Young Adults Women*. American Journal of Physiology 121:465-470.
- JONKMAN, S.N.; PENNING-ROUSELL, E. (2008). *Human Instability in Flood Flows*. Journal of the Water Resources Association (JAWRA) 44(4):1-11. DOI: 10.1111/j.1752-1688.2008.00217.x.
- JONKMAN, S.N.; KELMAN, I.; BAIN, V. (2005). *A Physical interpretation of Human Stability in Flowing Water*. In Proceedings of the International Symposium on Stochastic Hydraulics, Maio 23,24 2005, Nijmegen, the Netherlands.
- KARVONEN, R.A.; HEPOJOKI, A.; HUHTA, H.K; LOUHIO, A. (2000) *The Use of Physical Models in Dam Break Analysis*. RESCDAM Final Report, Helsinki of Technology, Helsinki, Finland.
- LIND, N.; HARTFORD, D.; ASSAF, H. (2004). *Hydrodynamics models of Human Instability in a Models*. In Flood Journal of the American Water Resources Association 40(1):89-96.
- SUETSUGI, K. (1998). *Control of the Floodwater and Improvements of Evacuation System for Floodplain Management*. In: Floodplain Risk Management, Proceeding of International Workshop, Hiroshima, 11-13 Novembro 1996, pp 191-207.