

XXIX CONGRESO LATINOAMERICANO DE
HIDRÁULICA  MÉXICO 2021



Compilación de
Trabajos Completos:
XXIX Congreso
Latinoamericano de
Hidráulica



ASOCIACIÓN
MEXICANA
DE
HIDRÁULICA



Hosted by
Spain Water
and IWHR, China



INSTITUTO
DE INGENIERIA
UNAM

COMPILACIÓN DE
TRABAJOS
COMPLETOS: XXIX
CONGRESO
LATINOAMERICANO DE
HIDRÁULICA

EDITORES:

MOISÉS BEREZOWSKY VERDUZCO
ALEJANDRO MENDOZA RESÉNDIZ
MARITZA LILIANA ARGANIS JUÁREZ

15 AL 19 DE NOVIEMBRE DE 2021
EVENTO VIRTUAL | MÉXICO

Compilación de Trabajos
Completos XXIX Congreso
Latinoamericano de
Hidráulica

EDITORES:

Moisés Berezowsky Verduzco
Alejandro Mendoza Reséndiz
Maritza Liliana Arganis Juárez

Compilación de Trabajos Completos: XXIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica

Libro Digital: PDF, descarga y online
ISBN 979-888722468-8

1. Ingeniería Hidráulica. 2. Mecánica de Fluidos Aplicada, 3. Hidrología e Hidrosfera

El presente contenido: texto y figuras de los trabajos completos, son propiedad exclusiva de los autores.

Editado y hecho en México

**XXIX CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
MÉXICO, 15 AL 19 DE NOVIEMBRE
EVENTO VIRTUAL**

**ESTUDO COMPUTACIONAL DO FENÔMENO DE CAVITAÇÃO
HIDRODINÂMICA EM APARATO VENTURI**

Thiago Vinicius Ribeiro Soeira

Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil, tvribeiro88@hotmail.com

Guilherme Barbosa Lopes Júnior

Universidade Federal de Pernambuco, Brasil, lopesjunior.gb@gmail.com

Cristiano Poletto

Universidade Federal do Rio Grande do sul, Brasil, cristiano.poletto@ufrgs.br

Julio Cesar de Souza Inácio Gonçalves

Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil, sig.julio@gmail.com

RESUMO:

O fenômeno de cavitação hidrodinâmica apresenta diversas aplicações na engenharia ambiental, tais como remoção de poluentes emergentes e síntese de biodiesel. Melhorar a compreensão acerca deste fenômeno é tarefa indispensável para controlar e otimizar a aplicação de reatores de cavitação hidrodinâmica nas indústrias. Este artigo tem como objetivo realizar simulações numéricas, usando dinâmica de fluidos computacional (CFD), para mapear o comportamento de alguns parâmetros hidráulicos em um dispositivo Venturi tipo fenda. O estudo computacional foi desenvolvido através da plataforma Ansys Inc., ferramenta *Fluent*, versão 14.0 (modelo multifásico, e o modelo de turbulência k-ε realizável). Os dados de entrada do modelo foram coletados de estudos experimentais, considerando cinco pressões de entrada no dispositivo Venturi. Um teste de independência de malhas e um estudo da influência das paredes do dispositivo Venturi na convergência das soluções numéricas também foram realizados. Os resultados mostraram que uma malha independente é obtida quando a densidade é igual ou superior a 0,91 elementos/mm³. As funções de parede tiveram pouca influência nos resultados das simulações. Os três parâmetros hidráulicos avaliados (pressão, velocidade do escoamento e fração de vapor) apresentaram um comportamento esperado, confirmando o potencial do uso de CFD no estudo do fenômeno de cavitação hidrodinâmica em dispositivo Venturi tipo fenda.

ABSTRACT:

The phenomenon of hydrodynamic cavitation has several applications in environmental engineering, such as removal of emerging pollutants and synthesis of biodiesel. Improving the understanding of this phenomenon is an indispensable task to control and optimize the application of hydrodynamic cavitation reactors in industries. This article aims to perform numerical simulations, using computational fluid dynamics (CFD), to map the behavior of some hydraulic parameters in a venturi slit-type device. The computational study was developed using the Ansys Inc. platform, *Fluent* tool, version 14.0 (multiphase model, and the realizable k-ε turbulence model). The model's input data were collected from experimental studies, considering five input pressures in the Venturi device. A mesh independence test and a study of the influence of the walls of the Venturi device on the convergence of numerical solutions were also carried out. The results showed that an independent mesh is obtained when the density is equal to or greater than 0.91 elements / mm³. The wall functions had little influence on the results of the simulations. The three hydraulic parameters evaluated (pressure, flow velocity and steam fraction) showed an expected behavior, confirming the potential of using CFD in the study of the hydrodynamic cavitation phenomenon in a Venturi slit device.

PALAVRAS CHAVES: cavitação hidrodinâmica; CFD; teste de independência de malhas.

INTRODUÇÃO

A cavitação hidrodinâmica pode ser entendida como o fenômeno de formação, crescimento e colapso de microbolhas em um líquido submetido às variações de pressão em virtude de sua passagem por uma restrição, como por exemplo, válvulas, placas de orifícios e tubos Venturi (Jyoti e Pandit, 2004, Gogate e Pandit, 2004). O fenômeno ocorre quando a pressão do fluido na restrição atinge valores abaixo da sua pressão de vapor e, neste instante, há a formação de bolhas (cavidades). A pressão do fluido se recupera à jusante da restrição e as bolhas entram em colapso adiabático, liberando grandes quantidades de energia (pressões entre 100 e 400 Mpa e temperaturas locais entre 10.000 e 14.000 K) (Pawar et al., 2017).

O colapso destas microbolhas em regiões de alta pressão pode causar efeitos adversos tais como: falhas, erosões (Rodio e Congedo, 2003), barulhos, vibrações e redução do tempo de vida das válvulas e bombas hidráulicas (Liang et al., 2016).

A cavitação também pode gerar turbulência e microcirculação do fluido no momento do colapso das cavidades, o que aumenta as taxas de transporte de massa, momento e energia, alterando a cinética de reações. Assim, uma vez que seus efeitos são responsáveis pelo processo de intensificação, a cavitação também é apresentada como uma opção para várias aplicações da engenharia, tais como, tratamento de água e efluentes (Dular et al., 2016, Bagal e Gogate, 2014, Alves et al., 2019), remoção de matéria orgânica natural (Araujo et al., 2020), ruptura de células microbianas (Batista et al., 2017), degradação de corante biológico (Machado et al., 2020, Rajoriya et al., 2017, Rajoriya et al., 2018), efluente de resíduos de curtume (Saxena et al., 2018), entre outros. Além disso, relata-se a aplicação da cavitação hidrodinâmica nos processos de produção, que variam desde a produção de nanoemulsão (Carpenter et al., 2017), síntese de biodiesel (Maddikeri et al., 2014) até o pré-tratamento de biomassa (Hilares et al., 2017).

Embora as pesquisas experimentais que envolvem este fenômeno serem capazes de trazer significativos avanços para a área ambiental, estes somente são possíveis através dos estudos dos parâmetros que influenciam a cavitação, como por exemplo, a geometria dos dispositivos. Por este motivo, é necessário que os estudos experimentais sejam desenvolvidos em conjunto com os estudos numéricos, uma vez que este proporciona o controle da manipulação da geometria e das condições de contorno (Soeira et al., 2020).

Kuldeep e Saharan (2016) estudaram numericamente a cavitação hidrodinâmica em dispositivos Venturi do tipo fenda, circular, elíptico e placa de orifício com um único e múltiplos furos de modo a obter o máximo efeito cavitacional através da otimização de parâmetros de operação e geométricos destes dispositivos. Os resultados mostram que o ângulo divergente ótimo para os dispositivos Venturi é de $6,5^\circ$, a relação de 1:1 e 1:3 entre a altura/diâmetro e comprimento do orifício para os dispositivos Venturi e placa de orifício, respectivamente, garantem a máxima zona cavitacional e as pressões de entrada de 8 e 10 atm garantiram o melhor efeito cavitacional para os dispositivos Venturi elíptico e placa de orifício (simples e múltiplos furos) e dispositivos Venturi fenda e circular, respectivamente.

Cappa et al. (2020) conduziram análises experimentais e numéricas da cavitação hidrodinâmica em placas de orifício. A Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) foi usada para avaliar o fluxo cavitacional nos dispositivos empregando modelos monofásicos e multifásicos e esses modelos foram comparados com os dados experimentais. Os resultados indicaram que o comportamento da cavitação hidrodinâmica não pode ser bem representado em modelo monofásico (erros relativos próximos a 20%), porém pode ser bem representado em modelo multifásico (erros relativos inferiores a 10%).

Soeira et al. (2020) avaliaram, por meio de CFD, a influência da mudança da geometria de um dispositivo de Venturi sobre o volume de cavidades formadas em sua seção divergente. Os resultados mostraram que o aumento do ângulo divergente de $6,5^\circ$ para $18,5^\circ$ reduziu gradativamente o volume das cavidades de 93 mm^3 para 10 mm^3 .

Com o objetivo de aumentar a compreensão acerca do fenômeno de cavitação hidrodinâmica, o presente trabalho propõe a realização de estudos computacionais de cavitação hidrodinâmica e análise dos parâmetros de pressão de operação, velocidade e fração de vapor em dispositivo Venturi do tipo fenda, usando os modelos multifásicos de CFD para as simulações. Para isso, o escoamento foi mantido em regime permanente e a validação numérica das simulações foi feita a partir dos resultados experimentais obtidos em um sistema de cavitação hidrodinâmica de escala laboratorial.

MATERIAL E MÉTODOS

Os estudos experimentais foram realizados para obter os parâmetros físicos de pressão e vazão média necessários no modelo computacional como dados de entrada.

Um sistema de cavitação hidrodinâmica (Figura 1a) foi construído, em circuito fechado e escala laboratorial, utilizando tubulações e conexões de PVC com diâmetros de 25,4 mm e 38,1 mm. Este sistema apresenta um tanque com capacidade volumétrica de 0,009 m³ seguido de uma válvula coletora de amostra (VA), uma bomba (B1) KSB Hydrobloc P100 (745,7 W) usada para promover o escoamento, três válvulas de controle de escoamento (V1, V2 e V3) posicionadas a jusante da bomba, dispositivo Venturi e uma linha de derivação (by-pass). Além disso, dois medidores de pressão (P1 e P2) foram instalados a montante e a jusante do dispositivo. Em P1 foi usado um controlador digital PCT-400Ri + Full Gauge com faixa de medição de 0-3,44 kPa e resolução de 10 kPa. Já em P2, foi utilizado um piezômetro com resolução de 10⁻³ m e unidade em mH₂O. Adicionalmente, um trocador de calor (TC) foi inserido no tanque para controlar a temperatura do sistema.

O dispositivo Venturi do tipo fenda (Figura 1b) foi confeccionado em material acrílico transparente e consiste principalmente de três seções: a seção de convergência, constrição e divergência. O dispositivo possui 186,85 mm de comprimento, sendo 34,0 mm de convergência, 0,85 mm de constrição e 152,0 mm de divergência. As seções de convergência e divergência possuem angulações de 22,5° e 5,5°, respectivamente. Além disso, a área da seção transversal da entrada e saída é de 900 mm² (30,0 x 30,0 mm) e da constrição é de 6,97 mm² (0,85 x 8,2 mm).

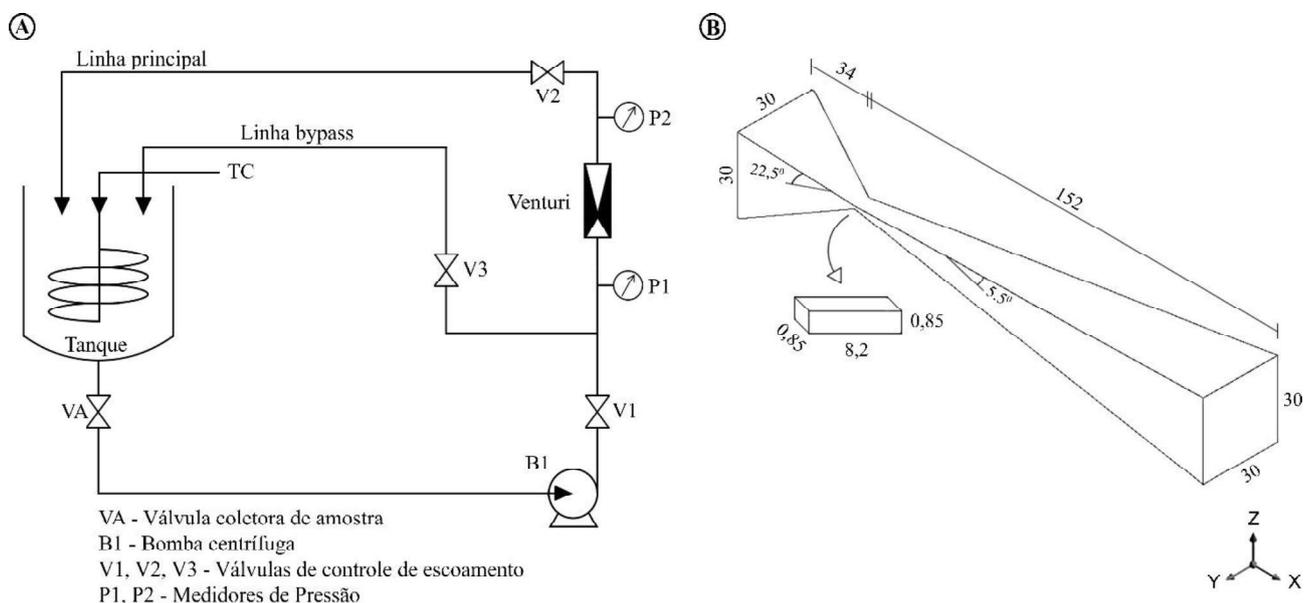


Figura 1. A – Sistema de cavitação hidrodinâmica. B – Venturi e suas dimensões (mm).

A descrição das condições hidráulicas estabelecidas no sistema de cavitação hidrodinâmica é mostrada na Tabela 1. Nota-se que os experimentos foram realizados com água da torneira. No total, foram realizados cinco experimentos variando a pressão de operação, pressão de saída e vazão média. A vazão foi medida em placa de orifício que foi previamente calibrada (coeficiente de vazão $C_d = 0,70$).

Tabela 1. Condições hidráulicas estabelecidas no sistema de cavitação hidrodinâmica.

Experimentos	Q _{média} [m ³ /s]	P1 [kPa]	P2 [kPa]
1	2,30×10 ⁻⁴	540	6,6
2	2,11×10 ⁻⁴	420	6,3
3	2,12×10 ⁻⁴	350	6,2
4	1,88×10 ⁻⁴	270	6,1
5	1,58×10 ⁻⁴	200	5,9

As equações de Navier-Stokes da média de Reynolds e equações de modelo turbulento são utilizadas para prever o fluxo médio de cavitação e resolver a viscosidade turbulenta, respectivamente (Li et al., 2017). Essas equações necessitam de certos ajustes quando múltiplas fases são consideradas nos estudos. Por isso, são empregadas as equações da continuidade e momento que governam o fluxo e são capazes de realizar esses ajustes.

Tendo o fluido caracterizado por duas fases, água líquida e vapor de água, o modelo de mistura para as simulações é utilizado (Equação 1)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \times (\rho_m \vec{V}_m) = 0 \quad [1]$$

Em que \vec{V}_m é a velocidade média:

$$\vec{V}_m = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{V}_k}{\rho_m} \quad [2]$$

E ρ_m é a densidade da mistura:

$$\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \quad [3]$$

Em que n representa o número de fases e α_k representa a fração de volume da fase k.

A soma das equações do momento de cada fase resulta a equação global de momento, dada por:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \vec{V}_m) + \nabla \times (\rho_m \vec{V}_m \vec{V}_m) = -\nabla P + \nabla \times [(\mu_m + \mu_t) (\nabla \vec{V}_m + \nabla \vec{V}_m^T)] \quad [4]$$

Em que μ_m é a viscosidade da mistura:

$$\mu_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \mu_k \quad [5]$$

O modelo k-ε Realizável foi adotado para a resolver a viscosidade turbulenta, uma vez que este modelo é adequado para fluidos multifásicos de alta velocidade contendo circulação e separação de fases (Ashrafizadeh e Ghassemi, 2015).

A equação do transporte de vapor foi utilizada para resolver a transferência de massa entre o líquido e o vapor (condensação e evaporação):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha \rho_v) + \nabla \times (\alpha \rho_v \vec{V}_v) = R_e - R_c \quad [6]$$

Em que \vec{V}_v , ρ_v , α , e v são representantes da velocidade da fase de vapor, densidade do vapor, fração de volume do vapor e fase do vapor, respectivamente. R_e e R_c são variáveis da transferência de massa relacionados ao crescimento e colapso das bolhas de vapor e são responsáveis pela transferência de massa da fase líquido-vapor na cavitação.

O modelo Schnerr-Sauer foi adotado para resolver a transferência de massa da fase líquida para a fase vapor e seus termos são:

Quando $P_v \geq P_l$

$$R_e = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho} \alpha (1 - \alpha) \frac{3}{\mathfrak{R}_B} \sqrt{\frac{2(P_v - P)}{3 P_l}} \quad [7]$$

Quando $P_v \leq P_l$

$$R_c = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho} \alpha (1 - \alpha) \frac{3}{\mathfrak{R}_B} \sqrt{\frac{2(P - P_v)}{3 P_l}} \quad [8]$$

Em que ρ_l , P_v , e P representam a densidade do líquido, pressão de vapor e pressão local, respectivamente. Além disso, é utilizado a equação de Rayleigh-Plesset que representa o crescimento de uma única bolha de vapor em um líquido de raio \mathfrak{R}_B (Ashrafizadeh e Ghassemi, 2015).

O estudo computacional foi desenvolvido através da plataforma Ansys Inc., ferramenta *Fluent*, versão 14.0, considerando um solver 3D baseado em pressão e calculando as equações em regime permanente. O Venturi (Figura 1b) foi construído em 3D no software ANSYS DesignModeler e, em seguida, utilizando o software ANSYS Meshing, uma malha de elementos hexaédricos finitos foi aplicado no dispositivo (Figura 2). Nota-se que foi adicionado às extremidades do dispositivo uma tubulação de 30 mm de comprimento a fim de minimizar a influência da instabilidade numérica.

Foi realizado o teste de independência de malhas para determinar a quantidade de elementos que formaram a estrutura da geometria. Neste teste, o parâmetro físico vazão foi utilizado como critério de análise e validação das simulações. Além disso, alguns parâmetros foram fixados, dentre eles: pressão de entrada e saída (540 e 7,5 kPa, respectivamente), pressão de vaporização da água (3,54 kPa), intensidade de turbulência (5%) e diâmetro hidráulico (0,03 m), densidade e viscosidade da água líquida (998,2 Kg/m³ e 0,001003 Kg/m s, respectivamente) e do vapor de água (0,5542 Kg/m³ e 0,0000134 Kg/ms, respectivamente).

Foi adotado o modelo multifásico de mistura, sem velocidade de deslizamento e o modelo de turbulência $k-\epsilon$ realizável com função de parede padrão. Para a cavitação foi utilizado o modelo Schnerr-Sauer, com pressão de vaporização constante em 3540 Pa e densidade do número de bolhas definida em 10^{13} . O esquema de volume de controle foi escolhido para resolver as equações de continuidade e momento. O algoritmo SIMPLEC foi aplicado para resolver o acoplamento pressão-velocidade. A discretização espacial para o gradiente foi a de célula baseada em mínimos quadrados, enquanto que para a pressão foi utilizado o esquema de interpolação PRESTO!. Para as equações escalares de momento, energia cinética turbulenta e taxa de dissipação turbulenta, empregou-se o esquema second order upwind. Já para a equação de fração de volume, aplicou-se o esquema first order upwind.

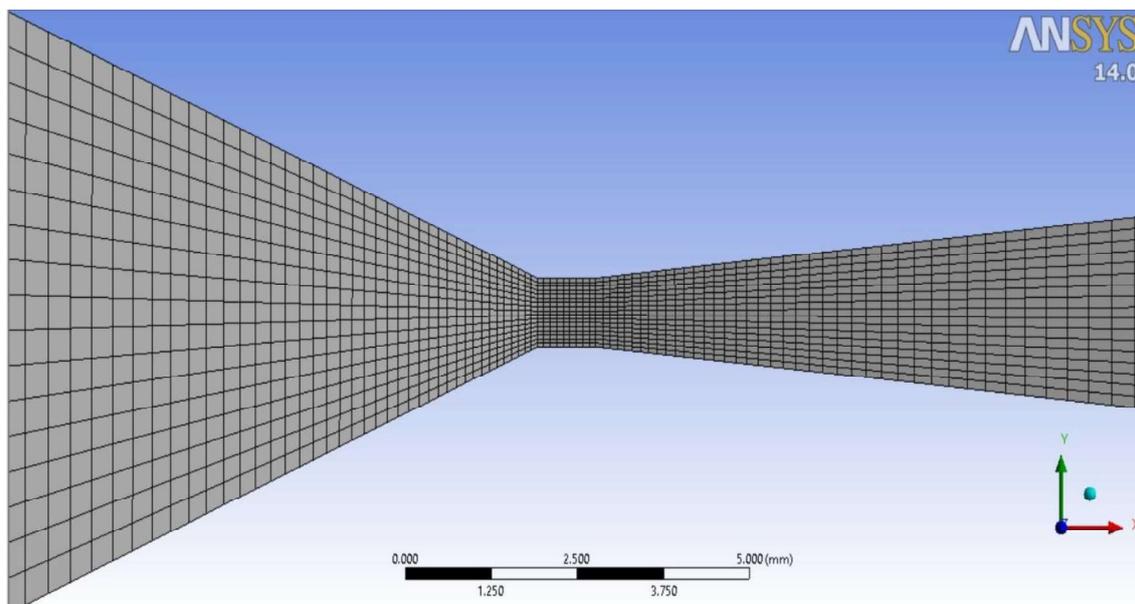


Figura 2. Zoom da vista frontal do dispositivo Venturi com aplicação da malha definida por elementos hexaédricos.

Após a determinação da malha independente, foi realizado o estudo da influência das paredes do dispositivo Venturi na convergência das soluções numéricas. De acordo com o software Ansys (2011), os fluxos turbulentos são significativamente afetados pela presença de paredes, pois o campo de velocidade médio é afetado pela condição de deslizamento que deve ser satisfeita na parede. No entanto, a turbulência também é alterada pela presença da parede de maneiras não triviais. Perto da parede, o amortecimento viscoso reduz as flutuações da velocidade tangencial, enquanto o bloqueio cinemático reduz as flutuações normais.

Portanto, o estudo da influência das paredes é essencial pois afeta significativamente a fidelidade das soluções numéricas uma vez que as paredes são as principais fontes de vorticidade e turbulência média. Assim, uma representação precisa do fluxo na região próxima da parede determina as previsões bem-sucedidas de fluxos turbulentos.

Após a determinação da malha independente e do tipo de tratamento aplicado nas paredes do dispositivo, as simulações computacionais foram realizadas para cada experimento da Tabela 1, mantendo-se iguais todos os demais parâmetros atribuídos no teste de independência de malhas.

Alguns procedimentos foram adotados de modo a garantir convergência e precisão nos resultados simulados:

1. Os valores de vazão de entrada e saída foram verificados a cada iteração para certificar que ambas sejam iguais (Conservação da Massa);
2. O volume de vapor formado foi verificado a cada iteração para garantir que houve convergência numérica;
3. As iterações foram desenvolvidas até que todos os parâmetros residuais permanecessem próximos de um valor constante no decorrer das iterações.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3 mostra o teste de independência de malhas, relacionando a vazão média e a densidade de elementos finitos do dispositivo Venturi. Nota-se um total de dez simulações com densidades variando entre 0,5 a 1,51 elementos/mm³. Observa-se que o aumento na densidade de elementos promove a estabilização da vazão em, aproximadamente, $2,2 \times 10^{-4}$ m³/s e que é identificado a malha independente com densidade igual ou superior a 0,91 elementos/mm³. A malha com 1,31 elementos/mm³ foi adotada para as simulações subsequentes deste trabalho por se tratar de uma malha de melhor qualidade em relação a de 0,91 elementos/mm³ e com custo computacional intermediário.

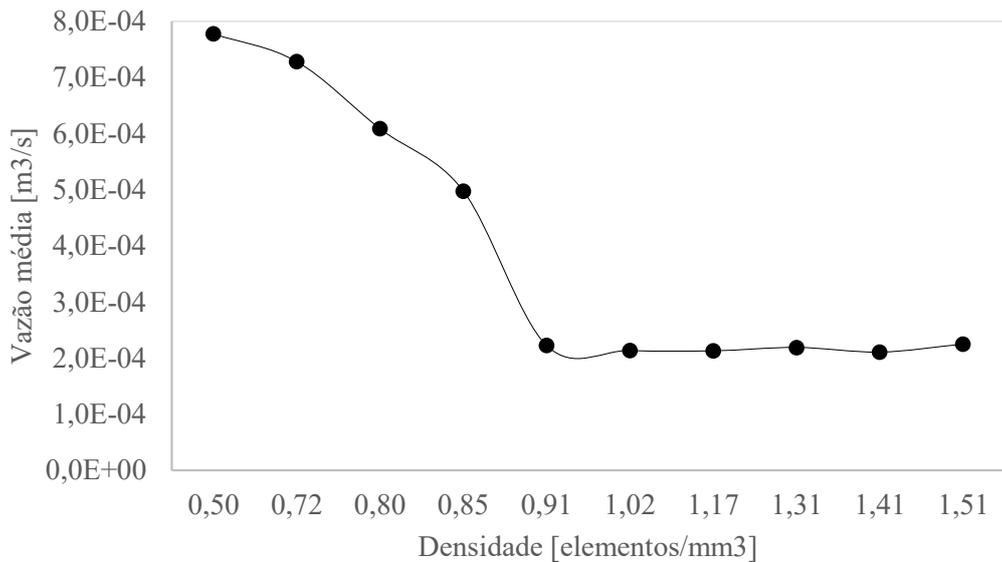


Figura 3. Teste de independência de malhas.

Uma vez que é adotado o regime de escoamento permanente, não há variação no desnível geométrico e as dimensões de entrada e saída do aparato são idênticas, esperava-se idealmente, que os valores de vazão de entrada e saída do Venturi fossem idênticos. Porém, tratando-se de simulações computacionais envolvendo cálculos numéricos complexos, era esperado que ocorresse algumas variações nos resultados de alguns parâmetros, como é o caso da Vazão.

Sendo assim, as funções de parede descritas anteriormente são de extrema importância para a redução das variações nos valores de vazão de entrada e saída. Então, foi estudado na malha independente todas as funções de parede que o programa oferece.

A Figura 4 apresenta os resultados do tratamento próximo à parede em função da variação entre os valores de vazão de entrada e de saída do dispositivo Venturi. Observa-se que apesar das funções de parede influenciarem nos resultados das simulações, a função de parede com maior variação entre as vazões de entrada e saída não ultrapassou 2,5% (Não-equilíbrio). Este valor pode ser justificado pela boa qualidade da malha empregada inicialmente. A função que teve menor variação e, portanto, a que foi utilizada para as próximas simulações foi a função de parede aprimorada.

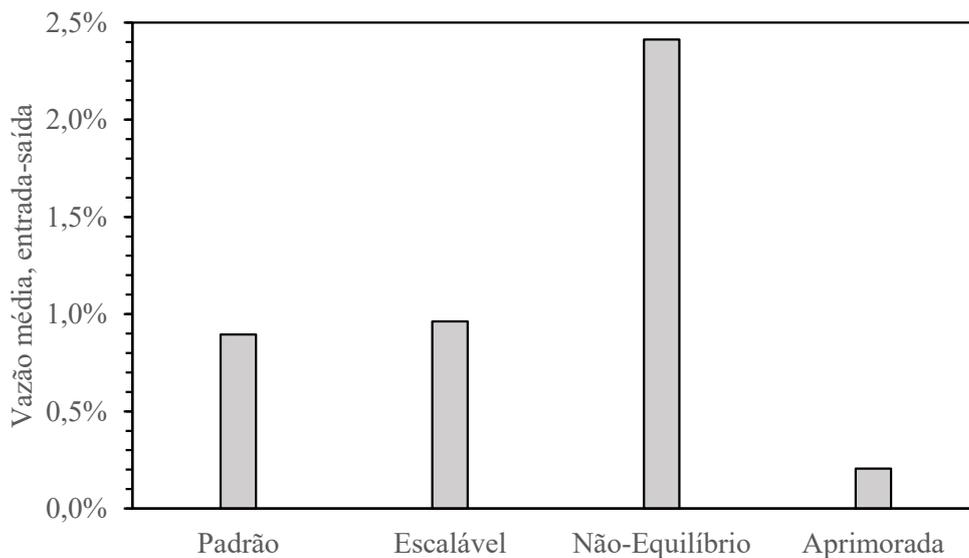


Figura 4. Tipos de tratamento próximo à parede do dispositivo Venturi

Na Figura 5a, 5b e 5c são apresentados os perfis longitudinais de pressão, velocidade e fração de vapor, respectivamente. É possível observar o mesmo comportamento para todas as simulações, evidenciando uma queda da pressão na seção convergente do Venturi, seguido de um aumento na velocidade e formação de vapor. Já após a constrição e durante a seção divergente, a pressão é recuperada seguido de redução na velocidade e fração de vapor, resultando no colapso das microbolhas geradas.

Além disso, é evidenciado que quanto maior a pressão aplicada na entrada do dispositivo, maior é o intervalo necessário para sua recuperação e maior também é a magnitude da velocidade e os valores máximo de fração de vapor. Estes resultados também são encontrados nos trabalhos de Bashir et al. (2011), Kuldeep e Saharan (2016), Cappa et al. (2020), Soeira et al. (2020).

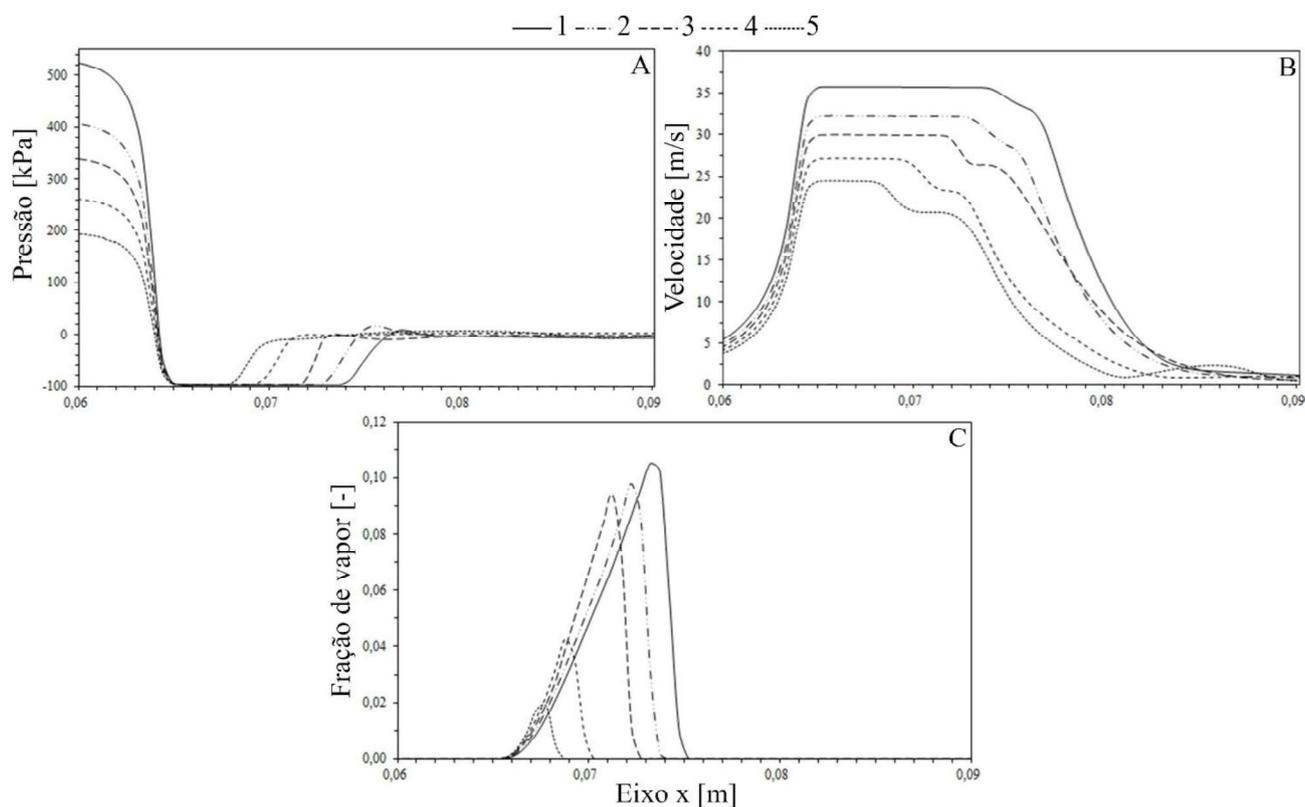


Figura 5. Perfis de Pressão (A), velocidade (B) e fração de vapor (C).

CONCLUSÃO

O presente trabalho realizou estudos computacionais do fenômeno de cavitação hidrodinâmica em aparato Venturi fenda de modo a validar numericamente as condições hidráulicas estabelecidas experimentalmente no sistema de cavitação hidrodinâmica. Para isso, foi realizado o teste de independência de malhas juntamente com os estudos de funções de parede para dar continuidade as simulações. O comportamento do fenômeno pôde ser evidenciado através dos estudos de perfil longitudinal de pressão, velocidade e fração de vapor. Os estudos computacionais envolvendo o fenômeno de cavitação hidrodinâmica podem trazer uma maior sensibilidade para a pesquisa experimental e a possibilidade de empregar as simulações computacionais na otimização geométrica dos dispositivos cavitacionais de modo a aumentar a eficiência do fenômeno e/ou redução de custos energéticos.

AGRADECIMENTOS

“O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, agradeço também ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - ProfÁgua, Projeto CAPES/ANA AUXPE N°. 2717/2015, pelo apoio técnico científico aportado até o momento”

REFERÊNCIAS

- Alves, P. H. L.; Silva, P. S. L.; Ferreira, D. C.; Gonçalves, J. C. S. I.** COD removal from sucrose solution using hydrodynamic cavitation and hydrogen peroxide: a comparison between Venturi device and orifice plate. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. 2019;24:1-8.
- Ansys, Inc.** (2011). "ANSYS FLUENT User's Guide". Canonsburg, Pa: Ansys, November 2011, pp. 1-2498.
- Araujo, M. N. de, Soeira, T. V. R., Poletto, C., Rezende, E. G. F. de, Cappa, O. A. P., Ferreira, D. C., Rocha, V. C., Gonçalves, J. C. de S. I.** (2020). "Removal of Natural Organic Matter in Waters Using Hydrodynamic Cavitation and Hydrogen Peroxide (HC-H₂O₂)". *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, Vol. 24, Ed. Especial, e29, 2020.
- Ashrafizadeh, S. M., Ghassemi, H.** (2015). "Experimental and numerical investigation on the performance of small-sized cavitating venturis". *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 42, April 2015, pp. 6-15.
- Bagal, M. V., Gogate, P. R.** (2014). "Degradation of diclofenac sodium using combined processes based on hydrodynamic cavitation and heterogeneous photocatalysis". *Ultrasonics Sonochemistry*, Vol. 21, No. 3, May 2014, pp. 1035-1043.
- Bashir, T. A., Soni, A. G., Mahulkar, A. V., Pandit, A. B.** (2011). "The CFD driven optimisation of a modified venturi for cavitation activity". *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 89, No. 6, March 2011, pp. 1366-1375.
- Batista, M. D., Anê, A. C. B. M., Gonçalves, J. C. de S.I.** (2017). "Use of hydrodynamic cavitation for algae removal: effect on the inactivation of microalgae belonging to genus *Scenedesmus*". *Water, Air, & Soil Pollution*, Vol. 228, No. 11, November 2017, pp. 1-8.
- Cappa, O. A. P., Soeira, T. V. R., Simões, A. L. A., Lopes, J. G. B., Gonçalves, J. C. de S. I.** (2020). "Experimental and computational analyses for induced cavitating flows in orifice plates". *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 37, No. 1, pp. 89-99.
- Carpenter, J., George, S., Saharan, V. K.** (2017). "Low pressure hydrodynamic cavitating device for producing highly stable oil in water emulsion: Effect of geometry and cavitation number". *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, Vol. 116, June 2017, pp. 97-104.
- Dular, M., Griessler-Bulc, T., Gutierrez-Aguirre, I., Heath, E., Kosjek, T., Klemenčič, A. K., Oder, M., Petkovšek, M., Rački, N., Ravnikar, M.** (2016). "Use of hydrodynamic cavitation in (waste)water treatment". *Ultrasonics Sonochemistry*, Vol. 29, March 2016, pp. 577-588.
- Gogate, P. R., Pandit, A. B.** (2004). "A review of imperative technologies for wastewater treatment I: oxidation technologies at ambient conditions". *Advances in Environmental Research*, Vol. 8, No. 3-4, March 2004, pp. 501-551.
- Hilares, R. T., Almeida, G. F. de, Ahmed, M. A., Antunes, F. A. F., Silva, S. S. da, Han, J., Santos, J. C. dos.** (2017). "Hydrodynamic cavitation as an efficient pretreatment method for lignocellulosic biomass: a parametric study". *Bioresource Technology*, Vol. 235, July 2017, pp. 301-308.
- Jyoti, K. K., Pandit, A. B.** (2004). "Ozone and cavitation for water disinfection". *Biochemical Engineering Journal*, Vol. 18, No. 1, April 2004, pp. 9-19.
- Kuldeep, Saharan, V. K.** (2016). "Computational study of different venturi and orifice type hydrodynamic cavitating devices". *Journal of Hydrodynamics*, Vol. 28, No. 2, April 2016, pp. 293-305.
- Li, X., Huang, B., Chen, T., Liu, Y., Qiu, S., Zhao, J.,** (2017). "Combined experimental and computational investigation of the cavitating flow in an orifice plate with special emphasis on surrogate-based optimization method". *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 31, No. 1, January 2017, pp. 269-279.
- Liang, J., Luo, X., Liu, Y., Li, X., Shi, T.** (2016). "A numerical investigation in effects of inlet pressure fluctuations on the flow and cavitation characteristics inside water hydraulic poppet valves". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 103, No. 1, July 2016, pp. 684-700.
- Machado, P. R., Soeira, T. V. R., Pagan, F. de S., Malpass, G. R. P., Gonçalves, J. C. de S. I., Ferreira, D. C.** (2020). "Synergistic bromothymol blue dye degradation with hydrodynamic cavitation and hydrogen peroxide (HC-H₂O₂)". *Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, Vol. 15, No.3, June 2020, pp. 1-14.
- Maddikeri, G. L., Gogate, P. R, Pandit AB.** (2014). "Intensified synthesis of biodiesel using hydrodynamic cavitation reactors based on the interesterification of waste cooking oil". *Fuel*, Vol. 137, December 2014, pp. 285-292.
- Pawar, S. K., Mahulkar, A. V., Pandit, A. B., Roy, K., Moholkar, V. S.** (2017). "Sonochemical effect induced by hydrodynamic cavitation: comparison of venturi/orifice flow geometries". *Aiche Journal*, Vol. 63, No. 10, June 2017, pp. 4705-4716.

- Rajoriya, S., Bargole, S., George, S., Saharan, V. K.** (2018). "Treatment of textile dyeing industry effluent using hydrodynamic cavitation in combination with advanced oxidation reagents". *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 344, February 2018, pp. 1109-1115.
- Rajoriya, S., Bargole, S., Saharan, V. K.** (2017). "Degradation of reactive blue 13 using hydrodynamic cavitation: Effect of geometrical parameters and different oxidizing additives". *Ultrasonics Sonochemistry*, Vol. 37, July 2017, pp. 192-202.
- Rodio, M.G. and P.M. Congedo** (2003). "Robust analysis of cavitating flows in the Venturi tube". *European Journal of Mechanics - B/fluids*, Vol. 44, No. 1, November 2003, pp. 88-99.
- Saxena, S., Saharan, V. K., George S.** (2018). "Enhanced synergistic degradation efficiency using hybrid hydrodynamic cavitation for treatment of tannery waste effluent". *Journal of Cleaner Production*, Vol. 198, October 2018, pp. 1406-1421.
- Soeira, T. V. R., Lopes Junior, G. B., Poletto, C., Gonçalves, J. C. de S. I.** (2020). "Quantitative characterization of volume of cavities in hydrodynamic cavitation device using computational fluid dynamics". *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, Vol. 24, Ed. Especial, e28, 2020.