

Cavitação hidrodinâmica para tratamento de águas

Mário da Silva Gomes



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA
DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Cavitação hidrodinâmica para tratamento de águas

Dissertação apresentada para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica na Especialidade de Energia e Ambiente

Autor

Mário da Silva Gomes

Orientador

Professor Doutor Miguel Rosa Oliveira Panão

Júri

Presidente: Professor Doutor Domingos Xavier Viegas

Vogais: Professor Doutor António Manuel Gameiro Lopes

Professor Doutor Miguel Rosa Oliveira Panão

Colaboração Institucional



Associação para o Desenvolvimento da
Aerodinâmica Industrial

Coimbra, Setembro, 2015

Resumo

O presente trabalho está enquadrado no estudo do fenómeno de cavitação, centrando-se essencialmente na cavitação hidrodinâmica aplicada ao tratamento de águas. Atualmente, o método de tratamento mais utilizado para a desinfeção de águas contaminadas com microrganismos é a cloração. No entanto, a utilização em excesso de cloro, associado a alguns compostos orgânicos, conduz à formação de substâncias cancerígenas potencialmente nefastas para a saúde pública. Assim sendo, um sistema ideal de desinfeção de águas contaminadas deveria basear-se numa tecnologia robusta, independente, de investimento reduzido e baixos custos de operação, com uma manutenção simples e eficaz, assim como deveria depender de um contributo mínimo ou nulo de agentes químicos, providenciando um tratamento seguro das águas. Um cavitador hidrodinâmico cumpre os requisitos previamente referidos, recorrendo ao fenómeno de cavitação para reduzir a presença de substâncias químicas e microrganismos na água, dependendo do número de eventos de cavitação gerados.

Este trabalho teve como principais objetivos fazer uma revisão do estado da arte sobre o fenómeno de cavitação, de modo a fundamentar a potencialidade da sua aplicação para tratamento de águas residuais, e construir uma instalação experimental que permitisse estudar diferentes condições de escoamento cavitante. Pretende-se, portanto, estabelecer critérios de *design* na geração de cavitação hidrodinâmica, explorando diferentes configurações de uma secção de ensaios que funciona como modelo, de modo a prover o conhecimento fluido-dinâmico fundamental para o desenvolvimento de ferramentas de *design* em cavitadores hidrodinâmicos.

Os resultados preliminares da instalação construída permitiram observar formações fluido-dinâmicas sugestivas do aparecimento do fenómeno de cavitação. Por outro lado, as estruturas fluido-dinâmicas associadas a diferentes geometrias de constrangimentos, e configurações, indicam a importância de prosseguir uma investigação experimental sistemática da sua influência na geração de cavitação hidrodinâmica e dos fundamentos físicos que estão na sua génese.

Palavras Chave: Cavitação, Cavitação hidrodinâmica, Instalação experimental, Secção de ensaios.

Abstract

The framework of this work is the study of the cavitation phenomenon, focusing on hydrodynamic cavitation in water treatment. Currently, the most used method for treating microorganism contaminated water is chlorination. However, the excessive use of chlorine, associated with some organic compounds, leads to the formation of cancer substances, potentially harming public health. Therefore, an ideal system for disinfecting contaminated waters should be based on a technology that is robust, independent, of reduced investment and operation costs, with a simple and effective maintenance, as well as minimum dependence or null of chemical agents, providing a safe water treatment. A hydrodynamic cavitator fulfills these requirements using the cavitation phenomenon to reduce the presence of chemicals and microorganisms in water, depending on the number of cavitation events.

The main objectives of this work are: to make a detailed state-of-art review on the cavitation phenomenon, in order to fundament its potential application for water treatment; to build an experimental setup that allows to study different cavitating flow conditions. Also, the establishment of design criteria in the generation of hydrodynamic cavitation is sought, exploring different configurations in a working section that operates as model, in order to promote the fundamental fluid dynamic knowledge to develop appropriate hydrodynamic cavitation design tools.

The preliminary results in the tests performed with the experimental facility allowed observing fluid dynamics formations suggestive of the emergence of cavitation. On the other hand, the fluid dynamic structures associated with different geometries in the constraints, and configurations, indicate the importance of continuing a systematic experimental research of its influence on generation of hydrodynamic cavitation and the physical fundamentals at their origin.

Keywords: Cavitation, Hydrodynamic cavitation, Experimental setup, Test section.

"Se o conhecimento pode criar problemas, não será através da ignorância que os resolveremos."

Isaac Asimov

À minha namorada, família e amigos.

Agradecimentos

A realização desta dissertação de mestrado contou com a colaboração e apoio de muitas pessoas, que direta ou indiretamente contribuíram para que isso fosse possível, às quais não posso deixar de prestar o meu reconhecimento.

Em primeiro lugar, agradecer ao Professor Doutor Miguel Panão pela disponibilidade demonstrada ao longo do trabalho, sempre com uma orientação cuidada e apoio incondicional, facilitando a realização do mesmo.

Agradecer ao Sr. Cardoso o tempo disponibilizado e o auxílio na concretização deste projeto.

Agradecer à minha mãe pelo esforço realizado ao longo destes longos anos de trajeto académico, ao meu pai por toda a ajuda na realização do trabalho na vertente mais prática e ao meu irmão por todo o apoio demonstrado nesta fase.

Agradecer à Raquel, pela cooperação e carinho manifestado todos estes anos, um suporte que me permitiu chegar até esta fase.

Por último, um agradecimento especial a todos os meus amigos que me acompanharam nesta caminhada.

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Objetivos	2
1.2	Estado atual do conhecimento	3
1.2.1	Noções históricas	3
1.2.2	Conceito de cavitação	5
1.2.3	Núcleos de cavitação	8
1.2.4	Efeitos no fenómeno de cavitação	10
1.2.5	Número de cavitação	12
1.3	Tipos de cavitação	15
1.3.1	Modo de geração	15
1.3.2	Forma das nuvens de cavitação	16
1.3.3	Grau de intensidade	16
2	Desafios à aplicação da cavitação hidrodinâmica	19
3	Instalação experimental	31
3.1	Circuito fechado de recirculação de água	31
3.2	Materiais e equipamentos	32
3.2.1	Bomba centrífuga	32
3.2.2	Válvula de balanceamento com caudalímetro	32
3.2.3	Outros componentes da instalação	33
3.3	Secção de ensaios	34
3.4	Montagem da instalação experimental	36
3.5	Medição do fenómeno de cavitação	38
4	Apresentação e discussão de resultados	39
4.1	Primeira configuração	39
4.2	Segunda configuração	41

5 Conclusões	47
5.1 Sugestões de trabalhos futuros	48
Bibliografia	53
A Procedimento de mudança de configuração	55

Lista de Figuras

Figura 1.1	Diagrama de fase da água [adaptado de Franc & Michel (2003)].	5
Figura 1.2	Desenvolvimento do micro-jato numa bolha de cavitação durante o seu colapso.	7
Figura 1.3	Influência da proximidade da bolha à superfície sólida no desenvolvimento do micro-jato no colapso de uma bolha de cavitação. O intervalo de tempo entre as fotos é de $2 \mu s$ (Brennen, 1995).	7
Figura 1.4	Forças estáticas numa bolha esférica (Tomás, 1986).	10
Figura 1.5	Efeitos da cavitação [adaptado de Ozonek (2012)].	11
Figura 1.6	Escoamento de um líquido numa conduta provida de uma constricção.	12
Figura 2.1	Representação esquemática da instalação experimental (Gogate & Kabadi, 2009).	22
Figura 2.2	Configurações das placas de orifícios (Gogate & Kabadi, 2009).	23
Figura 2.3	Dispositivo de geração de cavitação hidrodinâmica (Sampath Kumar & Moholkar, 2007).	24
Figura 2.4	Representação esquemática da instalação experimental (Saharan <i>et al.</i> , 2013).	25
Figura 2.5	Representação esquemática dos dispositivos de cavitação hidrodinâmica (Saharan <i>et al.</i> , 2013).	26
Figura 2.6	Geometria do dispositivo Venturi (Capocelli <i>et al.</i> , 2014).	26
Figura 2.7	Corte transversal da configuração do reator (Ihara <i>et al.</i> , 2014).	27
Figura 2.8	Disposição dos elétrodos (Ihara <i>et al.</i> , 2014).	28
Figura 3.1	Esboço da instalação experimental.	31
Figura 3.2	Bomba centrífuga Grundfos modelo CM 10-1 e correspondente chapa característica.	32
Figura 3.3	Válvula de balanceamento Caleffi (esquerda) e caudalímetro com indicador de caudal de movimento magnético (direita).	33

Figura 3.4	Reservatório de aproximadamente 200 litros de capacidade (esquerda) e Filtro Atlas SX Plus (direita).	33
Figura 3.5	Distribuidor Gardena para controlo de caudal (esquerda) e dispositivo de leitura de pressão e temperatura (direita).	34
Figura 3.6	Secção de ensaios em CAD.	35
Figura 3.7	Dispositivo de entrada e saída da secção de ensaios em PVC, com passagem de um canal circular para retangular.	35
Figura 3.8	Dimensões da secção de ensaios ($w = 40$ mm; $H = 10$ mm; $h = 2$ mm; $L = 500$ mm).	35
Figura 3.9	Dimensões dos constrangimentos.	36
Figura 3.10	Secção de ensaios.	36
Figura 3.11	Instalação experimental.	37
Figura 3.12	Alterações na secção de ensaios base.	38
Figura 4.1	Disposição do constrangimento na secção de ensaios, para a primeira configuração.	39
Figura 4.2	Desenvolvimento do fenómeno de cavitação no ensaio realizado para um constrangimento, numa vista lateral.	40
Figura 4.3	Disposição dos constrangimentos na secção de ensaios, para a segunda configuração.	41
Figura 4.4	Exemplos de estruturas visualizadas em filme no primeiro constrangimento da secção de ensaios.	43
Figura 4.5	Exemplos de estruturas visualizadas em filme no segundo constrangimento da secção de ensaios.	44
Figura 4.6	Exemplos de estruturas visualizadas em filme no primeiro constrangimento de uma vista superior.	45
Figura 4.7	Exemplos de estruturas visualizadas em filme de uma vista superior.	45

Nomenclatura

H	Altura da secção de ensaios [m]
h	Altura da secção mínima de passagem do escoamento numa conduta de secção retangular [m]
L	Comprimento do segmento de acrílico da secção de ensaios [m]
p_0	Pressão na secção mínima de passagem do escoamento [bar]
p_1	Pressão estática absoluta num ponto de referência do escoamento fora da zona de cavitação [bar]
p_g	Pressão estática dos gases contidos na bolha [bar]
p_l	Pressão exterior à bolha existente no líquido [bar]
p_v	Pressão de vapor saturado [bar]
Q	Caudal volúmico [L/min]
R	Raio da bolha [μm]
Re	Número de Reynolds ($= \rho u d / \mu$)
S	Tensão superficial [N/m]
T	Temperatura ambiente do líquido [K]
T'	Temperatura de mudança de fase [K]
v_0	Velocidade na secção mínima de passagem do escoamento [m/s]
v_1	Velocidade média num ponto de referência do escoamento fora da zona de cavitação [m/s]
w	Largura da secção de ensaios [m]
Z	Fator de dispersão

Símbolos gregos

ρ	Massa volúmica [kg/m^3]
--------	---

σ Número de cavitação

Acrónimos

GLASS Global Analysis and Assessment of Sanitation and Drinking-
Water

1 Introdução

A escassez de recursos de água doce faz da gestão sustentada destes recursos uma preocupação ambiental. Esta problemática tem suscitado o interesse pela reutilização de águas residuais tratadas, resultando no rápido crescimento de tecnologias para o seu tratamento (Petkovšek *et al.*, 2013).

Em julho de 2010, a Organização das Nações Unidas reconheceu o acesso à água potável como um direito humano essencial, contudo, este direito ainda se encontra longe de estar assegurado a toda a população mundial. De acordo com o relatório GLASS 2014 (estudo realizado a cada dois anos pela Organização Mundial de Saúde), cerca de 748 milhões de pessoas em todo o mundo ainda não teriam acesso a água potável de forma sustentada e outros 1800 milhões usariam uma fonte contaminada, sendo as zonas mais críticas os ambientes rurais localizados no continente africano e sudeste do continente asiático.

De entre os múltiplos agentes desinfetantes que podem ser empregues no processo de desinfecção de águas contaminadas, o cloro é o produto mais utilizado, num processo designado por cloração. A presença de compostos orgânicos em águas que sofrem este processo resulta na formação de trihalometanos, sub-produtos da desinfecção. Os trihalometanos são considerados compostos cancerígenos e a sua presença na água deve ser evitada (Meyer, 1994).

Apesar do conhecimento sobre cavitação existir há muitos anos, a sua aplicação na eliminação de poluentes em águas contaminadas não foi ainda totalmente investigada. Até agora, a atenção tem sido principalmente dirigida aos efeitos negativos da cavitação e sua influência sobre a durabilidade dos equipamentos hidráulicos. No entanto, a investigação levada a cabo nos últimos anos tem mostrado que existem processos físicos e químicos que acompanham o fenómeno de cavitação que podem ser utilizados em novas tecnologias para o tratamento de águas contaminadas. Os processos industriais usados para este fim exigem que as operações sejam realizadas da forma mais eficiente no que diz respeito à qualidade do resultado obtido e à economia de energia e tempo de uma forma ambientalmente benigna. Nesse sentido, a cavitação é um fenómeno que oferece um grande potencial neste domínio (Gogate & Kabadi, 2009).

Atualmente, a investigação em cavitação tem-se focado principalmente em três áreas. A primeira diz respeito ao desenvolvimento de um modelo que descreva o fenómeno associado

à implosão dinâmica das bolhas formadas por cavitação, uma vez que os modelos físicos clássicos existentes, iniciados por Rayleigh em 1917, não assumem uma série de fatores com grande impacto nos processos físico-químicos que ocorrem durante a cavitação, e que serão abordados posteriormente. A segunda centra-se no impacto negativo da cavitação hidrodinâmica procurando reduzir esses efeitos sobre os sistemas hidráulicos, e, por fim, a terceira área de investigação foca-se no aproveitamento dos efeitos da cavitação em diversos campos de aplicação, como por exemplo o tratamento de águas, no qual incide este trabalho (Tomás, 1986).

Os resultados experimentais de trabalhos realizados no âmbito da cavitação mostram que a cavitação hidrodinâmica possui grande potencial na remoção eficiente de produtos químicos, sugerindo que se continue com a investigação neste domínio, nomeadamente no desenvolvimento de um *design* apropriado para uso comercial.

Uma das mais importantes tarefas nesta área consiste em desenvolver um método adequado envolvendo cavitação hidrodinâmica, onde não seja necessário usar catalisadores, nomeadamente, agentes químicos, e, além disso, que possa ser realizada em condições normais de temperatura e pressão, permitindo uma simplificação tecnológica importante do processo e reduzindo a energia consumida (Ozonek, 2012).

Esta dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos, entre eles a presente introdução que, além dos objetivos, inclui uma revisão do estado atual do conhecimento nesta área de investigação, apresentando uma síntese geral dos conhecimentos existentes sobre o fenómeno de cavitação na generalidade. O segundo dedica-se particularmente aos desafios em relação à aplicação da cavitação hidrodinâmica no tratamento de águas residuais, debruçando-se sobre alguns aspetos julgados de maior interesse para o desenvolvimento da instalação laboratorial. O terceiro capítulo é dedicado à metodologia de investigação proposta na construção da instalação (projeto, materiais e equipamentos utilizados, bem como a definição das condições de operação) e o quarto capítulo inclui resultados preliminares onde se pode inferir sobre as estruturas hidrodinâmicas geradas. Por fim, no último capítulo são sintetizadas algumas notas conclusivas do trabalho realizado.

1.1. Objetivos

O presente estudo tem como objetivo fazer uma detalhada revisão do estado da arte sobre o fenómeno de cavitação, de modo a fundamentar a potencialidade da sua aplicação para tratamento de águas residuais, focando essencialmente na vertente hidrodinâmica. Posteriormente, construiu-se uma instalação que permite avaliar as estruturas fluido-dinâmicas associadas aos

constragimentos que originam a formação de bolhas por cavitação. Os constragimentos podem ter diversas geometrias, bem como configurações, por exemplo, isolados ou dispostos em cadeia. A instalação construída permitirá, então, em futuros trabalhos, a investigação da influência da adoção de diferentes configurações na geração de cavitação hidrodinâmica e dos fundamentos físicos que estão na sua gênese.

1.2. Estado atual do conhecimento

A revisão que se segue mostra como a cavitação, vista inicialmente como um fenômeno que deve ser evitado de forma a permitir o bom funcionamento de instalações hidráulicas, tem vindo a ser utilizada com benefícios há vários anos, em diversas áreas da engenharia. É feita ainda referência a alguns conceitos mais específicos acerca do fenômeno, nomeadamente no que diz respeito à cavitação hidrodinâmica, de forma a providenciar um conhecimento mais aprofundado sobre as características particulares do mesmo, de modo a aferir sobre os desafios que se colocam aquando da sua aplicação ao tratamento de águas residuais, que posteriormente será aplicado na análise do trabalho realizado.

1.2.1. Noções históricas

A palavra cavitação é originária do latim *cavitas* (cavidade) e foi introduzida em 1895 pelo engenheiro naval britânico Robert Edmund Froude (Grist, 1999). Apesar da cavitação ter sido registada pela primeira vez por Newton em 1704 (Newton, 1952) e prevista por Euler (1755) nos seus estudos acerca de máquinas hidráulicas, deve-se a Reynolds em 1873 a primeira descrição deste fenômeno, apresentada na sequência dos ensaios laboratoriais realizados relativamente ao comportamento de hélices utilizando um escoamento numa conduta provida de um estrangulamento (Sheldon, 1995). No entanto, pode dizer-se que o fenômeno de cavitação só assumiu real importância no domínio da engenharia, quando os seus efeitos se manifestaram de forma acentuada no funcionamento das hélices dos navios oceânicos. Os primeiros estudos experimentais do fenômeno resultariam da investigação das causas de problemas associados às condições de funcionamento previstas para o contratorpedeiro britânico *Daring* em 1894 e para o primeiro navio de turbina a vapor, o *Turbinia* em 1895. O insucesso dos resultados da viagem experimental do *Turbinia* levaram Charles Algernon Parsons a projetar e construir, nesse mesmo ano de 1895, o primeiro túnel hidrodinâmico conhecido, onde desenvolveu ensaios de cavitação com uma hélice de duas polegadas de diâmetro, tendo os resultados destes ensaios permitido aumentar a velocidade máxima do navio. Estes estudos pioneiros acerca da cavitação em hélices realizados por Parsons foram bastante importantes,

uma vez que, para além do seu interesse no domínio específico da otimização das condições de funcionamento de hélices, constituiu o ponto de partida para o desenvolvimento de túneis de cavitação e utilização da experimentação em modelo no estudo do fenómeno de cavitação e seus efeitos (Parsons, 1906; Tomás, 1986).

Em 1917, John William Strutt, mais conhecido no campo científico por Lord Rayleigh, apresentou uma análise teórica para o colapso de um vazio esférico localizado no seio de um líquido ideal, que constituiu uma contribuição fundamental para o estudo do fenómeno da cavitação e suas consequências. O problema tratado por Rayleigh, não só permitiu prever a existência de elevadas pressões associadas ao colapso das bolhas de cavitação, o que constituiria a primeira justificação lógica para as erosões observadas em fronteiras sólidas de escoamentos com cavitação, como tem servido também de base a todos os estudos teóricos que posteriormente se desenvolveram neste domínio (Tomás, 1986).

Diversas contribuições importantes para o progresso dos conhecimentos no domínio da cavitação foram desenvolvidas posteriormente, devendo salientar-se, entre outros, os trabalhos de Futtinger, Ackeret e Thoma na Alemanha, Tenot em França, e Roger e Moody nos Estados Unidos da América (Tomás, 1986).

A partir dos anos trinta, a investigação no domínio geral da cavitação englobando o estudo do fenómeno e demais aspetos com ele relacionados, nomeadamente as suas consequências, tem sido objeto de uma acentuada intensificação, bem evidenciada pelo crescente volume de trabalhos científicos que têm vindo a ser publicados. Esta atividade, traduzindo o interesse que o assunto tem despertado, demonstra a complexidade do fenómeno e a multiplicidade de problemas que se têm levantado neste domínio. De um modo geral, verifica-se que esta atividade tem vindo a ser estimulada pelas exigências de um rápido desenvolvimento tecnológico, acarretando uma intensificação do risco de cavitação em domínios tradicionalmente confrontados com as consequências do fenómeno, como a construção naval e a engenharia hidráulica, e pelo reconhecimento do papel que a cavitação pode desempenhar, muitas vezes através de um aproveitamento das suas consequências numa vasta e diversa gama de domínios científicos, onde o fenómeno é deliberadamente provocado, com o objetivo de aproveitar os seus efeitos para fins úteis (Tomás, 1986; Young, 1989).

As suas características de produção de ruído têm conduzido à aplicação da cavitação como fonte sonora de elevada intensidade em dispositivos utilizáveis para a observação e estudo do fundo do mar. As suas potencialidades erosivas têm sido exploradas vantajosamente em dispositivos de limpeza ultra-sónica (constituindo uma das aplicações mais divulgadas da cavitação), através da utilização de jatos cavitantes na perfuração de rochas e na limpeza de

superfícies. A sua capacidade de promover efeitos de agitação e mistura tem sido utilizada em processos industriais, como a dispersão de partículas sólidas em líquidos (cosméticos e tintas), a homogeneização do leite e a síntese de biodiesel. Os efeitos químicos associados ao fenómeno são de grande interesse no domínio da engenharia química e biomédica, graças à sua capacidade de desintegrar microrganismos ou estruturas celulares, permitindo extrair o conteúdo da célula ou destruir bactérias, contribuindo por exemplo, para o tratamento de águas residuais (Ozonek, 2012).

1.2.2. Conceito de cavitação

Existem dois processos que transformam uma substância do estado líquido para o estado gasoso. Se o processo ocorrer a pressão constante e com aumento de temperatura, designamos o mesmo por ebulição. Se ocorrer a temperatura constante, com diminuição da pressão, é designado por cavitação. No entanto, em alguns casos a transferência de calor necessária para a vaporização é tal, que a mudança de fase ocorre para uma temperatura (T') mais baixa do que a temperatura ambiente do líquido (T). A diferença de temperatura ($T - T'$) na cavitação é designada por atraso térmico e pode ser observada na Fig. 1.1 (Franc & Michel, 2003).

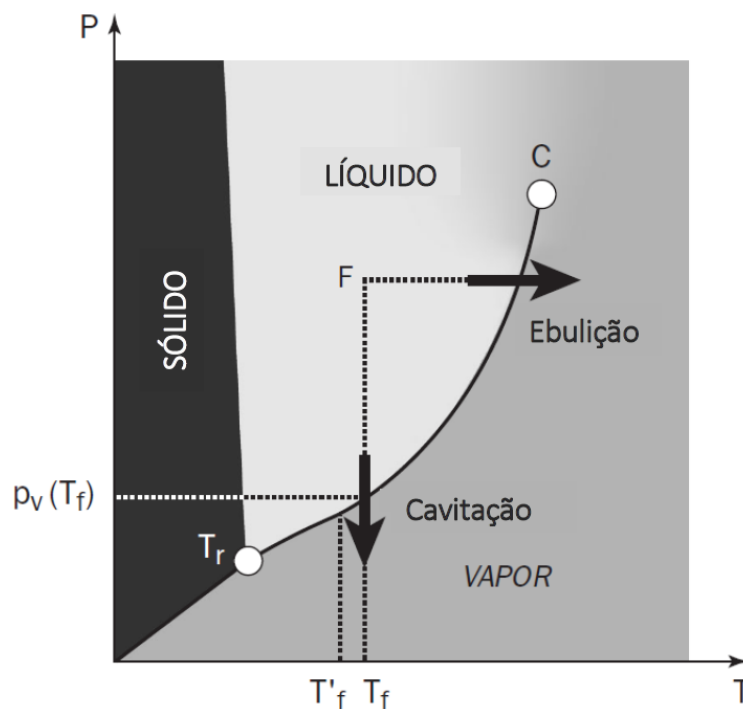


Figura 1.1: Diagrama de fase da água [adaptado de Franc & Michel (2003)].

A cavitação é um fenómeno isotérmico, suscetível de ser desencadeado em qualquer meio líquido, em zonas onde efeitos de carácter dinâmico possam originar uma diminuição local da pressão (estática) até um determinado valor crítico assimilável, em termos práticos, à pres-

são do vapor saturado (p_v) correspondente à temperatura local. O fenómeno desencadeia-se quando a diminuição local da pressão for suficiente para perturbar o equilíbrio de microdomínios gasosos (constituídos por gases, vapor do líquido ou, eventualmente, mistura dos dois componentes) existentes no seio do líquido ou localizados nas suas fronteiras (núcleos de cavitação), originando a formação de discontinuidades elementares, designadas por cavidades ou bolhas de cavitação, processo conhecido como nucleação. A nucleação é o princípio do fenómeno de cavitação. Uma vez formadas, estas bolhas de vapor iniciam um processo de crescimento (fase de expansão) resultante da ocorrência de um fenómeno de vaporização rápida do líquido (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. Se durante este processo de crescimento, as bolhas de vapor forem submetidas a uma pressão superior ao valor crítico correspondente à pressão do vapor saturado (como pode suceder, por exemplo, numa dada região de um escoamento quando ao serem transportadas para jusante, atingirem zonas de pressão mais elevadas), o seu desenvolvimento é interrompido, iniciando-se uma fase de implosão (fase de compressão, onde a pressão no interior da bolha aumenta e o vapor começa a condensar), conduzindo ao respetivo 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. Com a formação das cavidades, há uma mudança nas características do escoamento que pode tornar-se transiente. As cavidades serão, então, bruscamente reabsorvidas pelo líquido que as rodeia produzindo-se a sua extinção por dissolução dos gases e condensação do vapor que formavam o respetivo conteúdo (Tomás, 1986).

Quando o colapso das bolhas de vapor ocorre longe das superfícies sólidas, de uma forma simétrica, há uma porção de energia emitida de forma quase instantânea, dando origem a uma onda de choque. Se o colapso da bolha ocorrer na proximidade com uma superfície sólida de forma assimétrica, forma-se um micro-jato de líquido no interior da mesma. Esta assimetria é provocada pela diferença de aceleração para o interior da bolha, uma vez que de um lado da bolha, a aceleração é maior devido à perturbação motivada pela superfície sólida, fazendo com que o micro-jato formado possua uma velocidade elevada e incida nesta superfície, fenómeno observado na Fig. 1.2 (Koivula, 2000). O desenvolvimento de micro-jatos depende da distância do centro da bolha à superfície sólida e pode ser observado na Fig. 1.3. Uma outra condição assimétrica que pode motivar a formação de micro-jatos é a proximidade de várias bolhas de vapor numa "nuvem" finita de bolhas. Nesta condição, os micro-jatos tendem a direcionar-se para o centro da "nuvem" (Brennen, 1995).

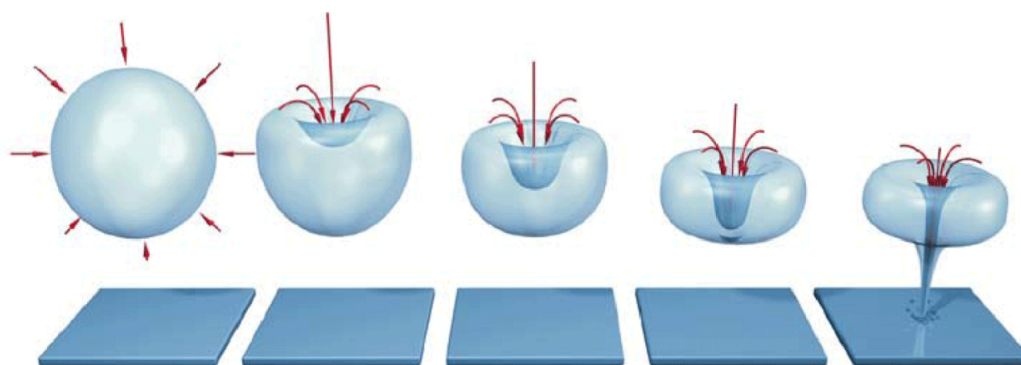


Figura 1.2: Desenvolvimento do micro-jato numa bolha de cavitação durante o seu colapso.

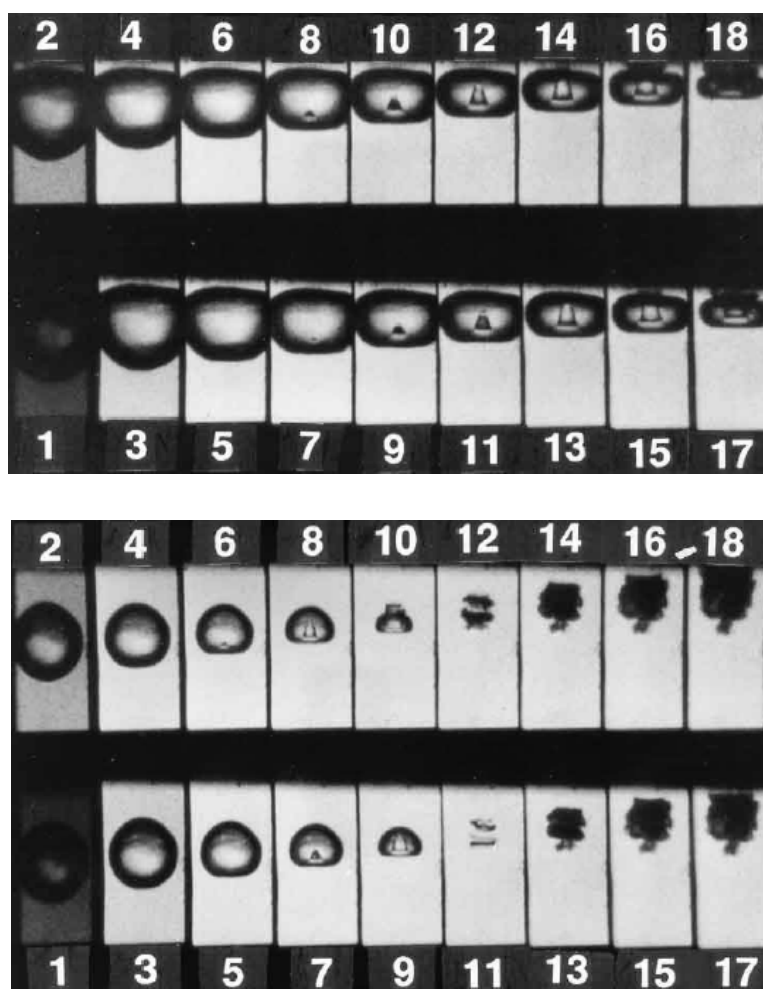


Figura 1.3: Influência da proximidade da bolha à superfície sólida no desenvolvimento do micro-jato no colapso de uma bolha de cavitação. O intervalo de tempo entre as fotos é de $2 \mu s$ (Brennen, 1995).

É possível concluir que o processo de formação, crescimento e colapso das cavidades ou bolhas de cavitação, que constitui a característica essencial do fenômeno de cavitação, estará dependente da ocorrência simultânea, num dado meio líquido, de três condições essenciais:

- A existência de núcleos gasosos, de dimensões adequadas, que irão funcionar como embriões das bolhas de cavitação;
- A presença de zonas de redução localizada da pressão, necessárias para promover a formação das referidas bolhas e o seu crescimento por vaporização do líquido;
- A possibilidade de ocorrência de um restabelecimento da pressão, necessário para interromper o crescimento das bolhas e promover o respetivo colapso.

Este fenômeno tanto se pode manifestar no interior do líquido, como junto de uma fronteira sólida, como já foi referido, e pode manifestar-se em líquidos em repouso ou em movimento. Contudo, apesar do fenômeno de cavitação poder ser produzido num líquido em repouso, por consequência de variações dinâmicas da pressão, associadas à presença de um campo sonoro (cavitação acústica) ou à vibração de um corpo sólido mergulhado no líquido, de um modo geral, no domínio da engenharia hidráulica, a sua ocorrência está normalmente associada a efeitos hidrodinâmicos, pelo que, se utiliza habitualmente a designação de cavitação hidrodinâmica.

1.2.3. Núcleos de cavitação

Como foi mencionado anteriormente, a cavitação trata-se de um fenômeno mais complexo do que dizer apenas que ocorre quando a pressão se reduz até um valor igual ou inferior à pressão de vaporização de um líquido. Para que as bolhas de cavitação possam ser criadas, existe a necessidade de rutura do líquido, e esta ação não é medida pela pressão de vapor, mas sim pela resistência à tensão, que se relaciona com a tensão superficial do líquido a uma determinada temperatura de operação. Um aumento da temperatura provoca uma queda no valor de tensão superficial, o que facilita o processo de evaporação.

A teoria da resistência à tração de um líquido “puro” prevê que, devido à sua estrutura física, a rutura da continuidade do líquido e a formação de uma fase gasosa desenvolvida, exigiriam a aplicação de tensões de tração muito elevadas (equivalente às forças de ligação intermoleculares) (Petkovšek *et al.*, 2013). Em líquidos puros, privados de quaisquer impurezas, a transição de fase líquido-gás como resultado da expansão do líquido é quase impossível, uma vez que existem grandes esforços de tração, na ordem das centenas de MPa. Se as

máquinas hidráulicas operassem com esse tipo de líquido, praticamente não existiria o fenómeno de cavitação, apenas em situações muito específicas, para velocidades ou temperaturas tremendamente elevadas.

Em geral, atualmente, é aceite que a cavitação de líquidos não pode ocorrer sem a pré-existência de núcleos microscópicos contendo gases ou vapor do líquido. Os gases ou o vapor estão presentes no próprio líquido ou em pequenas fissuras das matérias em suspensão ou das fronteiras sólidas (Quintela, 2014).

Pode então concluir-se que devem existir impurezas ou micro-bolhas de gás no líquido, que resultam na diminuição da resistência à tração do líquido e que posteriormente tendem a formar pequenas bolhas de vapor, processo designado por nucleação, o princípio do fenómeno da cavitação, como foi referido anteriormente.

Diversas evidências experimentais demonstram a presença de núcleos gasosos não dissolvidos num líquido comum, como por exemplo a água (Tomás, 1986):

- A cavitação é mais difícil de produzir em água que tenha sido previamente desarejada ou pressurizada por uma sujeição temporária a uma forte compressão. O desarejamento ou a pressurização forçariam a dissolução dos gases não dissolvidos, provocando a destruição parcial ou total dos núcleos, o que se traduziria num aumento da resistência à tração da água ensaiada (Knapp, 1958);
- A água cavita mais facilmente imediatamente a seguir ao colapso de uma bolha de cavitação ou após a introdução na água de um objeto que tenha sido exposto ao ar. Um colapso prévio de uma bolha de cavitação ou o contacto com um objeto exposto ao ar poderiam aumentar as dimensões dos núcleos existentes ou introduzir novas substâncias.

Importa também realçar sob que forma, e através de que processo, os microdomínios gasosos não dissolvidos podem persistir num líquido. Para os líquidos comuns, e especialmente para a água, a fonte de gases mais facilmente disponível é a atmosfera, pelo que se admite que os gases presentes, são na maior parte dos casos, de origem atmosférica (Tomás, 1986).

Uma bolha de vapor esférica estável num líquido em repouso representa um balanço entre a força de tensão superficial ($2S/R$), a pressão do vapor saturado (p_v), a pressão estática dos gases contidos na bolha (p_g), e a pressão exterior existente no líquido (p_l) (Fig. 1.4). Devido aos efeitos de tensão superficial, a pressão no interior da bolha é superior à pressão exterior e o equilíbrio pode exprimir-se pela seguinte equação:

$$p_l = (p_v + p_g) - \frac{2S}{R} \quad (1.1)$$

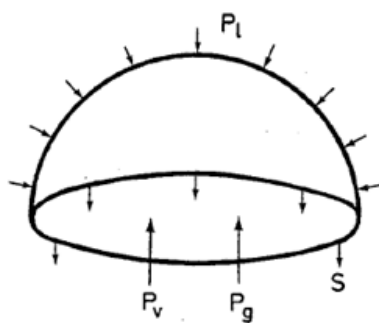


Figura 1.4: Forças estáticas numa bolha esférica (Tomás, 1986).

De entre os vários modelos que explicam o mecanismo de estabilização dos núcleos gasosos no líquido, o mais aceite foi proposto por Harvey em 1944 (Harvey *et al.*, 1944) o qual assume que “a cavitação tem origem nos núcleos de gases não dissolvidos que existem nos interstícios das paredes do reservatório em vez das cavidades livres do líquido”, isto pelo facto dos núcleos de gás livres serem geralmente instáveis e tenderem a ir para o interior do líquido. Por outro lado, os núcleos de gás nos interstícios das paredes podem não se dissolver, mesmo sob altas pressões.

1.2.4. Efeitos no fenómeno de cavitação

A cavitação resulta na geração de pontos quentes devido às condições de pressão e temperatura elevadas, na produção de radicais livres altamente reativos gerados no processo em consequência da dissociação de vapores presos nas bolhas de cavitação como resultado do movimento transiente da bolha impulsionado pela variação de pressão no volume do meio líquido, e na turbulência associada às correntes de circulação do líquido. Estes, entre outros efeitos posteriormente referidos, podem resultar na intensificação de várias reações físico-químicas (Gogate & Kabadi, 2009; Sampath Kumar & Moholkar, 2007).

As reações químicas são induzidas no volume médio, quando o conteúdo da bolha se mistura com o líquido circundante. O processo de mistura pode ocorrer de duas formas, com a fragmentação da bolha no ponto de máxima compressão (raio mínimo da bolha) ou por difusão de diferentes espécies químicas através da parede da bolha durante as pulsações da mesma. Porém, a contribuição para o processo global de mistura por fragmentação é muito maior em relação à difusão, que é um processo mais lento (Sampath Kumar & Moholkar, 2007).

O vapor de líquido retido na bolha durante a fase de compressão mínima sofre rutura para produzir radicais, devido às altas temperaturas e pressões atingidas na bolha. Contudo, a atual instrumentação não permite uma medição quantitativa direta desse fenómeno. Estas

quantidades têm de ser obtidas indiretamente, isto é, utilizando um modelo numérico centrado na dinâmica da bolha.

Depois de uma intensa pesquisa realizada nos últimos anos, foi admitida a possibilidade de aplicar o fenómeno de cavitação a áreas relacionadas com a proteção do meio ambiente. Como foi referido anteriormente, a cavitação estimula muitos efeitos físico-químicos importantes, que podem ser utilizados para degradar e/ou oxidar os poluentes presentes na água. Bolhas de cavitação produzidas por variação de pressão cumprem a função de "micro-reatores", que dentro de um período muito curto de tempo podem chegar a temperaturas e pressões extremas, e produzir radicais hidroxilo, um dos oxidantes mais poderosos e excelentes iniciadores de reações em cadeia.

Os efeitos da cavitação podem então ser divididos em efeitos térmicos, efeitos químicos e efeitos mecânicos ou físicos, relacionados com as mudanças dentro da bolha de cavitação desde o momento da sua criação até à sua implosão (Fig. 1.5).

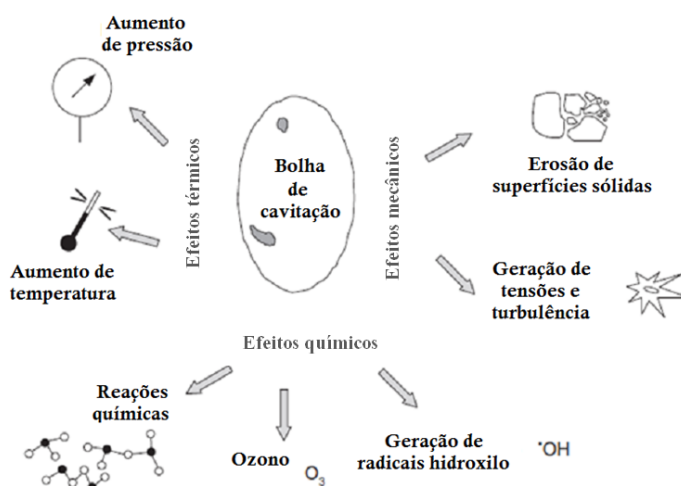


Figura 1.5: Efeitos da cavitação [adaptado de Ozonek (2012)].

A indicação mais conhecida da cavitação é o ruído, que produz uma gama de frequências entre os 10^2 Hz e os 10^5 Hz, resultado da implosão das bolhas. A cavitação favorece a dissipação de energia, causando um grande aumento de temperatura na vizinhança da zona de colapso das bolhas. A formação de bolhas de cavitação e a sua implosão são caracterizadas por uma densidade energética muito elevada, na ordem dos 10^{18} kW/m³. Durante a implosão de bolhas de cavitação, uma onda de choque primária é produzida com uma amplitude de pressão de cerca de 240 MPa e uma velocidade até 1700 m/s. No local do colapso das bolhas são também produzidas ondas secundárias com velocidades de cerca de 1800 m/s e pressões até 70 GPa. Estas ondas de choque intensas provocam um aumento drástico na temperatura (maior do que 1000 K) no centro da bolha e um aumento significativo na fase

de transição, superfície-limite, o que leva a alterações na composição química, acelerando as reações químicas e de transferência de massa. Estes efeitos resultantes do fenómeno de cavitação manifestam-se nomeadamente durante a fase de compressão do mesmo, durante períodos que variam de 1 a 50 μs (Ozonek, 2012; Arrojo & Benito, 2008).

Em suma, o mecanismo de desinfecção de microrganismos por cavitação é normalmente uma combinação dos seguintes efeitos (Gogate & Kabadi, 2009):

- Efeitos mecânicos: inclui a geração de turbulência, correntes de circulação do líquido e tensões tangenciais;
- Efeitos químicos: inclui a geração de radicais livres;
- Efeitos térmicos: geração de pontos quentes locais (condições de pressão e temperatura elevadas);
- Efeitos de tratamento combinados: quando a cavitação é combinada com agentes químicos.

1.2.5. Número de cavitação

O parâmetro principal para determinar a presença e intensidade de cavitação é uma grandeza adimensional designada por número de cavitação (σ). Diminuindo o número de cavitação, a probabilidade de ocorrência de cavitação ou de aumento da intensidade da mesma já presente, é maior (Petkovšek *et al.*, 2013). A diminuição do número de cavitação implica que o número de núcleos que intervêm no fenómeno seja maior, resultando na geração de mais bolhas. O número de cavitação a partir do qual a cavitação tem início é designado por número crítico de cavitação. Acima deste valor não ocorre cavitação.

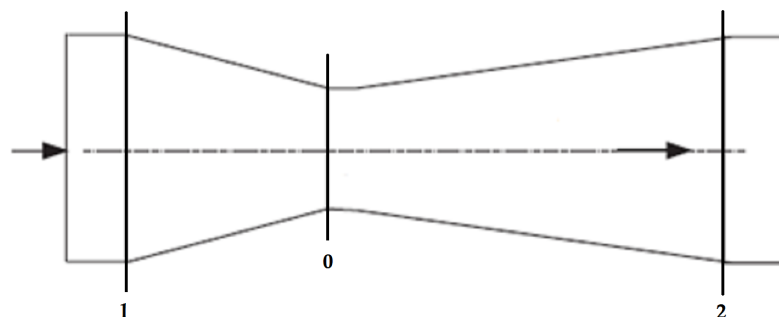


Figura 1.6: Escoamento de um líquido numa conduta provida de uma constrição.

Considerando o escoamento de um líquido através de uma conduta, conforme ilustrado

na Fig. 1.6 e assumindo que na secção mínima de passagem do líquido, a pressão é p_0 e a velocidade do escoamento é v_0 , a equação de Bernoulli para um escoamento unidimensional constante de um fluido incompressível para as secções transversais em 1 e 0 pode exprimir-se da seguinte forma:

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} = \frac{p_0}{\rho} + \frac{v_0^2}{2} \quad (1.2)$$

onde:

p_1 - pressão estática absoluta num ponto de referência do escoamento fora da zona de cavitação;

ρ - massa volúmica do líquido;

v_1 - velocidade média do escoamento obtida no mesmo ponto de referência.

Resolvendo a Eq. (1.2) em ordem à razão das velocidades, obtém-se:

$$v_0^2 - v_1^2 = \frac{2(p_1 - p_0)}{\rho} \Leftrightarrow \frac{v_0^2}{v_1^2} - 1 = \frac{(p_1 - p_0)}{\frac{\rho \cdot v_1^2}{2}} \quad (1.3)$$

Se a cavitação ocorresse na secção 0, isto é, se a tensão normal no elemento se anulasse, então p_0 seria igual à pressão de vapor saturado p_v a uma determinada temperatura de operação. Nesse caso, pode simplificar-se a Eq. (1.3) para

$$\sigma = \frac{(p_1 - p_v)}{\frac{\rho \cdot v_1^2}{2}} \quad (1.4)$$

em que σ corresponde ao número de cavitação. O termo no membro esquerdo da Eq. (1.3) é designado por fator de dispersão (Ozonek, 2012).

$$Z = \frac{v_0^2}{v_1^2} - 1 \quad (1.5)$$

Para que haja cavitação é necessário que $Z > \sigma$. Depois, assumindo que o caudal se conserva, caso a secção do canal seja retangular, como é o caso da secção de ensaios utilizada neste trabalho, a Eq. (1.5) simplifica-se para

$$Z = \left(\frac{H}{h}\right)^2 - 1 \quad (1.6)$$

onde:

H - altura da secção de ensaios;

h - altura da secção mínima de passagem do líquido.

Deste modo, o fator de dispersão depende apenas da geometria do canal retangular e da altura do constrangimento. O número de cavitação relaciona, no fundo, a queda de pressão máxima para dar origem ao fenómeno, em relação à pressão dinâmica que lhe está na origem. A pressão altera-se no limite ou na superfície de um corpo, em torno do qual o líquido flui, dependendo principalmente da variação da taxa de velocidade do escoamento. Assim sendo, a pressão dinâmica pode ser considerada como definidora do tamanho da queda de pressão, resultando na formação das cavidades e conseqüente crescimento das mesmas. Neste sentido, o significado físico do número de cavitação traduz a razão entre a intensidade das forças que se opõem à rutura da continuidade do líquido, tendendo a inibir a cavitação, e a intensidade das forças que a favorecem (Ozonek, 2012).

A determinação da intensidade da cavitação hidrodinâmica desempenha um papel bastante importante na conceção de soluções técnicas. Como foi mencionado anteriormente, valores do número de cavitação σ suficientemente elevados, geralmente correspondem a regimes de escoamento não cavitantes, ou seja, ausência de qualquer evidência de presença do fenómeno de cavitação. Valores suficientemente reduzidos estão normalmente associados a regimes cavitantes, em que o fenómeno se pode apresentar com um grau de desenvolvimento mais ou menos acentuado. Isto pode ser observado em alguns trabalhos, como o de Kwon & Yoon (2013) em que as experiências mostraram que um número de cavitação mais baixo gerava mais calor, ou o trabalho realizado por Wu *et al.* (2013) relativamente ao tratamento de alacloro com cavitação hidrodinâmica, tendo os resultados mostrado que a diminuição do número de cavitação leva a um aumento de eventos de cavitação, bem como da taxa de degradação de alacloro.

Os parâmetros que afetam a intensidade de cavitação são (Ozonek, 2012):

1. Parâmetros que determinam as características estruturais do reator (tamanho e forma do indutor de cavitação e câmara de escoamento);
2. Parâmetros que caracterizam as propriedades do meio líquido (viscosidade, densidade, tensão superficial e o conteúdo de gases dissolvidos);
3. Parâmetros associados às características do processo tecnológico, o tempo do processo (número de vezes que o meio atravessa a região de cavitação), bem como a dependência do mesmo em relação à pressão e temperatura.

Assim, a intensidade de cavitação depende do tamanho e número de bolhas de cavitação, bem como das condições de implosão das bolhas (p,T), influenciando os efeitos físico-químicos. Normalmente, o aumento do número de Reynolds é acompanhado por um aumento do número

de cavitação (pode ser resultado de um aumento da velocidade ou redução do coeficiente de viscosidade cinemática) (Ozonek, 2012).

1.3. Tipos de cavitação

1.3.1. Modo de geração

A cavitação com base no seu modo de geração pode ser classificada em quatro tipos (Gogate *et al.*, 2006):

- **Cavitação hidrodinâmica** – produzida pela variação de pressão estática no escoamento de um líquido, devido à variação de velocidade do escoamento como resultado de uma mudança de geometria na conduta. É normalmente produzida numa constricção (ou estrangimento), canais curvos ou como resultado de movimentos de corpos num líquido, como por exemplo, o movimento de uma hélice de um navio.
- **Cavitação acústica ou ultra-sónica** – resulta da variação da pressão no líquido devido à passagem de ondas sonoras, normalmente ultra-sónicas (16 kHz – 100 MHz). Estas ondas passam através do meio na forma de ciclos de compressão/rarefação. A separação das moléculas líquidas e formação das bolhas de cavitação por expansão ocorre no ciclo parcial de rarefação e conseqüentemente dá-se a compressão ou mesmo colapso no ciclo parcial de compressão, se a amplitude da onda de ultra-som for suficientemente alta. A cavitação ultra-sónica é o modo mais frequente de gerar cavitação em estudos à escala laboratorial (Sampath Kumar & Moholkar, 2007).
- **Cavitação ótica** – produzida por fotões de alta intensidade (laser), que quebram as ligações moleculares do líquido, formando bolhas.
- **Cavitação molecular ou de partículas** – produzida por um feixe de partículas elementares, por exemplo, neutrões ou prótons, rompendo um líquido, tal como numa câmara de bolhas.

De entre os vários modos de cavitação mencionados acima, a cavitação acústica e hidrodinâmica têm sido as de maior interesse académico e industrial devido à facilidade de operação e pelo facto de proporcionarem condições de cavitação adequadas para diferentes transformações físico-químicas. A cavitação ótica e de partículas são tipicamente utilizadas para a cavitação de uma única bolha, que não induz qualquer alteração física ou química da massa em solução. Devido aos altos custos operacionais, não se encontram aplicações práticas em grande escala e são apenas objeto de pesquisa em laboratório.

Embora a cavitação acústica seja o melhor método para diminuir o tempo de reação, constatou-se que na cavitação hidrodinâmica existe um menor consumo de energia, sendo portanto mais barata e com maior eficiência energética para geração de cavitação. Além disso, também concluíram que na cavitação hidrodinâmica a transferência do processo da escala laboratorial para o nível de produção industrial, é relativamente simples em comparação com a utilização de cavitação acústica (Ambulgekar *et al.* , 2004).

Foi realizado por esses investigadores que a cavitação hidrodinâmica tem provado ser o método mais eficiente para operações em larga escala. A cavitação hidrodinâmica tem sido utilizada em vários processos químicos severos, ou seja, que necessitam de agitação intensa, tais como a hidrólise de óleos gordurosos, a polimerização e despolimerização de soluções poliméricas aquosas, e o rompimento de células microbianas na desinfecção de águas.

1.3.2. Forma das nuvens de cavitação

Podemos identificar os vários tipos de cavitação, caracterizando as formas das nuvens de cavitação, dependendo de onde a nuvem de cavitação ocorre e das condições iniciais. A dificuldade no desenvolvimento de um método único de classificação é causado por uma diversidade de condições quando se realiza a análise. Por exemplo, Arzumanov (Ozonek, 2012) diferencia apenas duas formas básicas de cavitação, dependendo da forma da nuvem de cavitação. Cavitação supercificial (*Surface cavitation*) que corresponde ao desenvolvimento do fenómeno na superfície de corpos sólidos, permanecendo ligada a estes, e gerada, por exemplo, a partir de núcleos de cavitação presentes na fronteira das superfícies que envolvem o escoamento, desenvolvendo-se nessa zona. Este tipo de cavitação pode assumir várias formas diferentes, dependendo da geometria da conduta e dos parâmetros de escoamento. Pode apresentar a forma de bolhas (*bubble cavitation*), folha laminar (*laminar sheet*) ou cavitação anexa à folha (*attached sheet cavitation*). A segunda forma de cavitação é designada por cavitação livre (*detached cavitation*), sendo realizada ao longo do escoamento do líquido, podendo assumir a forma de um vórtice (*vortex cavity*).

1.3.3. Grau de intensidade

Com base no grau de intensidade, a cavitação pode ser classificada em transiente ou estável. As necessidades energéticas para a geração de cada uma são diferentes, pelo que se deve adequar os parâmetros de operação ao tipo de aplicação necessária.

Cavitação transiente é um processo em que a bolha gerada acabará por entrar em colapso a uma fração mínima do seu tamanho inicial, momento em que o gás presente nas bolhas se dissipa para o líquido circundante por meio de um mecanismo bastante violento, libertando

uma quantidade significativa de energia sob a forma de ondas de choque. No ponto de colapso total, a temperatura do vapor no interior da bolha pode ser de vários milhares de Kelvin e a pressão ser de várias centenas de atmosferas. No caso de cavitação estável ou não-inercial, pequenas bolhas num líquido são forçadas a oscilar em tamanho ou forma, devido à forma de entrada de energia, tal como um campo acústico, quando a intensidade da entrada de energia é insuficiente para causar o colapso da bolha total. Esta forma de cavitação provoca efeitos cavitacionais significativamente mais moderados do que a cavitação transiente (Gogate & Kabadi, 2009).

Moholkar & Pandit (1997) estudaram o papel desempenhado pela turbulência na alteração do comportamento de uma bolha de cavitação localizada a jusante do constrangimento no escoamento de um fluido. Verificaram que o comportamento da bolha muda drasticamente sob condições de escoamento turbulento, isto é, observaram os efeitos da variação de pressão na transformação de cavitação estável (sem turbulência) em cavitação transiente (com turbulência). Neste estudo foi ainda possível concluir que, com um aumento da pressão a jusante do constrangimento, o tamanho máximo da bolha antes do colapso aumenta, bem como a sua duração de vida, uma vez que a intensidade e a frequência de turbulência são maiores, logo a intensidade de cavitação também aumenta. Um aumento do diâmetro do tubo a jusante do estrangulamento aumenta o raio máximo da bolha antes do colapso, resultando num impulso de pressão elevado. Esta alteração de comportamento é devida ao aumento da escala de turbulência (assumiu-se como função do diâmetro do tubo e do constrangimento). A razão entre o diâmetro do constrangimento e do tubo fornece um possível meio de controlo sobre o volume cavitacional sem alterar a intensidade de cavitação. Um aumento do diâmetro do estrangulamento diminui a intensidade de turbulência e conseqüentemente aumenta a vida da bolha, uma vez que a perda de carga diminui, no entanto, o tamanho máximo da bolha atingido durante o colapso transiente não muda significativamente. Estes autores analisaram ainda que, apesar de haver pequenas bolhas formadas a jusante, o seu efeito na cavitação é maior devido ao impulso de pressão associado ao seu colapso. Pela análise deste trabalho fica evidente que a passagem de cavitação estável a cavitação transiente é resultado da turbulência no líquido. Uma decomposição de microrganismos em água contaminada eficiente implica, portanto, um comportamento transiente das bolhas de cavitação.

2 Desafios à aplicação da cavitação hidrodinâmica

A cavitação hidrodinâmica é um dos processos emergentes e a sua eficácia em aplicações tais como o tratamento de águas residuais ou desinfecção de água já é comprovada em diversos trabalhos, como tem vindo a ser mencionado (Badve *et al.* , 2014). Tem sido extensivamente estudada por diversos investigadores, dado ser um processo eficiente em termos energéticos e de fácil aplicação à escala industrial.

Como já foi referido, a cavitação hidrodinâmica pode ser gerada num escoamento usando simplesmente uma constricção, como uma placa de orifício, um tubo Venturi ou uma válvula de estrangulamento. Na constricção, a energia cinética do líquido aumenta com a correspondente diminuição da pressão local segundo o princípio de Bernoulli. Durante a passagem do líquido através da constricção, ocorre a separação da camada limite e uma quantidade substancial de energia é perdida na forma de uma queda de pressão, devido à permanente turbulência local. Uma intensidade de turbulência elevada no líquido é também gerada a jusante da constricção, dependendo da intensidade da queda de pressão e da pressão de recuperação, que por sua vez, dependem da geometria da constricção e das condições do escoamento. É possível concluir que a intensidade de turbulência tem um efeito relevante sobre a intensidade da cavitação. Controlando as condições geométricas e de funcionamento do reator, a intensidade de cavitação requerida para um determinado processo pode ser gerada com o máximo de eficiência (Gogate & Kabadi, 2009).

Capocelli *et al.* (2014) estudaram o efeito da pressão de recuperação na degradação de p-nitrofenol por meio de cavitação hidrodinâmica. Para um valor da pressão de entrada fixo, o aumento da pressão de recuperação a jusante da constricção resulta em colapsos mais violentos e na libertação de radicais hidroxilo, o que explica o aumento da taxa de degradação de p-nitrofenol, comprovada experimentalmente. Neste estudo foi também realizada uma simulação numérica de uma bolha de cavitação nas condições experimentais exploradas. Com o desenvolvimento da tecnologia e de ferramentas numéricas cada vez mais avançadas, o estudo e a compreensão de fenómenos como a cavitação, tem vindo a sofrer um grande desenvolvimento.

O modelo matemático da bolha de cavitação é descrito pelas seguintes equações: equação de Rayleigh-Plesset, equação para o fluxo difusivo de vapor de água, balanço de energia da

bolha, equação da continuidade e equação de Bernoulli. O domínio de integração $[0 \leq x \leq L]$ corresponde ao comprimento do dispositivo de cavitação. O sistema das equações referidas anteriormente pode ser resolvido utilizando o método de Runge-Kutta-Fehlberg, que permite obter a variação do raio da bolha, da temperatura e da pressão, juntamente com o número de moléculas retidas na bolha, assumindo os valores iniciais indicados no trabalho.

Todos os modelos anteriores foram baseados numa plataforma comum para explicar a variação do raio da bolha com o tempo, ou seja, utilizando a equação convencional de Rayleigh-Plesset para a dinâmica da bolha de cavitação. A maior desvantagem desta equação é considerar o meio incompressível, resultando num desvio nos resultados do modelo em relação a experiências à escala real, particularmente durante os estágios de colapso onde o número de Mach é maior do que 1. Este modelo, que posteriormente foi melhorado por Plesset, é a base para a modelação do movimento de bolhas de cavitação.

Mais recentemente, as dinâmicas do gás dentro das bolhas em colapso foram estudadas considerando as equações de Navier-Stokes para fluidos compressíveis. Estes modelos detalhados foram usados para realçar que o estado do gás no colapso é fortemente influenciado por processos como a transferência de calor, transferência de massa, reações químicas e pressão não-uniforme no interior da bolha. Este conjunto de fenómenos não foi incluído nas formulações tradicionais de Rayleigh-Plesset. Constatou-se que a dinâmica das bolhas não é afetada pela reatividade química do conteúdo da cavidade, mas sim pelas condições de colapso, ou seja, a temperatura e pressão de colapso são muito alteradas pelas reações químicas que têm lugar na cavidade. Durante a fase de colapso, vapor de água e/ou quaisquer outras espécies químicas presentes na cavidade são sujeitas a condições extremas de temperatura e pressão. Sobre estas condições, as espécies químicas decompostas formam radicais livres, como já foi referido na secção relativa aos efeitos no fenómeno de cavitação.

Liu *et al.* (2014) investigaram numericamente as características dinâmicas de uma só bolha de cavitação, como o efeito do movimento da bolha na transferência de calor, num escoamento entre duas placas paralelas, baseando-se nas equações de Navier-Stokes e no método VOF (*volume of fluid method*) (método de resolução das equações de Navier-Stokes totalmente acoplado em velocidade e pressão, para malhas estruturadas e não estruturadas; a discretização das equações e a construção do modelo numérico apoiam-se no método dos volumes finitos (Didier, 2007)).

É assim conclusiva a importância que teve o desenvolvimento da modelação numérica no estudo do fenómeno de cavitação, com tendência a se desenvolver cada vez mais com o passar dos anos e com o aparecimento de novos métodos de discretização.

De um ponto de vista físico, três tipos característicos de cavitação hidrodinâmica podem distinguir-se em água, segundo Ozonek (2012):

1. Cavitação evaporativa (*Vaporous cavitation*)
2. Cavitação gasosa (*Gaseous cavitation*)
3. Cavitação gasosa- evaporativa (*Gas-vapour cavitation*)

A cavitação evaporativa depende da evaporação repentina do líquido a partir da superfície das bolhas de cavitação na sequência de uma diminuição do valor da pressão, frequentemente próximo do valor crítico da pressão de vapor do líquido a uma determinada temperatura. Caracteriza-se pelo facto de as bolhas serem preenchidas por vapor saturado e crescerem muito rapidamente, provocado pelo aumento rápido da pressão parcial de vapor no interior da bolha, que bloqueia eficazmente a difusão dos gases dissolvidos na água para dentro da bolha. A cavitação gasosa é induzida num líquido sobressaturado com a difusão de gases dissolvidos no líquido para o interior das bolhas. Define-se pelo facto de as bolhas crescerem mais lentamente do que durante a cavitação evaporativa. A cavitação gasosa- evaporativa ocorre quando as bolhas estão cheias com uma mistura resultante da evaporação a partir do líquido e da difusão dos gases dissolvidos no líquido. A água passa por diversas mudanças de fase: líquido-vapor-saturado-líquido. A taxa dinâmica para este processo é diferente da taxa na forma de vapor, prolongando o tempo de difusão de gás e produzindo quantidades idênticas de vapor e gás dentro das bolhas.

Reatores/Dispositivos de geração de cavitação hidrodinâmica

Muitos trabalhos têm-se focado na aplicação de reatores cavitacionais no tratamento de águas baseados na cavitação ultra-sónica, no entanto, estes não podem ainda ser aplicados à escala industrial devido aos custos muito elevados do tratamento. Os reatores de cavitação hidrodinâmica perfilam-se, portanto, como mais vantajosos, devido aos baixos custos de aplicação, fácil operação, baixos consumos energéticos e simplicidade de *design* do reator (Wu *et al.* , 2013). Escolher as condições de escoamento corretas no reator de cavitação hidrodinâmica é de primordial importância para maximizar os efeitos da cavitação desejados, de uma forma rentável. De seguida, são apresentados alguns reatores cavitacionais que foram utilizados no estudo do fenómeno da cavitação hidrodinâmica.

A cavitação pode ser gerada utilizando um equipamento rotativo, quando a velocidade de ponta do rotor atinge uma velocidade crítica e a pressão local próxima da periferia do impulsor diminui e aproxima-se da pressão de vapor do líquido, resultando na geração de cavidades de

vapor. Posteriormente, como o líquido se move do impulsor para o reservatório, a pressão do líquido aumenta, fazendo com que as cavidades transportadas com o escoamento, colapsem.

O consumo de energia neste tipo de reatores é muito mais elevado, e a flexibilidade sobre os parâmetros de projeto é menor em comparação com os reatores que utilizam placas de múltiplos orifícios. Em reatores com base na utilização de placas de orifício, o escoamento do circuito principal passa através de uma ou mais restrições, onde as velocidades locais aumentam repentinamente devido à redução da área de escoamento, resultando em pressões muito baixas que podem mesmo ser inferiores à pressão de vapor do meio líquido e assim dar início ao fenómeno de cavitação (Gogate & Kabadi, 2009). Uma representação esquemática da configuração do circuito e das configurações da placa é apresentada nas Figuras 2.1 e 2.2.

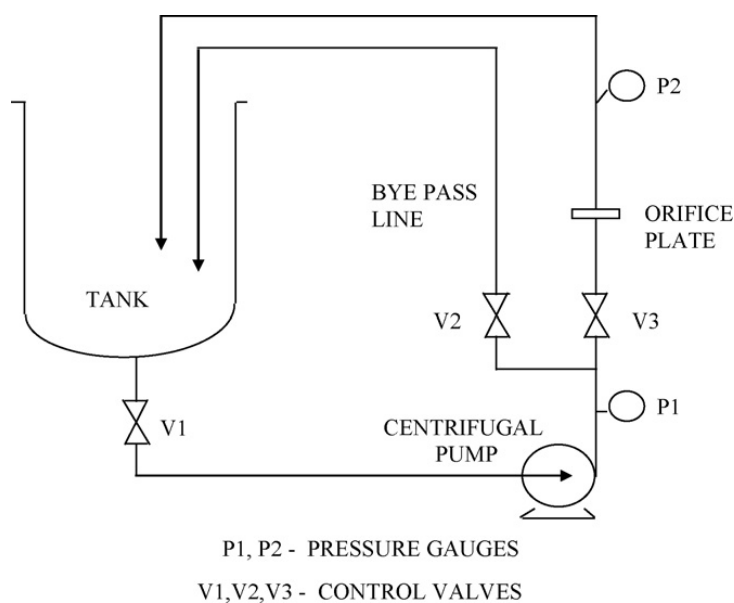


Figura 2.1: Representação esquemática da instalação experimental (Gogate & Kabadi, 2009).

Existem vários trabalhos utilizando esta configuração, destacando-se o de Wu *et al.* (2013) onde são utilizadas várias geometrias de placas de múltiplos orifícios, o que nos permite atingir diferentes intensidades de cavitação e um número variável de eventos gerados no reator cavitacional. Assim, como já foi referido, a utilização de uma placa de orifício no reator, oferece uma grande flexibilidade em termos de operação (controlo da pressão de entrada, velocidade do escoamento de entrada ou temperatura) e condições geométricas (número de orifícios por placa, localização desses orifícios ou configuração dos orifícios, resultando em diferentes intensidades cavitacionais) (Gogate & Kabadi, 2009).

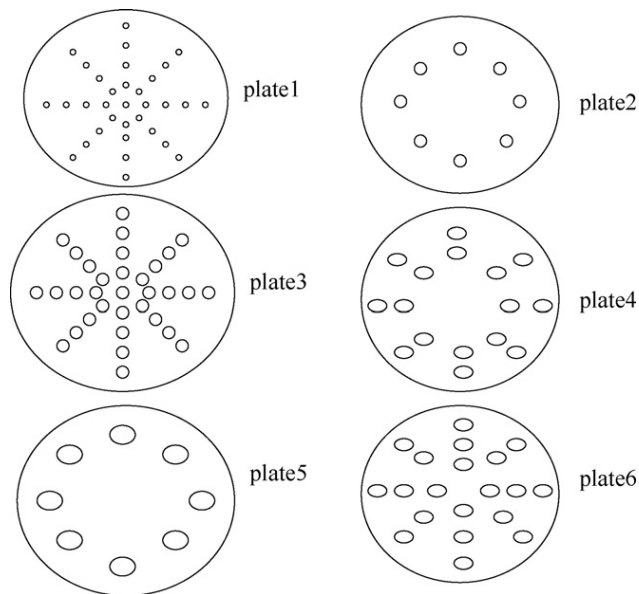


Figura 2.2: Configurações das placas de orifícios (Gogate & Kabadi, 2009).

Sampath Kumar & Moholkar (2007) apresentaram um tipo de reator de cavitação hidrodinâmica baseado na utilização de um injetor convergente-divergente (Fig. 2.3) para a criação no escoamento, da variação de pressão necessária para a condução das bolhas de cavitação. Este reator tem como particularidade a introdução exterior de bolhas de um gás adequado (árgon ou ar, uma vez que estes gases têm um coeficiente de expansão adiabático mais elevado, resultando em temperaturas mais elevadas no colapso da bolha) no escoamento do líquido a montante do bocal, utilizando um distribuidor de gás (aspersor). Assim sendo, a intensidade total de cavitação no reator pode ser controlada pela quantidade de gás introduzido através do aspersor a montante do bocal que serve de base aos núcleos de cavitação.

Este *design* oferece um bom controlo sobre dois parâmetros cruciais que afetam a intensidade da cavitação produzida, a taxa de nucleação e a taxa de variação de pressão a montante do estrangimento.

Concluiu-se que, quanto maior for a pressão inicial no interior da bolha, maior é a expansão da bolha até à garganta do injetor, onde é assumido que a pressão se reduz até ao valor da pressão de vapor saturado. O colapso posterior é controlado pelas forças de inércia e portanto, um colapso mais intenso é resultado de uma maior expansão da bolha. No entanto, o custo de operação é elevado, uma vez que são necessárias bombas de maior capacidade.

A utilização de um gás monoatômico como o árgon resulta em maiores efeitos cavitacionais, contudo, implica um investimento mais elevado em comparação com o ar.

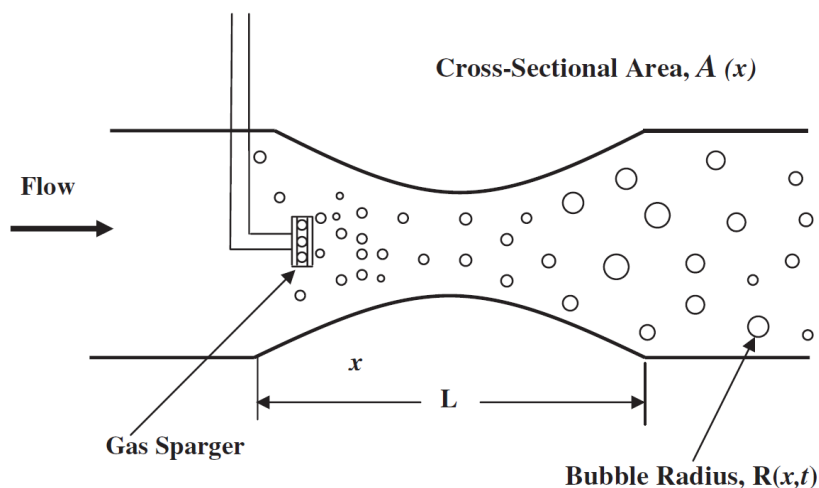


Figura 2.3: Dispositivo de geração de cavitação hidrodinâmica (Sampath Kumar & Moholkar, 2007).

Um aumento do valor do comprimento (L) da zona do bocal intensifica os efeitos cavitação, no entanto, existe um limite para este aumento para que o escoamento se mantenha estável.

A redução do tamanho das bolhas iniciais introduzidas no escoamento do líquido é outra forma de aumentar os efeitos cavitação. O distribuidor de gás deve ter aberturas muito finas e a taxa de escoamento do gás e a pressão do gás na fonte a partir do qual é retirado, devem ser alvo de um controlo adequado.

Os resultados da simulação mostraram que as bolhas introduzidas externamente são submetidas a um movimento transiente no bocal de passagem do escoamento, produzindo efeitos de cavitação de intensidades moderadas, suficientes para processos tal como a hidrólise de óleos gordos, rutura celular microbiana ou desinfeção de águas.

Não obstante, em comparação com os reatores que utilizam placas de orifício, a flexibilidade em termos de controlo da intensidade de cavitação é substancialmente menor, uma vez que os parâmetros geométricos que podem ser variados são apenas o comprimento e diâmetro do bocal. No caso da placa, como referido anteriormente, o número, o tamanho e a forma dos orifícios podem ser variados. Pode ser vantajoso utilizar uma combinação de bocal convergente-divergente e placa de orifício, dependendo do tipo de aplicação e requisitos de intensidade para a aplicação específica em questão.

A partir da descrição realizada anteriormente sobre alguns reatores de cavitação hidrodinâmica, facilmente se conclui que a placa de orifícios oferece uma maior flexibilidade em termos de aplicação dos efeitos do fenómeno de cavitação, porém, devido à distribuição aleatória das “variações de pressão turbulentas de condução do movimento da bolha”, o efeito da

cavitação (intensidade da cavitação) produzido em reatores de cavitação hidrodinâmica que utilizam placas de orifício também oscila significativamente (dificuldade de controlo). Além disso, as placas de orifício criam enormes perdas de carga devido ao escoamento de separação a jusante da placa, o que poderia ser um impedimento para um reator à escala comercial (Gogate & Kabadi, 2009).

Saharan *et al.* (2013) estudaram a degradação de uma solução de *orange-G* a partir de três dispositivos de cavitação diferentes: placa de orifício, venturi circular e venturi de estrangulamento retangular (Figuras 2.4 e 2.5). A otimização dos três dispositivos foi feita em termos da pressão do líquido à entrada dos dispositivos de cavitação e do número de cavitação. A geometria do dispositivo de cavitação (área transversal de escoamento, perímetro ou forma) revelou-se um parâmetro bastante importante no sentido de obter um efeito cavitacional máximo. O venturi retangular mostrou ser o mais eficiente em termos de degradação do composto (maior rendimento cavitacional).

O rendimento de cavitação hidrodinâmica ideal é assim resultado da otimização de vários parâmetros, tais como número de eventos cavitacionais que ocorrem dentro de um dispositivo de cavitação, intensidade de colapso da cavidade que, por sua vez, depende da geometria do dispositivo cavitante, e condições de escoamento do líquido, ou seja, o tempo de permanência da cavidade na zona de baixa pressão, a escala de turbulência e a taxa de recuperação de pressão a jusante da garganta.

Concluíram, assim, que ao manipular estes parâmetros, é possível controlar os efeitos químicos associados ao fenómeno de cavitação, facto já evidenciado noutros trabalhos apresentados.

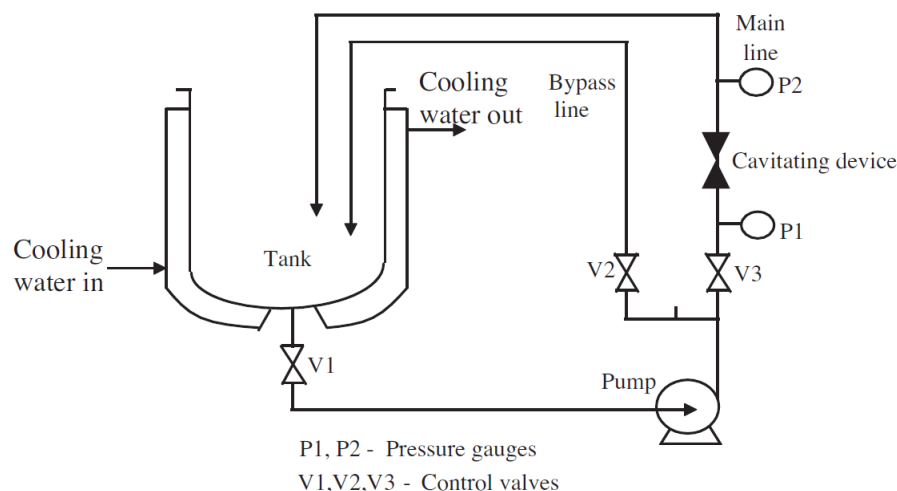


Figura 2.4: Representação esquemática da instalação experimental (Saharan *et al.* , 2013).

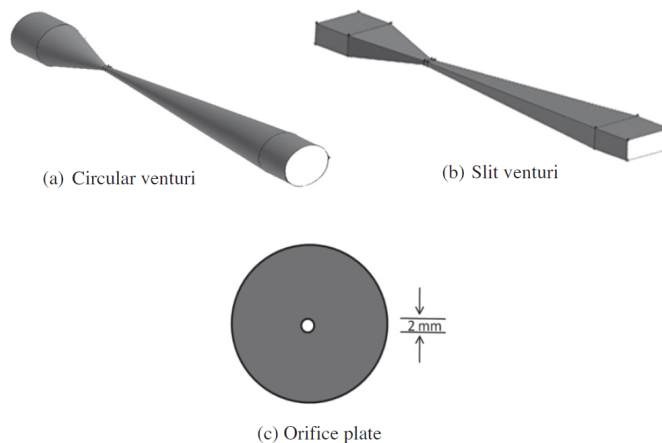


Figura 2.5: Representação esquemática dos dispositivos de cavitação hidrodinâmica (Saharan *et al.*, 2013).

No trabalho apresentado anteriormente por Saharan *et al.* (2013) é possível verificar portanto, que as placas de orifício nem sempre são a melhor solução.

Capocelli *et al.* (2014) realizaram um estudo teórico e experimental acerca de cavitação como um processo de oxidação avançada. Para a previsão dos efeitos cavitacionais hidrodinâmicos, foi investigada experimentalmente a taxa de degradação de uma solução de p-nitrofenol num dispositivo cavitacional com a geometria apresentada na Fig. 2.6.

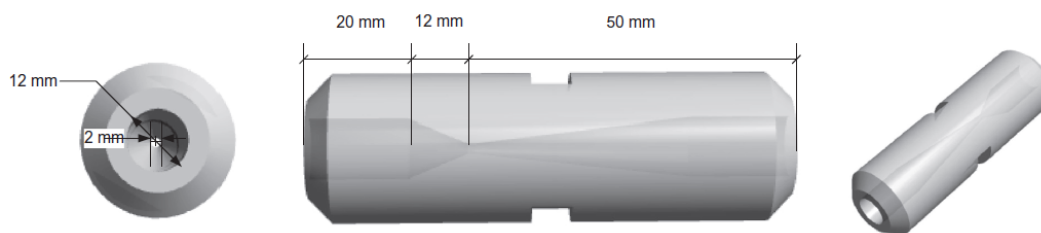


Figura 2.6: Geometria do dispositivo Venturi (Capocelli *et al.*, 2014).

Para uma boa taxa de remoção e eficiência energética, concluíram que o valor da pressão à entrada do dispositivo, deveria rondar os 0.4 MPa e o número de cavitação ser de 0.25.

O comportamento físico-químico da cavitação hidrodinâmica foi discutido com base no estudo de uma bolha dinâmica individual. Como foi referido no primeiro capítulo, durante o colapso da bolha, são alcançadas temperatura locais e condições de pressão elevadas, assim

como espécies radicais, particularmente radicais hidroxilo (OH), são libertadas pela dissociação das moléculas de água. Os parâmetros geométricos e operacionais influenciam diretamente a dinâmica da bolha e as reações químicas em várias fases, como já foi discutido.

Para o modelo matemático da bolha dinâmica individual foram utilizadas algumas equações como, a equação de Rayleigh-Plesset para o movimento radial da bolha, a equação para o fluxo difusivo de vapor de água, o balanço energético global da bolha de cavitação com condução de calor através da bolha, a equação da continuidade e a equação do momento (Capocelli *et al.*, 2014).

Em muitos estudos, são adotadas técnicas que complementam a cavitação hidrodinâmica, de forma a intensificar os seus efeitos e viabilizar as aplicações requeridas. Ihara *et al.* (2014) propuseram um novo método de tratamento de águas, utilizando descargas elétricas em microbolhas formadas por cavitação. Concluíram que a simples utilização dos efeitos da cavitação não provocava a descoloração da solução índigo carmin (utilizada principalmente como indicador de pH), mas a combinação de cavitação com descargas elétricas resultava na descoloração da solução. Este resultado confirmou a eficácia do tratamento de água ao iniciar descargas elétricas na "nuvem" das micro-bolhas formadas por cavitação. A geração de radicais foi confirmada por observação de espectros de emissão de descarga. Foi realizada ainda uma comparação do efeito da descoloração quando os eletrodos são dispostos de modo a que o canal de descarga seja perpendicular ao escoamento do líquido, bem como quando o canal de descarga é paralelo ao escoamento do líquido (Fig. 2.8), concluindo que a taxa de descoloração com o arranjo em paralelo é quase duas vezes superior do que com o arranjo perpendicular. Isto poderá ser explicado por uma maior eficiência na geração de radicais devido a uma maior frequência das descargas no caso do arranjo paralelo. A configuração do reator utilizado neste estudo é apresentado na Fig. 2.7.

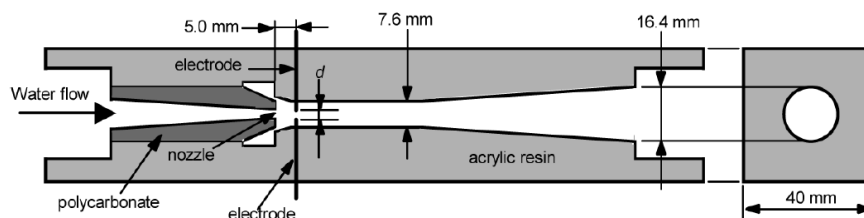


Figura 2.7: Corte transversal da configuração do reator (Ihara *et al.*, 2014).

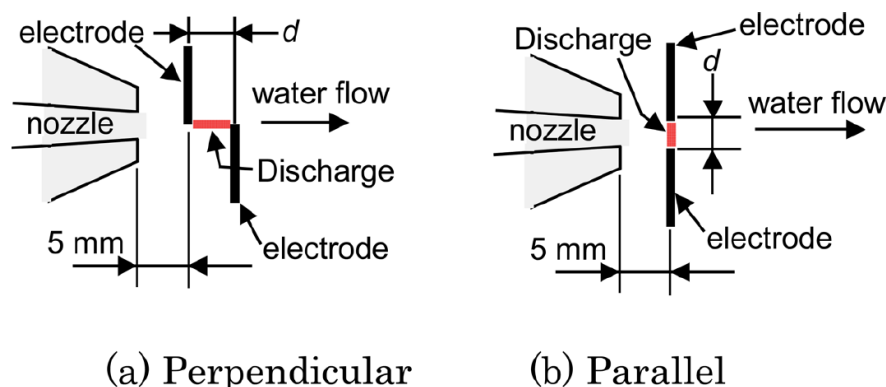


Figura 2.8: Disposição dos elétrodos (Ihara *et al.* , 2014).

Korniluk & Ozonek (2011) no seu trabalho acerca de cavitação hidrodinâmica aplicada em poluentes de aterros municipais, fazem referência às imensas vantagens deste fenómeno, particularmente à simplicidade do *design*, que resulta em custos de manutenção reduzidos, sendo os únicos custos energéticos consequência do uso de bombas para criar uma variação de pressão. Referem ainda que é muito difícil obter eficiências de tratamento satisfatório utilizando apenas um método. Assim, geralmente uma combinação de dois ou três métodos seria o ideal para melhorar as taxas de degradação, adicionando vários agentes oxidantes, como o peróxido de hidrogénio ou ozono. Além disso, uma combinação de cavitação com outros métodos reduz os custos gerais de tratamento, porque os custos operacionais de cavitação incluem apenas o consumo de energia.

Zupanc *et al.* (2013) investigaram a remoção de produtos farmacêuticos a partir da combinação de cavitação hidrodinâmica e peróxido de hidrogénio numa secção simples Venturi. Eles relataram que a remoção média do fármaco escolhido atingiu mais de 60 %.

Chakinala *et al.* (2009) fizeram um estudo sobre água residual industrial, em que utilizaram cavitação hidrodinâmica combinada com reagente de Fenton, resultando numa remoção de carbono orgânico total entre os 60 e os 80 %. Bagal *et al.* (2013) também usaram a cavitação hidrodinâmica combinada com reagente de Fenton que resultou numa degradação completa do composto orgânico 2,4- dinitrofenol.

Para seleccionar os parâmetros operacionais e *design* do reator favoráveis à geração de cavitação, algumas recomendações são referidas por Gogate & Kabadi (2009):

- Uma configuração com placa de orifícios é necessária apenas para reações químicas de maior intensidade, enquanto que para transformações físicas e processos mais moderados (normalmente entre 15 e 20 *bar*), uma configuração em tubo de Venturi é recomendada;

- Escolher pressões de operação mais elevadas à entrada, a montante da constricção mecânica, mas um pouco abaixo do início da supercavitação;
- Selecionar a melhor combinação de propriedades físicas do líquido, para permitir a geração de núcleos de menor tamanho inicial (líquidos com valores da pressão de vapor e viscosidade reduzidos e uma tensão de superfície maior, de modo a obter colapsos violentos das cavidades);
- Para configurações com placa de orifícios, otimizar o número e diâmetro dos furos para a área de escoamento livre equivalente com base no tipo de aplicações (menor número de orifícios de grande diâmetro para aplicações que necessitam de maior intensidade de cavitação, como a destruição de produtos químicos complexos, e de maior número de buracos com diâmetros menores para aplicações que requerem intensidades relativamente baixas, como por exemplo a rutura de células);
- Projetar o reator de cavitação hidrodinâmica com a menor área livre para o escoamento (áreas livres inferiores devem ser utilizadas para a produção de altas intensidades);
- No caso de homogeneizadores de alta velocidade, escolher a velocidade de rotação muito acima da velocidade crítica para a criação de cavitação e abaixo da velocidade onde a indução de ar ocorre;
- No caso de um escoamento num Venturi, a técnica mais económica para aumentar a intensidade de cavitação, seria reduzir o diâmetro da garganta ou o comprimento do tubo, mas utilizando valores de caudal mais elevados, podendo existir uma limitação devido à possibilidade de instabilidade no escoamento.

3 Instalação experimental

De modo a poder estudar os fenómenos associados à cavitação hidrodinâmica para diferentes geometrias de constrangimento e configuração no caso de múltiplos constrangimentos, foi construída uma instalação que será descrita neste capítulo.

3.1. Circuito fechado de recirculação de água

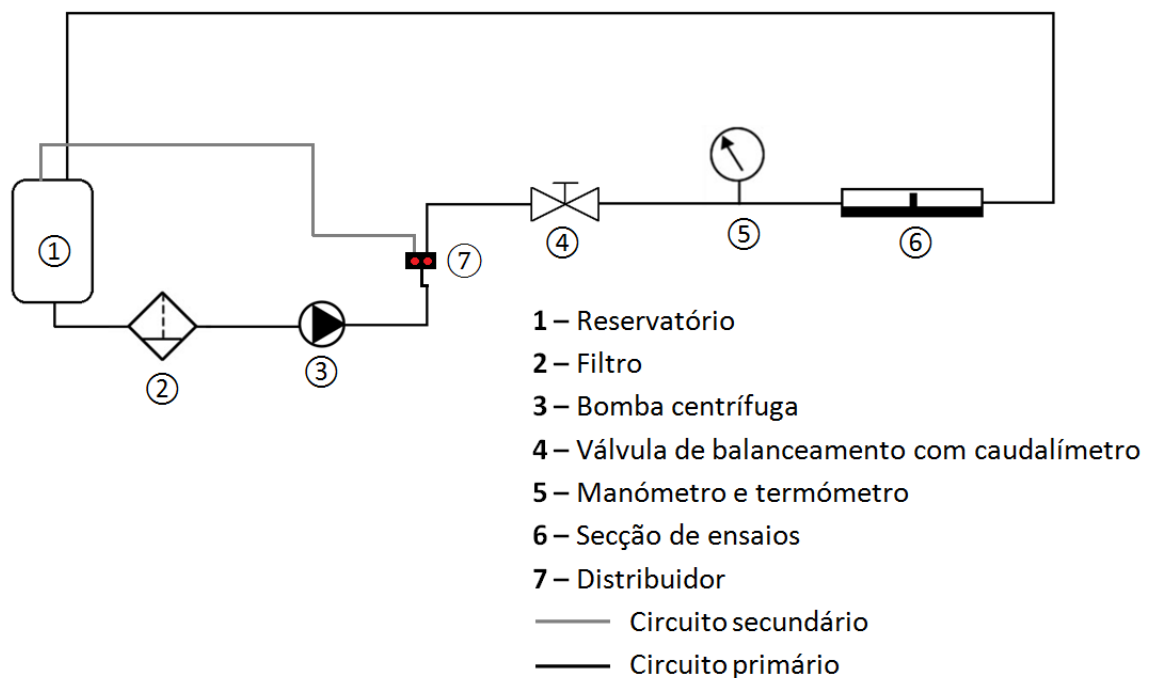


Figura 3.1: Esboço da instalação experimental.

A instalação experimental foi projetada de acordo com informações retiradas da revisão da literatura, apresentando na Fig. 3.1 o seu esboço. A instalação é constituída por um circuito fechado, com recirculação do líquido, dispensando a existência de uma fonte contínua de alimentação, permitindo assim reduzir substancialmente as quantidades de líquido a utilizar. Paralelamente ao circuito primário existe um circuito secundário, de forma a colocar a bomba centrífuga em funcionamento, fazendo circular o líquido alguns segundos, antes da realização dos ensaios.

Neste ensaio experimental, uma vez que a instalação se destina a realizar investigação

fundamental do uso de cavitação hidrodinâmica para o tratamento de água, foi esse o fluido considerado.

3.2. Materiais e equipamentos

3.2.1. Bomba centrífuga

A bomba centrífuga selecionada foi da Grundfos, modelo CM-10-1 (Fig. 3.2). As bombas CM (centrífuga modular) são bombas multicelulares horizontais, com entrada axial e não autoferrantes. As bombas são do tipo monobloco e equipadas com motores monofásicos alimentados pela rede elétrica.

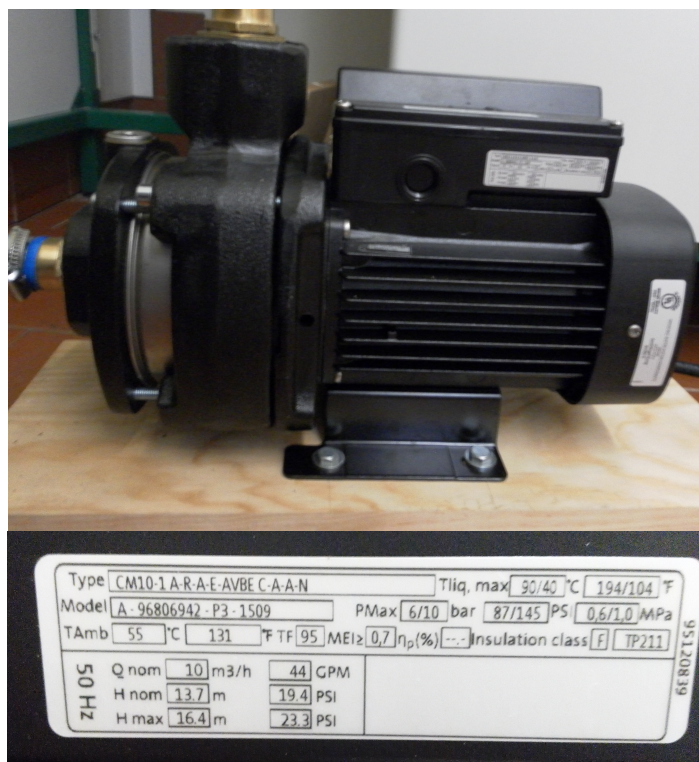


Figura 3.2: Bomba centrífuga Grundfos modelo CM 10-1 e correspondente chapa característica.

3.2.2. Válvula de balanceamento com caudalímetro

Para medir e regular o caudal que passa no circuito foi selecionada uma válvula de balanceamento com caudalímetro Caleffi (Fig. 3.3|esquerda) cuja gama de funcionamento está entre os 50 e os 200 *l/min*. O caudalímetro apresenta escala graduada com indicador de caudal de movimento magnético (Fig. 3.3|direita).



Figura 3.3: Válvula de balanceamento Caleffi (esquerda) e caudalímetro com indicador de caudal de movimento magnético (direita).

3.2.3. Outros componentes da instalação

O reservatório ou tanque de circulação utilizado tem aproximadamente 200 litros de capacidade (Fig. 3.4|esquerda). O filtro Atlas SX Plus (Fig. 3.4|direita) foi selecionado para a ligação entre o reservatório e a bomba, de modo a que o líquido chegue sem partículas sólidas à bomba. As ligações de entrada/saída são em bronze de rosca de uma polegada.



Figura 3.4: Reservatório de aproximadamente 200 litros de capacidade (esquerda) e Filtro Atlas SX Plus (direita).

O distribuidor Gardena (Fig. 3.5|esquerda) tem como função fazer a ligação entre a bomba e o circuito primário e secundário. Permite ainda a regulação do caudal a circular na tubagem, uma vez que a bomba não possui qualquer variador de frequência. A instalação está ainda

equipada com um sistema de medição composto por leitura de pressão e temperatura à entrada da secção de ensaios (Fig. 3.5|direita).



Figura 3.5: Distribuidor Gardena para controlo de caudal (esquerda) e dispositivo de leitura de pressão e temperatura (direita).

3.3. Secção de ensaios

A secção de ensaios utilizada neste trabalho que serve de base aos estudos fundamentais de cavitação é constituída por 4 placas de acrílico que formam um canal retangular e dois dispositivos em PVC que fazem a ligação da tubagem à secção de ensaios, sendo o aperto realizado com veios roscados e respetivas porcas trapezoidais ao longo da secção. A placa inferior apresenta múltiplos furos que permitem encaixar os vários constrangimentos, o que nos permite ter diferentes configurações, que poderão facilmente ser variadas. Os restantes orifícios são preenchidos por placas horizontais lisas, devidamente isoladas para evitar fugas.

É assim evidente que este dispositivo de geração de cavitação se encontra no grupo de reatores cavitacionais em que a cavitação é gerada como resultado de processos hidrodinâmicos associados com uma mudança súbita na geometria do escoamento.

As Figuras 3.6 a 3.9 apresentam a secção de ensaios projetada, onde são indicadas também algumas das suas características.

O material das placas que constituem a secção de ensaios é de acrílico (Fig. 3.10), permitindo a observação direta do fenómeno de cavitação e o acesso ótico às técnicas de diagnóstico laser, como por exemplo: *Phase Doppler Interferometry* para medir o tamanho das bolhas e velocidade; ou PIV (*Particle Image Velocimetry*) para medir o campo de velocidades e pressão do escoamento.

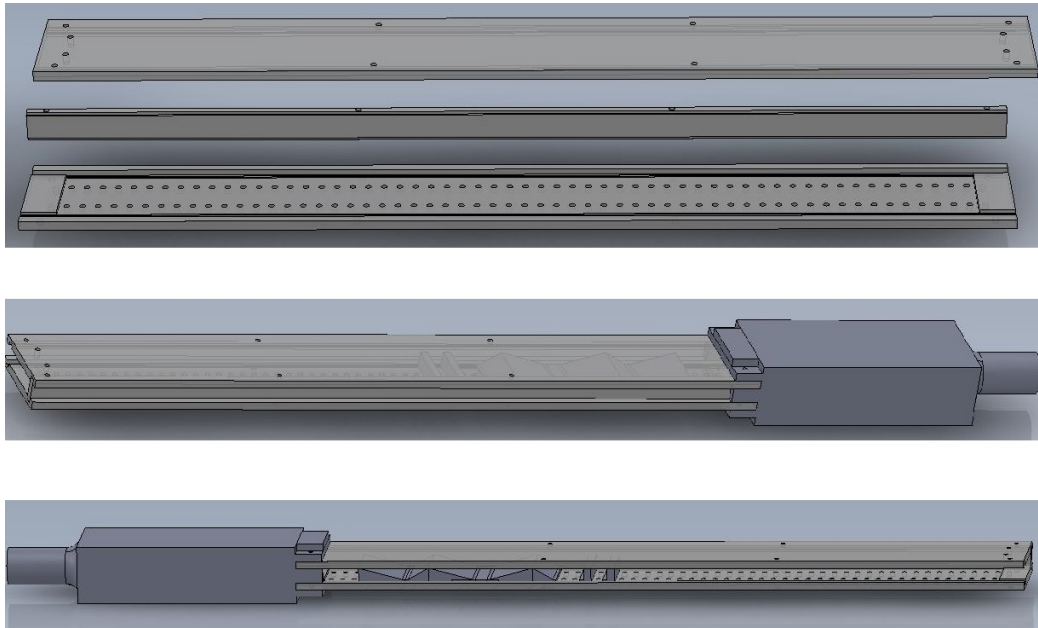


Figura 3.6: Secção de ensaios em CAD.

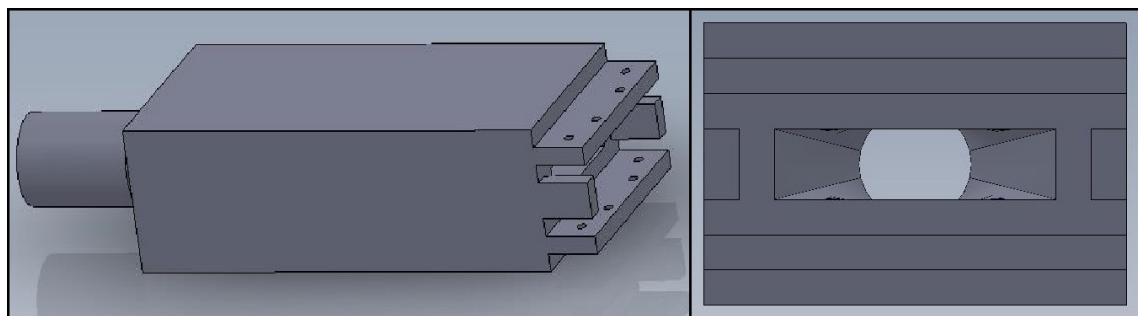


Figura 3.7: Dispositivo de entrada e saída da secção de ensaios em PVC, com passagem de um canal circular para retangular.

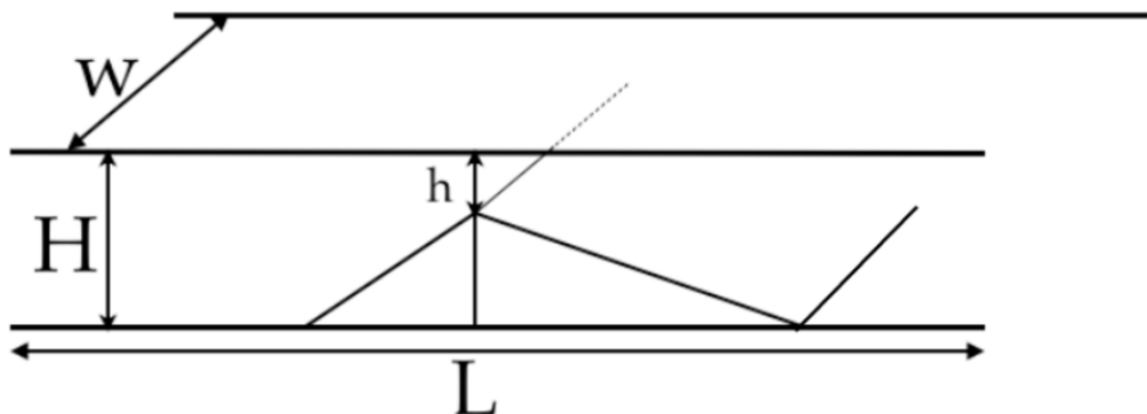


Figura 3.8: Dimensões da secção de ensaios ($w = 40$ mm; $H = 10$ mm; $h = 2$ mm; $L = 500$ mm).

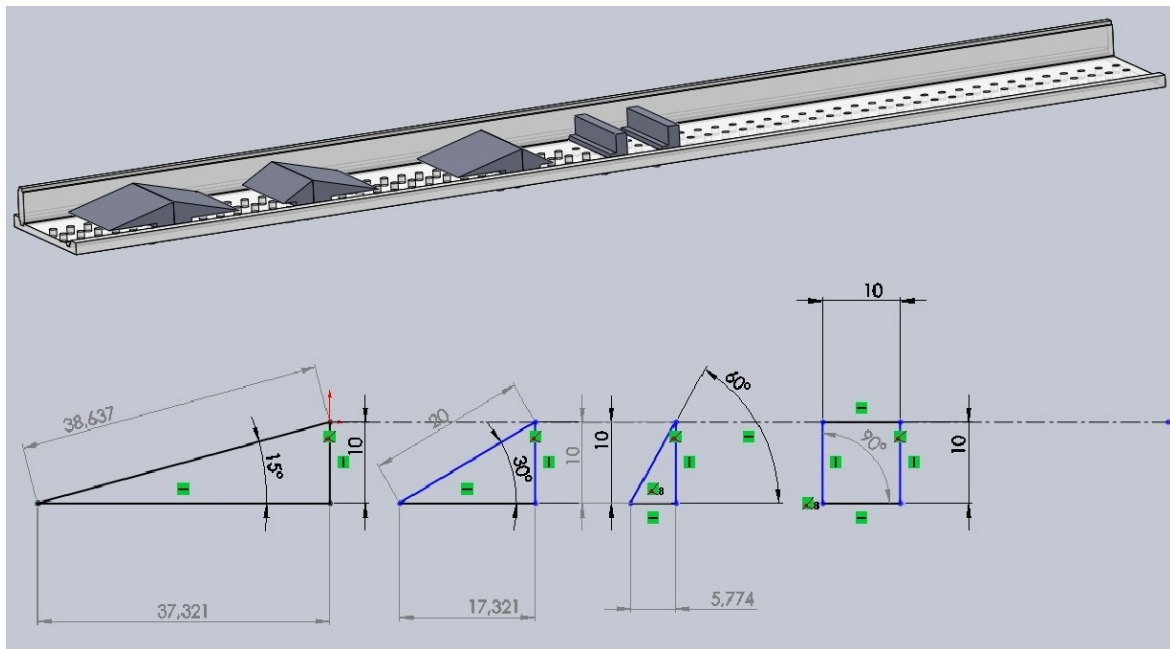


Figura 3.9: Dimensões dos constrangimentos.

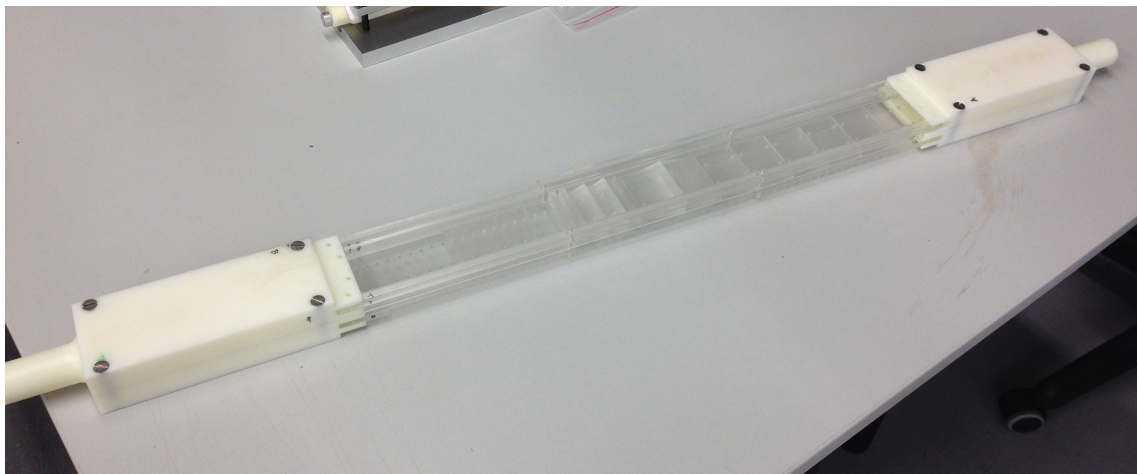


Figura 3.10: Secção de ensaios.

3.4. Montagem da instalação experimental

Como idealizado inicialmente, esta instalação (Fig. 3.11) trata-se de um sistema em circuito fechado, alimentado por um reservatório com metade da sua capacidade cheia de água, uma vez que possui três canais sensivelmente a meio, que nos permitem garantir que as oscilações de pressão do sistema sejam atenuadas, libertando o ar em excesso contido no seu interior e assim admitir uma pressão igual à pressão atmosférica à saída do mesmo. A passagem de água do reservatório para o resto do circuito é feita na sua base por uma válvula de corte (passador borboleta), sendo a ligação dos diferentes equipamentos feita através de

mangueira cristal de uma polegada, para uma observação mais precisa de eventuais problemas que possam advir durante o trajeto do líquido ao longo do circuito, exceto a ligação entre o filtro e a aspiração da bomba que é realizada através de mangueira de polietileno de uma polegada, visto que apresenta uma "robustez" mais elevada. O distribuidor apesar de ser um elemento importante, nomeadamente em termos de manutenção da bomba e do restante circuito, verificou-se que impossibilitava a obtenção de caudais mínimos à geração do fenómeno de cavitação devido às perdas de carga introduzidas, pelo que durante os ensaios realizados foi removido.

No decurso do projeto, a secção de ensaios foi objeto de uma modificação, nomeadamente o aumento do comprimento da mesma com o intuito de assegurar um comprimento que permitisse ter uma região de escoamento totalmente desenvolvido no interior da secção-teste que contém os estrangulamentos. A referida modificação foi levada a cabo, uma vez que, tendo em conta os ensaios inicialmente preconizados, esta se tornaria benéfica para os resultados finais da investigação. Assim, a acrescentar à peça de acrílico, foi projetada e construída uma peça em alumínio de aproximadamente 50 cm, com um canal retangular interior com as mesmas dimensões da peça de acrílico e todos os contornos necessários para uma ligação eficiente entre as duas peças (Fig. 3.12).



Figura 3.11: Instalação experimental.

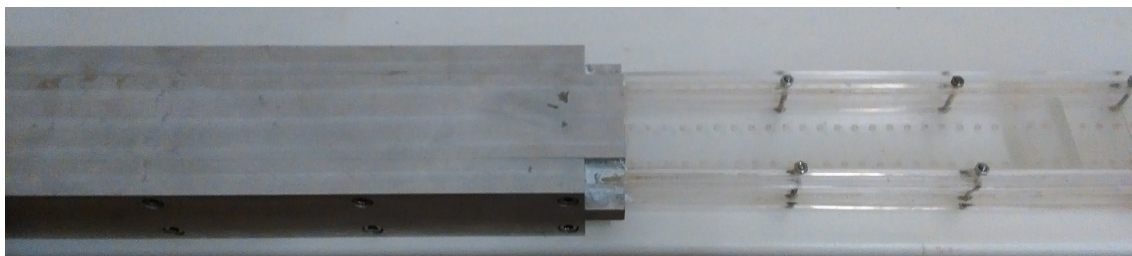


Figura 3.12: Alterações na secção de ensaios base.

3.5. Medição do fenómeno de cavitação

Para a deteção do fenómeno de cavitação podem ser assumidos dois métodos:

- **Métodos indiretos** — recorre-se à medição de um dos efeitos da cavitação, como por exemplo, a determinação do efeito da cavitação sobre o comportamento de uma determinada peça de equipamento (perda de rendimento de uma máquina hidráulica, por exemplo), a medição do efeito da cavitação sobre a distribuição de pressões ao longo de uma fronteira sólida em contacto com o escoamento onde surge a cavitação e a medição do ruído ou das vibrações acústicas emitidas pela cavitação através de um detetor acústico.
- **Métodos diretos** — procede-se à observação direta do fenómeno de cavitação. Pode ser feita por meios visuais ou fotográficos. Constitui uma técnica especial, particularmente adaptada à investigação da cavitação que permite, não só a deteção do fenómeno desde o limiar do seu aparecimento, como também uma caracterização exata da sua localização e desenvolvimento. A observação direta recorrendo a técnicas fotográficas adequadas, oferece a única possibilidade de desenvolver um estudo detalhado do fenómeno hidrodinâmico, quer no início, quer em estados avançados do seu desenvolvimento. No entanto, apresenta algumas limitações, uma vez que, só é possível em líquidos transparentes e exige a presença de paredes transparentes ou de janelas de observação, o que pode ser complicado quando é necessário testar equipamentos de grandes dimensões ou realizar ensaios em protótipos. Neste trabalho adotou-se este método.

4 Apresentação e discussão de resultados

Neste capítulo apresentam-se os resultados experimentais obtidos na secção de ensaios estudada. Inicialmente, foram realizados ensaios para uma configuração em que se utilizou apenas um constrangimento, e de seguida para uma segunda configuração constituída por quatro constrangimentos dispostos em cadeia. A realização de ensaios esteve sempre dependente da preparação da instalação experimental e da viabilidade do funcionamento da secção de testes, condicionando o número desses ensaios realizado.

4.1. Primeira configuração

Na Fig. 4.1 é apresentada a disposição do constrangimento na placa inferior da secção de ensaios, bem como a sua geometria e distância à entrada da secção.

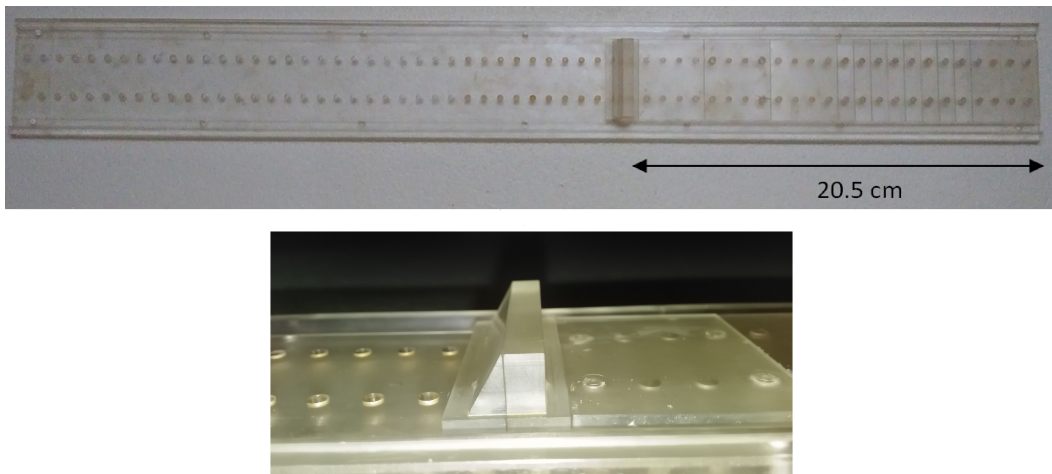


Figura 4.1: Disposição do constrangimento na secção de ensaios, para a primeira configuração.

Neste ensaio, o caudal lido pela válvula de balanceamento foi de aproximadamente 75 l/min , e a pressão relativa registada na tubagem foi de aproximadamente 0.8 bar . Para os valores obtidos é possível calcular o número de cavitação (σ), que será igual a 15.7. Sabendo que o fator de dispersão (Z) é igual a 24 e que para que ocorra cavitação é necessário que a condição $Z > \sigma$ se verifique, podemos concluir que se encontram condições para a ocorrência de cavitação.

De notar que a água utilizada neste ensaio se encontrava com bastantes partículas/impurezas

dissolvidas, facto que poderá ter tido um contributo importante para os resultados alcançados, uma vez que como foi referido na revisão, a presença de impurezas resulta na diminuição da resistência à tração do líquido.

As imagens obtidas do ensaio realizado podem ser observadas na Fig. 4.2. Estas foram submetidas a um tratamento, de forma a clarificar as estruturas fluido-dinâmicas do escoamento.

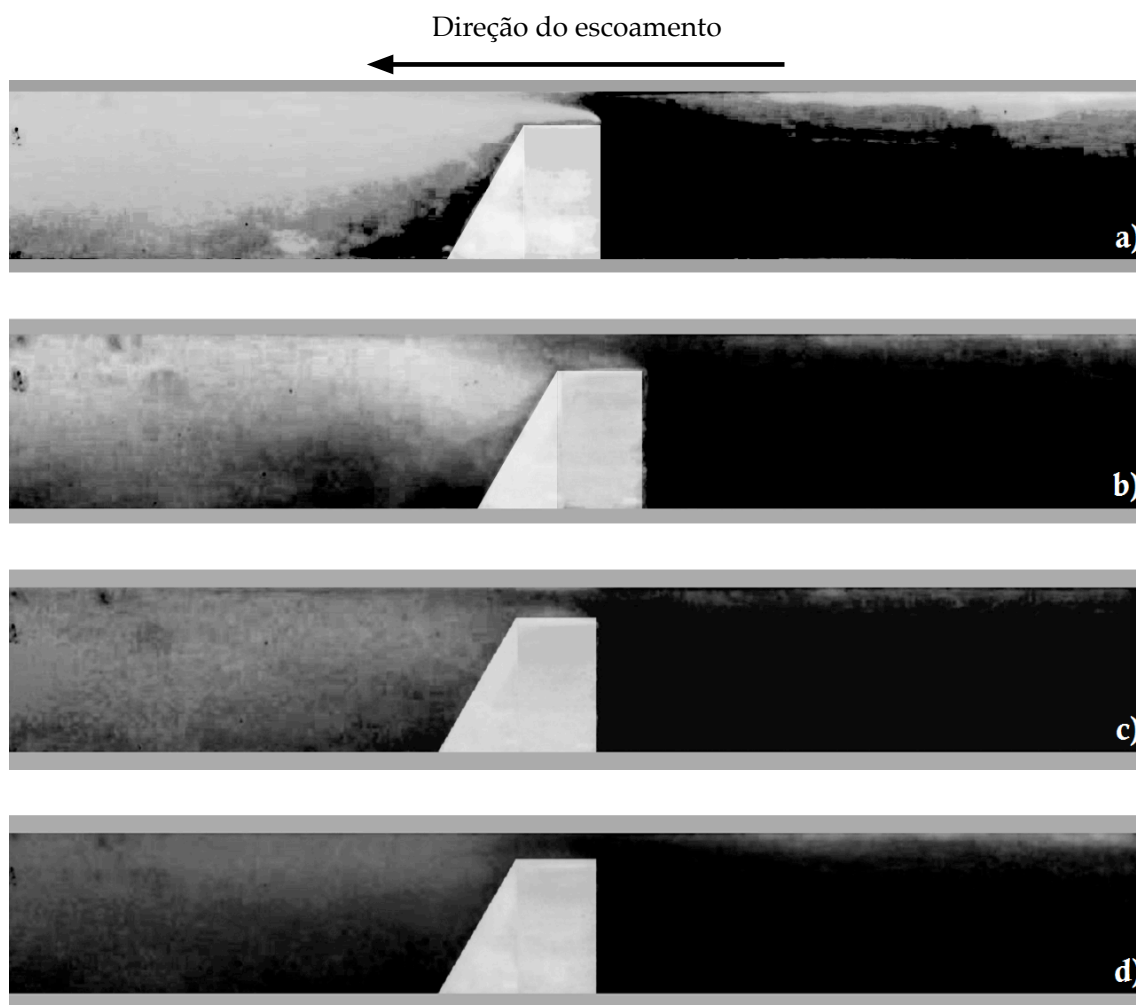


Figura 4.2: Desenvolvimento do fenómeno de cavitação no ensaio realizado para um estrangimento, numa vista lateral.

As zonas escuras indicam uma menor passagem da luz pelo escoamento, enquanto as zonas claras significam uma maior permeabilidade à luz. A zona clara corresponde assim a uma zona constituída maioritariamente por vapor, uma vez que este oferece menor resistência à passagem de luz (Fig. 4.2.(a)).

As formações apresentadas na Fig. 4.2 indiciam ainda que, provavelmente, estaremos na presença de um tipo de cavitação transiente, podendo ser o resultado de uma flutuação no

escoamento que terá gerado momentaneamente condições de cavitação.

Em relação ao desenvolvimento do escoamento cavitante, é possível visualizar nestas imagens dois agrupamentos de bolhas.

O primeiro agrupamento de bolhas (zona clara), corresponde a uma região de elevado conteúdo de vapor que permanece aproximadamente na mesma posição relativamente ao constrangimento, envolvendo-o de uma forma semelhante a uma folha (Figura 4.2.(a)), o que sugere que se trate da formação de um tipo de instabilidade designado na literatura anglo-saxónica por *sheet cavity*. Esta formação, ao ser caracterizada por uma tensão no fluido mais elevada, tem conseqüentemente uma maior influência na desestabilização das micro-bolhas existentes no seio do líquido a jusante do constrangimento. Este tipo de cavidades apresenta, portanto, um carácter instável, logo maior turbulência.

Pode observar-se nas Figuras 4.2.(b) e 4.2.(c) um segundo agrupamento de bolhas de vapor que se separam periodicamente da zona de cavitação anexa ao constrangimento, fenómeno designado por *vapor cloud shedding*, sendo conduzidas ao longo do escoamento principal até que se dê o seu colapso a jusante da constrição, numa região de pressão mais elevada.

De realçar ainda que, no ensaio realizado para esta configuração, foi também evidente o surgimento de ruído e vibração intermitentes durante a passagem do líquido na zona de secção mínima.

4.2. Segunda configuração

Na Fig. 4.3 é apresentada a disposição dos constrangimentos para a realização do segundo ensaio, bem como as suas geometrias.

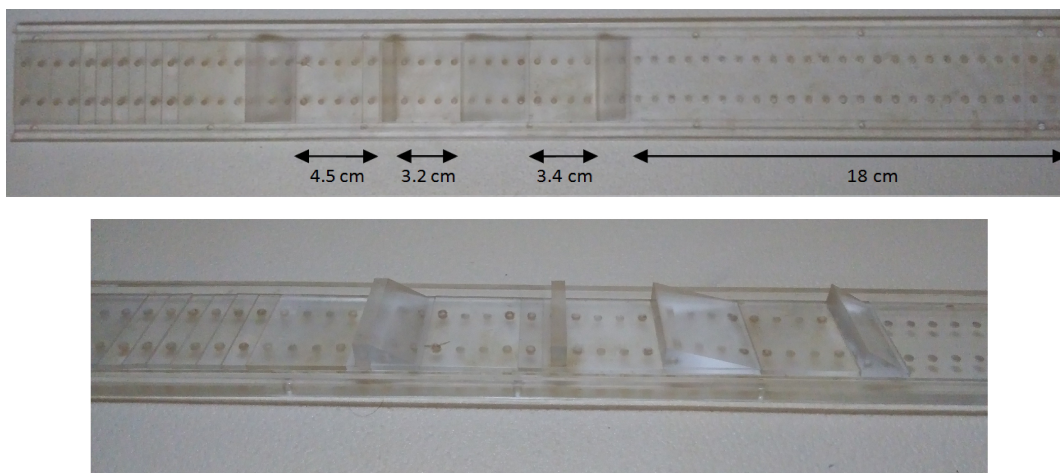


Figura 4.3: Disposição dos constrangimentos na secção de ensaios, para a segunda configuração.

As imagens obtidas neste segundo ensaio são ilustradas nas Figuras 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7, apresentando o seu aspeto original, que neste caso, ao contrário do ensaio discutido anteriormente, é vantajoso para a observação das estruturas fluido-dinâmicas formadas. Apenas são ilustradas imagens do primeiro e segundo constrangimento, uma vez que nos subsequentes não se verificaram formações relevantes.

Para este ensaio, o caudal medido pela válvula de balanceamento foi de aproximadamente $55\text{l}/\text{min}$ e uma pressão aproximadamente igual à obtida para a primeira configuração. Assim, o valor do número de cavitação obtido é igual a 29.3 e sabendo que o fator de dispersão se mantém, uma vez que depende apenas das dimensões da secção de ensaios, teoricamente, para a configuração geométrica da instalação, não existem condições para a ocorrência cavitação.

O aumento do número de constrangimentos também pode ter provocado uma maior perda de carga que tenha levado à diminuição do caudal disponível. Dada a presença prévia de bolhas, foi possível observar as estruturas hidrodinâmicas em cada constrangimento, de modo a fazer uma análise qualitativa da influência de diferentes geometrias.

São ainda observadas algumas estruturas fluido-dinâmicas, com semelhanças a vórtices (Fig. 4.4), que têm tendência a ser formadas numa zona central da secção, como indicado na Fig. 4.6. A presença destes filamentos na região cavitante foi apenas momentânea, observando-se facilmente o seu rápido arrastamento pelo escoamento para jusante. Pode ser postulado que o aumento da largura da secção reduz o efeito das paredes laterais (e, conseqüentemente, o efeito da camada limite), o que permite que um outro mecanismo desencadeie a instabilidade na cavitação, como os núcleos pré-existentes no escoamento a montante do constrangimento.

As bolhas de menor dimensão a jusante do primeiro constrangimento são, provavelmente, apenas o resultado do colapso das bolhas devido à diminuição das forças de tensão superficial.

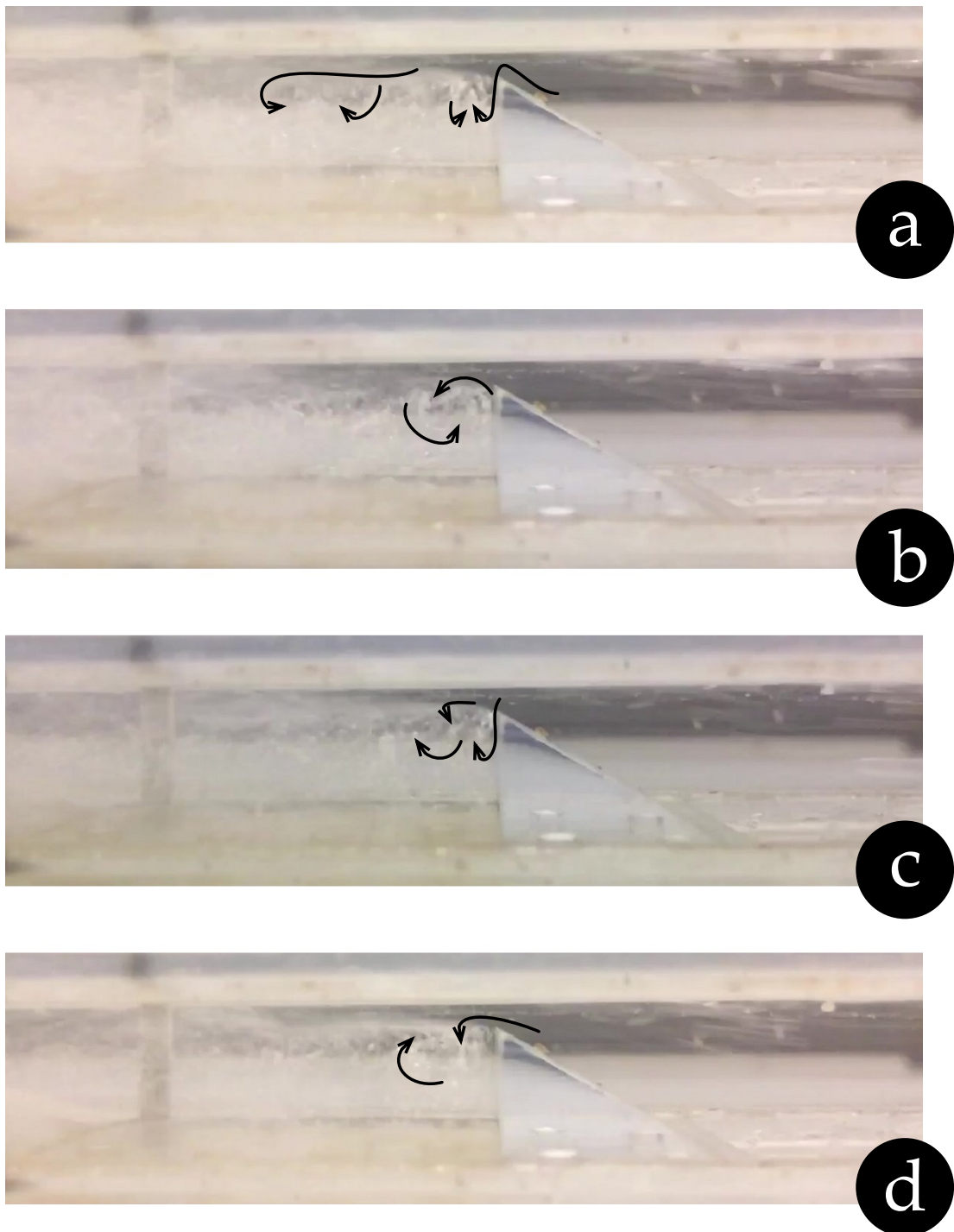


Figura 4.4: Exemplos de estruturas visualizadas em filme no primeiro constrangimento da secção de ensaios.

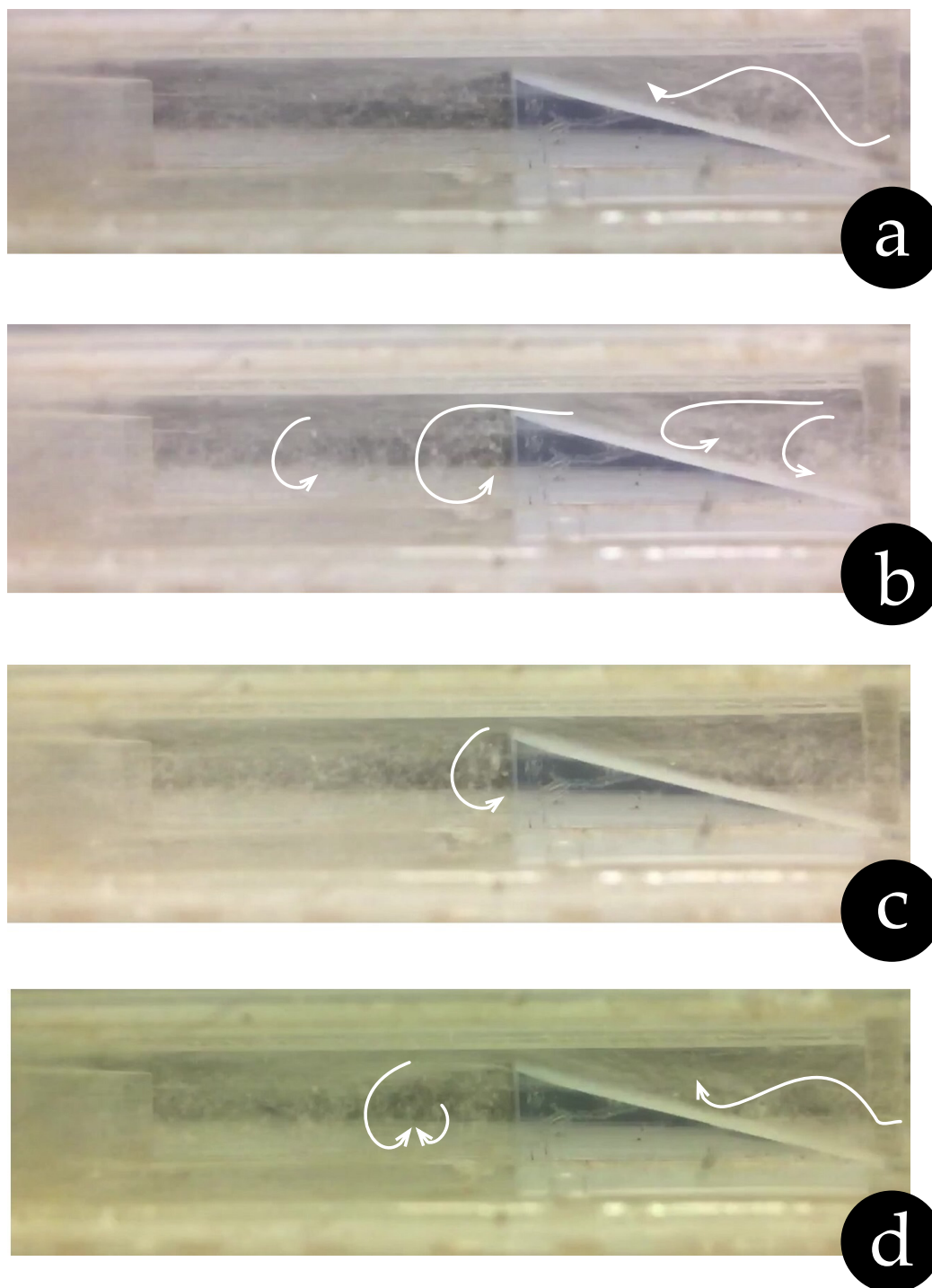


Figura 4.5: Exemplos de estruturas visualizadas em filme no segundo estrangimento da secção de ensaios.

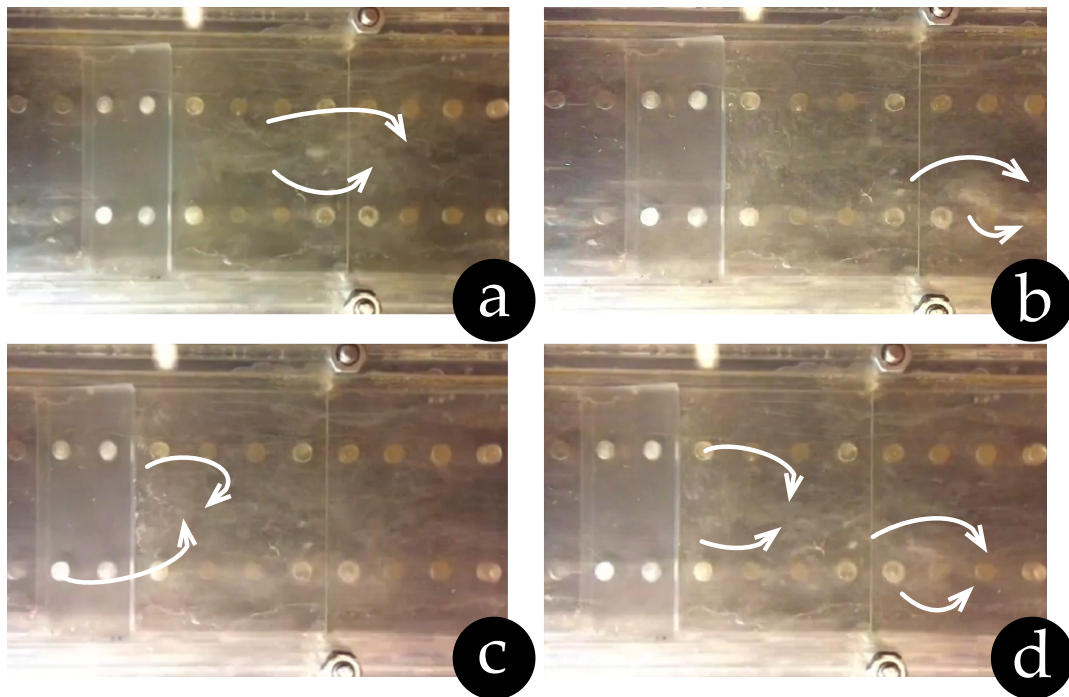


Figura 4.6: Exemplos de estruturas visualizadas em filme no primeiro constrangimento de uma vista superior.

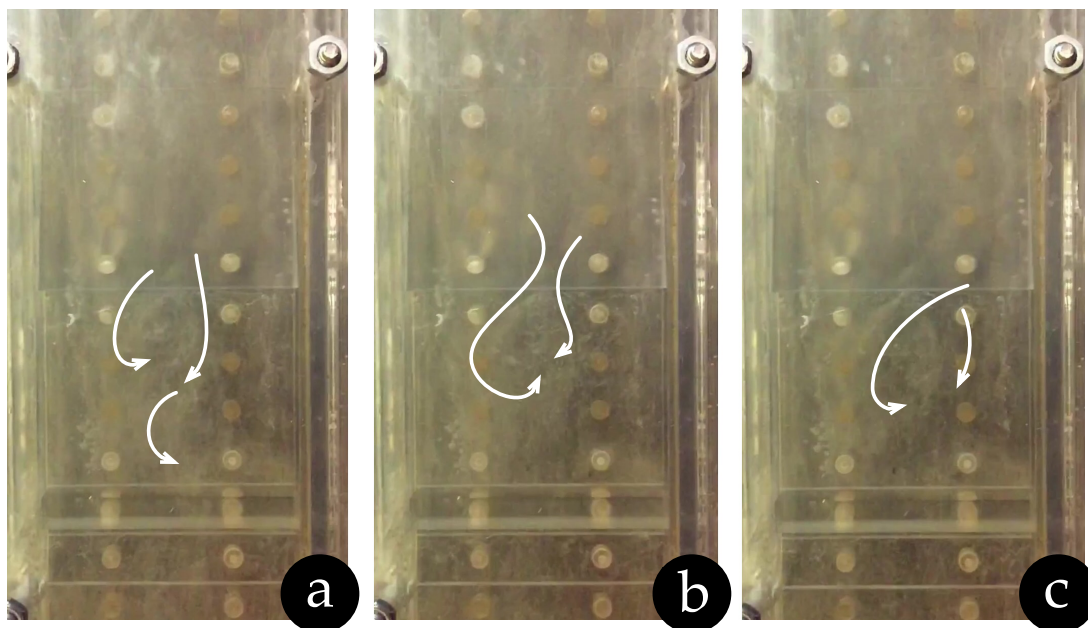


Figura 4.7: Exemplos de estruturas visualizadas em filme de uma vista superior.

5 Conclusões

Tendo por base a informação derivada da revisão da literatura e a análise dos principais resultados alcançados no estudo experimental preliminar realizado para teste da instalação construída, é possível tecer algumas considerações finais e apresentar as principais conclusões deste trabalho.

A cavitação é um fenómeno complexo que, apesar de ter vindo a ser amplamente estudado ao longo dos anos, permanece incompletamente compreendido no que respeita aos fundamentos. Não obstante, é reconhecida a sua extensa e relevante aplicabilidade em diversos domínios científico-industriais. Uma das aplicações evidenciada é o tratamento de águas residuais, no qual a cavitação hidrodinâmica, um tipo particular de cavitação, gera um conjunto de fenómenos químicos, mecânicos e térmicos, que em conjunto são capazes de reduzir a presença de substâncias químicas e microrganismos na água, de uma forma ambientalmente sustentável. Contudo, apesar de a cavitação hidrodinâmica ser uma tecnologia bem estabelecida a nível laboratorial, a sua aplicação à escala industrial é ainda muito escassa. O principal obstáculo para tal reside nas dificuldades encontradas na transferência do processo da escala laboratorial para o nível de produção industrial, exigindo um esforço combinado de engenheiros, físicos, químicos e biólogos, no sentido de aproveitar eficazmente esta tecnologia e possibilitar o uso de reatores de cavitação hidrodinâmica para aplicações industriais. Embora o reator de cavitação seja um reator físico de construção relativamente simples, a sua geometria tem um impacto significativo na geração de eventos de cavitação e, portanto, na eficiência do processo. Assim, no domínio particular da engenharia, uma das principais tarefas na área da cavitação consiste no desenvolvimento de ferramentas de *design* em reatores de cavitação hidrodinâmica que sejam favoráveis à geração do fenómeno e que permitam uma simplificação tecnológica do processo, reduzindo os custos operacionais. Porém, isso depende do cabal conhecimento fundamental dos mecanismos complexos envolvidos, daí a necessidade de construir instalações laboratoriais simplificadas que permitam realizar esses estudos.

Nesta investigação experimental, a instalação construída foi testada e permitiu observar o efeito de diferentes configurações de uma secção de ensaios, tomada como modelo experimental de um reator, na geração de cavitação hidrodinâmica, nomeadamente através da observação das estruturas fluido-dinâmicas associadas aos constrangimentos da secção.

Os resultados preliminares mostram que, em ambos os ensaios, foram observadas formações fluido-dinâmicas sugestivas do aparecimento do fenómeno de cavitação. É possível concluir em relação ao primeiro ensaio, no qual foi utilizado apenas um estrangimento, a existência de uma densidade de bolhas de cavitação mais elevada, formando uma "nuvem" de cavitação. O aparecimento deste tipo de cavitação é associado a um valor de caudal superior, em relação ao obtido no segundo ensaio, bem como à presença de partículas/impurezas no seio do líquido ensaiado. No segundo ensaio, para uma disposição de estrangimentos em cadeia e um caudal inferior ao obtido no primeiro ensaio visualizou-se o aparecimento de bolhas menos concentradas, geradas a montante, e com um maior diâmetro, associadas a eventos de cavitação mais moderados e exteriores à secção de teste. Porém, esse permitiu observar as estruturas fluido-dinâmicas semelhantes a vórtices. Assim sendo, um maior valor da velocidade do escoamento tem tendência a formar bolhas com um diâmetro mais reduzido e zonas de turbulência mais elevadas, o que provoca uma intensidade de cavitação maior, associada a um ruído mais audível.

Em suma, é possível concluir que a diminuição do número de cavitação (valor de caudal mais elevado), provoca a interação de um maior número de núcleos no fenómeno, resultando numa densidade de bolhas de cavitação mais elevada.

De acordo com os resultados obtidos, é possível concluir que a geração de cavitação não foi completamente efetiva como assumida inicialmente. No entanto, a eficácia do processo pode ser melhorada através da introdução de alterações no dispositivo experimental, nomeadamente em parâmetros geométricos. Apesar das limitações, com este trabalho foi possível reunir um conjunto de elementos de base considerados importantes para futuros estudos de cavitação e para a continuação da investigação do fenómeno de cavitação hidrodinâmica e suas aplicações.

5.1. Sugestões de trabalhos futuros

Sendo a utilização da cavitação hidrodinâmica uma solução promissora no tratamento de águas residuais, assim como em muitas outras áreas, é fundamental dar continuidade à investigação neste domínio, pelo que esta dissertação deve ser tomada como base para subsequentes projetos investigacionais. Assim, são tecidas algumas sugestões para trabalhos futuros com o intuito de progredir com o trabalho realizado, nomeadamente:

- Introdução de alterações na atual secção de ensaios que permita a variação de parâmetros geométricos, particularmente a altura dos estrangimentos, de modo a investigar a sua influência no comportamento do escoamento (valor do parâmetro crítico de cavitação) em função da diminuição da área de passagem do líquido, e que permitam gerar cavitação

com caudais menores;

- Estudo detalhado dos parâmetros de intensificação do processo de cavitação, tais como a presença de partículas sólidas, sais e gases dissolvidos no líquido. Por exemplo, recolha de amostras do líquido em estudo para posterior medição da concentração de ar e avaliação da sua influência na geração de cavitação;
- Utilização de técnicas experimentais avançadas adequadas ao estudo dos escoamentos cavitantes que permitam uma observação mais detalhada do fenómeno.

Bibliografia

- Ambulgekar, G. V., Samant, S. D., & Pandit, a. B. 2004. Oxidation of alkylarenes to the corresponding acids using aqueous potassium permanganate by hydrodynamic cavitation. *Ultrasonics Sonochemistry*, **11**(3-4), 191–196.
- Arrojo, S., & Benito, Y. 2008. A theoretical study of hydrodynamic cavitation. *Ultrasonics Sonochemistry*, **15**(3), 203–211.
- Badve, Mandar P., Gogate, Parag R., Pandit, Aniruddha B., & Csoka, Levente. 2014. Hydrodynamic cavitation as a novel approach for delignification of wheat straw for paper manufacturing. *Ultrasonics Sonochemistry*, **21**(1), 162–168.
- Bagal, Manisha V., Lele, Bhagyashree J., & Gogate, Parag R. 2013. Removal of 2,4-dinitrophenol using hybrid methods based on ultrasound at an operating capacity of 7 L. *Ultrasonics Sonochemistry*, **20**(5), 1217–1225.
- Brennen, Christopher Earls. 1995. *Cavitation and Bubble Dynamics*. Oxford University Press, New York.
- Capocelli, Mauro, Prisciandaro, Marina, Lancia, Amedeo, & Musmarra, Dino. 2014. Cavitational reactor for advanced treatment of contaminated water: the effect of recovery pressure. *Desalination and Water Treatment*, 1–6.
- Chakinala, Anand G., Gogate, Parag R., Burgess, Arthur E., & Bremner, David H. 2009. Industrial wastewater treatment using hydrodynamic cavitation and heterogeneous advanced Fenton processing. *Chemical Engineering Journal*, **152**(2-3), 498–502.
- Didier, E. 2007. Simulação Numérica De Escoamentos Com Superfície Livre. **11**, 3–18.
- Euler, Leonhard. 1755. Principes généraux du mouvement des fluids. Académie Royale des Sciences et des BellesLettres de Berlin, *Mémoires*.

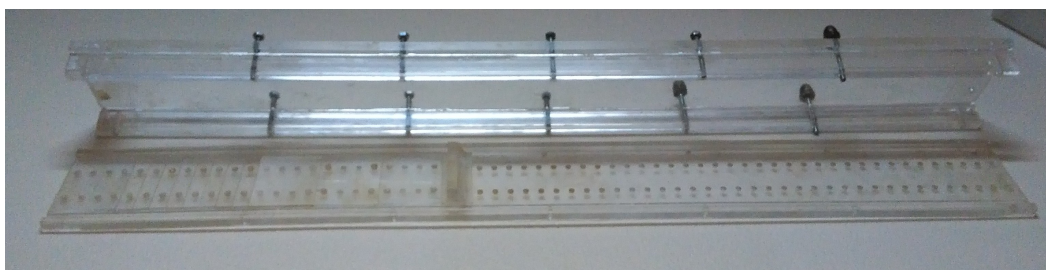
- Franc, Jean-Pierre, & Michel, Jean-Marie. 2003. *Fundamentals of Cavitation*. Grenoble Sciences.
- Gogate, Parag R., Tayal, Rajiv K., & Pandit, Aniruddha B. 2006. Cavitation: A technology on the horizon. *Current Science*, **91**(1), 35–46.
- Gogate, PR, & Kabadi, AM. 2009. A review of applications of cavitation in biochemical engineering/biotechnology. **44**(1), 60–72.
- Grist, E. 1999. *Cavitation and the Centrifugal Pump: A Guide for Pump Users*. Philadelphia, PA : Taylor & Francis.
- Harvey, E. Newton, Barnes, D. K., McElroy, W. D., Whiteley, A. H., Pease, D. C., & Cooper, K. W. 1944. Bubble formation in animals. I. Physical factors. *Journal of Cellular and Comparative Physiology*, **24**(1), 1–22.
- Ihara, Satoshi, Hirohata, Taiki, Kominato, Yuichi, Yamabe, Chobei, Ike, Hideaki, Hakiai, Kazunori, Hirabayashi, Kazuya, & Tamagawa, Masaaki. 2014. Water treatment using discharge generated in cavitation field with micro bubble cloud. *Electrical Engineering in Japan (English translation of Denki Gakkai Ronbunshi)*, **186**(4), 1–10.
- Knapp, B Y Robert T. 1958. Cavitation and Nuclei.
- Koivula, T. 2000. On cavitation in fluid power. *Proc. of 1st FPNI-PhD Symp. Hamburg*, 371–382.
- Korniluk, Marta, & Ozonek, Janusz. 2011. Application of Hydrodynamic Cavitation for Leachate of Municipal Landfill Site. 584–587.
- Kwon, W. C., & Yoon, J. Y. 2013. Experimental study of a cavitation heat generator. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, **227**(1), 67–73.
- Liu, Bin, Cai, Jun, & Huai, Xiulan. 2014. International Journal of Heat and Mass Transfer Heat transfer with the growth and collapse of cavitation bubble between two parallel heated walls. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **78**, 830–838.
- Meyer, ST. 1994. O uso de cloro na desinfecção de águas, a formação de trihalometanos e os riscos potenciais à saúde pública. **10**, 99–110.
- Moholkar, Vijayanand S, & Pandit, Aniruddha B. 1997. Bubble Behavior in Hydrodynamic Cavitation : Effect of Turbulence. *AIChE Journal*, **43**(6), 1641–1648.

- Newton, Isaac. 1952. *Optiks*. Dover Publications, New York, p.207.
- Ozonek, Janusz. 2012. *Application of Hydrodynamic Cavitation in Environmental Engineering*.
- Parsons, Charles A. 1906. The steam turbine on land and at sea. *Lecture to the Royal Institution, London*.
- Petkovšek, M, Zupanc, M, Dular, M, Kosjek, T, Heath, E, Kompare, B, & Širok, B. 2013. Rotation generator of hydrodynamic cavitation for water treatment. **118**, 415–423.
- Quintela, António Carvalho. 2014. *Hidráulica*. 13.^a edn. Lisboa : Fundação Calouste Gulbenkian.
- Saharan, Virendra Kumar, Rizwani, Manav a., Malani, Aqeel a., & Pandit, Aniruddha B. 2013. Effect of geometry of hydrodynamically cavitating device on degradation of orange-G. *Ultrasonics Sonochemistry*, **20**(1), 345–353.
- Sampath Kumar, K., & Moholkar, Vijayanand S. 2007. Conceptual design of a novel hydrodynamic cavitation reactor. *Chemical Engineering Science*, **62**(10), 2698–2711.
- Sheldon, I. Green. 1995. *Fluid Vortices: Fluid Mechanics and Its Applications*. Springer Science & Business Media, p.732.
- Tomás, Maria Teresa Dias Lopes Gomes. 1986. *ESTUDO DO FENÓMENO DA CAVITAÇÃO IMPLEMENTAÇÃO DE TÉCNICAS EXPERIMENTAIS*. Ph.D. thesis.
- Wu, C.D., Zhang, Z.L., Wu, Y., Wang, L., & Chen, L.J. 2013. Effects of operating parameters and additives on degradation of phenol in water by the combination of H₂O₂ and hydrodynamic cavitation. *Desalination and Water Treatment*, 1–7.
- Young, F. R. 1989. *Cavitation*. New York: McGraw-Hill.
- Zupanc, Mojca, Kosjek, Tina, Petkovšek, Martin, Dular, Matevž, Kompare, Boris, Širok, Brane, Blažeka, Željko, & Heath, Ester. 2013. Removal of pharmaceuticals from wastewater by biological processes, hydrodynamic cavitation and UV treatment. *Ultrasonics Sonochemistry*, **20**(4), 1104–1112.

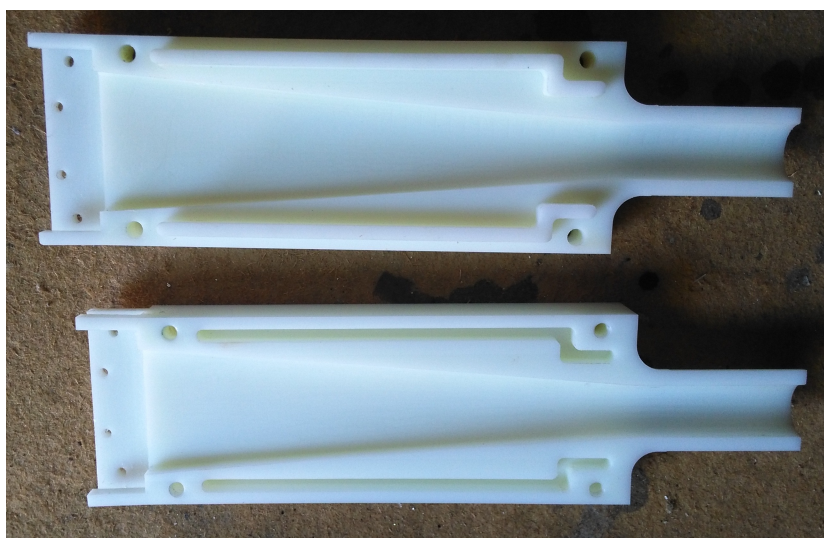
A Procedimento de mudança de configuração

A colocação da secção de ensaios totalmente operacional para a realização dos ensaios experimentais envolve um conjunto de tarefas mais ou menos específicas, que serão apresentadas de seguida.

Para a mudança de configuração basta variar os constrangimentos na placa inferior do segmento de acrílico, que serve de suporte aos mesmos. O facto de o segmento de acrílico ser constituído por quatro peças dificulta a sua vedação, uma vez que tem várias zonas onde o líquido pode vazar. A vedação é feita através da colagem das peças com selante transparente e posterior aperto das mesmas através de veios roscados e respectivas porcas, deixando secar durante aproximadamente um dia para uma selagem eficiente.



As peças em PVC que fazem a ligação da secção de ensaios ao resto do circuito são constituídas por duas partes coladas com cola e veda, um produto mais forte do que o selante transparente e que permite uma boa fixação das duas partes.



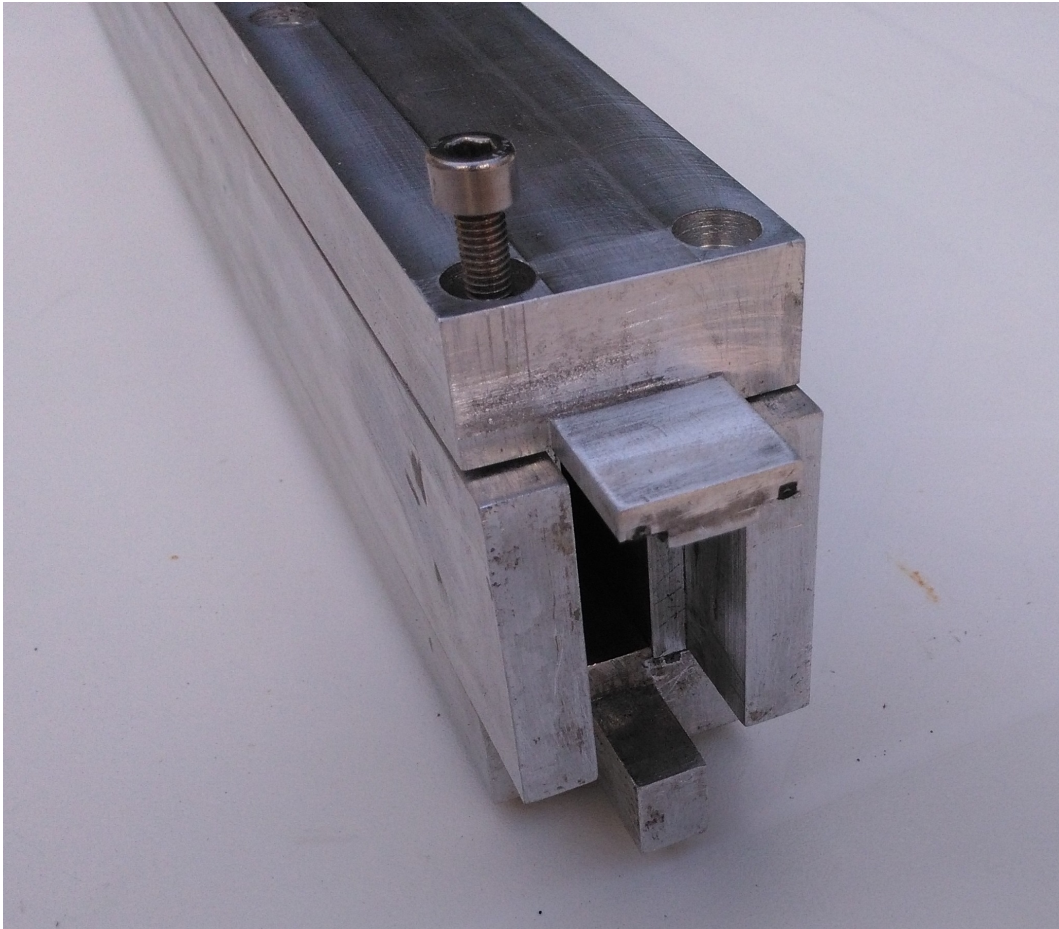


Posteriormente é feito o encaixe da peça em PVC no segmento em acrílico do lado de saída do líquido, utilizando mais uma vez o selante transparente.



O segmento de alumínio apresenta uns rasgos ao longo do canal nas peças laterais que permitem a colocação de *o-rings* que, com o posterior aperto através de parafusos de cabeça cilíndrica com sextavado interno, possibilitam a passagem do líquido no canal, sem fugas.





Por último, a junção dos segmentos de acrílico e de alumínio é realizada através da cola e veda utilizada nas peças em PVC, uma vez que permite uma melhor fixação em comparação com o selante transparente. Os dois segmentos devem ficar sob pressão durante aproximadamente um dia, com o auxílio de grampos de aperto.

