SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE ROMPIMENTO PARCIAL DA BARRAGEM SANTA BÁRBARA

RAFAEL ZANOVELO PERIN[1]; ARMANDO MIGUEL AWRUCH [2]; RÉGIS SPEROTTO DE QUADROS[3]

[1]*Universidade Federal de Pelotas – rafael-perin@hotmail.com*
[2]*Universidade Federal do Rio Grande do Sul - amawruch@ufrgs.br*
[3]*Universidade Federal de Pelotas – quadros99@gmail.com*

1. INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural fundamental na vida humana, sendo utilizada para agricultura, transportes, geração de energia, hidratação, lazer e muitas outras. Desde o principio das civilizações as comunidades estabeleceram-se em torno dos recursos hídricos, uma vez que a água fomenta o desenvolvimento de diversas atividades e proporciona a manutenção da vida humana.

No entanto, ao estabelecer-se tão próximo dos recursos hídricos, a água torna-se uma ameaça para as comunidades, sendo submetidos as adversidades provenientes do meio ambiente, como a escassez, enchentes, tsunamis, poluição, etc. E, ao considerar-se o desenvolvimento e a urbanização, tem-se problemas ainda mais graves, como é o caso do rompimento de barragem, a contaminação da água, entre outros.

Segundo a UNISDR (*The United Nations Office for Disaster Risk Reduction)*, o crescimento populacional e as construções em planícies e zonas costeiras são fatores agravantes nos eventos de inundações, fazendo a população cada vez mais vulnerável (2015). Em consonância, KUZMA; LUO (2020) apontam que os gastos com enchentes já passou de um trilhão de dólares nos últimos 30 anos e que tendem a piorar, visto que o número de pessoas afetadas por inundações dobrará até 2030.

Deste modo, o desenvolvimento de estudos ligados aos desastres ambientes ganham relevância e importância, com objetivo de contribuir com a sociedade. O presente trabalho versa sobre a simulação numérica da Barragem Santa Bárbara, localizada em Pelotas.

O modelo matemático de águas rasas é empregado para descrever o escoamento, sendo resolvido pelo método dos elementos finitos e pelo método das linhas ou direções características (ZIENKIEWICZ et al., 2005). A partir disso, aproveitando e ampliando o código computacional desenvolvido por GRAVE (2016), apresenta-se a projeção de um cenário de inundação em Pelotas após um rompimento da estrutura. Assim, a modelagem matemática pode ser empregada na tomada de decisões frente a um evento de desastre na cidade.

2. METODOLOGIA

O sistema de equações de águas rasas é caracterizado por um escoamento bidimensional em águas pouco profundas, ou seja, a escala vertical tem dimensão significativamente menor que as escalas horizontais. O modelo provém da integração das equações da conservação de massa e da quantidade de movimento ao longo da profundidade, como feito por AWRUCH (1983). Deste modo, obtêm-se:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \qquad (1)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial F_{ij}}{\partial x_j} + \frac{g.h}{2}.\frac{\partial \eta}{\partial x_i} + (-1)^i\ \lambda U_k + \left(\frac{g}{{c_m}^2}\ \frac{|U|}{h^2}\right)\ U_i = \overline{c_d}\ |W|.W_i, \qquad (2)$$

no domínio Ω com $i, j=1,2$ e $k = i + (-1)i+1$, onde $u_i(x_1,x_2,t)$ é a componente da velocidade instantânea na direção de x_i, $U_i(x_1,x_2,t)$ é a componente do fluxo (vazão por unidade de largura) na direção de x_i, $h(x_1,x_2,t)$ é a profundidade total, $H(x1,x2)$ é a distância do plano de referência ao fundo e $\eta(x_1,x_2,t)$ é a elevação da superfície livre em relação a H. Ainda, $U_i = \hat{U}_i\ h$, $F_{ij} = \hat{U}_i\ U_j$, $h = H + \eta$, g é a aceleração da gravidade, $\hat{U}_i(x_1,x_2,t)$ é a componente da velocidade constante na profundidade na direção x_i, $\lambda = 1,4\ .\ 10^{-4}\ sin\Theta$ é o coeficiente de Coriolis (sendo Θ a latitude do ponto considerado), c_m é o coeficiente de Chezy (dado em $m^{1/2}/s$), que está vinculado ao coeficiente de Manning ς pela expressão $c_m = h^{1/6}/\varsigma$ (cujo ς é dado em $s/m^{1/3}$ e $g/{c_m}^2$ é adimensional), W_i é a componente da velocidade do vento (sendo $W_1 = |W|\ cos(\varrho)$ e $W_2 = |W|\ sin(\varrho)$) e c_d é um coeficiente de arrasto. Em sistemas de águas rasas os comprimentos de ondas são grandes, ou seja, são ondas longas, sendo que sua celeridade c_w vem dada por:

$$c_w \cong \sqrt{gh}\ ,\ c_w^2 = \frac{dp}{dh} \Rightarrow \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{c_w^2}\frac{\partial p}{\partial t}, \qquad (3)$$

sendo p a pressão dada por $p = \frac{1}{2}g\ (h^2 - H^2)$.

As condições iniciais e de contorno devem ser fornecidas às equações (1) e (2). As condições iniciais consistem em fornecer valores de U e h em $t = 0$ e as condições de contorno forçadas, de tipo Dirichlet, são: a) $\boldsymbol{U\ v} = U_i\, v_i = 0$ em Γ_w (contorno "sólido" ou "fechado"); b) $\boldsymbol{U\ v} = U_i\ v_i = \bar{U}_v$ em Γ_U (contorno "aberto"); c) $h=\bar{h}$ em Γ_h (contorno "aberto"). $\bar{U}_v$ e $\bar{h}$ são valores prescritos das incógnitas nas partes Γ_U e Γ_h do contorno total Γ. E, v_i é um versor unitário. O contorno total Γ é a união de todas as partes do contorno, ou seja, $\Gamma = \Gamma_w\ \cup\ \Gamma_U\ \cup\ \Gamma_h$.

O modelo de águas rasas é resolvido pelo método dos elementos finitos, usando elementos triangulares, com nós em seus vértices, e função de interpolação linear. A discretização temporal das equações se da pelo método das linhas ou direções características (em inglês: Characteristic Based Split Method – CBS), onde faz-se a separação das variáveis do problema. Os procedimentos podem ser vistos com detalhe em ZIENKIEWICZ et al. (2005).

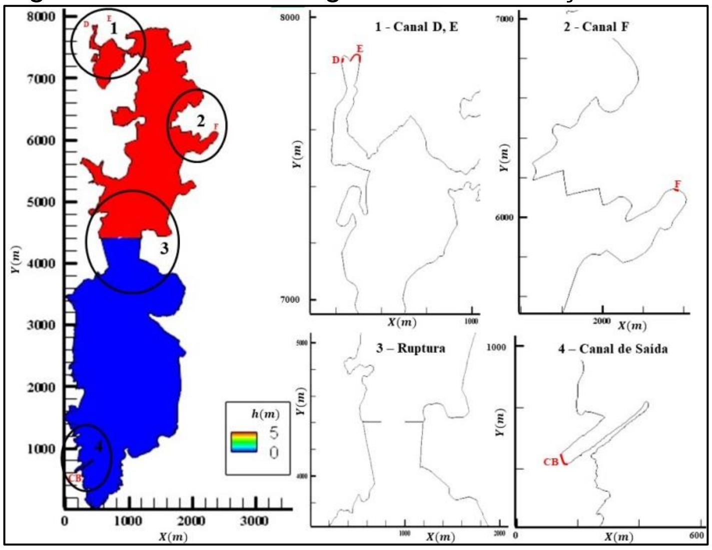
No presente trabalho resolve-se o esquema CBS de forma totalmente explícita. Para isso, a condição para estabilidade é que o passo de tempo adotado seja menor que o intervalo de tempo crítico. Ou seja, $\Delta t \leq \Delta t_{crit}$, sendo $\Delta t_{crit} = l/(c_w + |u|)$, cujo l é um tamanho característico do elemento, c_w é dado pela equação (3) e $|u|$ é o valor absoluto da velocidade (GRAVE, 2016).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A cidade de Pelotas localiza-se no sul do estado do Rio Grande do Sul (RS), Brasil (latitude: -31º 46'19"; longitude: -52º 20'33"). Pelotas é uma das cidades mais populosas do estado e devido sua proximidade com os recursos hídricos possui recorrentes inundações, sendo estes fatores agravantes na vulnerabilidade humana.

Deste modo, a metodologia supracitada é aplicada na projeção de um cenário de inundação na cidade de Pelotas devido ao rompimento parcial da Barragem Santa Bárbara. Para isso, desenvolveu-se a malha computacional em elementos finitos contemplando a estrutura de retenção e as imediações da barragem, para uma altitude de 4 metros, dispostas na Figura 1 a condição inicial e as características do domínio. Os valores de contorno da geometria são baseados nos dados de altimetria fornecidos pela prefeitura da cidade de Pelotas. A partir do código computacional validado por GRAVE (2016) em linguagem FORTRAN, onde foram adicionados os efeitos do vento e de Coriolis, fizeram-se as simulações numéricas.

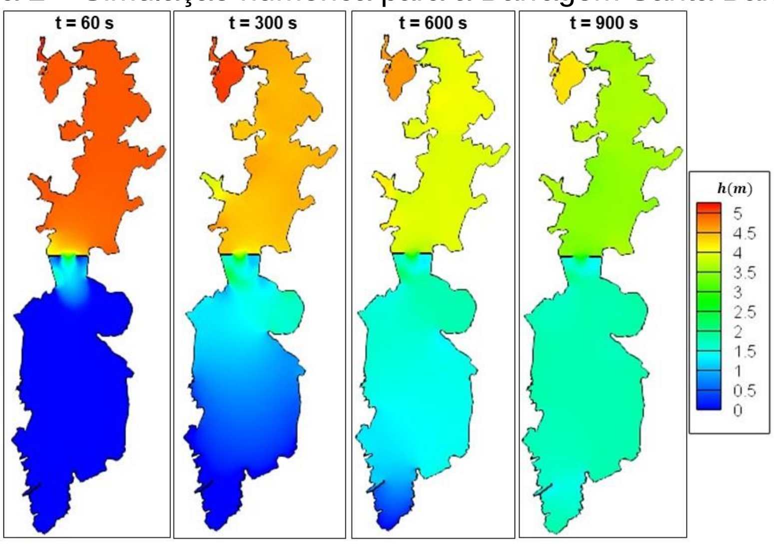
Figura 1 – Barragem Santa Bárbara: geometria, condição inicial e de contorno.



Fonte: elaborada pelos autores.

Na Figura 1 observa-se a condição inicial, em *t = 0s* a altura de água dentro do reservatório é *5m* e a parte externa considera-se seca. Na Figura 2 são apresentadas as simulações numéricas em alguns instantes de tempo, evidenciando que o esvaziamento progressivo da barragem ocasiona na inundação da cidade.

Figura 2 – Simulação numérica para a Barragem Santa Bárbara.



Fonte: elaborada pelos autores.

4. CONCLUSÕES

A ocorrência de inundações é um problema recorrente da sociedade, ocasionando prejuízos econômicos e perdas de vidas humanas. Com isso, a modelagem matemática em sistemas de águas rasas ganha evidência, uma vez que é um modelo bidimensional que considera uma variação na altura, propiciando uma aproximação numérica para eventos de inundações.

Neste trabalho projetou-se um cenário de inundação na cidade de Pelotas devido a uma ruptura parcial na Barragem Santa Bárbara, propiciando informações acerca da ocorrência do evento e a sua abrangência. Deste modo, estima-se que em pouco mais de 15 minutos de esvaziamento o volume do reservatório se iguala a altura da água na zona habitada, aproximadamente *2,5m*. Ou seja, uma ruptura na barragem ocasionaria um desastre de grandes proporções na cidade.

Ainda, podem ser realizadas novas simulações considerando outros cenários de inundação, variando as condições do problema, extendendo o domínio, considerando as construções, calculando a dispersão de poluentes e muitos outros.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AWRUCH, A. M. **Modelos numéricos em hidrodinâmica e fenômenos de transporte usando o método dos elementos finitos.** 1983. 354f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

GRAVE, M. **Simulação e Controle de Enchentes Usando as Equações de Águas Rasas e a Teoria do Controle Ótimo.** 2016. 105f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

KUZMA, S.; LUO, T. **The Number of People Affected by Floods Will Double Between 2010 and 2030.** World Resources Institute, Washington, 23 abr. 2020. Acessado em 19 ago. 2020. Online. Disponível em: www.wri.org/blog/2020/04/aqueduct-floods-investment-green-gray-infrastructure

PELOTAS. **GeoPelotas: Portal de Informações Geográficas da Prefeitura de Pelotas.** Acessado em 08 out. 2020. Online. Disponível em: <geopelotas-pmpel.hub.arcgis.com>.

UNISDR. **The human cost of weather related disasters:** 1995-2015. Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, Bruxelas. Acessado em 09 ago. 2021. Disponível em: https://www.unisdr.org/files/46796_cop21weatherdisastersreport2015.pdf

ZIENKIEWICZ, O. C.; TAYLOR, R. L.; NITHIARASU, P. **Finite Element Method for Fluid Dynamics**. Oxford (UK): Butterworth-Heinemann, 2005. 2v. 6ed.