

## AValiação NUMÉRICA DO IMPACTO DE ONDAS MASSIVAS SOBRE PILARES DE PONTES COM MODELO HIDRODINÂMICO DE ÁGUAS RASAS

Renato Vaz Linn<sup>1</sup>, Alexandre Luis Braun<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Sul / Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC/UFRGS), Programa de Pós-Graduação em Design (PGDesign/UFRGS) / [renatolinn@ufrgs.br](mailto:renatolinn@ufrgs.br)

<sup>2</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Sul / Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC/UFRGS), / [alexandre.braun@ufrgs.br](mailto:alexandre.braun@ufrgs.br)

### Resumo

Este trabalho analisa o impacto de uma onda massiva sobre um pilar circular de uma ponte. A simulação é conduzida por um modelo hidrodinâmico de águas rasas calculado numericamente utilizando-se o Método dos Elementos Finitos em um esquema de linhas características. Um perfil de velocidades é desenvolvido a partir dos valores médios obtidos pelo modelo de águas rasas para fins de determinação da pressão total. Um modelo reduzido de pilar circular de ponte é analisado, comparando-se os resultados obtidos de pressão ao longo da profundidade ao longo do tempo com a presente metodologia com resultados experimentais. Os resultados apresentam boa similaridade, demonstrando o potencial de aplicação para determinação de cargas de impacto sobre pilares submetidos a cargas hidrodinâmicas extremas, determinando-se a elevação de água, velocidades, pressões e evolução temporal do escoamento.

### Palavras-chave

Dinâmica de Fluidos Computacional; Águas Rasas; Eventos Extremos; Pontes.

### Introdução

Com o aumento do uso de sistemas de transporte e desenvolvimento econômico em áreas costeiras, a construção de pontes tem sido intensificada. Adicionalmente às cargas usuais de carros, trens, vento e pedestres, muitas destas pontes estão sujeitas a cargas hidrodinâmicas decorrentes de eventos hidromecânicos extremos como o rompimento de barragens e tsunamis. Tais ondas, ditas ondas massivas, produzem impactos em pontes gerando pressões adicionais de curta, média ou longa duração. Tanto a pressão hidrostática quanto a pressão dinâmica influem na magnitude do impacto de tais ondas de significativa massa, sendo que a desconsideração de tais cargas pode resultar no colapso da estrutura em tais situações. É, portanto, necessário determinar formas quantitativas de se avaliar tais cargas de impactos.

Para simular eventos hidrodinâmicos extremos como rompimento de barragens e tsunamis, tanto experimentalmente quanto numericamente, é possível empregar uma condição inicial do escoamento que produza uma onda massiva a ser propagada. Esta técnica foi empregada com sucesso por diversos autores (SHIGEMATSU, 2004; KURZ, 2024; YANG, 2022) e é empregada neste trabalho.

Neste trabalho, utiliza-se de um modelo hidrodinâmico de águas rasas para descrever o escoamento. Nesta metodologia, considera-se que a profundidade é significativamente menor que as outras duas dimensões do escoamento e nas Equações de Navier-Stokes são consideradas de forma integrada na profundidade. Disto resulta um modelo tridimensional representado de forma bidimensional. Este modelo tem sido empregado com sucesso para simular escoamentos hidrodinâmicos, incluindo-se eventos extremos como rompimento de barragens e tsunamis (GRAVE, 2024; KURZ, 2023, PERIN, 2020).

## Simulação Hidrodinâmica em Águas Rasas

As equações de águas rasas descrevem um escoamento incompressível com superfície livre onde as escalas horizontais são muito maiores que a vertical. As equações que descrevem o escoamento são dadas por (Fig. 1):

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

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial F_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\partial p}{\partial x_i} + Q_i = 0 \quad (\text{Equação 2})$$

onde  $x_i$  são as coordenadas espaciais ( $i, j = 1, 2$ ) e  $t$  é o tempo. As componentes  $U_i = hu_i$  definem as velocidades médias horizontais ao longo da seção transversal do escoamento  $u_i$  multiplicadas pela altura total de água  $h$ . As variáveis  $h$  e  $U_i$  são as incógnitas do problema. As componentes de fluxo  $F_{ij}$  são definidas por  $F_{ij} = hu_i u_j$  e o termo do tipo pressão por:

$$p = \frac{1}{2}g(h^2 - H^2) \quad (\text{Equação 3})$$

onde  $g$  é a aceleração da gravidade e  $H$  é a profundidade do leito a partir de um referencial de nível. A elevação de água  $\eta$  é relacionada por  $h = \eta + H$ . Os termos de fonte  $Q_i$  são dados por:

$$Q_i = -g(h - H)\frac{\partial H}{\partial x_i} + \frac{gu_i|u|}{C^2h} \quad (\text{Equação 4})$$

onde  $|u| = (u_1^2 + u_2^2)^{\frac{1}{2}}$ . A equação de Chézy-Manning é considerada onde:

$$C = n^{-1}h^{1/6} \quad (\text{Equação 5})$$

sendo  $n$  o coeficiente de Manning. Condições iniciais e de contorno necessitam ser aplicadas para a solução deste sistema de equações diferenciais. O Método dos Elementos Finitos é utilizado conjuntamente de um esquema característico (*Characteristic-Based Split* – CBS) para solução do problema utilizando-se elementos triangulares lineares (KURZ, 2024).

O modelo hidrodinâmico utilizado calcula a elevação de água e velocidade média da seção do escoamento. Entretanto, não há um perfil de velocidades. Para obtenção deste perfil, emprega-se um perfil logaritmo que satisfaz a velocidade média através de:

$$\frac{\bar{u}_i - u_{max}}{u^*} = \frac{2.3}{k} \log \frac{y}{h} \quad (\text{Equação 6})$$

onde  $\bar{u}_i$  é o perfil de velocidades na direção  $i$  e:

$$u^* = \sqrt{\tau/\rho} = \sqrt{gR_H S} \quad (\text{Equação 7})$$

em que o raio hidráulico  $R_H$  pode ser aproximado por  $R_H \approx h$  e, então, integrando-se ao longo da profundidade, obtém-se:

$$\bar{u}_i = u_i + \frac{1}{k} \sqrt{ghS} \left( 1 + 2.3 \log \frac{y}{h} \right) \quad (\text{Equação 8})$$

Para um escoamento turbulento  $k \approx 0.3$  e conjuntamente da relação  $\sqrt{S} = nu_i R_H^{-2/3} \approx nu_i h^{-2/3}$  a Eq. 6 resulta em:

$$\bar{u}_i = u_i \left[ 1 + h^{-1/6} \sqrt{gn} \left( 3.33 + 7.66 \log \frac{y}{h} \right) \right] \quad (\text{Equação 9})$$

que expressa o perfil de velocidades em função da velocidade média, altura relativa e fricção do leito.

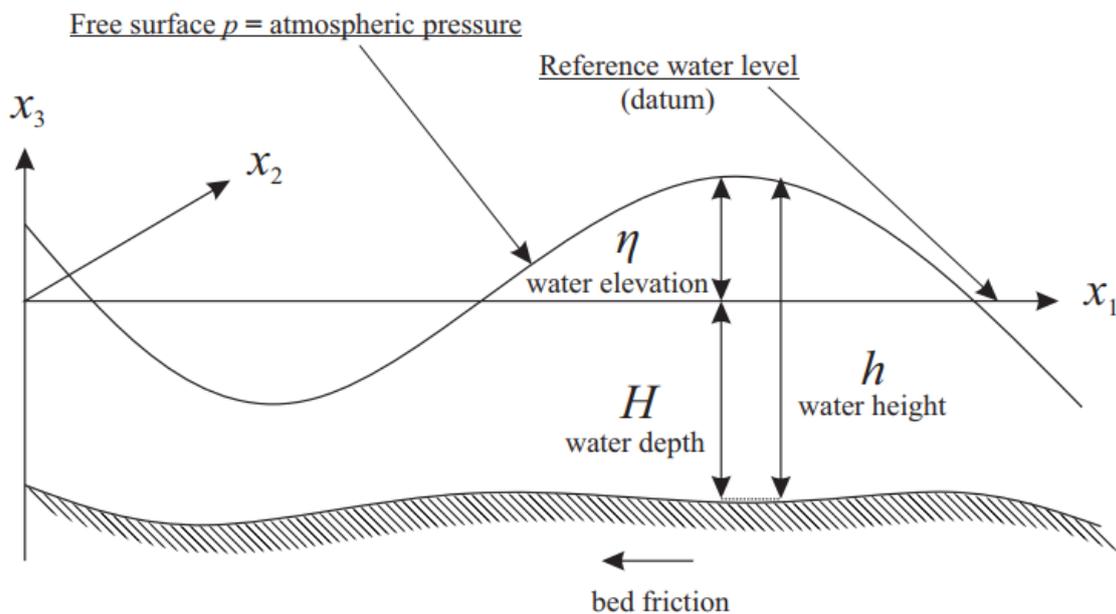
A pressão do fluido é obtida pela soma da componente hidrostática:

$$p_h = \rho gh \quad (\text{Equação 10})$$

com a componente dinâmica:

$$p_d = \frac{1}{2} \rho |\bar{u}|^2 \quad (\text{Equação 11})$$

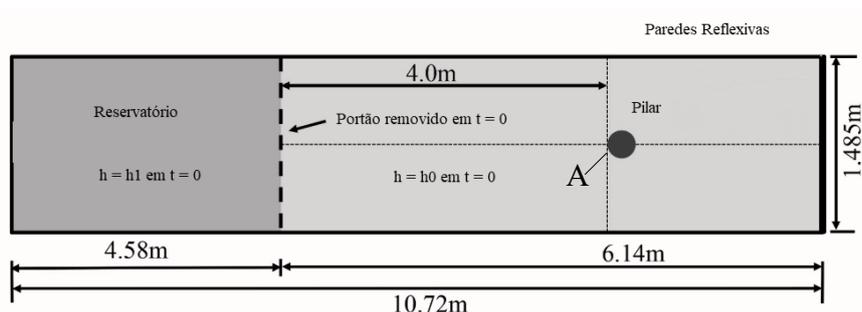
onde  $\rho$  é massa específica da água.



**Figura 1 – Perfil do escoamento de águas rasas.**

## Descrição da Análise

Adota-se um reservatório (indicado à esquerda na Fig. 2) retendo água com altura  $h_1$  e um pilar circular de raio  $R = 0.04\text{m}$  em leito de batimetria constante e lâmina de água de valor  $h_0$ . Subitamente, no tempo  $t = 0$ , o portão que retém a água é removido e a simulação inicia-se, gerando uma grande onda massiva propagando-se na direção do pilar. Neste trabalho, o pilar, geometria e condições do escoamento possuem as mesmas dimensões em escala reduzida avaliado experimentalmente por (YANG, 2022): raio  $R = 0.04\text{m}$ ,  $h_1 = 0.273\text{m}$  e  $h_0 = 0.08\text{m}$ . Uma malha contendo aproximadamente 100k elementos triangulares lineares foi empregada e a simulação realizada até um tempo final  $t = 6\text{s}$ . O coeficiente de Manning adotado é  $n = 0.010$ .



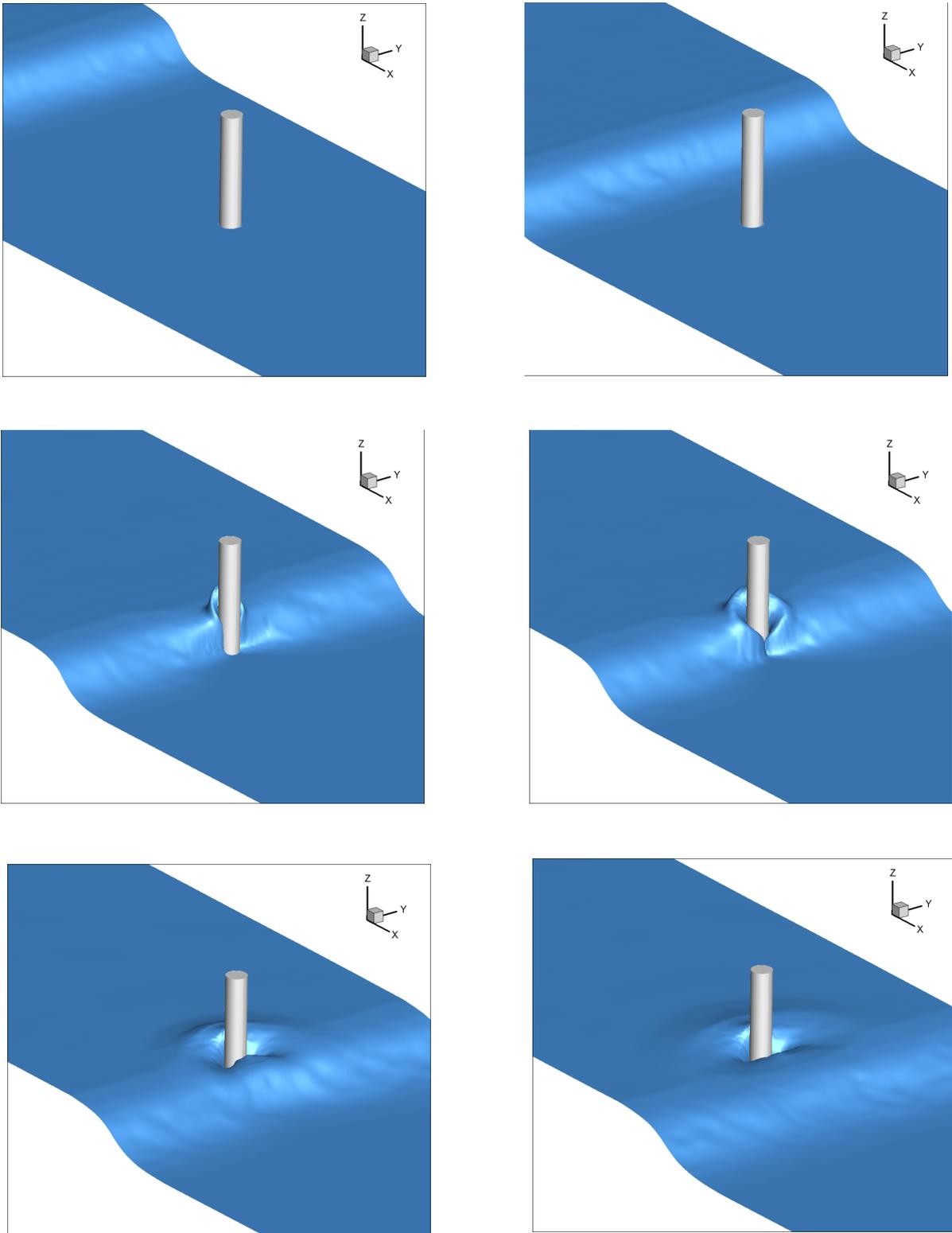
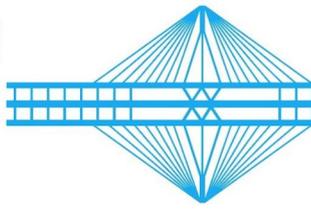
**Figura 2 – Vista superior da geometria, condições iniciais e de contorno do escoamento.**

## Resultados

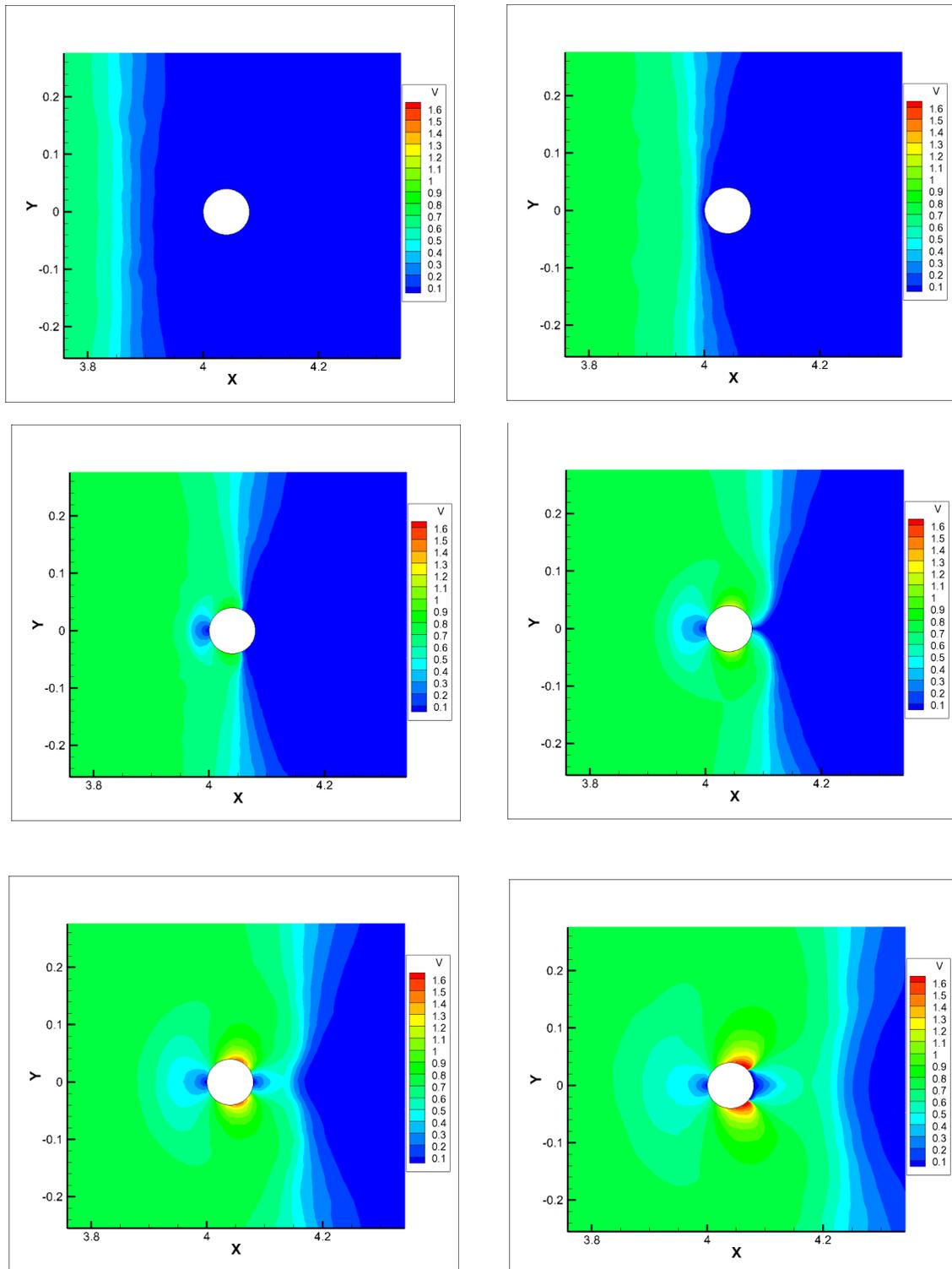
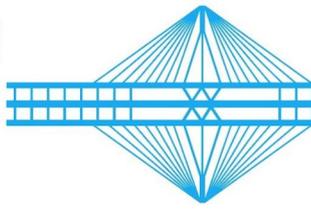
A Fig. 3 ilustra a evolução temporal do impacto da onda sobre o pilar. Anteriormente ao impacto, a onda propaga-se por uma longa distância com pouca interferência pois o leito é constante, havendo efeito de fricção do leito. No momento inicial do impacto há uma súbita grande elevação do nível de água na região do pilar primeiramente atingida, propagando-se para as laterais do pilar. Com a passagem da frente de onda, o entorno do pilar rebaixa o seu nível de água para níveis ligeiramente abaixo do nível em regiões mais afastadas em suas laterais e região anterior, mantendo-se elevado na região frontal.

Similarmente, o campo de magnitude de velocidade é apresentado na Fig. 4. Nesta figura pode-se perceber que a onda se propaga e sofre interferência apenas na região no entorno do pilar, propagando-se continuamente longe dele. Tanto na zona frontal quanto na zona anterior do pilar há a formação de uma região de estagnação do escoamento com baixas velocidades. Nas zonas laterais há um acréscimo significativo de velocidades durante e após o impacto da onda.

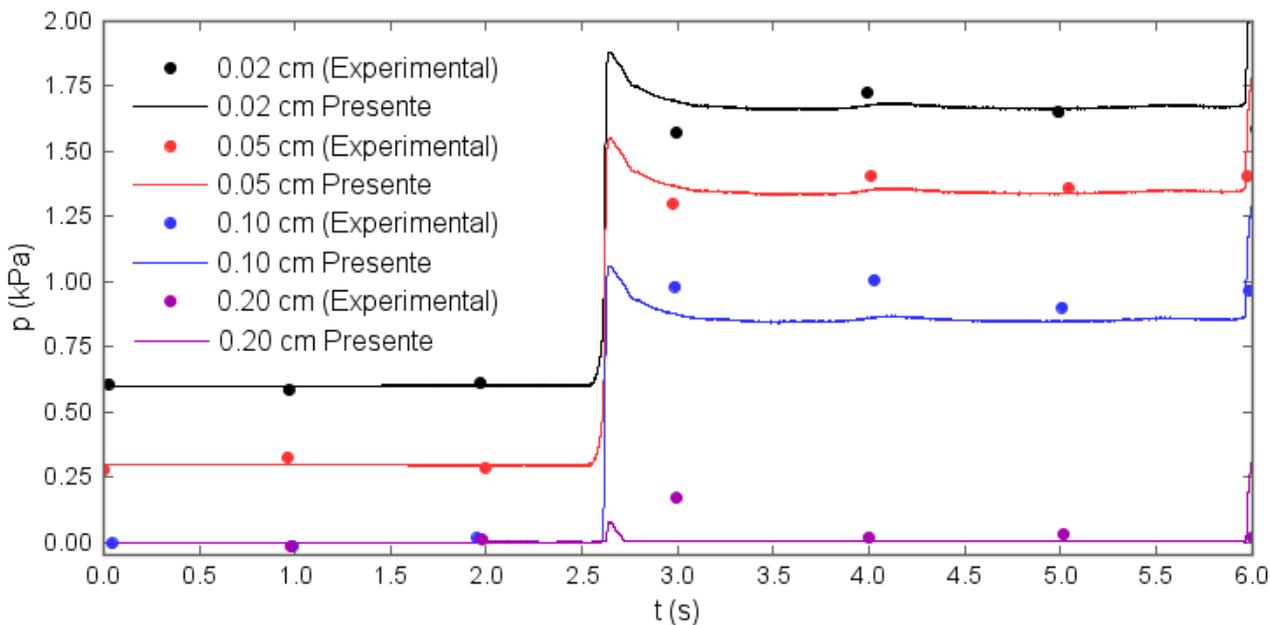
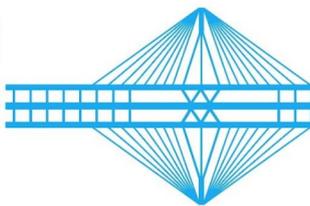
A variação ao longo do tempo da pressão da região frontal do pilar (referente ao ponto A da Fig. 2) é mostrada na Fig. 5 para diferentes valores de alturas com relação leito. Nesta mesma figura, os resultados obtido são comparados com os valores experimentais apresentados por (YANG, 2022). Como pode ser observado, há uma excelente semelhança, corroborando a validade do presente modelo. Também é possível verificar que no momento do impacto há um pico de pressão cujo valor é capturado com a simulação numérica.



**Figura 3 – Sequência temporal do impacto da onda no pilar: elevação da água.**



**Figura 4 – Sequência temporal do impacto da onda no pilar: campo de velocidades.**



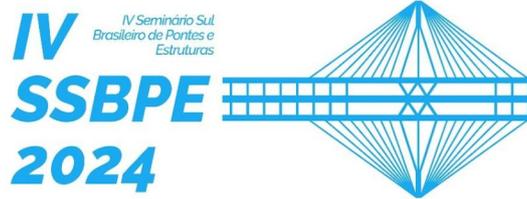
**Figura 5 – Pressão no ponto A do pilar para diferentes profundidades ao longo do tempo.**

## Conclusões

O presente trabalho apresentou uma abordagem numérica para avaliação da carga de impacto de ondas massivas em pilares de pontes. O modelo hidrodinâmico de águas rasas foi empregado conjuntamente do Método dos Elementos Finitos. Um exemplo de verificação foi analisado contendo um pilar circular isolado submetido a uma grande onda produzida pelo rompimento de uma barragem (reservatório de água). O modelo foi capaz de prever a evolução do escoamento incluindo-se pressões, velocidades e nível de água com precisão, sendo os resultados compatíveis com dados experimentais. Com o modelo é possível prever cargas em pilares de outros formatos, conjuntos de pilares, situações envolvendo batimetria complexa e eventos hidrodinâmicos variados. Para trabalhos futuros, será incluído o efeito do transporte do próprio leito, chamado assoreamento, que é um fenômeno importante que conduz a aumento de cargas em pilares de ponte.

## Referências

- PERIN, R. Z.; QUADROS, R. S.; AWRUCH, A.M.; LINN, R.V. Simulação numérica de enchentes em águas rasas via elementos finitos. In: Proceedings of the XXIII Encontro Nacional de Modelagem Computacional ENMC e XI Encontro de Ciência e Tecnologia de Materiais ECTM. UFT, Palmas, TO, 2020.
- GRAVE, M.; LINN, R. V.; AWRUCH, A. M.. Control of Shallow Water Flows Using an Optimization Procedure and Finite Element Analysis. Flow, Turbulence and Combustion. 2024.
- KURZ, G. B.; QUADROS, R. S.; LINN, R. V.; FERNANDO, H. J.; JESUS, W. C. Efeito do Coeficiente de Manning na Equação de Águas Rasas. In: XI Encontro Regional de Matemática Aplicada e Computacional do Rio Grande do Sul - XI ERMAC-RS, Pelotas, 2023.
- KURZ, G. B.; LINN, R.V.; BUSKE, D.; QUADROS, R. S. Evaluating Partial Dam Breach using the CBS Method in Shallow Waters. International Journal Of Hydromechanics, Vol. 7, pp. 278-291, 2024.



- SHIGEMATSU, T.; LIU, P.L.F.; ODA, K. Numerical modeling of the initial stages of dam-break waves. *J. Hydraul. Res.* 42 (2), 183–195, 2004.
- YANG, S.; YANG, W.; ZHANG, C.; QIN, S.; WEI, K.; ZHANG, J. Experimental and numerical study on the evolution of wave front profile of dam-break waves. *Ocean Engineering*. 247, 2022.
- YANG, S., Z. TAN, W. YANG, H. IMANI, D. SONG, J. LUO, J. ZHANG. Experimental study on hydrodynamic interaction between dam-break waves and circular pier. *Ocean Engineering*, v. 266, 2022.