



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

GUILHERME ALBUQUERQUE MAGALHÃES

**CONSTRUÇÃO E ANÁLISE DE UMA BANCADA DE CAVITAÇÃO
INDUZIDA POR PLACAS DE ORIFÍCIOS**

**Recife
2022**

GUILHERME ALBUQUERQUE MAGALHÃES

**CONSTRUÇÃO E ANÁLISE DE UMA BANCADA DE CAVITAÇÃO
INDUZIDA POR PLACAS DE ORIFÍCIOS**

Trabalho de conclusão do curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Guilherme Barbosa Lopes Júnior

**Recife
2022**

Catálogo na fonte
Bibliotecário Gabriel Luz CRB-4 / 2222

M189c Magalhães, Guilherme Albuquerque.
 Construção e análise de uma bancada de cavitação induzida por placas de
 orifícios / Guilherme Albuquerque Magalhães. 2022.
 63 f: figs., gráfs., tabs.

 Orientador: Prof. Dr. Guilherme Barbosa Lopes Junior.
 TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
 Departamento de Engenharia Mecânica, Recife, 2022.
 Inclui referências e anexo.

 1. Cavitação. 2. Placas de orifício. 3. Tubulações.
 I. Lopes Junior, Guilherme Barbosa (Orientador). II. Título.

UFPE

621 CDD (22. ed.)

BCTG / 2022 - 359

GUILHERME ALBUQUERQUE MAGALHÃES

**CONSTRUÇÃO E ANÁLISE DE UMA BANCADA DE CAVITAÇÃO INDUZIDA POR
PLACAS DE ORIFÍCIOS**

Trabalho de conclusão do curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em: 20/05/2022.

—

BANCA EXAMINADORA

Prof. Guilherme Barbosa Lopes Júnio
Orientador
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Marcus Costa Araújo
Examinador
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Flávio Augusto Bueno Figueiredo
Examinador
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus por ter me dado a graça de viver e por tudo que tenho, mesmo sem merecer.

Agradeço aos meus pais, por me ensinarem a ser uma pessoa educada, ética e que me proporcionaram as melhores condições para que pudesse ter estudo e conhecimento. Além disso, agradeço por me apoiarem e estar comigo em todos os momentos.

Agradeço a minha família, pela companhia em momentos difíceis e pelo bom ânimo.

Agradeço a Aline que esteve em todos os momentos comigo, me dando força me apoiando e me ajudando.

Agradeço à Universidade Federal de Pernambuco e seus professores que tanto me ensinaram a respeito da engenharia. Espero retribuir sua dedicação com bons serviços à sociedade, em particular gostaria de agradecer ao meu orientador pela paciência, dedicação e estímulo para que eu pudesse realizar este trabalho e concluí-lo. Se puder chegar mais longe, foitambém graças a ele.

Agradeço aos meus professores orientadores que se mostraram solícitos e atenciosos em todos os momentos, pelo apoio constante e por buscarem sempre o melhor de mim.

Agradeço a todas as outras pessoas que passaram em minha vida e deixaram sua contribuição pessoal, sempre fundamental na construção e evolução do ser.

RESUMO

A cavitação é um fenômeno que contribui em diversas áreas como na remoção de hormônios, na remoção de bactérias e vírus, em processos oxidativos, na área farmacêutica, entre outros. Esse evento pode ocorrer em condições diferentes, sejam elas bombas e turbinas hidráulicas, em placas de orifício, tubos venturi ou em válvulas parcialmente fechadas, comportando-se distintamente conforme o dispositivo de cavitação ao qual está submetido. Devido a sua peculiaridade, poucos estudos foram desenvolvidos na análise da otimização dos parâmetros geométricos dos dispositivos de cavitação. Dessa forma, o presente trabalho objetivou analisar de forma qualitativa e quantitativa o fenômeno de cavitação a partir da identificação do coeficiente de perda de carga que cada geometria irá causar no sistema.

Palavras-Chave: cavitação; placas de orifício; tubulações.

ABSTRACT

Cavitation is a phenomenon that contributes in several areas such as the removal of hormones, the removal of bacteria and viruses, in oxidative processes, in the pharmaceutical area, among others. This event can occur under different conditions, be they pumps and hydraulic turbines, in orifice plates, venturi tubes or in partially closed valves, behaving differently according to the cavitation device to which it is subjected. Due to its peculiarity, few studies have been developed in the analysis of the optimization of the geometric parameters of the cavitation devices. Thus, the present work aimed to qualitatively and quantitatively analyze the phenomenon of cavitation from the identification of the head loss coefficient that each geometry will cause in the system.

Keywords: cavitation; orifice plates; pipes.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tubulação em ferro fundido.	16
Figura 2 - Bombas volumétricas.....	17
Figura 3 - Bombas de escoamento radial, axial e misto, respectivamente	18
Figura 4 - Diagrama de Moody.	21
Figura 5 – Representação da pressão de vapor sobre o processo de cavitação.	23
Figura 6 - Etapas da cavitação.	25
Figura 7 - Perda de pressão na entrada de uma bomba centrífuga	26
Figura 8 – Efeito da cavitação térmico, químicos, mecânicos ou físicos	28
Figura 9 - Escoamento em placa de orifício.	29
Figura 10 - Tubo venturi.....	30
Figura 11 - Cavitação fluxo em Venturi e orifícios	31
Figura 12 – Comparação dos resultados da remoção de QDO em tubo venturi e placa de orifício	32
Figura 13 - Placas de orifícios (Ambulgekar).	33
Figura 14 - Desenho esquemático da bancada de estudo.....	36
Figura 15 – Início da montagem dos tubos e válvulas	37
Figura 16 – Fixação da flange com o tubo de acrílico.	37
Figura 17 – Cortes dos tubos	38
Figura 18 - Montagem da estrutura parede.....	38
Figura 19 - Configuração dos furos na placa	40
Figura 20 - Condições experimentais das diferentes pressões.....	41
Figura 21 - Perfis da pressão para as diferentes condições de pressão de entrada.....	44
Figura 22 – Vazamento nos flanges	48
Figura 23 – Tubo de PVC e tubo de acrílico	49
Figura 24 - Teste 1. As quais indicam 0,5 0,8, e 1 bar, respectivamente	50

Figura 25 - Imagens do fenômeno da cavitação no teste 2. As quais indicam 0,6, 0,65, 0,75 e 1 bar, respectivamente	52
Figura 26 - Imagens do fenômeno da cavitação no teste 2. As quais indicam 0,5, 0,7, 0,8 e 1 bar, respectivamente	54
Figura 27 - Nuvem de cavitação.	56

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Gráfico da perda de carga em relação ao número de cavitação para o experimento de Cappa (2018).....	42
Gráfico 2 - Gráfico do Número de Cavitação em relação a Perda de Carga para o experimento de Kuldeep (2016).	45
Gráfico 3 - Gráfico do número de caviação em relação a perda de carga para o experimento de Kuldeep (2016), para diferentes condições de garganta/comprimento	46
Gráfico 4 - Gráfico do Número de Cavitação em relação a Perda de Carga na remoção de DQO Alves et al. (2019).....	47
Gráfico 5 - Gráfico da Perda de Carga x Número de Cavitação do teste 1	51
Gráfico 6 - Gráfico da Perda de Carga x Número de Cavitação do teste 2	53
Gráfico 7 - Gráfico da Perda de Carga x Número de Cavitação do teste 3	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tabela de dados para as diferentes condições de cavitação.	63
Tabela 2 - Tabela de dados para as diferentes condições de pressões	68
Tabela 3 - Dados do fluxo para condições de garganta/comprimento: 1, 1/2 e 1/3 respectivamente	70
Tabela 4 - Dados de condições de fluxo para à remoção de DQO	70
Tabela 5 - Condições experimentais para o fenômeno da cavitação em placa com 3 orifícios de 5mm	79
Tabela 6 - Condições experimentais para o fenômeno da cavitação em placa com 5 orifícios de 5mm	82
Tabela 7 - Condições experimentais para o fenômeno da cavitação em placa com 3 orifícios de 5mm e 6 orifícios com 3,2mm	85

LISTA DE ABREVIações E SIGLAS

DQO	Demanda química de oxigênio
J	Carga unitária
L	Comprimento do tubo
NPSHd	Net Positiv Suction Head (Valor Positivo da Carga de Pressão) disponível
NPSHr	Net Positiv Suction Head (Valor Positivo da Carga de Pressão) requerido
PVC	Policloreto de polivinila ou policloreto de vinil
Δh	Perda de carga
z	Altura do escoamento ao um referencial fixo
p	Pressão do fluxo
V	Velocidade do fluxo em um ponto escolhido
γ	Peso específico do líquido
D	Diâmetro do tubo
U	Velocidade do escoamento
Q	Vazão
Re	Número de Reynolds
Pv	Pressão de vapor
K	Coeficiente de perda de carga localizada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	15
2.2	OBJETIVO GERAL	15
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
3.1	TUBULAÇÃO.....	16
3.2	BOMBAS HIDRÁULICAS	17
3.3	PERDA DE CARGA.....	19
3.3.1	Perda de carga distribuída.....	19
3.3.2	Perda de carga localizada.	22
3.4	PRESSÃO DE VAPOR.....	22
3.5	CAVITAÇÃO.....	24
3.6	DISPOSITIVOS DE CAVITAÇÃO HIDRODINÂMICA.....	29
4	METODOLOGIA.....	35
4.1	ANÁLISE DOS PERFIS DE REATORES DE CAVITAÇÃO	35
4.2	PROJETO DA BANCADA DE CAVITAÇÃO	38
4.3	CÁLCULOS DA PERDA DA CARGA EM EXPERIMENTO	39
5	RESULTADOS	41
5.1	RESULTADOS DAS ANÁLISES DO PERFIL DE CAVITAÇÃO DOS ARTIGO ESTUDADO	41
5.2	RESULTADO DA MONTAGEMDA BANCADA DE CAVITAÇÃO	42
5.3	RESULTADOS DOS TESTES NA BANCADA DE CAVITAÇÃO	49
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	59
	REFERÊNCIAS	60

1 INTRODUÇÃO

Desde os tempos remotos, a captação de recursos hídricos é de extrema importância para a manutenção das sociedades, tanto para necessidades básicas como para a irrigação. Portanto, se fez necessária a implantação dos primeiros meios e obras capazes de conduzir água, que estão na base do conhecimento como “Engenharia Hidráulica” (BAPTISTA; LARA, 2010).

Dessa forma, na Mesopotâmia foram construídos canais entre os rios Tigres e Eufrates para possibilitar a irrigação e desenvolvido por Aqueduto de Jerwan, o primeiro sistema de abastecimento público de água que se tem conhecimento, em 691 a.C. Apesar de ter se iniciado nos primórdios, a grande evolução da hidráulica só ocorreu no século XIX, em meio ao desenvolvimento de produção de materiais e ao crescimento populacional em grandes centros urbanos (AZEVEDO NETTO, 1998).

Atualmente, o transporte de fluidos é uma das operações iniciais em diversas indústrias, sendo de extrema importância para o estudo do comportamento de fluidos em movimento, devido a sua influência em bombas e em tubos, e de grande relevância para a análise dos fenômenos que ocorrem a partir da movimentação dos mesmos. Um sistema de transporte de líquido por recalque é um conjunto de elementos que inclui tubulações, conexões, válvulas, motores e bombas utilizados para ser possível realizar o transporte de um fluido de um ponto de carga inferior até o ponto superior ou o transporte em sistemas nos quais ambos os reservatórios estão abertos para a atmosfera (PORTO, 2006).

Sendo um item essencial de um sistema de recalque, as bombas hidráulicas são acionadas por um motor que transfere energia mecânica para o fluido incompressível na forma de aumento de pressão visando deslocar o líquido. Em sistemas como esse, pode-se notar o surgimento do processo da cavitação hidrodinâmica, caracterizado por um líquido que ao passar por uma região de baixa pressão atinge sua pressão de vapor, formando bolhas ou núcleos que diminuem a massa específica do mesmo. A jusante no escoamento, essas bolhas encontram regiões em que a pressão atuante é maior que a pressão da região que elas se formaram e a brusca variação de pressão provoca o colapso das bolhas (PORTO, 2006).

A cavitação hidrodinâmica é um evento complexo e é visto em sistemas e máquinas hidráulicas. Tendo em vista a sua importância e aplicação, este fenômeno tem sido cada vez mais estudado e analisado tanto numérico, como experimentalmente, e seus mecanismos ainda são pouco conhecidos (COELHO, 2006).

A cavitação hidrodinâmica ocorre de forma rápida, resultando em uma grande liberação de energia que permite a geração de alguns pontos quentes, que podem variar de 1 a 10 K, e de regiões com altas pressões, entre 10 e 500 Mpa. Nota-se ainda que além das alterações físicas, a implosão das bolhas libera fortes oxidantes no meio líquido (*e.g.*, radicais OH) devido à quebra das moléculas de água (GHAYAL et al., 2013; DULAR et al., 2016).

Em sistemas controlados, a cavitação hidrodinâmica irá ocorrer quando um líquido passar por um estreitamento físico, como, por exemplo, por uma placa de orifício, por um Venturi, por uma válvula parcialmente fechada ou por bombas. Nas instalações hidráulicas em que é necessária a utilização de bombas de recalque, a cavitação pode gerar ruídos, queda de rendimentos das bombas e eventualmente até a quebra da bomba, visto que o colapso das bolhas pode causar um desgaste excessivo no rotor das bombas (PORTO, 2006).

Apesar destes problemas que a cavitação pode gerar, é evidente que a cavitação tem diversas aplicações industriais, no contexto do conhecimento atual e das tecnologias disponíveis como, por exemplo, a cavitação aplicada na desinfecção de água; a síntese de biodiesel; o tratamento de efluentes; a remoção de algas; e a degradação de compostos emergentes, como produtos farmacêuticos e hormônios (GOGATE, 2007; BATISTA et al. 2017).

Neste trabalho, será realizada a análise da influência de diferentes parâmetros no processo de formação da cavitação, o qual será gerado em placas de orifício. Desta forma, será possível identificar o comportamento do coeficiente de perda de carga em relação à velocidade do fluxo em diferentes tubos e placas de orifícios.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Construir uma bancada de cavitação induzida, avaliando o seu funcionamento.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Observar o fenômeno da cavitação forçada em um sistema hidráulico de bancada através de placas de orifícios;
- Avaliar as alterações causadas no fenômeno da cavitação quando há placas com 3, 5 e 9 furos bem como a variação dos diâmetros dos furos.
- Analisar a influência da perda de carga no fenômeno da cavitação
- Compreender de que forma o sistema irá se comportar com a variação do diâmetro da tubulação em que há o escoamento.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 TUBULAÇÃO

De acordo com Alambert Júnior (1997, p. 23), “tubulação é um conjunto de tubos e conexões usados para transportar fluidos ou sólidos, ou suas misturas de um ponto a outro.”. A escolha adequada da tubulação é fundamental quando se deseja um bom desempenho do sistema de transporte de fluidos.

Para a instalação de tubos em um sistema, algumas características do tubo devem ser consideradas, como o diâmetro, a pressão de trabalho, as cargas externas, a facilidade no transporte, o tipo de solo, a profundidade do assentamento, a manutenção, além dos custos econômicos do processo de instalação e dos tubos.

Segundo Telles (1987) e Tsutiya e Sobrinho (1999), os materiais que normalmente são mais utilizados para as tubulações são: o ferro fundido, que possui uma boa resistência à corrosão, utilizados em serviços de baixa pressão e em locais em que não ocorram grandes esforços mecânicos; o aço soldado, recomendado em situações nas quais ocorrem esforços elevados sobre a linha, como em travessias de grandes vãos; o concreto, sendo normalmente utilizado no sistema de esgoto e possui baixo custo e boa resistência mecânica; e o policloreto de polivinila ou policloreto de vinil (PVC), altamente resistente à corrosão, que não é descartado totalmente pela quebra e proporciona uma obra com mais rapidez e leveza (Figura 1) (PASSETO, 1972).

Figura 1 - Tubulação em ferro fundido



Fonte: <https://www.solucoesindustriais.com.br/empresa/construcao/atitubos/produtos/construcao/tubo-de-ferro-fundido-ductil>

Sanks (1998) afirma que, os principais fatores que devem ser considerados para seleção de tubulações, sejam elas expostas ou aterradas, são:

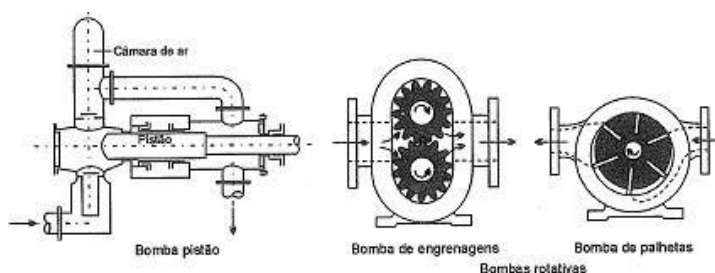
- Propriedades do fluido: propriedades corrosivas ou formadoras de resíduos;
- Condições de serviço: pressão, corrosão pela atmosfera para as tubulações expostas, cargas do solo, capacidade de suporte e recalque, cargas externas e potencial corrosivo para tubulação enterrada;
- Disponibilidade: tamanhos, espessura e acessórios (conexões);
- Propriedades do tubo: força estática e fadiga, ductilidade, resistência à corrosão, resistência ao atrito do fluido do tubo ou revestimento;
- Econômicos: vida útil, manutenção, custo de transporte ao local de trabalho, reparos e despesas residuais.

3.2 BOMBAS HIDRÁULICAS

As bombas hidráulicas podem ser definidas como máquinas operatrizes que transferem energia para o líquido com o intuito de transportar o mesmo. O rotor recebe uma energia através do motor e a transmite para o líquido na forma de energia de pressão, energia potencial ou cinética, ocasionando no aumento da pressão e da velocidade do mesmo (BRASIL, 2010). Conforme o processo de transformação de energia no interior das bombas, podem-se classificar as bombas em dois grupos:

- **Bombas volumétricas:** utilizam a variação de volume do líquido no interior de uma câmara fechada, resultando em uma variação de pressão. O volume varia pela ação de movimentos rotativos de engrenagens ou do pistão (Figura 2) (BAPTISTA; LARA, 2010).

Figura 2 - Bombas volumétricas



Fonte: BAPTISTA; LARA (2010).

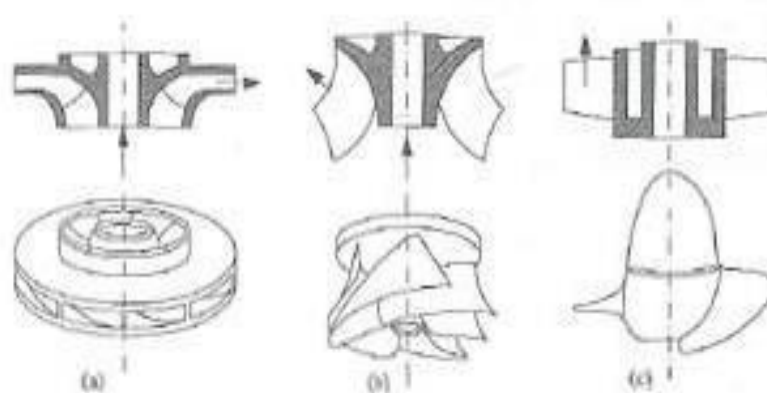
- **Turbobombas:** o deslocamento do fluido ocorre por uma força centrífuga que fornece uma energia cinética de forma contínua através de um elemento rotativo, o rotor, que terá um disco com hélices acoplado, o qual recebe o fluido pelo centro e o expulsa pela periferia.

As turbobombas podem ter um ou vários rotores, classificadas como simples estágio ou múltiplos estágios, o último mais indicado quando há a necessidade de recalcar o líquido em grandes alturas. Também existem as que admitem o líquido por um lado do rotor, chamadas de sucção simples, e as que admitem o líquido por dois lados, chamadas de sucção múltipla e permitindo maior equilíbrio do motor.

Porto (2006) descreve que também é possível classificar as bombas centrífugas a partir da forma que o líquido entra no interior da máquina, classificadas como (Figura 3):

- **Bombas de escoamento radial:** o fluido de trabalho entra axialmente, pelo centro, e sai pela periferia, radialmente, destinadas a vencer grandes cargas com vazões baixas;
- **Bombas de escoamento misto ou diagonal:** nessa classificação, o líquido entra de axialmente e sai em uma direção diagonal, indicadas para cargas médias;
- **Bombas de escoamento axial:** o líquido entra axialmente e sai em um movimento helicoidal, sendo mais utilizadas para situações em que há altas vazões e cargas baixas.

Figura 3 - Bombas de escoamento radial, axial e misto, respectivamente.



Fonte: PORTO (2006).

3.3 PERDA DE CARGA

No fluxo de um ponto ao outro da tubulação, o líquido sofre certa resistência ao seu movimento em razão do efeito da viscosidade e inércia. A “Perda de Carga” é o fenômeno que ocorre quando essa resistência é vencida pelo líquido em movimento, caracterizado pela dissipação de parte da energia disponível e causando a diminuição da pressão de fluxo (BARROS et al., 2018).

A energia que o líquido possui ao escoar por um ponto da tubulação é dada pela Equação da Energia (Eq.1):

$$H = z + \frac{p}{\gamma} + \frac{V^2}{2g}$$

(Eq.1)

A subtração entre dois pontos representa a energia cedida pela unidade de líquido para escoar de um ponto ao outro. A energia cedida permite que o líquido possa vencer as resistências, que podem ocorrer devido à rugosidade das paredes da tubulação, ao atrito interno, à compressibilidade do líquido e a mudança de direção (MANCITYRE, 1990).

A diminuição da energia ocorre basicamente de duas formas: a distribuída, que está associada às características físicas do conduto; ou a localizada, relacionada com as peças especiais para junção, à mudança de direção e o controle de vazão.

3.3.1 Perda de carga distribuída

A perda de carga distribuída se deve principalmente ao atrito interno entre partículas e gera, transversalmente ao escoamento, diferentes velocidades. As causas dessas variações de velocidades são a viscosidade do líquido e a rugosidade da tubulação. Sendo o escoamento uniforme (Eq.2), tem-se que a perda de carga unitária (J) é a razão entre a perda de carga contínua (Δh) e o comprimento do tubo (L) (BAPTISTA; LARA, 2014).

$$J = \frac{\Delta h}{L}$$

(Eq.2)

A partir da Equação da Energia (Eq. 3), aplicada entre dois pontos da tubulação sem conexões, válvulas e afins, é possível chegar à Equação Universal da Perda de Carga para Condutores Circulares (Eq.4):

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + \Delta h_{1-2}$$

(Eq.3)

$$\Delta h = \frac{fU^2}{D2g}L$$

(Eq.4)

A partir da Equação Universal da Perda de Carga para Condutores Circulares e da Equação da Continuidade, a Equação da Perda de Carga Unitária (Eq.5) fica:

$$J = \frac{8fQ^2}{\pi^2 g D^5}$$

(Eq.5)

Sendo f calculado através da expressão (Eq.6):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \log \left(\frac{\frac{e}{d}}{3,7} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right)$$

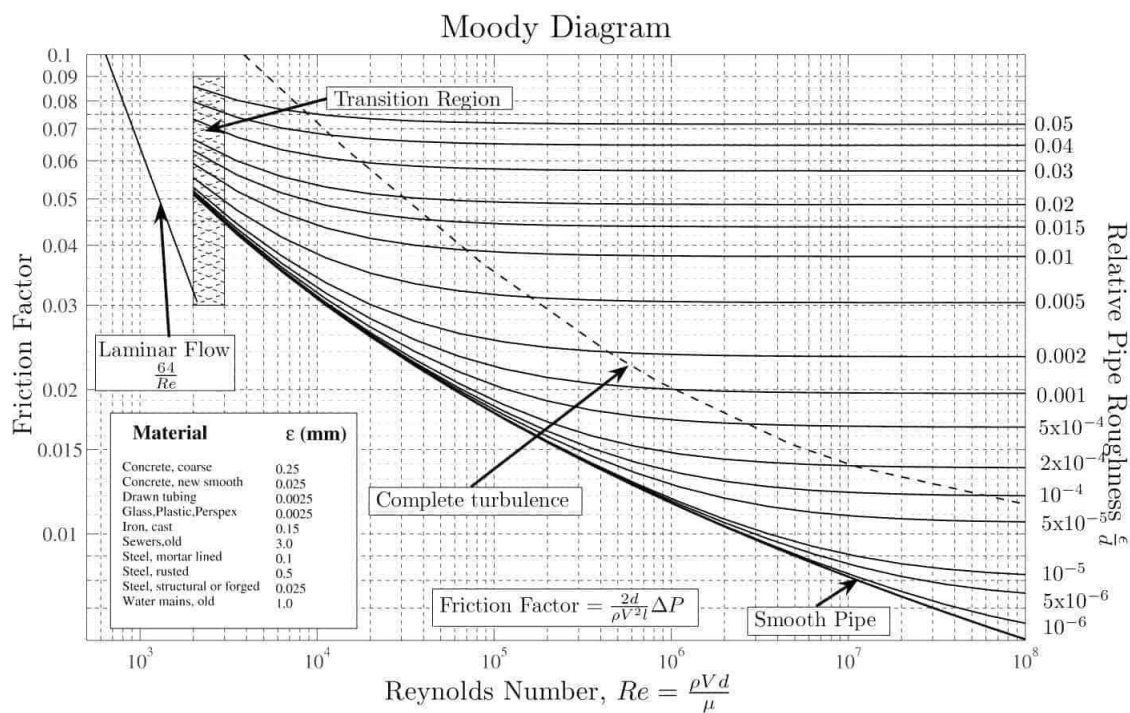
(Eq.6)

O coeficiente f é um adimensional que depende do escoamento. Tendo em vista a complexidade do cálculo do valor de f , que está dado de forma implícita na fórmula, o engenheiro americano Moody criou, em 1944, um diagrama que é um gráfico na forma não dimensional, o qual relaciona o coeficiente f , ou fator de atrito de Darcy, o número de Reynolds e a rugosidade relativa do fluxo totalmente desenvolvido em tubos circulares.

Pela dificuldade de se encontrar os valores para o coeficiente de perda de carga, as fórmulas apresentadas até o momento são impraticáveis para sistemas mais complexos sem a

utilização de computadores. Dessa forma, algumas fórmulas foram desenvolvidas em laboratório de forma empírica e se tornaram mais amplamente utilizadas visando que o cálculo seja mais objetivo, ainda que as equações sejam utilizadas apenas em condições específicas, pois só devem ser aplicadas em condições limites estabelecidas em testes de modo que não podem ser generalizadas.

Figura 4 - Diagrama de Moody.



Dessa forma, podemos citar as fórmulas de Hazen-Williams, aplicada para condutos circulares com diâmetros superiores a 50mm; a fórmula de Flamant, usada para condutos de parede lisa; a fórmula de Fair-Whipple-Hsiao, recomendada pela norma brasileira para projetos de instalações hidráulicas; a fórmula de Scobey, indicada para cálculo de perda de carga em redes de irrigação por aspersão e gotejamento que utilizam tubos leves (BAPTISTA; LARA, 2010).

3.3.2 Perda de carga localizada

Praticamente todos os sistemas de distribuição ou linhas de captação necessitam de válvulas, joelhos, T's, registros, bocais, ampliação, redução, entre outros. Cada um desses elementos causa no sistema a alteração no módulo da velocidade média e, consequentemente,

a perda de pressão localmente. Assim, existe um acréscimo na turbulência, produzindo a perda de carga que deve ser somada à perda de carga distribuída, devido ao atrito, nos trechos em que não há presença desses elementos, conhecida como perda de carga localizada (PORTO, 2006).

É possível que em algumas instalações hidráulicas, como nas prediais, a perda de carga localizada seja mais importante que a perda de carga distribuída, devido ao excesso de elementos especiais, conexões e aparelhos em relação ao comprimento da tubulação. Em contrapartida, as instalações com comprimentos mais longos, como adutoras, podem ter as perdas de carga localizadas desprezadas (BAPTISTA; LARA, 2010).

Devido à dificuldade de quantificar algumas variáveis, experimentos evidenciam que para dimensionar a perda de carga localizada pode ser usada a seguinte expressão (Eq.7):

$$\Delta h = K \frac{V^2}{2g}$$

(Eq.7)

Sendo K, o coeficiente de perda de carga localizada, um coeficiente adimensional que depende da geometria da conexão e do número de Reynolds, e que, de acordo com Porto (2006), o mesmo ainda pode variar conforme a rugosidade da parede e das condições de escoamento.

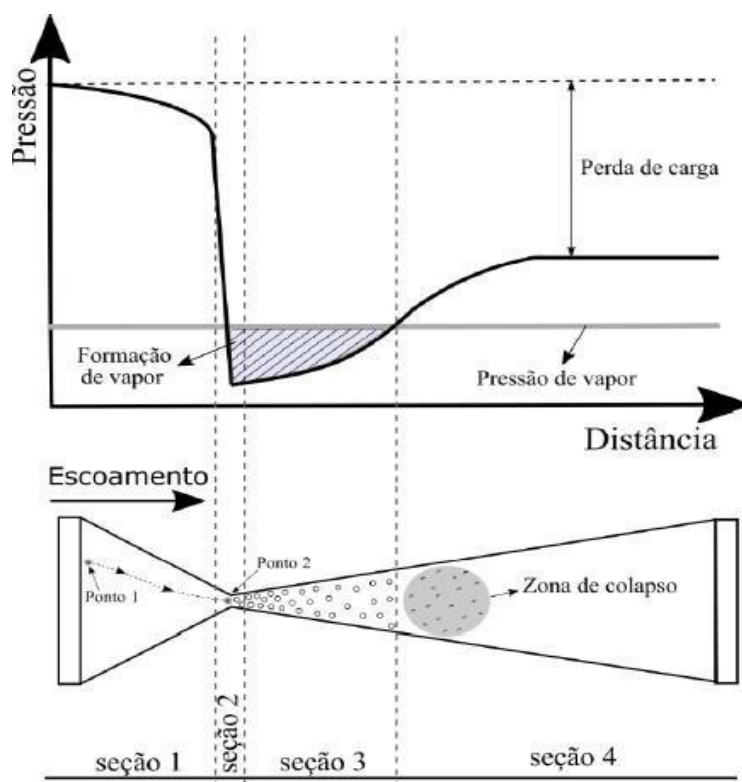
3.4 PRESSÃO DE VAPOR

Quanto maior forem as forças de atração entre as moléculas na fase líquida, maior a dificuldade para que as mesmas escapem para a fase vapor e, conseqüentemente, menor será a pressão de vapor deste líquido e sua volatilidade (ATKINS; JONES, 2013).

Em outras palavras, pode ser dito que pressão de vapor é a pressão que o vapor exerce quando o mesmo está em equilíbrio com a fase líquida em uma temperatura constante. Quando a pressão de vapor de um líquido atinge a pressão atmosférica, mediante o fornecimento de energia, ou seja, por meio do aquecimento, esta barreira imposta pela pressão atmosférica deixa de existir e as moléculas da fase líquida automaticamente passam para a fase vapor (LUCIANA et al. 2018). Quanto maior a pressão de vapor de um líquido, mais facilmente o mesmo irá evaporar e, conseqüentemente, menor será sua temperatura de ebulição (ATKINS; PAULA, 2013).

É possível notar, na figura 5 abaixo, a representação de como a definição da pressão de vapor tem influência no processo de cavitação.

Figura 5 – Representação da pressão de vapor sobre o processo de cavitação.



Fonte: ATKINS; PAULA (2013).

Em um sistema de recalque com vazão constante, nota-se que na seção 2 há uma diminuição da pressão pelo estreitamento da seção, seja por um tubo Venturi, placa de orifício ou qualquer outro dispositivo que inicie o processo.

Por meio da Equação da Continuidade, se existir um fluxo constante, a velocidade do fluido irá aumentar com a diminuição da área em que há o escoamento. Assim sendo, a Equação de Bernolli mostra que a pressão irá diminuir. Quando a pressão diminui a ponto de ser inferior à pressão de vapor do líquido, as microbolhas se formam e dão início ao fenômeno cavitacional.

3.5 CAVITAÇÃO

A palavra “cavitação” tem sua origem do latim *cavus*, que pode ser traduzido para o português como cavidade, significando a formação de bolhas de vapor em líquido, sendo introduzida pelo engenheiro naval britânico Robert Edmund Froud (GRIST,1999). A cavitação

hidrodinâmica é um fenômeno causado pela variação de pressão em diferentes seções de um escoamento (GOGATE, 2007).

Geralmente, a cavitação hidrodinâmica pode ser entendida como o fenômeno que engloba a formação, o crescimento e a implosão (colapso) de microbolhas de vapor (cavidades) em meio líquido (CAPOCELLI et al., 2014).

A cavitação hidrodinâmica ocorre inevitavelmente em sistemas de elevação, pois no percurso irá ocorrer uma diminuição na pressão do líquido de trabalho devido à natureza do escoamento ou ao movimento do líquido gerado pelas partes móveis que fazem parte do sistema, como bombas, pistões, entre outros (COELHO, 2006).

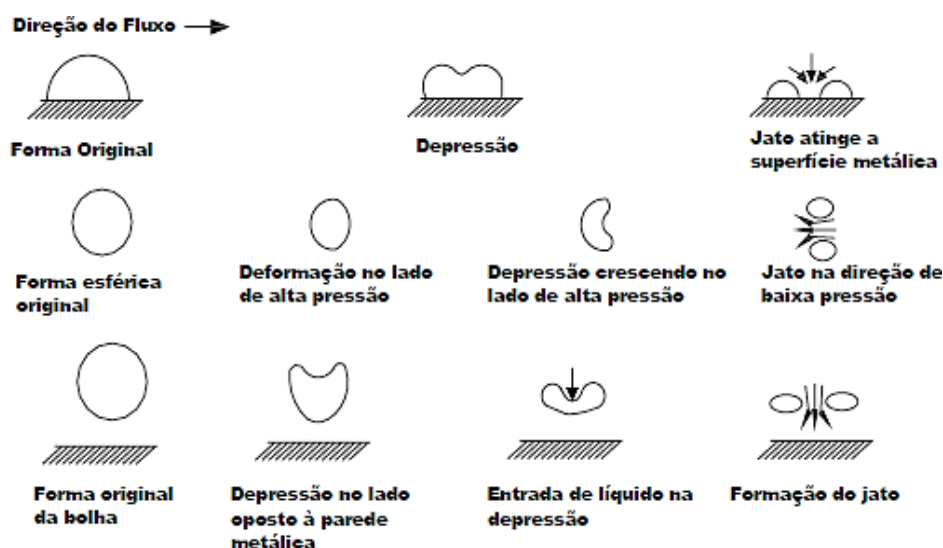
Este fenômeno ocorre quando a pressão absoluta de um líquido escoando abaixa até que a pressão estática chegue a um nível igual ou inferior à pressão de vapor do líquido, sendo iniciado o processo de vaporização e a consequente formação de bolhas de vapor arrastadas para uma região em que há uma pressão maior do que na região onde as mesmas se formaram (COELHO, 2006).

Após a formação das bolhas, as mesmas começam a crescer por meio da ocorrência de um fenômeno de vaporização rápida do líquido, ou seja, o vapor do líquido difunde-se para a bolha pela respetiva evaporação na interface gás-líquido, devido à possibilidade de coexistirem a fase líquida e a fase gasosa. Caso as bolhas de vapor sejam submetidas a uma pressão maior do que o valor da pressão de vapor do líquido, como em regiões em que há um escoamento a jusante, as mesmas atingem zonas que possuem pressão mais elevadas e o seu desenvolvimento é interrompido, iniciando-se o processo de implosão que ocasiona no colapso das bolhas. Como o volume específico do líquido é inferior ao volume específico do vapor, o colapso das bolhas implicará a existência de um vazio, proporcionando o aparecimento de ondas de choque (GOMES, 2015).

Conforme exposto por Gomes (2015), são necessárias três condições essenciais para ocorrer a cavitação (Figura 6):

- A existência de núcleos gasosos que atuarão como embriões das bolhas de cavitação;
- A presença de região de baixa pressão, necessária para promover a formação das referidas bolhas e seu crescimento por vaporização do líquido;
- A presença de uma região de recuperação da pressão, necessária para interromper o crescimento das bolhas e promover o respectivo colapso.

Figura 6 - Etapas da cavitação



Fonte: GREIN; WYSS (1974).

Visto que a bolha é formada no processo de cavitação, a mesma pode sofrer um colapso violento emitindo fortes ondas de choque. Essas ondas podem chegar a uma ordem de giga Pascal e a temperaturas locais na ordem de até 10000K (DULAR, 2015).

Devido a essas condições e somado ao fato de que há uma quantidade muito elevada de implosões que ocorrem próximas às regiões das paredes do tubo, das pás de bombas e das turbinas, ocorre um processo de erosão que irá danificar esses componentes e causar uma redução significativa do rendimento dos equipamentos.

Nas bombas centrífugas, os pontos mais críticos para que a cavitação ocorra são aqueles em que existe uma baixa pressão, ou seja, nas regiões que se encontram próximas às entradas das pás, pois, após esse trecho, o líquido adquire energia suficiente para seguir o seu fluxo. Sendo assim, deve sempre existir energia disponível, conforme NPSHd (Valor Positivo da Carga de Pressão), no flange de sucção da bomba, de forma que o líquido consiga atingir as pás do rotor sem perder boa parte de sua pressão e, conseqüentemente, vaporizar (Figura 7) (COELHO, 2006).

Figura 7 - Perda de pressão na entrada de uma bomba centrífuga



Fonte: COELHO (2006).

Sendo assim, a NPSH pode ser descrita como uma diferença entre a pressão absoluta na sucção da bomba e a pressão de vapor do líquido. De modo a que não ocorra a cavitação, deve a NPSH disponível seja menor que a NPSH requerida, podendo esta ser definida como “a energia necessária para o líquido se deslocar do flange de sucção e superar a queda de pressão dentro da bomba até o ponto em que ganhará energia e será suprimida (PORTO, 2006, p.68).” A NPSH requerida deverá ser fornecida pelo fabricante da bomba.

Para que esses valores possam ser comparados, é possível determinar uma equação matemática que descreve o NPSHd (Eq.8):

$$N.P.S.H.d = \frac{p_a - p_v}{\gamma} - Z - \Delta H_s$$

(Eq.8)

$\frac{p_a}{\gamma}$ = pressão atmosférica;

$\frac{p_v}{\gamma}$ = carga da tensão de saturação;

ΔH_s = somatório de todas as perdas até a entrada da bomba;

Z = altura de sucção.

Além destas variáveis para identificar a cavitação, pode ser utilizada uma variável adimensional para estudar a cavitação em máquinas hidráulicas: o coeficiente de cavitação de Thoma. O coeficiente de Thoma ou *Número de Cavitação* é um fator que descreve a probabilidade de ocorrer cavitação em máquinas e circuitos hidráulicos (GOGATE; PANDIT, 2001). É definido matematicamente como (Eq.9):

$$\sigma = \frac{(p_2 - p_v)}{0,5\rho V^2}$$

(Eq. 9)

Onde ρ e V são a massa específica e a velocidade de referência do escoamento respectivamente, ou seja, propriedades referentes ao fluido que está sendo escoado. E onde p e p_v são a pressão absoluta no ponto em estudo e a pressão de vapor do líquido respectivamente.

O número de cavitação, em condições ideais, deve ser menor ou igual a 1 para que a cavidade seja gerada em uma região de baixa pressão. Entretanto, as cavidades também podem ser geradas com valores acima de 1 quando há presença de gases dissolvidos e partículas suspensas que atuam como pré-núcleos (SHAH et al. 1999).

Quando se tem um menor número de cavitação é obtida maior atividade cavitacional, ou seja, maior densidade numérica de cavidades. Em contrapartida, um número muito baixo pode resultar na coalescência, causando a nuvem de cavitação que reduz a intensidade do colapso da cavidade ou da pressão de colapso, sendo dessa forma aconselhável operar o dispositivo de cavitação em um número cavitacional mais alto do que as condições de estrangulamento (KULDEEP, 2016).

Além de o fenômeno cavitacional estar relacionado a máquinas hidráulicas, é possível encontrá-lo também ao longo de uma tubulação com equipamentos auxiliares, como válvulas ou medidores de vazão. Estes dispositivos geram um aumento da velocidade e uma queda de pressão no líquido, favorecendo o crescimento das bolhas (SANCHEZ et al., 2008).

Ainda que a cavitação não seja um processo desejado, nota-se que, quando esse fenômeno ocorre em ambientes controlados, pode ser aproveitado para alguns casos, como o da produção de biodiesel (SANTOS, 2009); a remoção de ácido húmico em água (CAPPA, 2018); a remoção de DQO em solução de sacarose (ALVEZ et al., 2018); tratamento de água (GOMES, 2015).

Dessa forma, é possível notar que a partir das mudanças na bolha de cavitação, desde o momento da sua criação até a sua implosão, os efeitos da cavitação podem ser classificados em: efeitos térmicos, químicos, mecânicos ou físicos (Figura 8) (GOMES, 2015).

Figura 8 – Efeito da cavitação térmicos, químicos, mecânicos ou físicos.



Fonte: GOMES (2015).

3.6 DISPOSITIVOS DE CAVITAÇÃO HIDRODINÂMICA

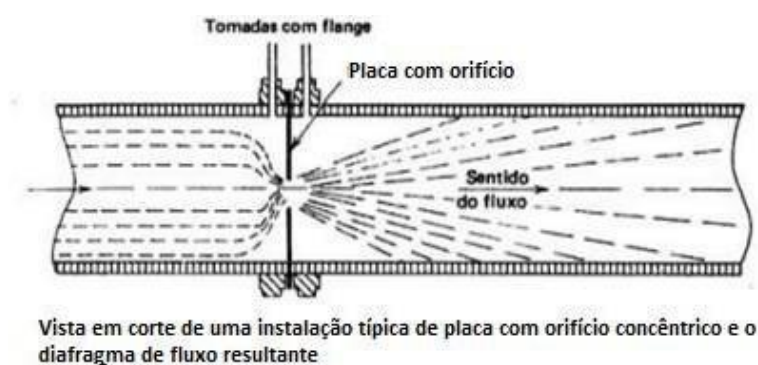
Diversas pesquisas buscam melhorar o tratamento da água através de novas formas de cavitação, porém os altos custos da cavitação acústica, que exigem mais custo de energia, deste processo impedem que o mesmo seja utilizado em larga escala (GOMES, 2015). Dessa forma, os dispositivos de cavitação hidrodinâmica se tornam mais vantajosos, devido aos baixos custos de aplicação, a fácil operação, o baixo consumo energético e a simplicidade de *design* do reator (WU et al., 2013).

A cavitação hidrodinâmica pode ser formada pela passagem de um líquido através de uma restrição física ou dos medidores de vazão, tais como uma placa de orifício (HILARES et al., 2017), um Tubo Venturi, entre outros (CHOI et al., 2018).

Esses dispositivos pretendem aumentar a velocidade, reduzir a pressão e gerar cavidade. Assim é importante controlar os parâmetros de operação, a pressão de entrada, o número de cavitação e a vazão, de modo a que o fenômeno seja otimizado (RAJORIYA et al., 2017).

A placa de orifício é uma placa que pode ter um ou mais furos precisos, instalada perpendicularmente ao eixo do tubo, tendo facilidade de construção, modificação e baixo custo, porém pode ocasionar na alta perda de carga e na corrosão na borda do orifício (Figura 9).

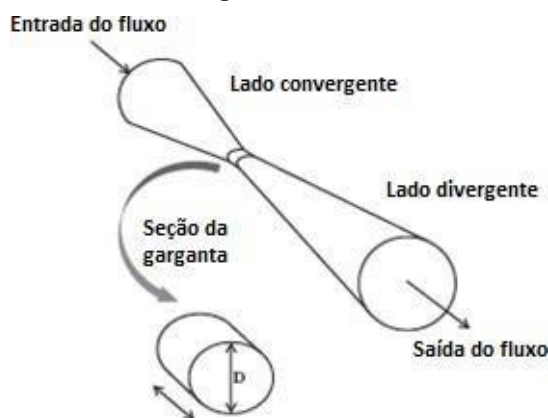
Figura 9 - Escoamento em placa de orifício



Fonte: ALMEIDA (2016).

Já o tubo venturi, é um dispositivo formado por duas seções finas de um tubo ligadas por uma garganta estreita. Após passar pelo estreitamento, a velocidade do fluido aumenta e então ocorre uma diminuição da pressão.

Figura 10 - Tubo venturi.



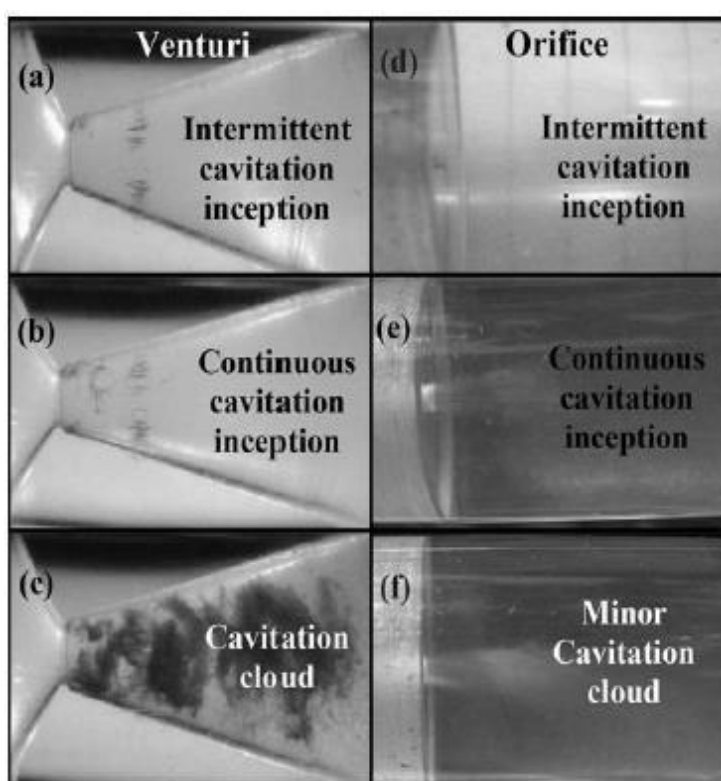
Fonte: Adaptado de: CID; CORREA (2019).

Nos últimos tempos, diversos estudos têm sido realizados a fim de identificar qual a melhor forma de confecção do dispositivo de cavitação, pois, ao realizar uma análise separadamente, cada forma possui características hidrodinâmicas diferentes, como as densidades de cavidades, taxa de recuperação, comprimento da zona de baixa pressão, entre outros (ALVES et al., 2019).

Moholkar e Pandit (2001) desenvolveram um sistema unificado que permite simular a dinâmica das bolhas em dois dispositivos específicos utilizados em reatores de cavitação hidrodinâmica, o Venturi e a placa de orifícios, chegando a importantes resultados. As câmaras com placas de orifício são mais propícias para intensificar reações químicas, enquanto os dispositivos Venturi são mais indicados para processos de mistura com baixa pressão de entrada, de 15 a 25 bar.

Pawar et al. (2007) realizou um estudo, em que comparou o efeito sonoquímico induzido da cavitação hidrodinâmica entre as placas de orifícios e o tubo Venturi. Para esse estudo, o rendimento cavitacional da placa de orifício é marcado como maior do que todas as configurações de teste com Tubo Venturi, ainda que apresente menor densidade numérica de bolhas cavitação e menor dissipação de energia no fluxo cavitante. O resultado disso pode ser observado nas fotografias de cavitação fluxo em venturi e orifícios apresentados na figura 11.

Figura 11 - Cavitação fluxo em Venturi e orifícios



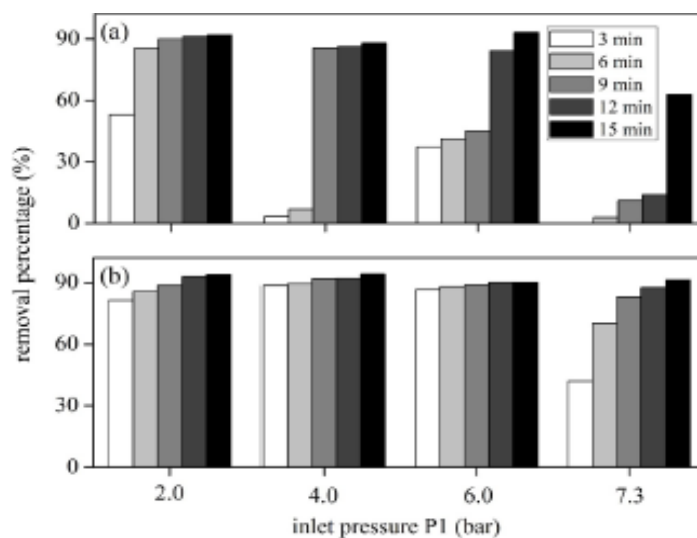
Fonte: PAWAR (2007).

Na figura 11 vê-se as seguintes imagens: a) início de cavitação intermitente; b) início de cavitação contínua; c) nuvem de cavitação; d) início de cavitação intermitente; e) início de cavitação contínua; f) nuvem de cavitação menor.

Nota-se que há uma nuvem de bolhas de cavitação maior no Tubo Venturi do que na placa. Essas nuvens possuem alta densidade numérica de bolhas de cavitação, resultando em fortes interações bolha/bolha, que ocasionam maior junção entre as bolhas de cavitação e, conseqüentemente, dão origem a bolhas maiores que colapsam com menor intensidade, gerando uma perda de possível efeito sonoquímico. As características deste processo resultam na redução no rendimento cavitacional. Já para as placas de orifício há uma menor formação de nuvens de cavitação, ou seja, haverá uma menor interação entre as bolhas, aumentando a intensidade do colapso transitório das bolhas (PAWAR et al., 2017).

No estudo da eficiência de remoção da demanda química de oxigênio (DQO) da solução de sacarose, identificou-se uma eficiência de aproximadamente 90% tanto para placas de orifício como para tubos venturi geralmente em que houve o tratamento durante 15 minutos. Porém, como visto na Figura 12, ao realizar a análise com diferentes parâmetros, como menor tempo de tratamento e menores pressões, nota-se que o tubo venturi possui um melhor desempenho, pois irá atingir uma eficiência de remoção de 90% em menor tempo (ALVES et al., 2019).

Figura 12 - Cavitação fluxo em (a) Orifícios e (b) Venturi



Fonte: ALVES et al. (2019).

De acordo com Kuldeep e Sahara (2016), na placa de orifício as cavidades são formadas na entrada e implodem na saída do orifício, gerando menores cavidades e baixa intensidade de colapso. Por outro lado, no tubo venturi, as cavidades se estendem desde a entrada da garganta e sendo produzidas até a seção divergente, local em que aumentam consideravelmente e onde

ocorre um colapso de alta intensidade e maior geração de radicais hidroxila quando as cavidades implodem.

Considerando as placas de orifícios, o controle das condições geométricas, como a quantidades de furos, a área do furo ou até a espessura da placa, e ajustes no funcionamento do reator, a intensidade de cavitação pode ser gerada com o máximo de eficiência para a solicitação desejada (GOGATE; KABADI, 2009).

Considerando apenas as placas de orifícios, sabe-se que quando há a incorporação de diferentes placas de orifícios ocorrem diferentes intensidades de cavitação, portanto, diferentes magnitudes de pressões são geradas devido ao colapso das cavidades. A magnitude da pressão de colapso depende da área de vazão percentual oferecida e também do perímetro dos furos presentes nas placas de orifício (KULDEENP; SAHARAN, 2016).

Moholkar e Pandit (2001) observaram que à medida que há um aumento da área de fluxo do líquido nos reatores de cavitação, a área da camada de cisalhamento e a intensidade cavitacional aumentam. O parâmetro definido para medição do cisalhamento (α) é definido como (Eq.10):

$$\alpha = \frac{P_t}{A_t} \quad (m^{-1})$$

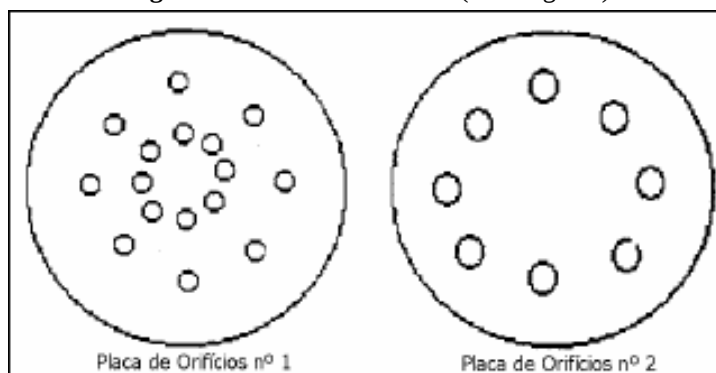
(Eq.10)

Sendo:

P_t é o perímetro total dos furos;

A_t é a área total de fluxo dos furos.

Em seus estudos, Ambulgekar et al. (2004) comparou uma placa de 16 furos com 2mm de diâmetro a outra placa de 8 furos com diâmetro de 3mm para a produção de ácido benzoico, que podem ser vistas na imagem abaixo. Ao realizar a comparação, concluiu que a placa com mais furos permitiu uma maior porcentagem de ácido benzoico do que a placa com menos furos (Figura 13).

Figura 13 - Placas de orifícios (Ambulgekar)

Fonte: AMBULGEKAR et al. (2004).

Pal et al. (2010) realizaram um estudo em que utilizaram quatro placas, com 1, 3, 5 e 7 orifícios respectivamente, de mesmo diâmetro. A placa de 7 orifícios apresentou melhores resultados, pois à medida que aumentava o número de furos aumentava também o rendimento. Esta placa com uma área de fluxo maior apresenta maior coeficiente (α).

Em seu trabalho, Gogate e Pandit (2004), recomendam que o diâmetro dos furos da placa de orifícios precisa ser analisado e usado conforme a aplicação. Para cavitações mais intensas, devem-se utilizar maiores diâmetros como, por exemplo, para a degradação de produtos químicos complexos, enquanto diâmetros menores com grande número de orifícios devem ser usados em situações que requerem menores intensidades.

Com menores áreas disponíveis para o fluxo é produzida uma cavitação com alta intensidade, pois a taxa com que a pressão do líquido aumenta afeta diretamente a formação e o colapso das cavidades. Foi desenvolvido ainda uma equação, de forma empírica, que deduz a pressão de colapso da bolha (Eq. 11):

$$P_{colapso} = 7527(F)^{-2,55}x\{(P_1)^{2,46}(R_0)^{-0,8}(d_0)^{2,37}\}$$

(Eq. 11)

Onde se tem que R_0 é o tamanho inicial da cavidade em unidades de milímetros, P_1 é a pressão de entrada do líquido no furo da placa, em atm, d_0 é o diâmetro do orifício em milímetro e F é uma porcentagem da área livre da seção transversal do tubo. A pressão de colapso é dada em atm.

Dessa forma, é possível notar que a utilização de uma placa de orifício em um dispositivo de cavitação oferece uma grande flexibilidade nas alterações de parâmetros que influenciam diretamente o fenômeno resultante, como o controle da pressão de entrada, a velocidade do escoamento de entrada ou a temperatura, e as condições de geométricas, como o

número de orifícios por placa, a localização desses orifícios ou o diâmetro dos orifícios. (GOGATE; KABADI, 2009).

4. METODOLOGIA

4.1 ANÁLISES DOS PERFIS DE REATORES DE CAVITAÇÃO

Atualmente, muitas pesquisas têm sido desenvolvidas sobre a dinâmica da cavitação geradas pelos medidores de vazão, como orifícios, válvulas e tubos venturi que conseguem gerar cavidades. Como analisado anteriormente, a diminuição de área de fluxo em tais dispositivos deve ser suficiente para manter a pressão abaixo da pressão de vapor do meio de fluxo a fim de gerar cavidades.

Sendo assim, será feita uma análise dos estudos de Kuldeep (2016), Cappa (2018) e Alves et al, (2019) a fim de que, a partir dos dados fornecidos, seja possível identificar de que forma a perda carga influencia o fenômeno da cavitação.

Primeiro, será realizada a verificação a partir da construção de tabelas com os valores numéricos da variação de perda de carga de cada cenário proposto nos trabalhos e, posteriormente, os dados serão plotados em gráficos do coeficiente de perda de carga em função da velocidade em que o fluido passa pela constrição, visto que em todos os cenários haverá uma variação da pressão de entrada, e, conseqüente, uma variação da vazão.

A medição da velocidade do escoamento foi possível através da fórmula da vazão (Eq. 12):

$$Q = \frac{v}{A} \text{ (m}^3\text{/s)}$$

(Eq. 12)

Para encontrar a perda de carga, usou-se a equação de energia (Eq. 3), e considerando que o escoamento será desenvolvido no mesmo nível e que a velocidade média permanece constante, chega-se a expressão (Eq. 13):

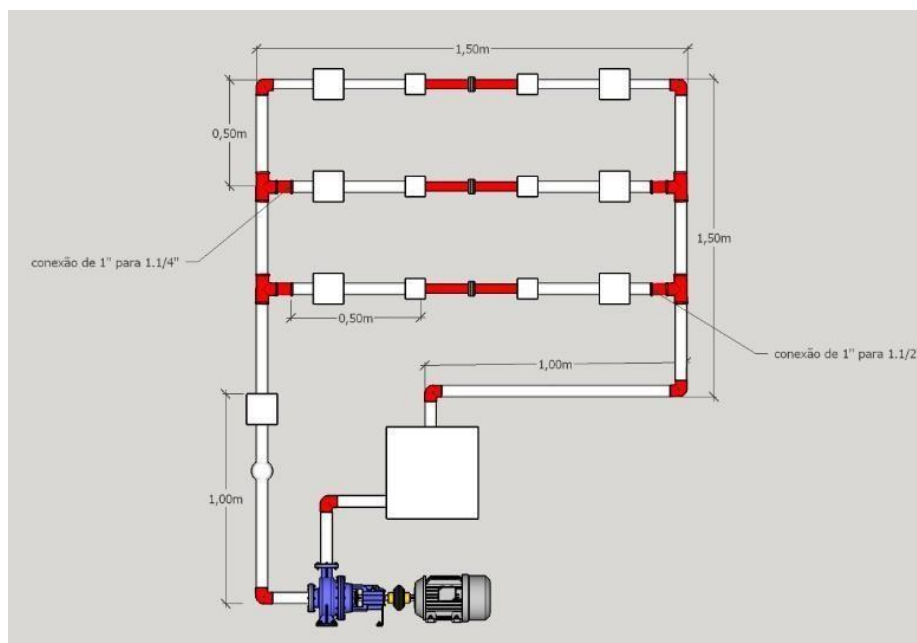
$$\Delta h = \frac{\Delta P}{\rho \cdot g}$$

(Eq. 13)

4.2 PROJETO DA BANCADA DE CAVITAÇÃO

Para o presente trabalho, foi montada uma bancada a fim de que fosse possível observar o fenômeno da cavitação e seus desdobramentos em um reator de cavitação, onde foram utilizadas placas de orifícios e tubos de diferentes diâmetros. A representação esquemática da bancada pode ser vista na figura 14 abaixo.

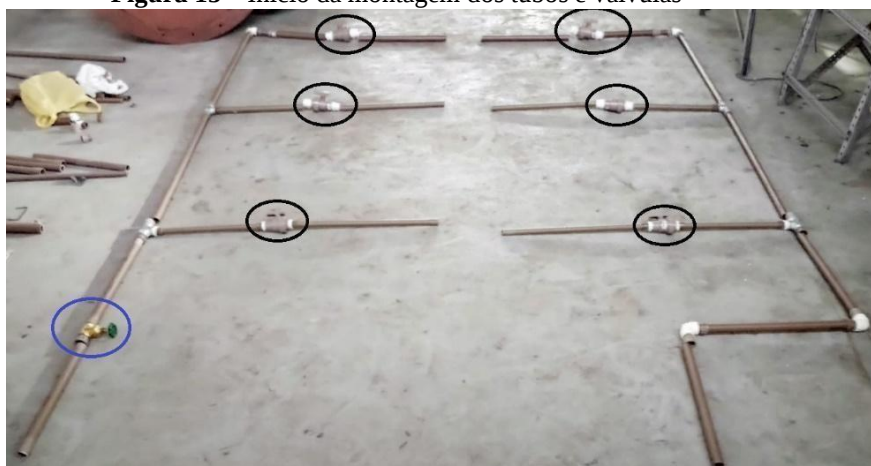
Figura 14 - Desenho esquemático da bancada de estudo



Fonte: AUTOR (2022).

Na bancada foram utilizados seis registros borboletas, colocados antes e após a placa de orifício, para interromper o fluxo nos tubos sem escoamento; um registro borboleta, instalado na tubulação de recalque para controlar a vazão de água; uma bomba centrífuga para bombeamento da água; um reservatório para armazenar o líquido; e ainda foram colocados medidores de pressão a jusante e a montante para identificação do comportamento do fluxo após a cavitação forçada. Para armazenamento do líquido de trabalho foi utilizado um reservatório (Figura 15).

Figura 15 – Início da montagem dos tubos e válvulas



Fonte: AUTOR (2022).

As tubulações em PVC utilizadas foram as de 25mm, 32mm e 40mm. Para a estrutura externa de sucção e recalque foi usada a tubulação em PVC de 32mm. Já para as estruturas centrais inferior e superior, foram utilizados os tubos em PVC de 25mm e 40mm respectivamente. Para ser possível a observação visual do fenômeno da cavitação, foram usados tubos de acrílico com uma medida total de um metro de comprimento, conectados por flanges quadradas em acrílico, de 8mm de espessura.

Os cortes nas placas de acrílico foram feitos por uma cortadora a laser, aproveitando o máximo do material e deixando-o com as medidas exatas. As placas que contém o(s) orifício(s) também foram confeccionadas nos mesmos moldes dos flanges, a fim de facilitar a fixação e padronizar a estrutura da bancada (Figura 16).

Figura 16 – Fixação da flange com o tubo de acrílico



Fonte: AUTOR (2022).

A flange foi usada como uma peça de conexão entre as tubulações devido à facilidade de fixação, possibilitando a troca das tubulações de acrílico, pois foram executados testes em tubos com 25mm, 30mm, 40mm, bem como a alteração do dispositivo de cavitação (Figura 18 e 19).

Figura 17 – Cortes dos tubos



Fonte: AUTOR (2022).

Figura 18 – Montagem da estrutura parede



Fonte: AUTOR (2022).

Para a instalação da bomba foram considerados dois pontos:

1. O aumento do $N. P. S. Hd$ para evitar a ocorrência do processo de cavitação dentro da bomba a fim de que a mesma não sofresse danos.
2. Para que a cavitação não ocorra na bomba, a condição ideal deverá ser $N.P.S.Hd > N. P. S. Hr$. Sendo assim, algumas medidas podem ser necessárias para não ocorrer a cavitação, como abaixar a bomba, pois assim há uma mudança no conceito da fórmula e o termo da distância vertical será adicionada aos termos de pressão absoluta e pressão de vapor e aumentar a altura do tanque, ou seja, dessa forma incrementamos ainda mais termo para que assim o $N.P.S.Hd$ também obtenha um aumento significativo.

Nas condições de instalação, notou-se que a necessidade de usos de válvulas e conexões seria menor, diminuindo, assim, a perda de carga durante a sucção e aumentando a facilidade e a praticidade da instalação.

4.3 CÁLCULOS DA PERDA DA CARGA EM EXPERIMENTO

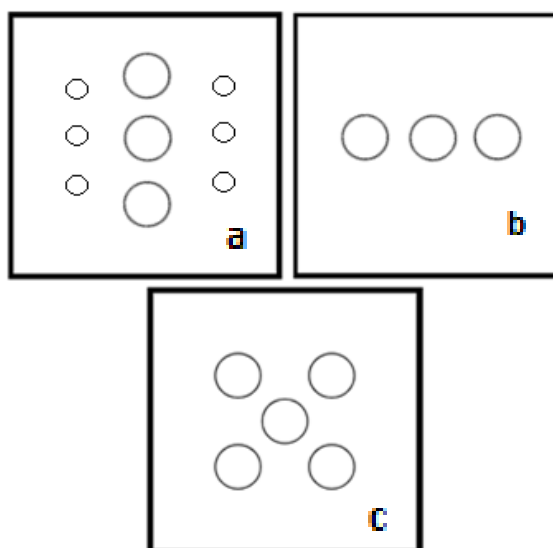
O procedimento experimental baseia-se na quantificação da perda de carga localizada pela placa de orifício. Antes do início do ensaio, garantiu-se o regime permanente do sistema. O experimento inclui um sistema de recirculação do líquido no qual há uma placa de orifício múltiplo.

No presente estudo, seis placas de orifícios (com diferentes diâmetros e número de furos) foram consideradas. Todas as placas foram confeccionadas em acrílico e as medidas de cada uma delas são de 12x12cm. A configuração dos furos na placa é mostrada na figura 20. Além disso, foram considerados os diferentes diâmetros, os quais fixam a placa de orifício.

Os testes realizados foram:

- Tubo de 40mm com placa de orifício contendo 3 furos de 5mm e 6 furos de 3,2mm (Figura 19, a).
- Tubo de 50mm, com placa de orifício contendo 3 furos de 5mm (Figura 19, b);
- Tubo de 50mm com placa de orifício contendo 5 furos de 5mm (Figura 19, c);

Figura 19 - Configuração dos furos na placa



Fonte: AUTOR (2022).

Para acionar a bomba foi usado um sistema simples, onde a mesma foi ligada diretamente a uma fonte de energia. A regulação de vazão foi feita pela válvula de gaveta que existe na tubulação de recalque, possibilitando a variação de pressão aferida pelos medidores de pressão.

Porém, como não há um medidor de vazão, essa medida será obtida por meios factuais, ou seja, em quanto tempo o sistema irá preencher um recipiente com um litro. A partir dos dados obtidos de pressão de entrada, pressão de saída, vazão e velocidade, foi possível a obtenção dos valores correspondentes de perda de carga, número de cavitação e do coeficiente de perda de carga para cada situação proposta.

5 RESULTADOS

5.1 RESULTADOS DAS ANÁLISES DO PERFIL DE CAVITAÇÃO DOS ARTIGOS ESTUDADOS

Kuldeep (2016) e Cappa (2018) realizaram estudos em que obtiveram uma otimização para os reatores de cavitação. O primeiro estudo abrange na sua investigação tanto os tubos Venturi como as placas de orifícios, já o segundo estudo foca apenas na identificação da melhor geometria de placas de orifício para a remoção de ácido húmico.

Como a pressão é um dos fatores preponderantes na ocorrência do fenômeno cavitacional, foi realizada uma análise do comportamento da constante de perda de carga para cada condição de pressão de entrada conforme as condições estudadas nos dois estudos de Kuldeep (2016) e Cappa (2018), explicitada abaixo.

Para a escolha do melhor modelo de pressão, Cappa (2018), definiu 10 cenários para que se permita escolher um que seja mais preponderante para a ocorrência do fenômeno, sendo eles (Figura 21):

Figura 20 - Condições experimentais das diferentes pressões

Simulação	P ₁ [kPa]	P ₂ [kPa]	Q [L/s]	Cv [-]
1	50	1,11	0,0543±0,0002	3,03
2	110	2,90	0,0759±0,0004	1,58
3	230	6,05	0,1091±0,0005	0,79
4	300	7,17	0,1249±0,0007	0,61
5	360	8,52	0,1303±0,0010	0,57
6	480	10,63	0,1459±0,0012	0,47
7	570	12,48	0,1542±0,0012	0,42
8	630	12,22	0,1676±0,0057	0,36
9	680	12,97	0,1705±0,0012	0,35
10	730	13,47	0,1722±0,0023	0,34

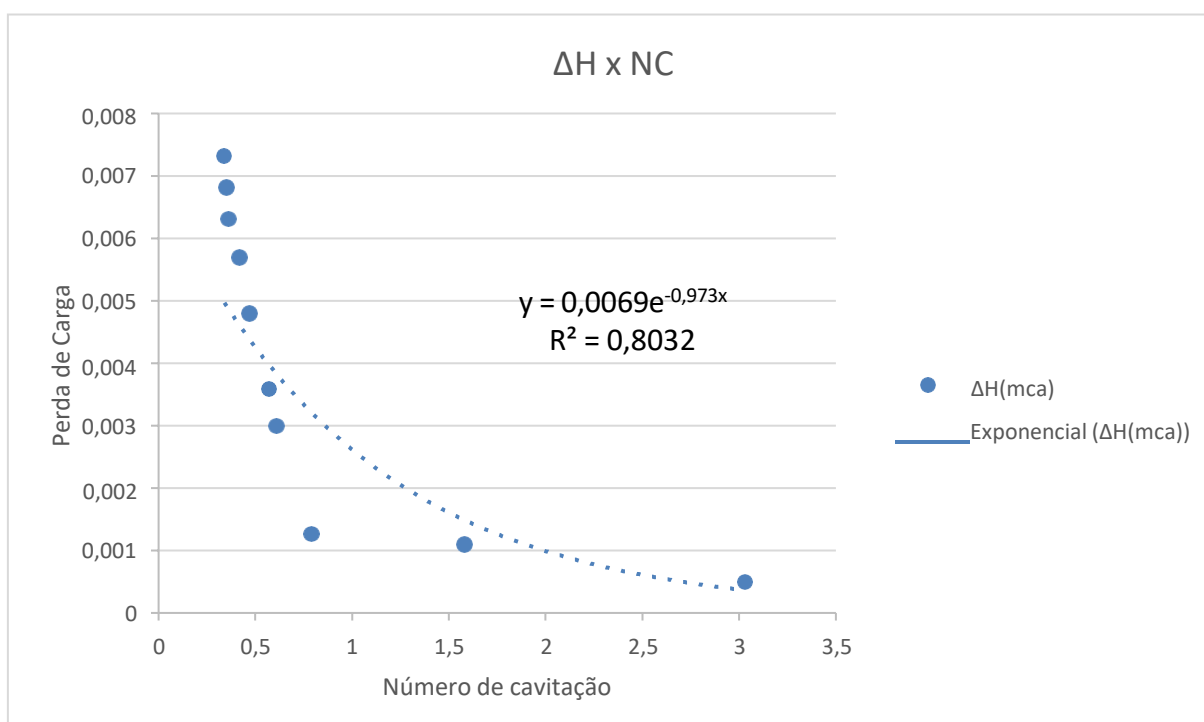
Fonte: CAPPA (2018).

Tendo em vista a fórmula da perda de carga e da variação de pressão, é possível plotar um gráfico de pontos discretos entre o número de cavitação e da perda de carga, como analisado abaixo na Tabela 1 e Gráfico 1:

Tabela 1 - Tabela de dados para as diferentes condições de cavitação

P1(mca)	P2(mca)	Q(m³/s)	V (m/s)	ΔH(mca)	NC
5	0,111	0,000543	0,675165	0,00049887	3,03
11	0,29	0,000759	0,943739	0,00109284	1,58
13	0,605	0,001091	1,356547	0,00126477	0,79
30	0,717	0,001249	1,553004	0,00298800	0,61
36	0,852	0,001303	1,620148	0,00358646	0,57
48	1,063	0,001459	1,814118	0,00478940	0,47
57	1,248	0,001542	1,917320	0,00568887	0,42
63	1,222	0,001676	2,083935	0,00630376	0,36
68	1,297	0,001705	2,119994	0,00680630	0,35
73	1,347	0,001702	2,116264	0,00731139	0,34

Fonte: CAPPA (2018).

Gráfico 1 - Gráfico da perda de carga em relação ao número de cavitação para o experimento de Cappa (2018).

Fonte: AUTOR (2022)

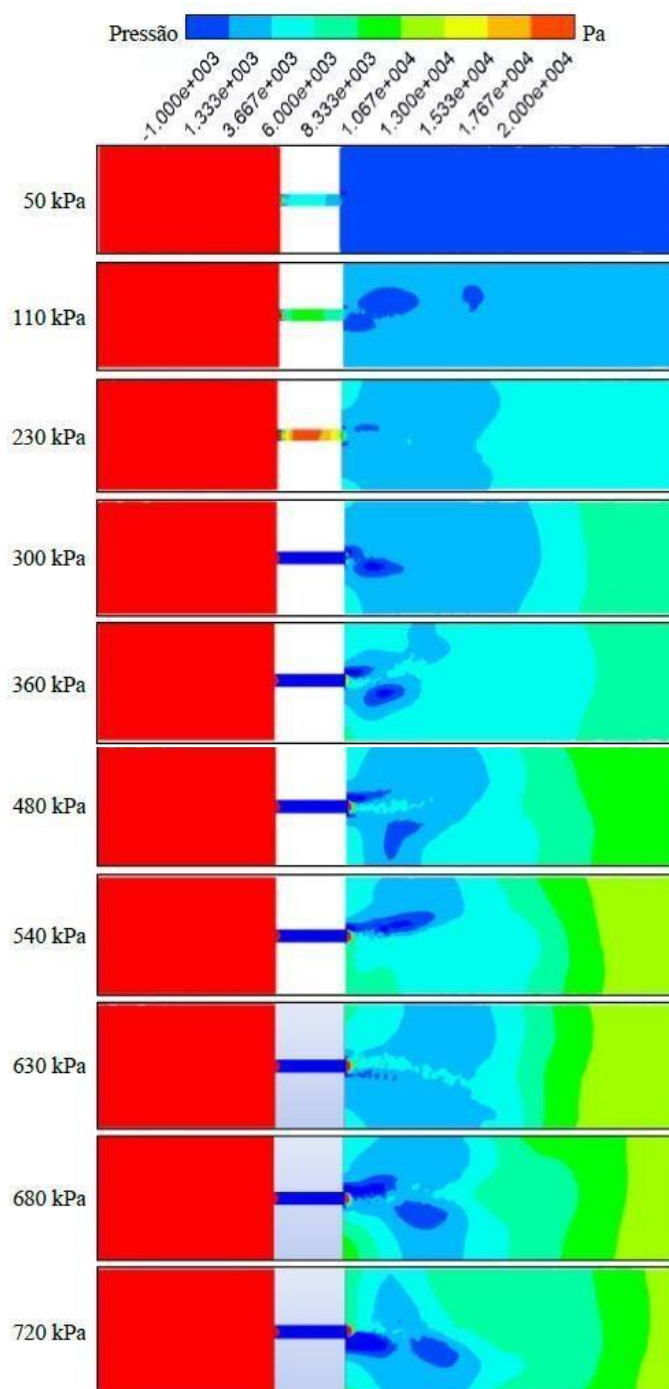
Conforme analisado na figura 22, de 50 a 230Kpa não houve atividade cavitacional. Após a constrição da placa de orifício, é necessário que a pressão seja menor que a pressão a montante do orifício. Como pode ser constatado na Figura 21, esses casos apresentaram uma

pressão maior no orifício. Nos cenários onde as pressões de entrada são de 680 e 720 Kpa, as zonas de cavitação são mais intensas e possuem maior área de baixa pressão após a placa de orifício, ocasionando, dessa forma, numa maior atividade cavitacional.

Nas pressões de 300 a 630 Kpa, ainda que tenham uma área de baixa pressão, existe uma baixa intensidade e uma baixa taxa de recuperação de pressão. As pressões de entrada de 720 e 680 kPa apresentaram maior atividade cavitacional. Para essas pressões, as zonas de cavitação foram mais intensas, com uma área de baixa pressão maior a jusante da placa de orifício. As pressões de entrada entre 300 e 630 kPa também apresentaram elevada área de baixa pressão a jusante da placa, entretanto a intensidade foi inferior à pressão de 730 e 680kPa.

A condição de apresentar uma intensidade de zona de baixa pressão aliada a uma baixa taxa de recuperação de pressão pode causar a nuvem de cavitação. Essa situação aumenta a chance de coalescência (aderência, junção) entre as cavidades, causando a redução no potencial de implosão ou até mesmo o não colapso das bolhas (PARWAR et al., 2017; BASHIR et al., 2011; SAHARAN, 2016).

Figura 21 - Perfis da pressão para as diferentes condições de pressão de entrada



Fonte: PARWAR et al. (2017).

Kuldeep (2016) realizou uma simulação computacional da dinâmica de fluidos abrangente, visando investigar numericamente o comportamento de escoamento 3-D dentro de reatores de cavitação hidrodinâmica, utilizando o modelo cavitacional. Nesta simulação, são tidos como base 5 reatores, sendo eles: Venturi Elíptico, slit Venturi, Venturi circular, placa com um orifício e placa com múltiplos orifícios. Além disso, foi feita uma análise, realizada

sob as mesmas circunstâncias, sobre os dispositivos de cavitação com diferentes relações entre a área de furo e a angulação de abertura para venturis e a espessura da placa para os orifícios.

Para placas de orifício em que existe apenas a variação da pressão de entrada, foi observado que para pressões de 80 a 100 mca as zonas de baixa pressão foram mais intensas e houve maior atividade cavitacional. Para as placas de orifício, Kuldeep (2016) focou em dois casos: o primeiro com uma placa com um único furo e o segundo com placas de orifícios com múltiplos furos. Em ambos os casos os resultados foram obtidos de formas independentes.

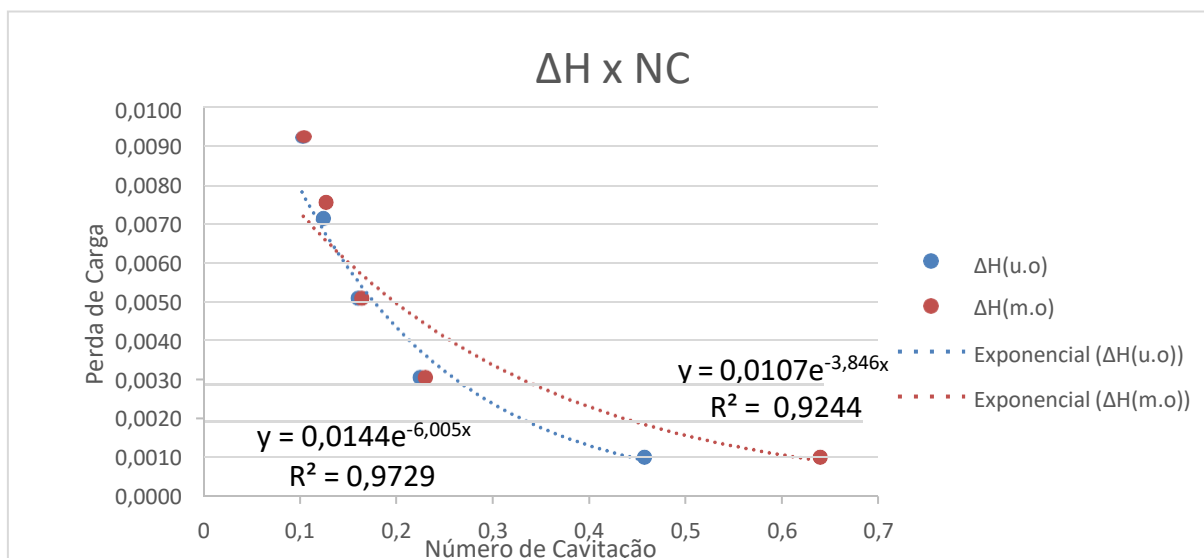
Para análise, foram acrescentados os dados de perda de carga, identificado na tabela 2 abaixo:

Tabela 2 - Tabela de dados para as diferentes condições de pressões

P1(mca)	P2(mca)	NC (u.o)	V (u.o)(m/s)	NC(m.o)	V (m.o)(m/s)	$\Delta H(u.o)$	P2 (m.o)	$\Delta H(m.o)$
20	10,1831	0,458	20,71	0,64	17,51	0,0010017	101,724	0,0010028
40	10,1847	0,225	29,55	0,231	29,13	0,0030423	101,620	0,0030446
60	10,1943	0,161	34,95	0,165	34,53	0,0050821	101,978	0,0050818
80	10,1968	0,125	39,67	0,128	30,19	0,0071226	61,984	0,0075306
100	10,2934	0,1027	43,98	0,104	43,36	0,0091536	101,377	0,0091694

Fonte: KULDEEP (2016).

Gráfico 2 - Gráfico do Número de Cavitação em relação a Perda de Carga para o experimento de Kuldeep (2016).



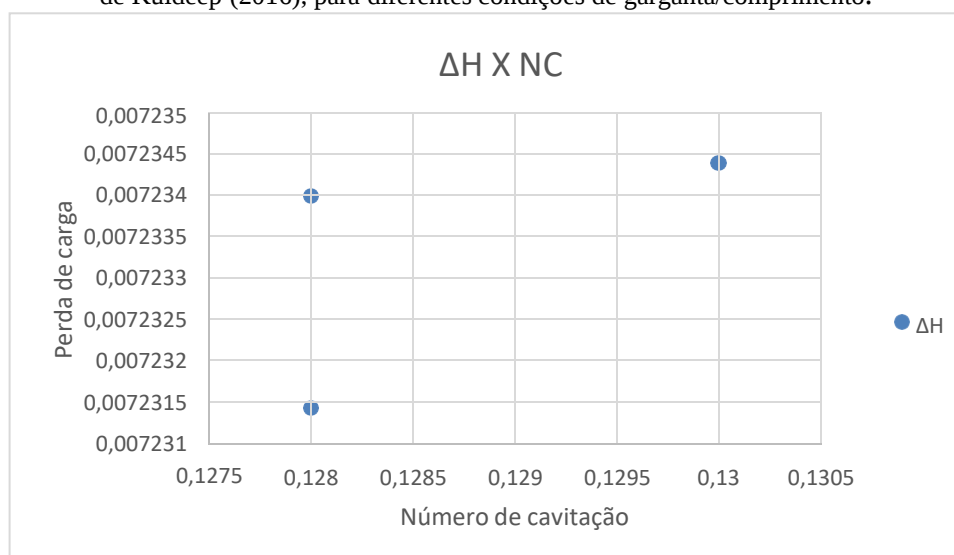
Fonte: AUTOR (2022)

Para o diâmetro da garganta/comprimento foi estudado as diferentes razões para uma mesma pressão de entrada (Tabela 3) (Gráfico 3).

Tabela 3 - Dados do fluxo para condições de garganta/comprimento: 1, 1/2 e 1/3 respectivamente

P1(mca)	P2(mca)	NC	V(m/s)	ΔH (mca)
81,06	10,1617	0,13	38,83	0,007234
81,06	10,16561	0,128	39,14	0,007234
81,06	10,19065	0,128	39,19	0,007231

Fonte: KULDEEP (2016).

Gráfico 3 - Gráfico do Número de Cavitação em função a Perda de Carga de carga para o experimento de Kuldeep (2016), para diferentes condições de garganta/comprimento.

Fonte: AUTOR (2022)

Em seus estudos com o objetivo de identificar quais as melhores condições de remoção de DQO de uma solução de sucralose em diferentes reatores de pressão, Alves et al., (2019) realizaram experimentos a partir da variação da pressão de entrada. Para as placas de orifícios as características de escoamento foram (Tabela 4):

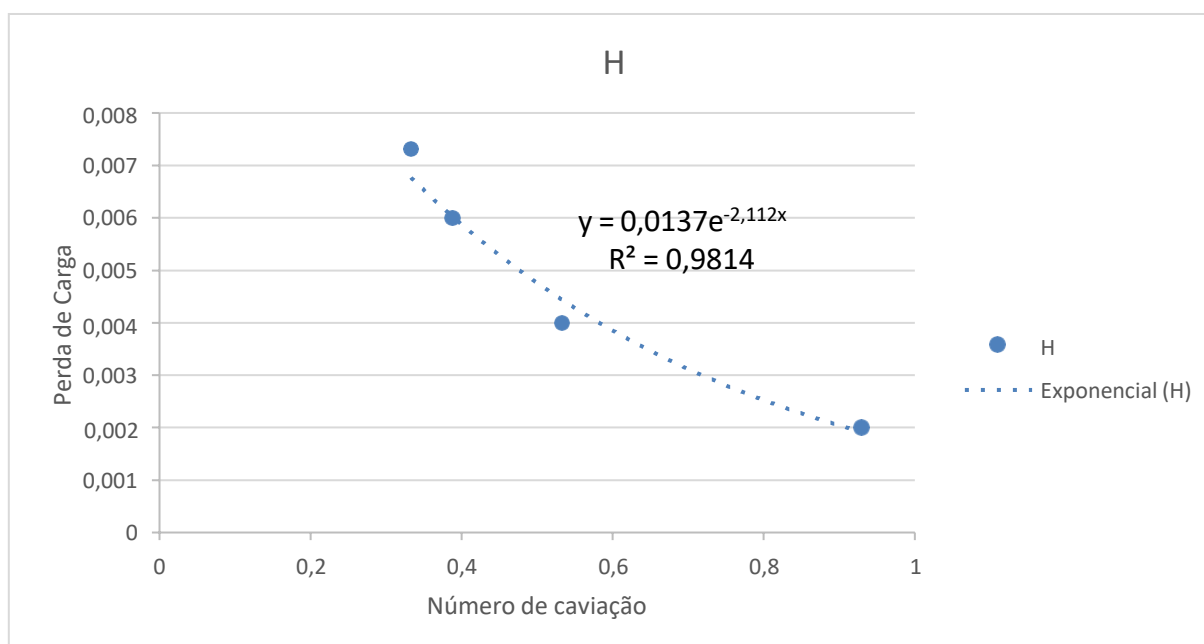
Tabela 4 - Dados de condições de fluxo para à remoção de DQO.

P1 (Kpa)	P2 (Kpa)	Vazão (L/s)	Velocidade (m/s)	NC	ΔH
20	0.5	0.100	14,19	0,93	0,001989757
40	0.91	0.135	19,15	0,533	0,003988698
60	1,25	0.161	22,82	0,388	0,005994782
73	1,43	0.176	24,84	0,333	0,00730292

Fonte: ALVES et al. (2019).

Em seguida, podemos plotar um gráfico para evidenciar a forma que as variáveis de velocidade e perda de carga se relacionam (Gráfico 4).

Gráfico 4 - Gráfico do Número de Cavitação em relação a Perda de Carga na remoção de DQO Alves et al. (2019).



Fonte: AUTOR (2022)

Além das variações de pressão, Alves et al. (2019) também levaram em consideração a variação do tempo em que a solução ficou circulando pelo sistema, sendo avaliado que as placas de orifícios atingiam 90% de eficiência de remoção após 9 minutos, para a pressão de 20 mca.

As curvas dos gráficos 3 e 4 mostram que à medida que há um incremento da pressão ao montante do fluxo, independentemente da quantidade de furos na placa, ocorrem duas ações subsequentes: haverá aumento na perda de carga e haverá aumento do coeficiente de perda de carga.

De acordo com Saharan et al. (2016), os valores ideais para o número cavitacional devem estar entre 0,15 e 0,25. Porém, nos experimentos realizados por Kuldeep (2016), os valores ideais para os casos estudados ficaram entre 0,10 e 0,20. Ainda que tenham encontrado valores diferentes, mas com interseções, é possível inferir dois pontos:

1. Nem sempre a cavitação será otimizada pelo incremento da pressão a montante;
2. Para cada aplicação da cavitação haverá um intervalo específico para as condições ótimas de aplicação do fenômeno cavitacional.

Considerando que para placas de orifício o parâmetro da razão diâmetro da garganta/comprimento tem um efeito não muito significativo no aspecto de perda de carga, pode-se observar que quanto maior a proporção, maior é o número de cavidades devido à pressão estática ser igual à pressão de vapor na garganta. Entretanto, havendo uma relação muito alta, poderá ocasionar a queda de pressão, transformando as cavidades geradas em cavidades inativas (KULDEEP, 2016).

5.2 RESULTADOS DA MONTAGEM DA BANCADA DE CAVITAÇÃO

Durante a montagem da bancada foram encontradas algumas dificuldades em relação ao encaixe dos tubos, ao controle da vazão e à vedação do sistema, explicitados abaixo:

- Foram encontradas dificuldades no encaixe dos tubos em reduções, ainda que estivessem com as medidas corretas. Dessa forma, foi necessário o alargamento das reduções por meio da utilização de uma lixa a fim de facilitar o encaixe entre os tubos. Além disso, não foram encontradas em lojas conexões tipo “T” com o encaixe tipo solda, sendo necessária a utilização de mais conexões rosqueadas para possibilitar o encaixe. Houve a mesma dificuldade para as válvulas borboletas, sendo utilizado um niple onde em um lado foi feito o encaixe com o tubo e no outro com a válvula.
- Inicialmente, foram utilizadas borrachas entre os flanges, fixadas através de 4 parafusos. Após a montagem e fixação da estrutura, foram realizados testes iniciais em que ocorreram vazamentos nos flanges. Desta forma, evidenciou-se que as borrachas colocadas inicialmente não foram suficientes para conter o vazamento do fluido.

Figura 22 – Vazamento nos flanges



Fonte: AUTOR (2022).

Isto posto, foram realizadas diversas tentativas de contenção do vazamento, como a utilização de soldas líquidas, de cola de silicone, o uso duplo de borrachas, entre outros. Para as conexões entre o tubo de PVC e o tubo de acrílico, foram retirados os flanges e colocadas reduções.

Figura 23 - Tubo de PVC e o tubo de acrílico.



Fonte: AUTOR (2022).

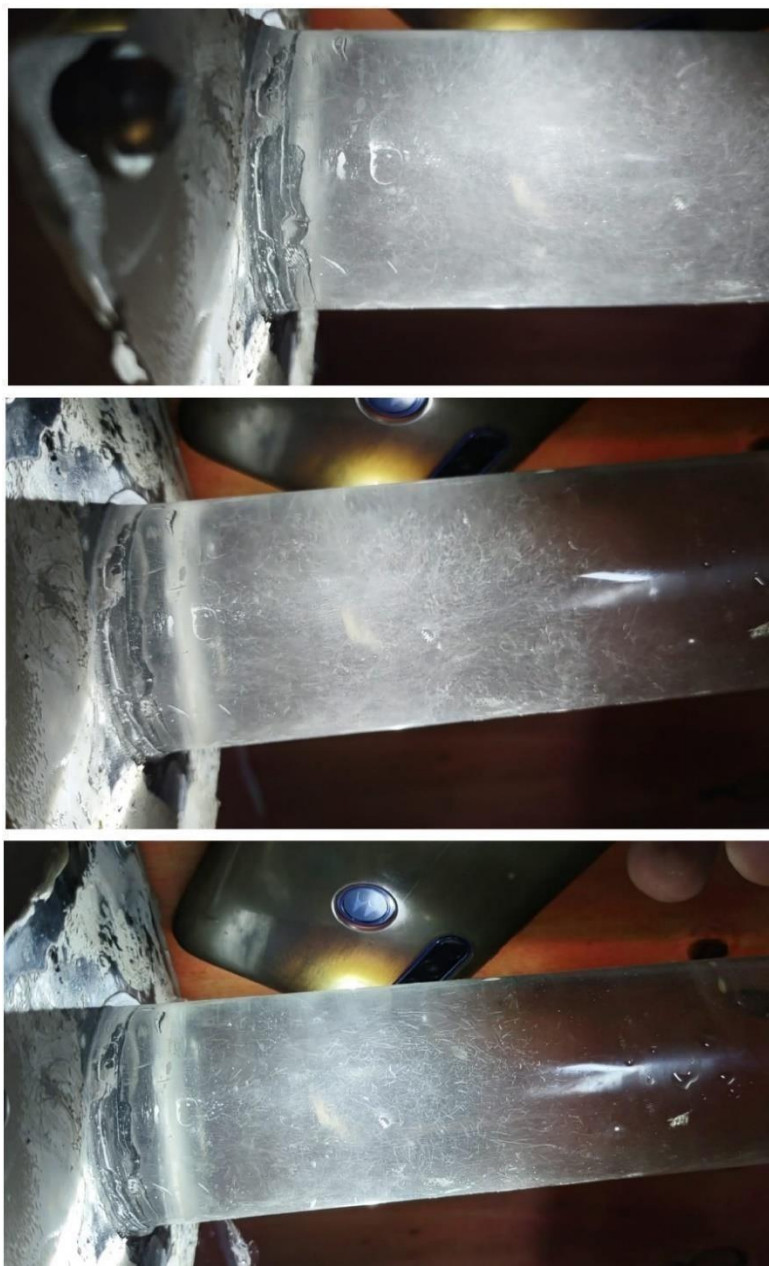
Nos flanges que se conectam com a placa de orifício foram encontradas duas soluções: na primeira solução foi utilizada a cola epóxi entre os flanges; na segunda solução foi utilizada uma borracha mais grossa entre as placas com mais furos, possibilitando apertar mais os flanges.

5.3 RESULTADOS DOS TESTES NA BACADA DE CAVITAÇÃO

De início notou-se que em todas as situações de testes em que a pressão de entrada era muito baixa as bolhas não eram formadas. Segue abaixo, a partir dos cálculos e dos experimentos na bancada, as informações que indicam os resultados das análises feitas.

O primeiro teste realizado foi no tubo de 50mm, com a placa de orifício contendo 3 furos de 5mm. A pressão máxima de entrada atingida foi 1 bar. Nos testes, as pressões de saída analisadas foram 0,1; 0,5 e 1 bar.

Figura 24 – Teste 1. As quais indicam 0,5 0,8, e 1 bar, respectivamente.



Fonte: AUTOR (2022).

Enquanto as alterações eram efetuadas, notava-se uma mudança significativa no comportamento das bolhas de cavitação, como pode ser constatado na figura 24. A seguir, foi construída uma tabela com os parâmetros necessários para uma análise a partir dos parâmetros propostos (Tabela 5).

Como não houve alteração na pressão de entrada, as três vazões de entrada permaneceram constantes e então, foi feita a análise desse resultado. O fenômeno cavitacional está intimamente ligado à taxa de recuperação de pressão, ou seja, foi possível observar que quando houve uma maior perda de carga, e consequente maior coeficiente de perda de carga,

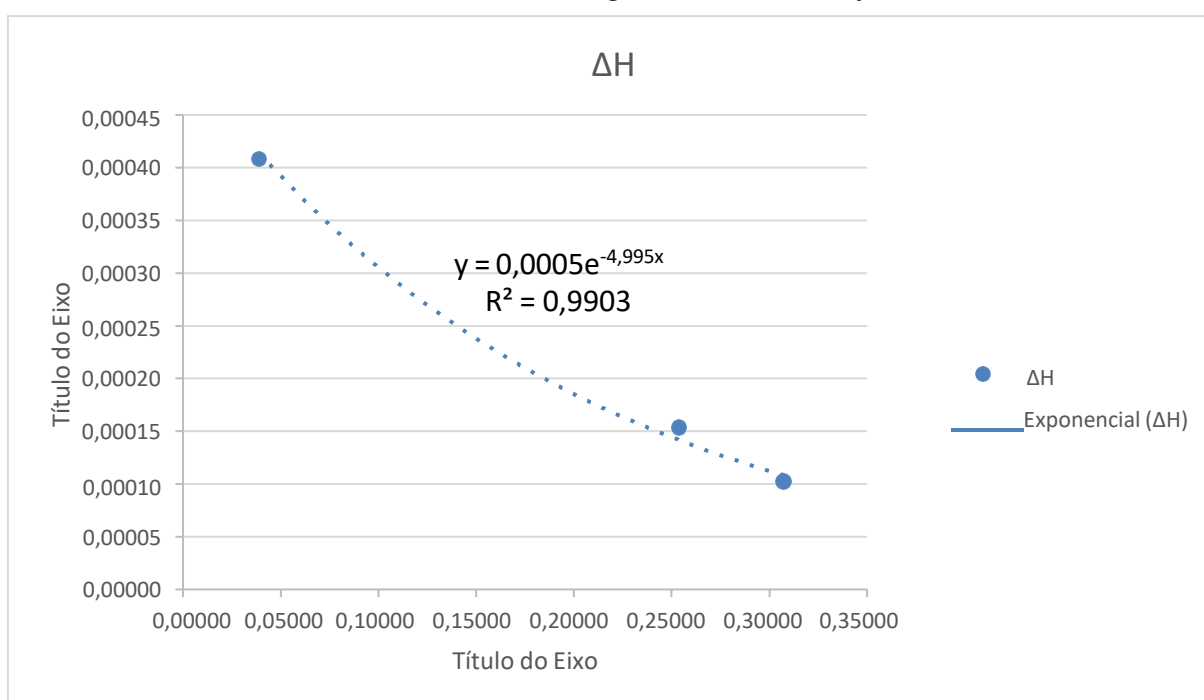
ocorreu maior formação de bolhas e ainda perduravam mais tempo, pois não havia pressão suficiente para a implosão das mesmas.

Tabela 5 - Condições experimentais para o fenômeno da cavitação em placa com 3 orifícios de 5mm

P1(mca)	P2(mca)	Q (m ³ /s)	V(tubo)(m/s)	V(furo)(m/s)	NC	ΔH(mca)
5	1	0,00110	2,242	18,68	0,03900	0,00041
8	6,5	0,00130	2,650	22,08	0,25376	0,00015
10	9	0,00140	2,854	23,78	0,30732	0,00010

Fonte: AUTOR (2022).

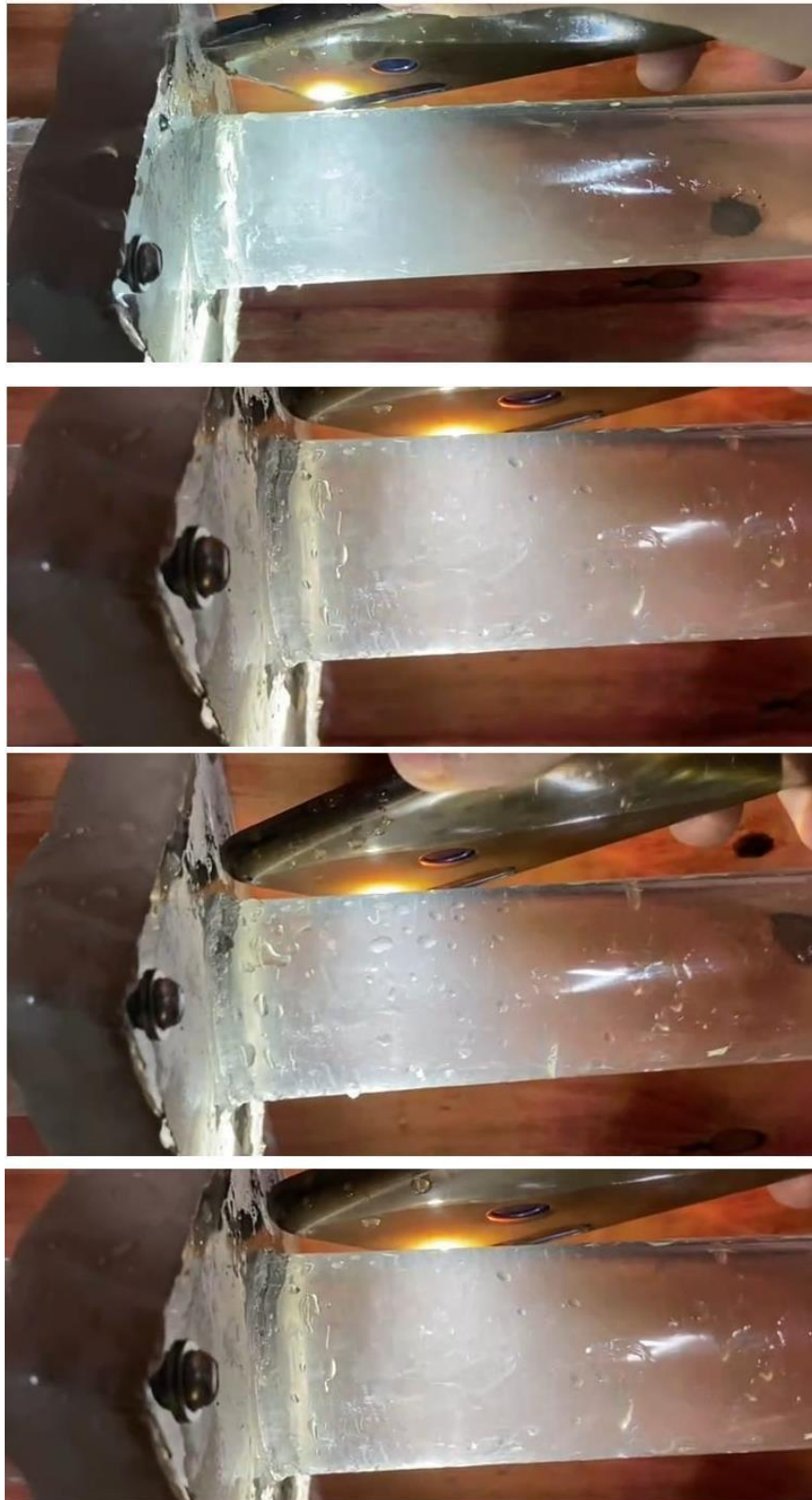
Gráfico 5 - Gráfico da Perda de Carga x Número de Cavitação do teste 1.



Fonte: AUTOR (2022).

O segundo teste realizado foi no tubo de 50mm, com a placa de orifício contendo 5 furos de 5mm. Sendo assim as condições foram testadas foram 0,6; 0,65 e 0,75 e 1 bar (Tabela 6) (Gráfico 6). Para as condições de teste apresentadas, foi possível fazer as seguintes observações visuais:

Figura 25 – Imagens do fenômeno da cavitação no teste 2. As quais indicam 0,6, 0,65, 0,75 e 1 bar, respectivamente.



Fonte: AUTOR (2022).

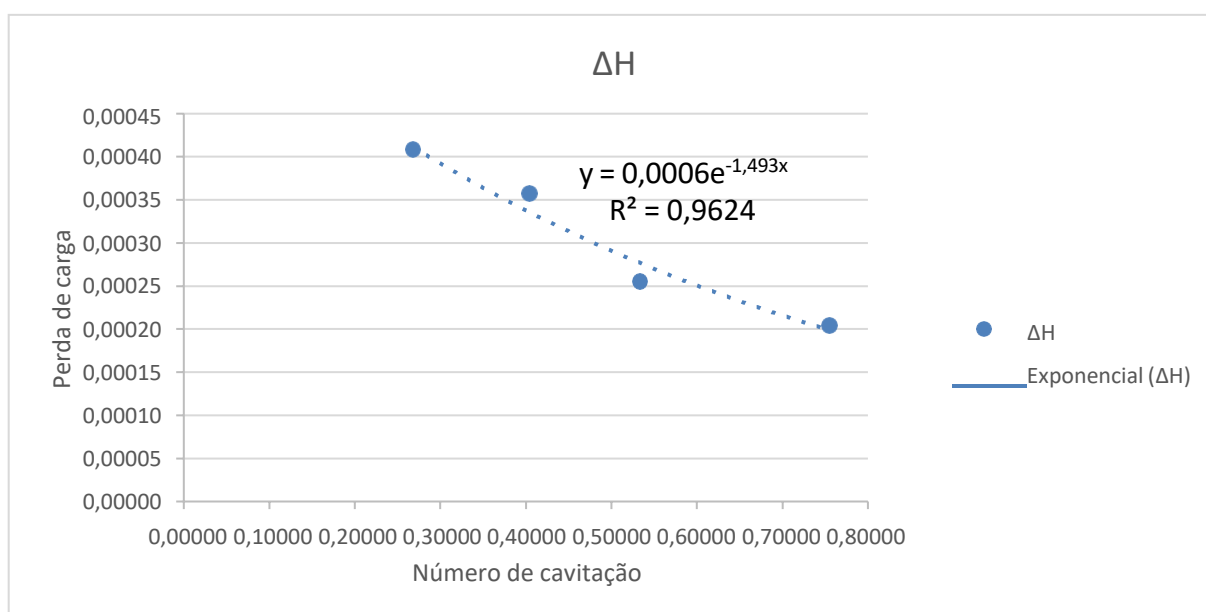
A partir das informações de pressão de entrada, pressão de saída e vazão, foi possível construir a Tabela 6 e identificar o comportamento da cavitação de junto ao gráfico 6.

Tabela 6 - Condições experimentais para o fenômeno da cavitação em placa com 5 orifícios de 5mm.

P1(mca)	P2(mca)	Q (m ³ /s)	V(tubo)(m/s)	V(furo)(m/s)	NC	ΔH(mca)
6	1	0,00110	2,242	11,21	0,10833	0,00051
6,5	3	0,00113	2,303	11,52	0,40458	0,00036
7,5	5	0,00130	2,650	13,25	0,53381	0,00026
10	9	0,0014	2,854	14,27	0,85367	0,00010

Fonte: AUTOR (2022).

Gráfico 6 - Gráfico do Número de Cavitação x Perda de Carga do teste 2.

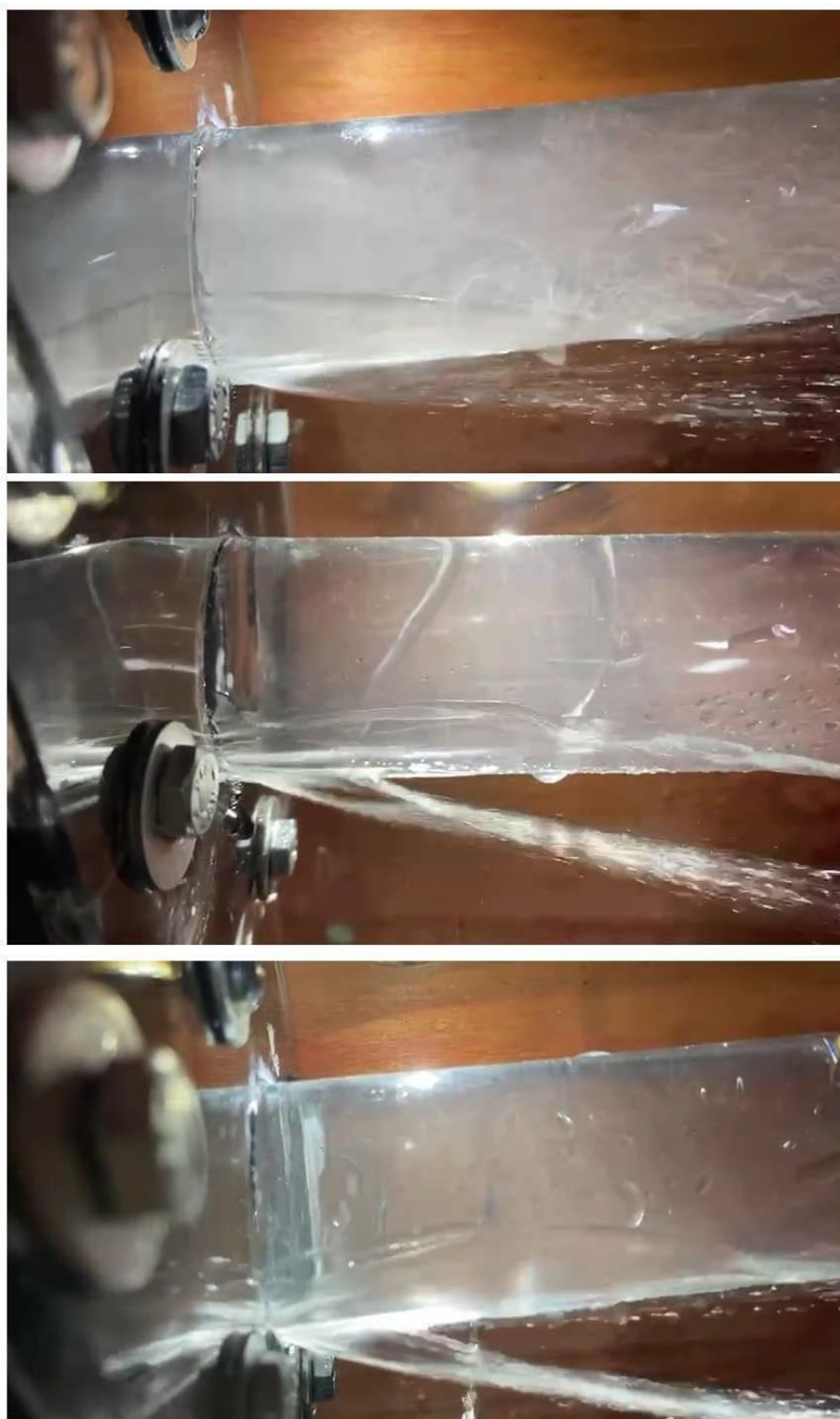


Fonte: AUTOR (2022).

Analisando cuidadosamente a Figura 25, é possível notar que ao passar das imagens obtêm-se uma melhor visualização do que há atrás do tubo, ou seja, o tubo fica mais transparente, indicando uma diminuição da atividade cavitacional. Essa indicação pode ser relacionada com a tabela 2, a qual evidencia que para maiores pressões de entrada houve uma menor perda de carga no sistema, gerando assim menores valores do coeficiente de carga e maiores valores do número de cavitação.

O terceiro teste realizado foi no tubo de 40mm, com a placa de orifício contendo 3 furos de 5mm e 6 furos de 3,2mm (Tabela 7 e Gráfico 7). O fenômeno pode ser analisado nas Figura 31.

Figura 26- Imagens do fenômeno da cavitação no teste 2. As quais indicam 0,5, 0,7, 0,8 e 1 bar, respectivamente



Fonte: AUTOR (2022)

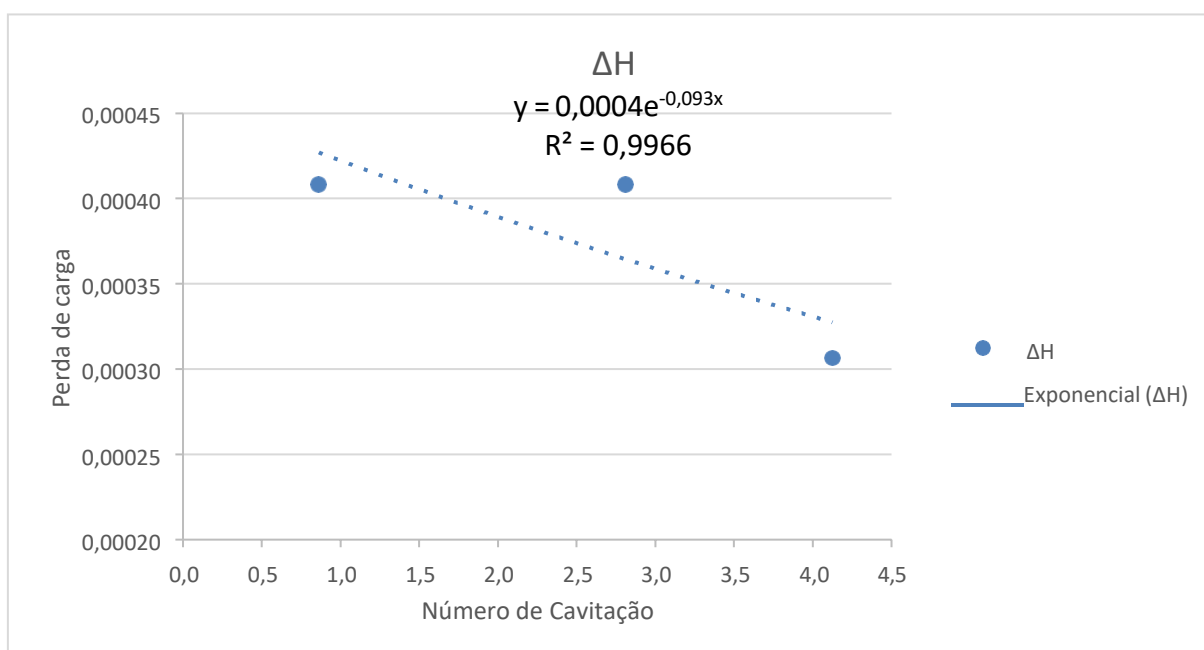
Foi possível observar uma semelhança do teste 03 com o teste 2, pois, como pode ser analisado no gráfico 7, à medida em que a perda de carga aumentou, o número de cavitação também aumentou. Essa similaridade pode ser notada ainda na Figura 27, visto que há uma diminuição na quantidade de bolhas com o aumento da pressão de entrada.

Tabela 7 - Condições experimentais para o fenômeno da cavitação em placa com 3 orifícios de 5mm e 6 orifícios com 3,2mm.

P1(mca)	P2(mca)	Q (m ³ /s)	V(tubo)(m/s)	V(furo)(m/s)	NC	ΔH(mca)
5	1	0,00100	1,244	3,97	0,86312	0,00408
7	3	0,00110	1,368	4,37	2,81134	0,00408
8	5	0,00120	1,493	4,77	4,12522	0,00306

Fonte: AUTOR (2022).

Gráfico 7 - Gráfico do número de cavitação x perda de carga do teste 3.



Fonte: AUTOR (2022).

Os dados da Tabela 7, juntamente com a Figura 26, ainda corroboram para o fato de que, como já foi dito, valores do número de cavitação acima de 1 não configuram um cenário ideal para que se obtenha uma grande formação de bolhas em uma região de baixa pressão.

No terceiro teste ainda foi possível observar a situação da formação de nuvem de cavitação no momento em que as válvulas estavam completamente abertas. Isso ocorreu devido

à grande quantidade de furos, possibilitando maior formação de bolhas, juntamente ao fato de que a pressão de saída ficou próxima de zero, o que facilitou o crescimento e junção a jusante das bolhas de cavitação.

Figura 27 – Nuvem de cavitação



Fonte: AUTOR (2022).

É possível notar que há similaridade entre os resultados discutidos dos trabalhos analisados com os resultados obtidos na bancada de cavitação construída. Essa similaridade é vista de forma muito clara na comparação entre os gráficos. Para todos os experimentos, pode-se notar que o gráfico que melhor indica a variação da perda de carga em relação ao número de cavitação é uma curva exponencial negativa.

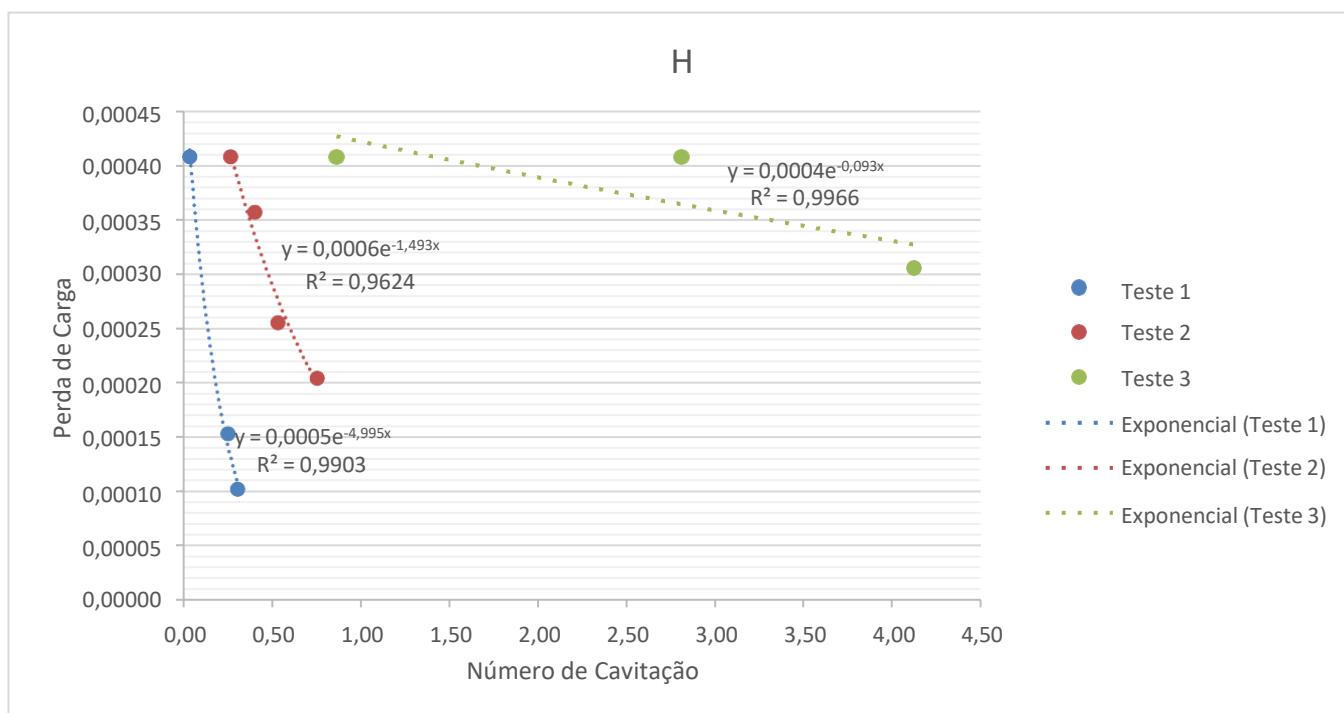
De maneira geral, para os dados iniciais, a medida em que há a diminuição da perda de carga, o número de cavitação tende a aumentar, ou seja, nos resultados em que ocorre uma maior perda de carga haverá mais áreas de baixas pressões, favorecendo a formação e crescimento da bolha, que, como visto nas figuras do teste de bancada, permitiu maior intensidade do fenômeno nos casos em que houve maior perda de carga. Porém, como evidenciado por Cappa (2018), existem cenários com baixas perdas de carga que não serão propícios para a formação de bolhas.

Continuando as discussões e comparações dos trabalhos revisados com os testes realizados de bancada, nota-se que essa maior intensidade da zona de baixa pressão, juntamente com a menor taxa de recuperação de pressão, pode propiciar a coalescência entre as bolhas,

também denominada como nuvem de cavitação e conhecida por reduzir o potencial de implosão.

A comparação entre os dados obtidos indica que quando os valores da perda de carga tendem a diminuir e o número de cavitação tende a crescer, ocorre a vantagem da diminuição da chance de ocorrência tanto da coalescência como da elevação da taxa de recuperação de pressão, sendo estes os fatores que indicam maiores chances para o desenvolvimento completo do fenômeno cavitacional, assim como da formação, do crescimento e da implosão das bolhas. Porém, a falta de grande intensidade na zona de baixa pressão após o orifício pode acarretar no baixo acúmulo de energia para o momento da implosão das bolhas. Dessa forma, não é possível identificar um valor ótimo de perda de carga para a cavitação, devendo este valor ser analisado de forma única para cada situação na qual o fenômeno da cavitação é designado.

Gráfico 8 – Comparação entre os resultados dos testes realizados na bancada de cavitação forçada.



Fonte: AUTOR (2022)

O gráfico acima (Gráfico 8), o qual correlaciona os resultados dos três testes realizados na bancada de cavitação, elucida que ainda que os cenários forneçam o mesmo valor de perda de carga, a cavitação não ocorrerá da mesma forma, pois, para diferentes geometrias e quantidade de furos irá formar de cenários distintos.

Para o primeiro cenário, teste 1, como haverá apenas 3 orifícios e a área total de escoamento da placa de orifícios será menor, dessa forma a velocidade do fluxo na estricção será maior e a partir da equação 9, a medida que aumenta a velocidade o número de cavitação aumenta.

No teste 2 já há um acréscimo na área do fluxo, ou seja, a velocidade na estricção diminui e o número de cavitação aumenta. O mesmo ocorre para o cenário 3, visto que também haverá um acréscimo na área de fluxo.

Dessa forma, como já visto nesse trabalho, para número de cavitação muito alto a cima de 1, não haverá a formação de bolhas nem o fenômeno da cavitação. E ainda, nota-se que nos testes realizados na bancada em questão, quanto menor foi o número cavitacional, houve maior intensidade das bolhas da formação de bolhas, ainda que não signifique maior rendimento, pois este depende do objetivo da utilização da cavitação.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados obtidos pela experimentação realizada na bancada, é possível obter algumas conclusões, conforme a seguir:

- Quando houve uma maior perda de carga, observou-se uma diminuição do número de cavitação;
- Com o acréscimo do número de furos, é possível ter uma diminuição de perda de carga e maior facilidade de formação de bolhas de cavitação;
- Visto que para os três testes há valores de ΔH no mesmo intervalo, não é possível obter a mesma forma de cavitação, elucidando que a geometria e quantidade de furos estão influenciando a formação das bolhas;
- Ter maior perda de carga não significa necessariamente maior rendimento cavitacional, evidenciando que o rendimento deverá ser identificado após análises e testes de acordo com cada situação desejada;
- As dimensões do tubo não possuem influência direta no fenômeno da cavitação em si, porém, é possível que a diminuição da área o fluxo impacte diretamente na velocidade do fluido. Entretanto, a velocidade do fluido também pode ser alterada e controlada por uma válvula no recalque da bomba;
- A cavitação não irá ocorrer quando a perda de carga for muito baixa.
- Recomendo, para trabalhos futuros, a análise da cavitação com o funcionamento simultâneo dos três trechos. Além disso, recomendo o estudo da cavitação com outros fluidos.

REFERÊNCIAS

- ALAMBERT JÚNIOR, N. **Manual prático de tubulações para abastecimento de água**. Rio de Janeiro: ABES, 1997, 176 p.
- ALMEIDA, A. S. O. **Modelagem hidráulica de flocculador de placas de orifícios**. 2016. 91f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Saneamento Ambiental)-Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.
- ALVES, P. H. L.; SILVA, P. S. L.; FERREIRA, D. C.; GONÇAVES, 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**, v. 24, e12, p. 1-8, 2019.
- ALVES, P.H.L. **Uso da cavitação hidrodinâmica para o tratamento de águas residuárias**. 2018. 113f. Dissertação (Mestrado em Inovação Tecnológica) - Programa de Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica, Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, 2018.
- AMBULGEKAR, G. V et al. Oxidação de alquilenos aos ácidos correspondentes usando permanganato de potássio aquoso por cavitação hidrodinâmica. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 11, n. 3-4, pág. 191-196, 2004.
- ATKINS, P. W; JONES, L. **Princípios de química: questionando a vida moderna e o meio ambiente**. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- ATKINS, P. W; PAULA, J. **Físico-química**. Rio de Janeiro: LTC, 2013.
- BAPTISTA, M; LARA, M. **Fundamentos da Engenharia Hidráulica**. 3ª Edição ver. e ampl. Minas Gerais: Editora UFMG, 2014.
- BARROS, M.J.S et al. Estudo da perda de carga em tubulação curva utilizando fluidodinâmica computacional. CONEPETRO – III Congresso Nacional de Engenharia de Petróleo, Gás natural e Biocombustível. Editora Realize. **Anais...**, 2018.
- BASHIR, T. A. et al. The CFD driven optimisation of a modified venturi for cavitation activity. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 89, n. 6, 17 mar. 2011.
- BATISTA, M. D., ANHÊ, A. C. B. M., GONÇALVES, J. C. S. I. Use of hydrodynamic cavitation for algae removal: effect on the inactivation of microalgae belonging to genus *scenedesmus*. **Water Air Soil Pollut.** (2017) 228:443.
- BRASIL, A. N. **Maquinas Termo hidráulicas de Fluxo – Teoria Geral das Maquinas de Fluxo**, 2010.
- CAPPA, O.A.P. **Remoção de ácido húmico em águas usando cavitação hidrodinâmica: uma abordagem experimental e computacional**. 2018. 90f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologia Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, 2018.
- CID, A. S.; CORREA, T. Venturino: análise da variação de pressão em um tubo de Venturi utilizando Arduino e sensor de pressão. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 41, 2019.

COELHO, W.R. **Análise do fenômeno de cavitação em bomba centrífuga**. 2006. 267f. Dissertação (Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, Rio de Janeiro, 2006.

DULAR, M. et al. Use of hydrodynamic cavitation in (waste) water treatment. **Ultrasonics Sonochemistry**, 29, 577–588, 2016.

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.

GOGATE, P. R., PANDIT, A. B. A review and assessment of hydrodynamic cavitation as a technology for the future. **Current Science**. v. 91, n. 1, p.35-46, 2006.

GOGATE, P. R., TAYAL, R. K., PANDIT, A. B., **Cavitation: a technology on the horizon**. **Current Science**. v. 91, n. 1, p.35-46, 2006.

GOGATE, P.R., PANDIT, A. B.. Hydrodynamic cavitation: A State of the Art Review. **Chemical Engineering**. Mumbai, India, v. 17, p. 1-85, 2001.

GOGATE, Parágrafo R.; TAYAL, Rajiv K.; PANDIT, Aniruddha B. Cavitação: uma tecnologia no horizonte. **Ciência atual** , p. 35-46, 2006.

GOMES, M.S. **Cavitação hidrodinâmica para tratamento de águas**. 2015. 77f. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Coimbra, 2015.

GRIST, E. **Cavitation and the Centrifugal Pump: A Guide for Pump Users**. Philadelphia, PA: Taylor & Francis, 1999.

HILARES, R. T., ALMEIDA, G. F., AHMED, M. A., ANTUNES, F. A. F., da SILVA, S. S., HAN, J., dos SANTOS, J. C.. Hydrodynamic cavitation as an efficient pretreatment method for lignocellulosic biomass: A parametric study. **Bioresource Technology**. Reino Unido, v. 235, p. 301-308. 2017.

KULDEEP, SAHARAN, V. K. Computational study of different venturi and orifice type hydrodynamic cavitating devices. **Journal of Hydrodynamics**. v. 28, p. 293-305. 2016.

MACINTYRE, A.J. **Manual de instalações hidráulicas e sanitárias**. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Koogan S.A, 1990.

MOHOLKAR, V. S., PANDIT, A. B., Modeling of hydrodynamic cavitation reactors: a unified approach. **Chemical Engineering Science**. Oxford, v. 56, , 2001.

NETTO, Azevedo. **Manual de Hidráulica**. 8ª Edição. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda., 1998.

PASSETO, W. **Tubos de PVC coletores de esgotos prediais e despejos industriais**. In: Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária, 13. Paraguai 1972. São Paulo: SABESP, 1972.

PAWAR, S. K., MAHULKAR, A. V., PANDIT, A. B. Sonochemical effect induced by hydrodynamic cavitation: comparison of venturi/orifice flow geometries. **AIChE Journal** v. 63, n. 10. 2017.

PORTO, R. de M.. Sistemas Elevatórios – Cavitação. In: PORTO, R. M.. **Hidráulica Básica**. 4ª edição. São Carlos. EESC-USP, 2006. p. 154.

RAJORIYA, S., BARGOLE, S., SAHARAN, V. K., Degradation of reative blue 13 using hydrodynamic cavitation: Effect of geometrical parameters and different oxidizing additives. **Ultrasonics Sonochemistry**. Inglaterra, v. 37, p. 192-202. 2017.

SAHARAN V. K., RIZWANI M. A. and MALANI A. A. et al. Effect of geometry of hydrodynamically cavitating device on degradation of orange-G[J]. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 20, n.1, p. 345-353, 2013.

SANKS, R.L el al. **Pumping station design**, Boston: Butterworth-Heinemann, 1998.

SANTOS, S.L. **Uso da cavitação hidrodinâmica como uma alternativa para a produção de biodiesel**. 2009. 80f. Centro Universitário FEi, São Bernardo do Campo, 2009.

SHAH Y. T., PANDIT A. B. and MOHOLKAR V. S. **Cavitation reaction engineering**[M]. New York, USA: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 1999.

TAO, Y., CAI, J., HUAI, X., LIU, B., GUO, Z. Application of Hydrodynamic Cavitation to Wastewater Treatment. **Chemical Engineering & Technology Journal**. Alemanha, v. 39, p. 1363-1376. 13 de abril de 2016.

TELLES, P.C.S **Tubulação Industriais**: materiais, projeto, montagem. 9 ed. Ver e ampl. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1997.

TSUTIYA, M,T; ALEM SOBRINHO, P. **Coleta e transporte de esgoto sanitário**, 1 ed. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1999. 548p.

VENQUIARUT, L.D; DALLAGO, M.R.; SCHNORRENBERGER, L.O. Pressão de vapor e evaporação. **Revista Insignare Scientia**, vol 1, n. 2, Mai./Ago. 2018

WU, Z.L. ONDRUSCHKA, B., BRÄUTIGAM, P. Degradation of chlorocarbons driven by hydrodynamic cavitation. **Chemical Engineering Technology**. v. 30, p. 642–648. 2007.

ZHANG, H., WU, X., LI, X.. Oxidation and coagulation removal of COD from landfill leachate by Fered-Fenton process. **Chemical Engineering Journal**. v. 210, p. 188-194. 2012.

ANEXO A – DIAGRAMA DE MOODY

