

## I-158 - ESTUDO COMPUTACIONAL E EXPERIMENTAL DO FENÔMENO DE CAVITAÇÃO HIDRODINÂMICA POR MEIO DE PLACAS DE ORIFÍCIOS

### **Otávio Augusto Puglieri Cappa**<sup>(1)</sup>

Engenheiro Ambiental pela Universidade Federal do Triângulo Mineiro (2016). Atualmente é graduando em Engenharia Civil e mestrando no Programa de Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade Federal do Triângulo Mineiro.

### **Thiago Vinícius Ribeiro Soeira**<sup>(2)</sup>

Graduando em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal do Triângulo Mineiro.

### **Guilherme Barbosa Lopes Junior**<sup>(3)</sup>

Graduado em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Alagoas (2009), mestrado em Ciências pelo Departamento de Hidráulica e Saneamento e doutorado em ciências pelo Departamento de Engenharia Mecânica pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP).

### **Julio Cesar de Souza Inácio Gonçalves**<sup>(4)</sup>

Graduado (2006) em Engenharia Ambiental no Instituto de Ensino Superior COC, mestrado (2009) e doutorado (2012) em Engenharia Hidráulica e Saneamento na Universidade de São Paulo (USP).

**Endereço**<sup>(1)</sup>: Rua Episcopal, 564, apto 901, bloco 3- Mercês – Uberaba – MG – CEP: 38060-050 – Brasil – Tel: (34) 99162-7296 – e-mail: otavio.puglieri@gmail.com

**Endereço**<sup>(2)</sup>: Rua Antônio Borges de Araújo, 465, Mercês – Uberaba – MG - CEP: 38060-050 – Brasil – Tel: (34) 99120-3850 – e-mail: tvribeiro88@hotmail.com

**Endereço**<sup>(3)</sup>: Avenida Doutor Randolpho Borges Júnior, 1250, Univerdecidade – Uberaba – MG – CEP: 38060-050 - Telefone: (34) 33185600 – e-mail: lopesjunior.gb@gmail.com

**Endereço**<sup>(4)</sup>: Avenida Doutor Randolpho Borges Júnior, 1250, Univerdecidade – Uberaba – MG – CEP: 38060-050 - Telefone: (34) 33185600 – e-mail: sig.julio@gmail.com.

## RESUMO

A maioria dos estudos voltados ao fenômeno cavitacional, aplicado a síntese de compostos e degradação de poluentes, ainda é realizado apenas por vertentes experimentais. Com o intuito de otimizar e alcançar um maior entendimento do fenômeno, o presente trabalho busca a validação do modelo computacional diante de resultados experimentais. Em bancada, foram medidas 13 diferentes pressões de entrada e saída aplicadas em um aparato cavitacional de placas de orifício. Para o procedimento de validação foi feito o estudo de independência de malhas para averiguação da malha ideal à ser aplicada. Para cada faixa de pressão experimental foi implementado o modelo monofásico turbulento  $k-\omega$  SST, com regime permanente à uma geometria com malha tetraédrica de 0,17 elem/mm<sup>3</sup>. Observou-se que para faixas de pressão em que não há a ocorrência do fenômeno cavitacional, o modelo se aproxima aos resultados experimentais, com erro relativo de 5%. Porém, quando as faixas de pressão atingem a grandeza necessária para ocorrência do fenômeno cavitacional, o modelo monofásico utilizado não se assemelha bem à formação da fase vapor e o erro relativo chega a valores de quase 18%. Mesmo com os erros relativos apresentados, foram observados resultados positivos quanto aos perfis de pressão, semelhantes aos obtidos por SAHARAN (2011). Desta forma, foi possível criar um bom prognóstico de futuras simulações aplicadas ao modelo bifásico.

**PALAVRAS-CHAVE:** Cavitação hidrodinâmica, Simulação computacional, Teste de independência de malhas, Validação.

## INTRODUÇÃO

A cavitação hidrodinâmica é um fenômeno causado pela variação de pressão em diferentes seções de um escoamento (GOGATE, 2007). O fenômeno baseia-se na geração, crescimento e implosão de microbolhas, e a decorrente formação de picos de alta pressão e temperatura (GOGATE, 2002).

A dinâmica do fenômeno pode ser resumida pelo escoamento de um líquido por uma restrição, como é o caso de orifícios e tubos Venturi (GOGATE e PANDIT, 2001). Quando o líquido passa pela restrição, a velocidade do escoamento aumenta e, consecutivamente, a pressão cai. Com a queda da pressão abaixo da

pressão de vapor do líquido, inicia-se a formação das microbolhas. Conforme o prolongamento da zona de baixa pressão, as microbolhas tendem a crescer e, nos piores casos, a se aglomerarem (ARROJO e BENITO, 2007). A partir da recuperação da pressão, após a região da constrição, as microbolhas implodem e liberam energia, principalmente, em forma de calor e pressão. (BASHIR et al., 2011).

Devido à capacidade de gerar um ambiente inóspito, a cavitação surgiu com grande importância em diversas áreas de estudo, como são os casos de desinfecção (ARROJO, BENITO E TARIFA, 2007), de síntese de biodiesel (GHAYAL, PANDIT e RATHOD, 2013), do tratamento de efluentes (BHANDARI, SOROKHAIBAM e RANADE, 2016), da degradação de substâncias (CAPOCELLI, 2014) e da produção de papel (BADVE et al., 2014).

Paralelamente aos estudos experimentais, a cavitação também possui estudos voltados às vertentes numéricas e computacionais. A maioria dos estudos baseiam-se na aplicação da Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), como a obra apresentada por Bashir e colaboradores (2011), que teve como objetivo otimizar as dimensões do tubo Venturi, de modo a potencializar o fenômeno cavitacional.

Recentemente, ambas as vertentes têm produzido resultados relevantes. Tao e colaboradores (2016) desenvolveram um estudo teórico do fenômeno, os principais reatores utilizados, os parâmetros passíveis de otimização, as estratégias de intensificação, além de outros fatores econômicos e energéticos do sistema. Porém, no estudo é apontada a necessidade da realização de mais aplicações experimentais auxiliadas por simulações numéricas, afim de que haja uma melhor condução da análise e interpretação dos resultados.

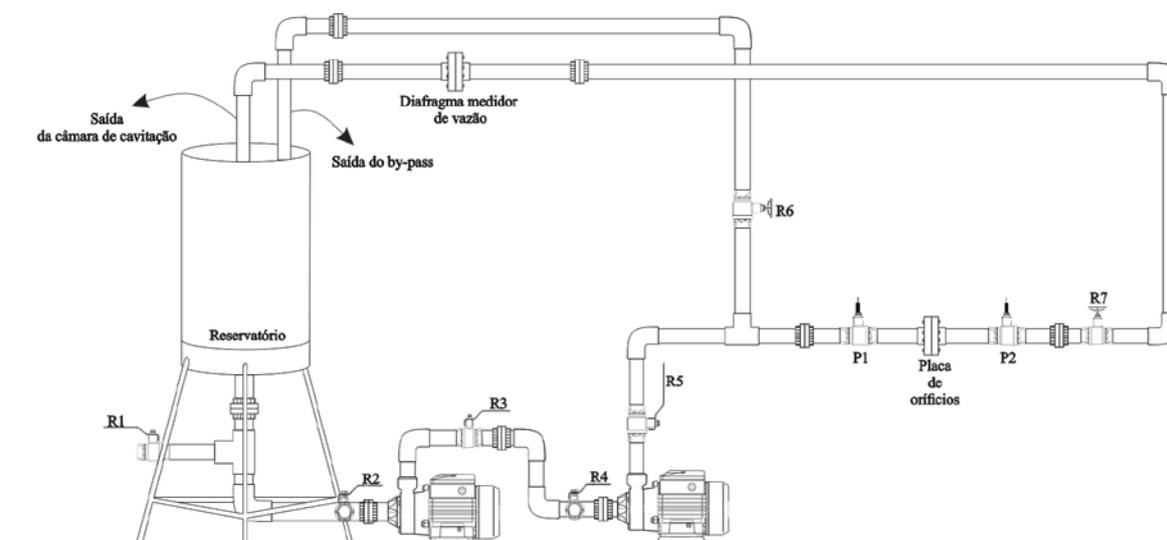
A recomendação feita tem total fundamento por realmente existirem poucos estudos que abordem ambas as metodologias. Apenas em um recente estudo são abordados ambos os métodos (LI et al., 2017). Eles apresentam em seu trabalho a combinação entre a investigação experimental e computacional da cavitação hidrodinâmica em placa de orifícios, com ênfase em métodos de otimização.

Com base na recomendação feita por Tao e colaboradores (2016) e inspirado no estudo de Li et al. (2017) a proposta do atual trabalho é realizar estudos computacionais e experimentais de fenômeno cavitacional em placas de orifícios, com o objetivo de comparar os resultados e averiguar sua confiabilidade.

## MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia do estudo é dividida em duas partes principais. A primeira se baseia nos procedimentos experimentais e a segunda nos estudos da simulação computacional.

### PRIMEIRA ETAPA: PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS



R – Registros; P – Medidor de pressão

**Figura 1 – Aparato experimental de cavitação hidrodinâmica**

O esquema do aparato de cavitação hidrodinâmica é ilustrado na Figura 1. O sistema resume-se em um reservatório com capacidade de 5 litros, duas bombas centrífugas em série, uma placa de orifício, registros de controle de vazão e medidores de pressão. A tubulação de sucção é conectada na parte inferior do reservatório e ligada diretamente ao sistema de recalque. Após o sistema de bombeamento, o excedente de água volta ao reservatório por um by-pass, regulado pelo registro R6. O by-pass tem como principal função o controle da vazão que entra na câmara de cavitação e a conseqüente regularização da pressão. A câmara de cavitação é composta por uma placa com um orifício de 3 mm de diâmetro e 8 mm de espessura. Antes da entrada e logo após a saída da placa de orifícios foram instalados dois tomadores de pressão, P1 e P2. A montante, um medidor digital (P1) e a jusante, um piezômetro (P2). Foram feitas 13 medidas de pressão e quintuplicatas das vazões correspondentes.

Como o procedimento experimental baseava-se apenas na quantificação das vazões para cada faixa de pressão, garantiu-se que a temperatura da água, 23°C, não se elevasse a partir de um sistema aberto. No qual, a água que enchia o reservatório era advinda da torneira e a recalçada pelo sistema era descartada para fora do aparato pela saída da câmara de cavitação. Antes do início do ensaio garantiu-se o regime permanente do sistema.

## RESULTADOS DA PRIMEIRA ETAPA

Com a aplicação da metodologia descrita anteriormente, obteve-se os seguintes resultados, Quadro 1.

**Quadro 1: Medidas experimentais**

| Medida | P1 [mH <sub>2</sub> O] | P2 [mH <sub>2</sub> O] | Q <sub>médio</sub> [L/s] |
|--------|------------------------|------------------------|--------------------------|
| 1      | 5                      | 0,1134                 | 0,0543±0,0002            |
| 2      | 11                     | 0,2961                 | 0,0759±0,0004            |
| 3      | 23                     | 0,6174                 | 0,1091±0,0005            |
| 4      | 30                     | 0,7308                 | 0,1249±0,0007            |
| 5      | 36                     | 0,8694                 | 0,1303±0,0010            |
| 6      | 48                     | 1,0836                 | 0,1459±0,0012            |
| 7      | 57                     | 1,273                  | 0,1542±0,0012            |
| 8      | 63                     | 1,2460                 | 0,1676±0,0057            |
| 9      | 68                     | 1,3230                 | 0,1705±0,0012            |
| 10     | 72                     | 1,3740                 | 0,1722±0,0023            |
| 11     | 78                     | 1,4770                 | 0,1800±0,0018            |
| 12     | 82                     | 1,5400                 | 0,1829±0,0041            |
| 13     | 87                     | 1,6700                 | 0,1874±0,0031            |

Com resultados obtidos foi possível observar que a vazão do sistema aumentou de acordo com a carga de pressão aplicada a montante do sistema cavitacional (P1). Para valores baixos de vazão, o desvio padrão foi inferior aos demais pela facilidade da medição.

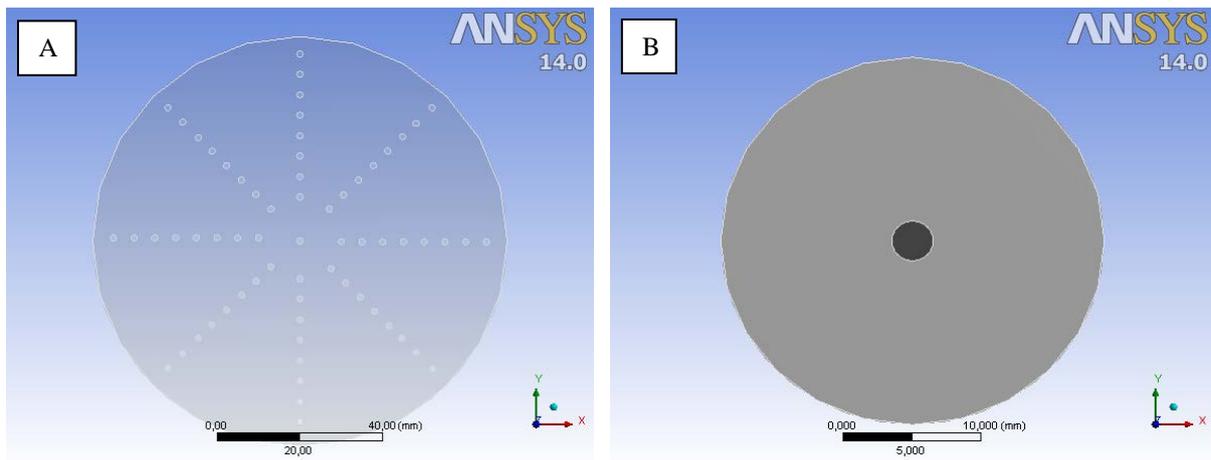
Pode-se observar também a grande quantidade de energia dissipada pelo fenômeno. A energia foi dissipada devido à abrupta redução de diâmetro da seção transversal do escoamento, de 27,8 mm para 3 mm e a alta carga cinética aplicada pelo sistema de bombeamento. A alta carga cinética no estrangulamento gera a queda de pressão no local e o início cavitação hidrodinâmica (GOGATE e PANDIT, 2001)

## SEGUNDA ETAPA: SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Para início do procedimento computacional foram plotadas duas geometrias, Figura 2. Uma direcionada ao teste de independência de malhas e a outra à validação das simulações. As geometrias foram distintas pelo fato do teste de independência ter sido realizado antes da obtenção das dimensões finais da câmara cavitacional.

Como os resultados do teste foram obtidos em função da densidade de elementos, não houve relevância entre a mudança das geometrias.

As simulações foram realizadas no FLUENT 14.0 por meio da aplicação das condições de contorno experimentais e a adoção do modelo turbulento  $k-\omega$  SST. A partir dos valores de pressão de entrada e saída, foram verificadas as vazões do modelo. Com o intuito de minimizar o custo computacional, efetuou-se o teste de independência de malhas e a adoção do modelo monofásico. A validação, por sua vez, foi definida a partir do erro relativo entre os valores experimentais e numéricos.



A – Geometria do teste de independência de malhas; B – Geometria do teste da validação

**Figura 2: Geometrias utilizadas na etapa de simulação**

### TESTE DE INDEPENDÊNCIA DE MALHAS

As simulações realizadas pela dinâmica de fluídos computacional (CFD) são sensíveis a malha aplicada à geometria em estudo. A malha ideal é aquela que os resultados obtidos pelas simulações não variam significativamente com a mudança do número de elementos (BASHIR et al., 2011).

Deste modo, o teste de independência foi realizado em uma única faixa de pressão (57mH<sub>2</sub>O) para diversas densidade de malhas com geometria tetraédrica, Figura 3. Dentre estas, foram selecionadas três para a análise do perfil de velocidade na câmara, Figura 4.

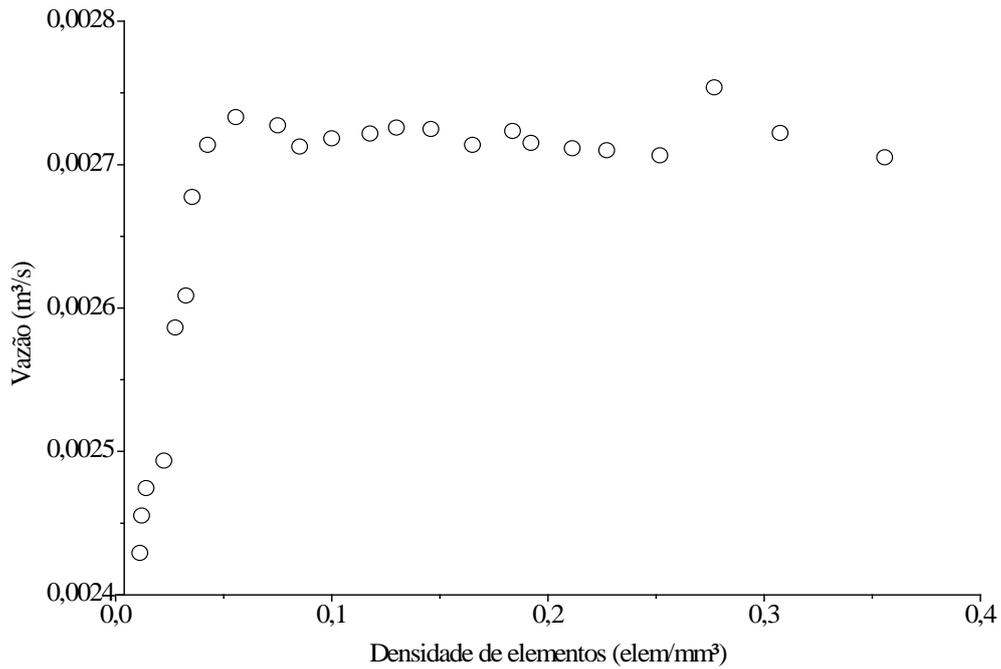


Figura 3: Variação da vazão de acordo com a densidade de elementos aplicada a placa cavitacional

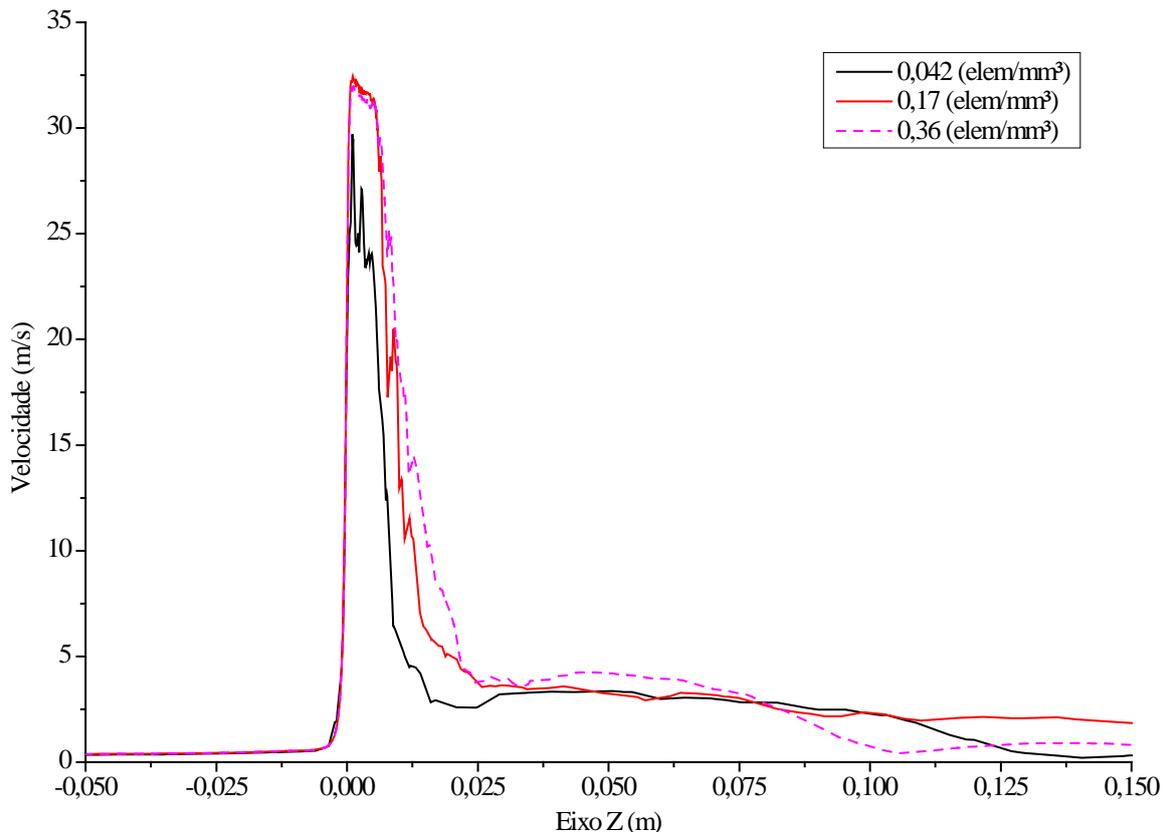


Figura 4: Perfil de velocidade no decorrer da câmara cavitacional

Como descrito anteriormente, a câmara de cavitação do teste de independência foi diferente da utilizada no procedimento experimental. Devido às maiores dimensões da geometria do teste, as vazões apresentadas pela Figura 2 foram superiores às vazões obtidas experimentalmente no Quadro 1.

Na Figura 2 observa-se que as vazões começam a ter menor grau de variação próximos aos valores de 0,0275 m<sup>3</sup>/s, a partir da densidade de 0,05 elementos/mm<sup>3</sup>. Essa estabilidade se deve principalmente a maior robustez da malha quanto a adição de elementos à sua estrutura e ao gradiente de elementos formado entre as seções de maiores e menores dimensões.

Para garantir a confiabilidade do teste de independência, analisou-se os resultados a partir de outro ponto de vista. Verificou-se a velocidade do escoamento no perfil longitudinal da câmara, a partir de três densidades específicas. Uma malha de densidade baixa (0,042 elem/mm<sup>3</sup>), fora do intervalo de estabilização da vazão. Uma intermediária (0,17 elem/mm<sup>3</sup>) e uma elevada (0,36 elem/mm<sup>3</sup>), ambas dentro do intervalo de estabilização.

O perfil de velocidade na Figura 4 apresenta um pico significativo na região 0,000 m. Nesse ponto localiza-se os orifícios da placa. Como essa região possui maior grau de variação de pressão e velocidade devido à placa de orifício, a malha teve um maior refinamento. Deste modo, a Figura 4 buscou trazer um maior enfoque no comportamento das curvas nas proximidades dos orifícios, cinco centímetros a montante e 15 centímetros a jusante.

O comportamento das três curvas se assemelham, porém, a curva com menor densidade de elementos se afasta das demais no pico máximo de velocidade no eixo Z. Já nas regiões onde o escoamento não possuiu grandes variações de pressão e velocidade, a diferença entre os resultados das malhas não foi significativa (BASHIR et al., 2011).

Portanto, os resultados mostram a importância do refinamento da malha nos pontos críticos da simulação e que o uso de baixos valores de densidade de malha não fornece resultados satisfatórios nem para análises gerais (vazão do sistema), nem para verificações pontuais (velocidade nos orifícios).

Como a malha de menor densidade apresentou baixa correlação com as demais, ela foi descartada. A densidade intermediária e a elevada possuíram comportamentos semelhantes, tanto em análises na Figura 3 quanto na análise da Figura 4. Deste modo, a escolha da malha para os testes de validação foi a de 0,17 elem/mm<sup>3</sup>, que com menor custo computacional foi capaz de fornecer valores com acurácia semelhante à densidade de 0,36 elem/mm<sup>3</sup>.

## **VALIDAÇÃO DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL**

A partir da densidade de malha escolhida na etapa de teste de independência, Figura 5, foram realizados os testes de validação da peça. O procedimento foi semelhante ao realizado na etapa anterior. O único procedimento necessário foi a mudança da geometria da peça e a aplicação de todos os pontos de pressão obtidos experimentalmente pelo Quadro 1. Os resultados obtidos foram analisados e o erro relativo para cada faixa de vazão foi quantificado.

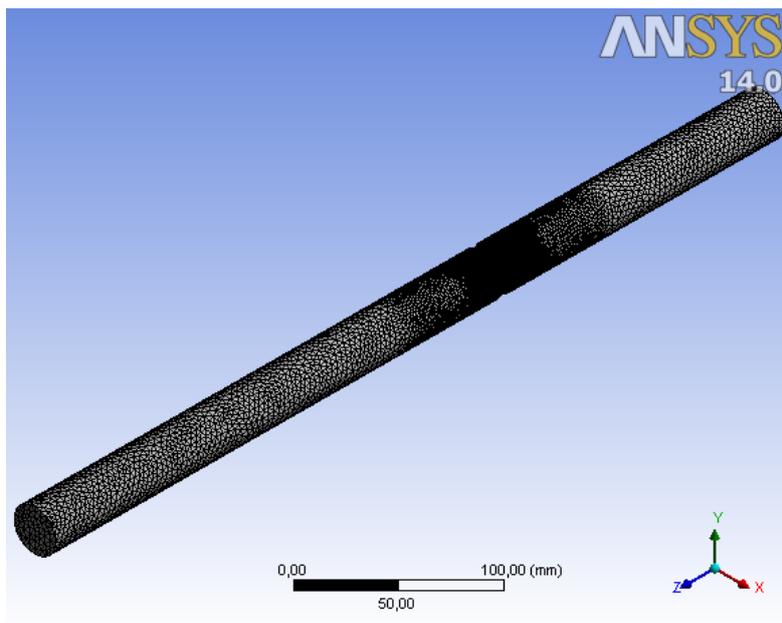


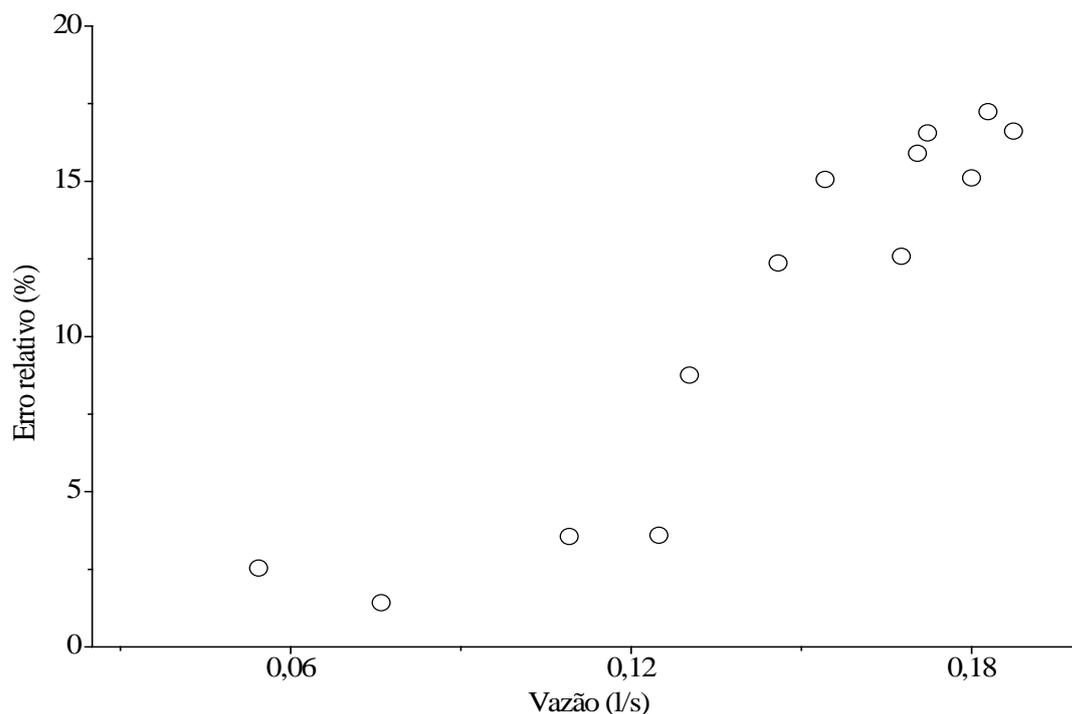
Figura 5: Câmara cavitacional com a malha de 0,17elem/mm<sup>3</sup>

## RESULTADOS DA SEGUNDA ETAPA

A partir das condições aplicadas à peça, os resultados obtidos podem ser observados no Quadro 2 e na Figura 6.

**Quadro 2: Vazões experimentais médias e resultados numéricos**

| P1 [mH2O] | P2 [mH2O] | Q <sub>médio</sub> [l/s] | Q <sub>simulada</sub> [l/s] | Erro <sub>relativo</sub> |
|-----------|-----------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| 5         | 0,1134    | 0,0543±0,0002            | 0,0530                      | 2,53%                    |
| 11        | 0,2961    | 0,0759±0,0004            | 0,0770                      | 1,42%                    |
| 23        | 0,6174    | 0,1091±0,0005            | 0,1130                      | 3,55%                    |
| 30        | 0,7308    | 0,1249±0,0007            | 0,1294                      | 3,59%                    |
| 36        | 0,8694    | 0,1303±0,0010            | 0,1417                      | 8,75%                    |
| 48        | 1,0836    | 0,1459±0,0012            | 0,1640                      | 12,37%                   |
| 57        | 1,273     | 0,1542±0,0012            | 0,1774                      | 15,05%                   |
| 63        | 1,246     | 0,1676±0,0057            | 0,1887                      | 12,58%                   |
| 68        | 1,323     | 0,1705±0,0012            | 0,1976                      | 15,90%                   |
| 72        | 1,374     | 0,1722±0,0023            | 0,2008                      | 16,56%                   |
| 78        | 1,477     | 0,1800±0,0018            | 0,2072                      | 15,10%                   |
| 82        | 1,54      | 0,1829±0,0041            | 0,2145                      | 17,24%                   |
| 87        | 1,67      | 0,1874±0,0031            | 0,2185                      | 16,62%                   |



**Figura 6 – Erro relativo entre dados experimentais e computacionais**

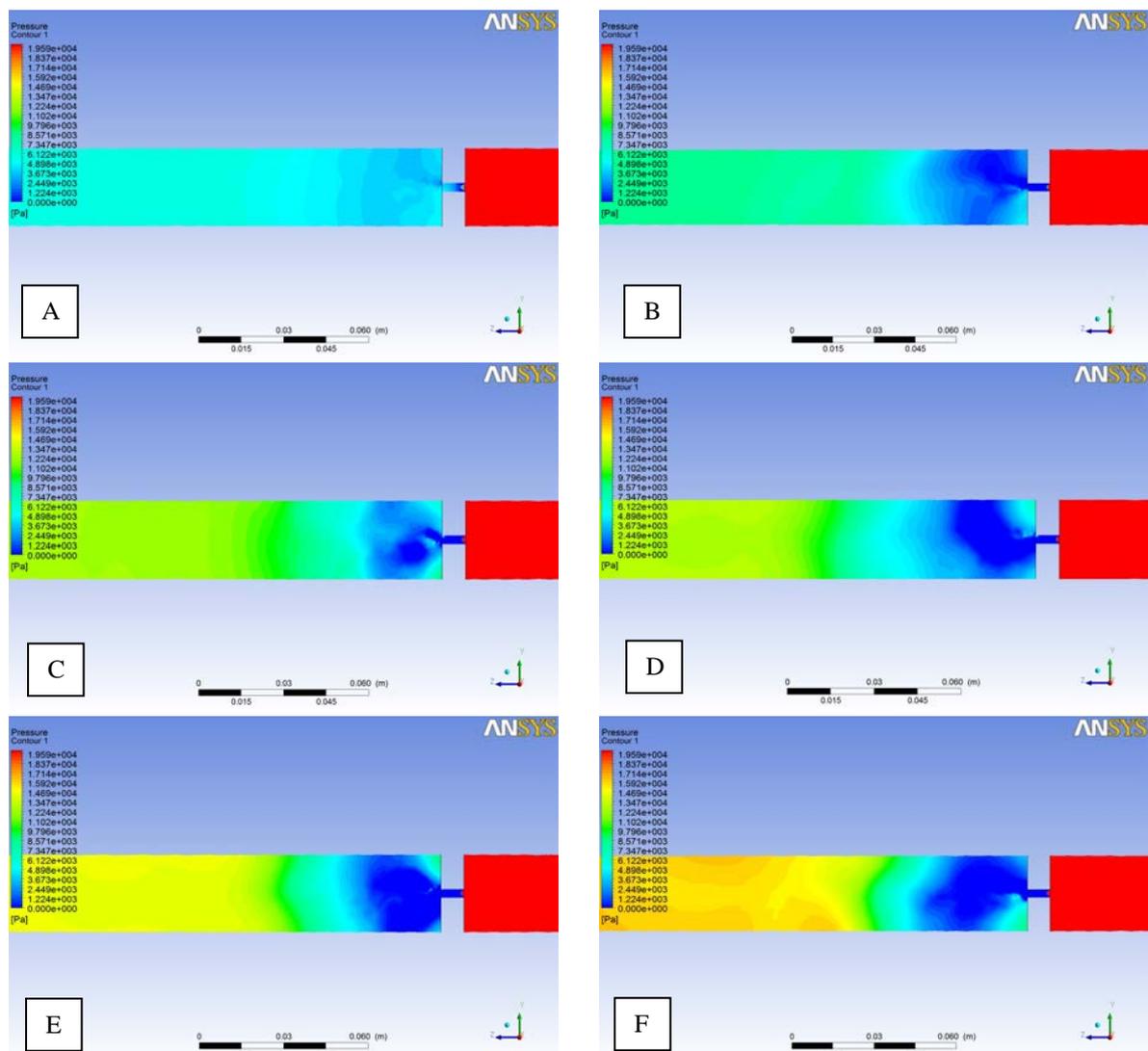
No Quadro 2 e na Figura 6 observam-se que os resultados entre as vazões experimentais e simuladas tem uma aproximação maior para os pontos iniciais de pressão/vazão. A partir da pressão de 36 mH<sub>2</sub>O, o erro relativo começa a aumentar e volta a se estabilizar por volta de 15%, após a pressão de 63 mH<sub>2</sub>O.

O aumento no erro relativo pode estar diretamente ligado à complexidade do fenômeno, principalmente quando as pressões de entrada se aproximam da faixa de pressão necessária para ocorrência da cavitação. Fato que pode ter sido piorado pela adoção do modelo monofásico. Como a aplicação do modelo bifásico necessitaria de um custo computacional maior, tentou-se a simulação dos parâmetros hidrodinâmicos a partir de um modelo mais simples. Porém, quando o fenômeno passa a apresentar duas fases, água líquida e vapor d'água, o modelo monofásico mostra divergências significativas entre o real e o simulado.

Em contrapartida, pode-se afirmar que para sistemas turbulentos em que não há a presença de duas fases, o modelo computacional monofásico se aproxima, com baixo erro relativo, dos dados experimentais, com boa correlação até a faixa de pressão de 30 mH<sub>2</sub>O.

Outro resultado obtido foi a respeito dos perfis de pressão. Observou-se um contínuo desenvolvimento dos perfis conforme o aumento das pressões de entrada do sistema, Figura 7. Os resultados apresentados elucidam que mesmo com a defasagem que modelo monofásico possui, ele é capaz de ilustrar, de maneira coerente, o comportamento das pressões no perfil longitudinal do escoamento. Na Figura 7 observa-se um crescente aumento na extensão da zona de baixa pressão conforme o aumento da pressão de entrada (SAHARAN, 2015). Isso se deve a baixa pressão de vapor atingida pelo escoamento com aplicação de pressões de entrada superiores à 30 mH<sub>2</sub>O. Da mesma forma com que para elevadas pressões de entrada houve a queda de pressão à níveis relativamente baixos, a zona de recuperação de pressão também se estendeu e se tornou mais intensa, como pode ser visto principalmente nas três últimas ilustrações (D, E e F) da Figura 7.

O resultado obtido na Figura 7 gerou um bom prognóstico para simulações aplicadas no bifásico. Espera-se que o modelo bifásico seja capaz de reduzir os erros relativos para altas pressões de entrada, assim como seja capaz de representar, de forma similar ao monofásico, o comportamento dos perfis de pressão. Outro resultado esperado são as estimativas de volume de vapor a sua respectiva correlação com o prolongamento da zona de baixa pressão e sua intensidade.



A - 11 mH<sub>2</sub>O; B- 36 mH<sub>2</sub>O; C- 57 mH<sub>2</sub>O; D - 68 mH<sub>2</sub>O; E – 78 mH<sub>2</sub>O; F – 87 mH<sub>2</sub>O

**Figura 7 – Desenvolvimento dos perfis de pressão conforme o aumento da pressão de entrada**

## CONCLUSÕES

De modo geral, observou-se a importância da realização prévia de um teste de independência de malhas antes dos procedimentos computacionais. Obteve-se, por meio do estudo, uma densidade ótima de 0,17elem/mm<sup>3</sup> para a realização dos testes de validação. Porém, mesmo com uma densidade de malha satisfatória, os resultados numéricos se aproximaram dos experimentais apenas para baixos valores de vazão. Devido ao crescimento do erro relativo e a provável ocorrência do fenômeno cavitacional, ponderou-se o modelo monofásico como principal responsável pela discrepância entre os resultados das etapas de validação.

Mesmo com a discrepância em alguns pontos da validação, foi possível observar o desenvolvimento dos perfis de pressão compatíveis com os observados em literatura, o que trouxe um bom prognóstico do que pode ser obtido quanto à aplicação das simulações ao modelo bifásico.

Para melhorar a representação das vazões em altas pressões de entrada, propõe-se estudos aplicados a modelos bifásicos, de modo a possibilitar a progressiva análise de validação e uma futura otimização e um maior entendimento do fenômeno cavitacional.

## AGRADECIMENTOS

Os autores são extremamente agradecidos à FAPEMIG pelo suporte financeiro.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ARROJO, S., BENITO, Y., TARIFA, A. M. A parametrical study of disinfection with hydrodynamic cavitation. *Ultrasonics Sonochemistry*. Madri, v. 15, p. 903-908, 09 de novembro de 2007.
2. ARROJO, S., BENITO, Y. A theoretical study of hydrodynamic cavitation. *Ultrasonics Sonochemistry*. Madri, v. 15, p. 203-211, 02 de abril de 2007.
3. BADVE, M. P., GOGATE, P. R., PANDIT, A. B., CSOKA, L. Hydrodynamic cavitation as a novel approach for delignification of wheat straw for paper manufacturing. *Ultrasonics Sonochemistry*. Mumbai, India, v. 21, p. 162-168. 2014.
4. BASHIR, T. A., SONI, A. G., MAHULKAR, A. V., PANDIT, A. B. The CFD driven optimisation of a modified venturi for cavitation activity. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. Canadá, v. 89, p. 1366 – 1375, dezembro de 2011.
5. BHANDARI, V. M., SOROKHAIBAM, L. G., RANADE, V. V. Industrial wastewater treatment for fertilizer industry: a case study. *Desalination and Water Treatment*. Lincoln, v. 1, p. 1-11. 09 de julho de 2016.
6. CAPOCELLI, M., PRISCIANDARO, M., LANCIA, A., MUSMARRA, D. Hydrodynamic cavitation of p-nitrophenol: A theoretical and experimental insight. *Chemical Engineering Journal*. Roma, v. 254, p. 1-8. 22 de maio de 2014.
7. GHAYAL, D., PANDIT, A. B., RATHOD, V. K. Optimization of biodiesel production in a hydrodynamic cavitation reactor using used frying oil. *Ultrasonics Sonochemistry*. Mumbai, India, v. 20, p. 322-328, 2013.
8. GOGATE, P. R. Application of cavitation reactions for water disinfection: current status and path forward. *Journal of Environmental Management*. Mumbai, India, v. 85, p. 801-815. 4 de julho de 2007.
9. GOGATE, P. R. Cavitation: an auxiliary technique in wastewater treatment schemes. *Environmental Research*. Mumbai, India, v. 6, p. 335-358, 2002.
10. GOGATE, P.R., PANDIT, A. B.. Hydrodynamic cavitation: A State of the Art Review. *Chemical Engineering*. Mumbai, India, v. 17, p. 1-85, 2001.
11. SAHARAN, V. K. Computational study of different venturi and orifice type hydrodynamic cavitating devices. *Journal of Hydrodynamics*. India, v. 28, p. 293-305. 12 de setembro de 2015.
12. TAO, Y., CAI, J., HUAI, X., LIU, B., GUO, Z. Application of Hydrodynamic Cavitation to Wastewater Treatment. *Chemical Engineering & Technology Journal*. Beijing, v. 39, p. 1363-1376. 13 de abril de 2016.