



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Estruturas fluídicas em cavitação hidrodinâmica

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

Fluidic structures in hydrodynamic cavitation

Autor

João Filipe Nogueira Machado

Orientador

Professor Doutor Miguel Rosa Oliveira Panão

Júri

Presidente	Professor Doutor Almerindo Domingues Ferreira Professor da Universidade de Coimbra
Vogal	Professor Doutor António Manuel Gameiro Lopes Professor da Universidade de Coimbra
Orientador	Professor Doutor Miguel Rosa Oliveira Panão Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Colaboração Institucional



Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial

Coimbra, setembro, 2016

À minha família.

Agradecimentos

É com a mais sincera gratidão que deixo aqui um agradecimento especial:

Ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra (DEM-UC) e a todos os seus Professores que contribuíram para a minha formação como futuro engenheiro;

Ao Professor Doutor Miguel Oliveira Rosa Panão, por toda a orientação e conhecimentos transmitidos nesta e noutras áreas;

Ao Professor Doutor João Carlos Mendes por possibilitar a realização deste trabalho nas instalações do ISEC e por todo o auxílio prestado;

Ao Engenheiro João Ferreira, da Grundfos pelos esclarecimentos relativamente ao funcionamento de bombas hidráulicas.

Ao Engenheiro Paulo Amaro e Sr. Abílio, do ISEC e ao Sr. Fernando, do DEM-UC pelo empréstimo de ferramentas.

À minha família, pai, mãe e irmã, pela paciência, compreensão e toda a ajuda incondicional prestada não só na realização deste trabalho, como também em todo o meu percurso académico.

E, por fim, a todos os meus amigos que contribuíram para que esta dissertação fosse bem sucedida.

Resumo

O presente trabalho pretende dar seguimento a uma dissertação realizada no ano 2015 por Mário da Silva Gomes denominada “Cavitação hidrodinâmica para tratamento de águas”. Sendo um dos mais recentes métodos a ser explorado na área do tratamento de águas, a cavitação hidrodinâmica tem-se revelado uma alternativa atrativa a nível económico e ambiental. Este fenómeno consiste na formação, crescimento e colapso de bolhas resultante de uma redução da pressão local abaixo do valor da pressão de vapor para as condições locais, redução essa causada pela passagem de um escoamento por um constrangimento.

Apesar do sucesso deste método à escala laboratorial, ainda não foi conseguida a sua transição para a escala industrial. Tal transição passa por um conhecimento mais aprofundado do fenómeno, a fim de uma manipulação correta de parâmetros geométricos e operacionais dos dispositivos usados para gerar cavitação.

Este trabalho teve como objetivos o estudo das condições da formação de cavitação hidrodinâmica para diferentes configurações de constrangimentos e o registo e avaliação das estruturas fluídicas criadas durante o fenómeno. Para isso recorreu-se a uma instalação experimental que possibilitou o estudo do fenómeno, com uma secção de ensaios que permitiu mudar a configuração de constrangimentos manualmente, seja pela mudança de geometria, número ou disposição destes.

Os resultados evidenciaram que tanto a geometria como a adição de um constrangimento possibilitaram diferentes condições dinâmicas para o aparecimento de cavitação e influenciaram a forma das estruturas fluidodinâmicas criadas por cavitação. Surge assim a necessidade de dar seguimento à investigação, com a finalidade de desenvolver um *design* ótimo para a geração de cavitação hidrodinâmica com melhor eficiência e passível de ser transposto à escala industrial.

Palavras Chave: Cavitação, Cavitação hidrodinâmica, Constrangimentos, Secção de ensaios, Número de cavitação

Abstract

This work intends to follow up on the thesis entitled "Hydrodynamic cavitation for water treatment" written by Mário da Silva Gomes in 2015. Being one of the most recent methods explored in the field of water treatment, hydrodynamic cavitation turns out to be an economically and environmentally attractive alternative. This phenomenon consists of the formation, growth and collapse of bubbles as a result of a local pressure decrease below vapor pressure for the local conditions, caused by the passage of a flow on a constraint.

Despite the success of this method on laboratory scale operation, its transition to industrial scale wasn't yet achieved. Such transition depends on a deeper knowledge about the phenomenon in order to manipulate correctly the geometric and operating parameters of cavitation reactors.

The main goals of this work were the study of hydrodynamic cavitation occurrence conditions for different constraints configurations and the recording and evaluation of the fluidic structures created during the phenomenon. To achieve that, an experimental set-up was used to study the phenomenon. Its test section allowed a manual configuration of the constraints by changing their geometry, amount and arrangement.

The results showed that the geometry, as well as the addition of a constraint, led to different dynamic conditions for the incipience of cavitation and affected the shape of the fluid dynamic formations created by cavitation. Therefore, the necessity arises to continue the research, aiming at the development of an optimal design for hydrodynamic cavitation generation with better efficiency and able to be transposed to industrial scale.

Keywords: Cavitation, Hydrodynamic cavitation, Constraints, Test section, Cavitation number

Conteúdo

Lista de Figuras	v
Nomenclatura	vii
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos	7
2 Instalação e metodologia experimental	9
2.1 Instalação	9
2.2 Procedimento experimental	16
3 Apresentação e discussão de resultados	17
3.1 Influência da geometria do constrangimento	18
3.2 Influência da distância entre dois constrangimentos	20
3.2.1 Variação da distância entre dois triângulos	20
3.2.2 Variação da distância entre dois retângulos	24
4 Conclusões	29
Anexo A: Procedimento de mudança de configuração	33

Lista de Figuras

Figura 1.1	À esquerda: formação de bolhas de cavitação nas pás de uma hélice (http://bit.ly/2bAqSTj). À direita: erosão por cavitação numa hélice (http://bit.ly/2b3RCfx).	3
Figura 1.2	Escoamento num canal com uma constricção.	4
Figura 1.3	Representação esquemática de um gerador de cavitação com órgãos rotativos [adaptado de Petkovšek <i>et al.</i> (2013)].	6
Figura 2.1	Esquema da instalação experimental.	9
Figura 2.2	Instalação experimental. Os números indicam os mesmos componentes que os da Figura 2.1.	10
Figura 2.3	Bomba Grundfos CR5-8 e respetiva placa com as características.	10
Figura 2.4	Variador de velocidades (esquerda) e lâmpada estroboscópica (direita).	11
Figura 2.5	Contador volumétrico (esquerda) e manómetro de Bourdon (direita).	12
Figura 2.6	Canal de acrílico, onde se vai gerar cavitação.	13
Figura 2.7	Placas constituintes do canal de acrílico.	13
Figura 2.8	Dimensões do canal de acrílico da secção de ensaios: $L = 500\text{ mm}$, $w = 40\text{ mm}$, $H = 10\text{ mm}$, $h = 2\text{ mm}$ (Gomes, 2015).	13
Figura 2.9	Secção de alumínio instalada a montante do canal de acrílico.	13
Figura 2.10	Peça em PVC. À direita: pormenor da variação da secção de passagem.	14
Figura 2.11	Secção de ensaios.	14
Figura 2.12	Constrangimentos dispostos na placa inferior do canal.	14
Figura 2.13	Dimensões dos constrangimentos.	15
Figura 2.14	Exemplos de geometrias possíveis de estudar.	15

Figura 2.15	Disposição do pano escuro na secção de ensaios.	16
Figura 3.1	Configurações estudadas com um constrangimento.	17
Figura 3.2	Configurações estudadas com dois constrangimentos iguais.	18
Figura 3.3	Número de cavitação incipiente para as diferentes geometrias analisadas.	19
Figura 3.4	Estruturas fluídicas visualizadas nos ensaios com um constrangi- mento para várias geometrias.	21
Figura 3.5	Número de cavitação incipiente para diferentes distâncias entre constrangimentos triangulares.	22
Figura 3.6	Estruturas fluídicas visualizadas nos ensaios para várias distân- cias entre dois constrangimentos triangulares. d/D_h : a) 2.91, b) 5.73, c) 9.83 e d) 14.79.	23
Figura 3.7	Número de cavitação incipiente para diferentes distâncias entre constrangimentos retangulares.	25
Figura 3.8	Estruturas fluídicas visualizadas nos ensaios para várias distân- cias entre dois constrangimentos retangulares. d/D_h : a) 3.84, b) 6.33, c) 10.20 e d) 16.69.	26
Figura A.1	Aplicação de vedante na placa inferior do segmento de acrílico.	33
Figura A.2	Fixação e vedação da peça em PVC ao segmento de acrílico.	34
Figura A.3	Fixação e vedação da peça de alumínio ao segmento de acrílico.	34

Nomenclatura

d	Distância entre constrangimentos [m]
D_h	Diâmetro hidráulico da secção de ensaios [m]
H	Altura da secção de ensaios [m]
h	Altura da menor secção de passagem do escoamento [m]
L	Comprimento do canal de acrílico da secção de ensaios [m]
p_1	Pressão estática absoluta num ponto de referência do escoamento fora da zona de cavitação [Pa]
p_v	Pressão de vapor [Pa]
Q	Caudal volúmico [m ³ /s]
v_0	Velocidade média na menor secção de passagem do escoamento [m/s]
w	Largura da secção de ensaios [m]

Símbolos gregos

Δt	Intervalo de tempo medido no contador para determinar o caudal [s]
ρ	Massa volúmica [kg/m ³]
σ	Número de cavitação
σ_i	Número de cavitação incipiente

1 Introdução

1.1. Enquadramento

Ao longo dos tempos tem-se assistido à gradual deterioração da qualidade da água fluvial principalmente devido à descarga de resíduos provenientes da atividade humana, nomeadamente no setor industrial e agrícola, sendo este impacto cada vez maior à medida que a população mundial vai crescendo.

Estima-se que 80% das doenças nos países subdesenvolvidos tenham como causa a água imprópria para consumo e o saneamento inadequado. A desinfecção da água para consumo e o tratamento de esgotos assumem cada vez mais um papel fundamental na proteção da saúde pública através da destruição de bactérias e vírus, ajudando a proteger ecossistemas e a prevenir a propagação de doenças transmitidas pela água (Pandit & Kumar, 2013).

Face às exigências das novas regulamentações ambientais, têm vindo a ser desenvolvidas novas técnicas de tratamento de águas residuais para serem usadas em associação com os métodos básicos convencionais (Gogate, 2002). Uma dessas técnicas é a cavitação hidrodinâmica. Sendo uma técnica não-química, a sua utilização não implica a formação de sub-produtos tóxicos, como acontece por exemplo na cloração. Para além disso, uma aplicação adequada da cavitação, permite diminuir substancialmente o uso de reagentes químicos utilizados nos tratamentos convencionais (Jyoti & Pandit, 2001; Assis *et al.*, 2009).

A cavitação hidrodinâmica, sendo um processo que tem um baixo consumo de energia relativamente à taxa de desinfecção, poderá ser considerada uma técnica com potencial para o tratamento de águas residuais com aplicação em larga escala (Jyoti & Pandit, 2001; Assis *et al.*, 2009).

Conceito de cavitação

Em qualquer meio líquido, o fenómeno de cavitação pode ser provocado em determinados pontos nos quais a pressão local diminua até um valor crítico. Na prática,

esse valor corresponde à pressão de vapor do fluido dependendo da temperatura local. Nessas condições, formam-se cavidades ou bolhas de cavitação, que começam a crescer repentinamente, à medida que se vão enchendo com o vapor do líquido circundante, assim como com outros gases que se encontrem dissolvidos no mesmo. Este crescimento é interrompido quando as bolhas formadas forem submetidas a uma pressão superior ao valor crítico, momento em que os gases presentes se dissolvem novamente no líquido e o vapor condensa, gerando a implosão violenta das bolhas (Tomás, 1986).

Neste sentido, a cavitação define-se como o fenómeno de formação, crescimento, e subsequente colapso de micro-bolhas ou cavidades que ocorre no seio de um líquido num intervalo de tempo extremamente curto (Gogate & Pandit, 2001), como consequência de uma redução de pressão local até ao valor da pressão de vapor.

Quando a redução da pressão tem origem em variações de velocidade num escoamento, o fenómeno designa-se cavitação hidrodinâmica (Gogate & Pandit, 2001). É o caso, por exemplo, do escoamento numa tubagem com secção de passagem variável. Quando a secção diminui, admitindo que o caudal se conserva, a velocidade aumenta, e conseqüentemente a pressão estática local diminui, de acordo com a equação de Bernoulli. Se esta redução de pressão for suficiente para que sejam atingidos valores inferiores ao da pressão de vapor, formam-se bolhas de cavitação. Estas são arrastadas pelo escoamento até encontrarem uma região onde, devido a uma nova mudança de secção, a pressão aumenta, desencadeando a fase de compressão e posterior colapso das bolhas (Gogate & Pandit, 2000).

A cavitação hidrodinâmica ocorre, também, na presença de corpos rotativos imersos num líquido, como é o caso das hélices dos navios (Fig. 1.1), das bombas hidráulicas e turbinas (Franc & Michel, 2005; Fuzier *et al.*, 2013). De facto, as elevadas velocidades locais impostas ao fluido, quando este atravessa uma turbomáquina, podem ser suficientes para que a pressão local em certos pontos assuma um valor abaixo do crítico, desencadeando assim o fenómeno de cavitação.

A ocorrência de cavitação nestes órgãos rotativos é, muitas vezes, acompanhada de alguns inconvenientes. A presença de uma fase de vapor no seio de um líquido implica alterações das características dinâmicas do escoamento e, conseqüentemente, alterações no funcionamento das instalações e máquinas hidráulicas. Por sua vez, o constante e frequente colapso das bolhas gera ondas de choque de elevada amplitude, provocando

ruído, vibrações, e fadiga dos materiais das instalações e máquinas hidráulicas, podendo mesmo criar danos permanentes (Tomás, 1986; Danlos *et al.*, 2012), como se pode observar na Fig. 1.1, à direita.

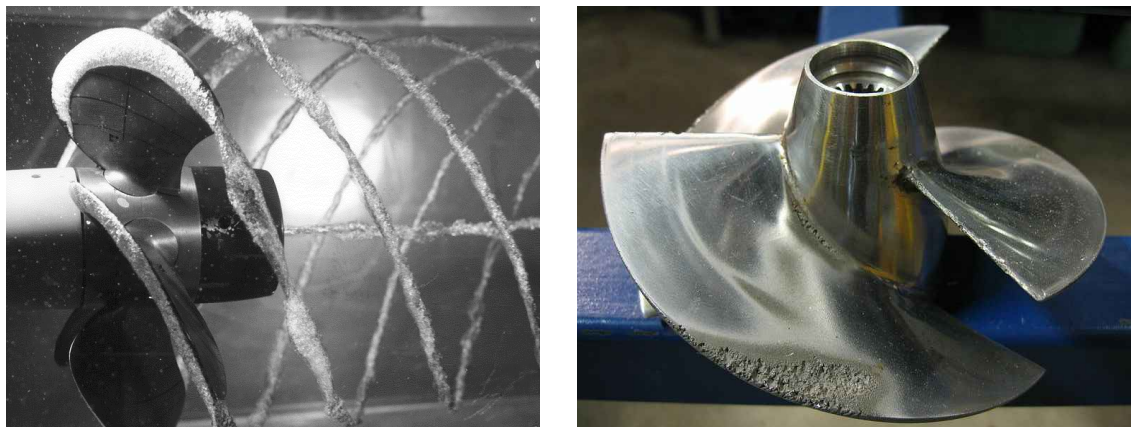


Figura 1.1: À esquerda: formação de bolhas de cavitação nas pás de uma hélice (<http://bit.ly/2bAqSTj>). À direita: erosão por cavitação numa hélice (<http://bit.ly/2b3RCfx>).

Durante a fase de compressão de uma bolha de cavitação, a pressão no interior aumenta e o vapor começa a condensar. Como o volume específico do líquido é muito inferior ao do vapor, esta condensação resulta na formação de um vazio e a bolha implode. O colapso pode ser tão rápido ao ponto de a velocidade da parede da bolha ultrapassar a velocidade do som no meio. Nesse instante o vapor ainda presente no centro da bolha não tem tempo suficiente para sair e é por isso sujeito a pressões e temperaturas extremas. Estas condições de pressão e temperatura atingidas durante o colapso da bolha são propícias à dissociação das moléculas de vapor, produzindo-se radicais livres altamente reativos (Tomás, 1986; Sampath Kumar & Moholkar, 2007).

É através da produção de radicais e da criação de condições extremas de pressão e temperatura locais (acima da ordem das centenas de MPa e dos milhares de Kelvin, respetivamente) em tão curto período de tempo, que a cavitação permite desencadear processos físico-químicos que poderão ser usados na degradação e oxidação de poluentes presentes na água (Ozonek, 2012).

Número de cavitação

Existe um parâmetro adimensional que caracteriza o quão próximo se encontra a pressão do líquido da pressão de vapor, ou seja, a potencialidade de ocorrer cavitação, designado por número de cavitação, σ (Brennen, 2005). A formulação adotada pode variar consoante a sua aplicação. Neste trabalho adotou-se a seguinte formulação:

$$\sigma = \frac{p_1 - p_v}{\frac{1}{2}\rho v_0^2} \quad (1.1)$$

Para melhor perceber o significado físico deste parâmetro, considere-se o escoamento de um líquido num canal semelhante ao da Fig. 1.2, em que o ponto (0) indica a zona do constrangimento, ou estrangulamento do escoamento, onde se espera que ocorra cavitação:

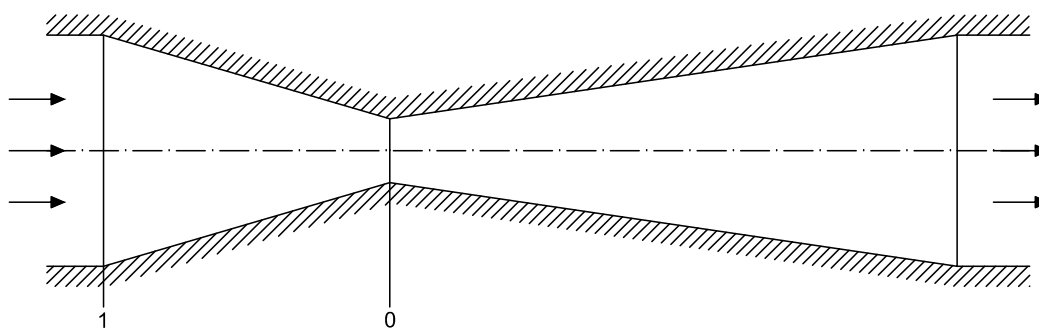


Figura 1.2: Escoamento num canal com uma constricção.

A pressão p_1 corresponde à pressão de referência obtida num ponto a montante do constrangimento (1), perto da zona de cavitação. Por sua vez, p_v e ρ são a pressão de vapor e a massa volúmica do fluido, ambas dependentes da temperatura, e v_0 é a velocidade média do fluido no constrangimento (0), onde a área da secção de passagem é menor e portanto a velocidade é máxima. Consoante o sistema hidráulico envolvido, os termos p_1 e v_0 podem ser determinados noutros pontos, sem que o número de cavitação perca significado físico. Por exemplo, nalguns artigos (Danlos *et al.*, 2012; Brennen, 2005; Ozonek, 2012), o número de cavitação contempla a velocidade a montante do constrangimento e noutros (Gogate & Pandit, 2000; Jyoti & Pandit, 2001) a pressão é definida a jusante.

A interpretação da expressão (1.1) permite constatar que o número de cavitação representa a relação entre as forças que inibem a cavitação e as forças que a promovem

(Tomás, 1986). Com efeito, um maior afastamento do valor da pressão estática relativamente ao da pressão de vapor vai dificultar a geração de cavitação, enquanto que um aumento da pressão dinâmica vai favorecê-la, na medida em que provoca uma redução da pressão estática em (0). Assim, é evidente que o aparecimento ou aumento de intensidade do fenómeno de cavitação seja acompanhado por uma redução do número de cavitação (Ozonek, 2012).

Na situação de transição entre haver ou não cavitação, designa-se o número de cavitação crítico a partir do qual essa ocorre como *incipiente*, σ_i (Jyoti & Pandit, 2001; Franc & Michel, 2005). Assim, para ocorrer cavitação, é necessário satisfazer a seguinte condição:

$$\sigma \leq \sigma_i \tag{1.2}$$

Este número está dependente de vários fatores, tais como a geometria do escoamento, a viscosidade do líquido, a força gravítica, a intensidade de turbulência, a rugosidade da parede e os gases dissolvidos ou livres no líquido.

O número de cavitação só pode ser comparado entre vários sistemas na situação de incipiência. De um modo geral, quanto menor for o valor de σ_i para um dado sistema, maior será a dificuldade em gerar cavitação nesse sistema, pois isso implica a necessidade de uma maior descida do parâmetro σ (Franc & Michel, 2005).

Reatores de cavitação hidrodinâmica

Diversos dispositivos de geração de cavitação hidrodinâmica têm sido desenvolvidos no sentido de melhor estudar este fenómeno e as suas potenciais aplicações. Com estes reatores pretende-se analisar a influência dos parâmetros geométricos e operacionais no comportamento do fenómeno. Numa área mais vocacionada para o tratamento de águas, essa análise tem por objetivo avaliar a taxa e eficácia de remoção de determinadas substâncias presentes na água. Como exemplo, Petkovšek *et al.* (2013) avaliaram a eficácia de um gerador de cavitação na remoção de quatro fármacos (ibuprofeno, cetoprofeno, carbamazepina e diclofenaco) presentes na água, estudando a influência da geometria do dispositivo, da pressão na câmara de tratamento e da temperatura do líquido, entre outras variáveis.

Diferentes reações físico-químicas requerem diferentes graus de intensidade de ca-

vitação para serem desencadeadas ou amplificadas. Através da manipulação das condições geométricas e de funcionamento do reator pretende-se controlar a intensidade de cavitação requerida para uma determinada reação física ou química com a máxima eficiência energética (Gogate & Kabadi, 2009).

O princípio de funcionamento da maioria dos dispositivos usados em laboratório consiste na passagem de um escoamento por um constrangimento, seja esse uma placa de um ou mais orifícios, uma válvula de estrangulamento, ou um tubo de Venturi, como é o caso do reator representado na Fig. 1.2 (Gogate & Kabadi, 2009). Contudo, encontram-se também na literatura reatores com órgãos rotativos que impõem uma multiplicidade de constrangimentos à passagem do fluido. Um exemplo disso é o reator ilustrado na Fig. 1.3 usado por Petkovšek *et al.* (2013), em que variações da velocidade, e conseqüentemente da pressão estática devem-se à passagem do fluido entre dois rotores providos de entalhes que rodam em sentido contrário.

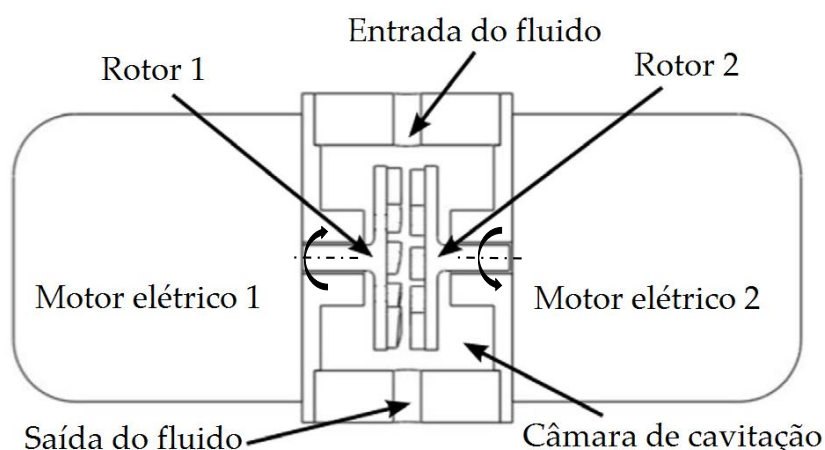


Figura 1.3: Representação esquemática de um gerador de cavitação com órgãos rotativos [adaptado de Petkovšek *et al.* (2013)].

Apesar da variedade de reatores existentes à escala laboratorial e do seu sucesso, ainda não foi desenvolvido um com *design* apropriado para uso comercial e aplicação à escala industrial (Petkovšek *et al.* , 2013; Chakinala *et al.* , 2009).

Uma investigação mais detalhada no sentido de desenvolver ferramentas de *design* para os geradores cavitacionais poderá contribuir para a simplificação tecnológica do processo, redução de custos operacionais, bem como contribuir positivamente para a sua aplicação à escala industrial (Gomes, 2015).

1.2. Objetivos

Na literatura não há uma orientação clara sobre a otimização da geometria de um cavitador. Isso depende de um estudo fundamental da influência das características geométricas dos constrangimento usados. Assim, diversas formas geométricas e configurações (número e disposição de constrangimentos) foram aplicadas a uma secção de ensaios, inserida num circuito fechado de água que produz as condições dinâmicas necessárias à geração de cavitação. Depois, através da visualização, pretendeu-se estudar, qualitativamente, o comportamento das estruturas fluídicas associadas à cavitação gerada.

O estudo da configuração de constrangimentos foi analisado sob duas vertentes distintas:

- Influência da geometria do constrangimento;
- Influência da adição de um constrangimento e distância entre constrangimentos consecutivos.

No capítulo seguinte será feita uma descrição detalhada da instalação experimental usada para a realização deste trabalho e da metodologia experimental adotada. No terceiro capítulo serão apresentados e discutidos os resultados da investigação e por fim, no último capítulo, serão tecidas as conclusões do estudo realizado.

2 Instalação e metodologia experimental

2.1. Instalação

Os ensaios laboratoriais desenvolveram-se no Laboratório de Máquinas Hidráulicas do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra (ISEC), tirando partido dos equipamentos lá disponíveis.



Figura 2.1: Esquema da instalação experimental.

A instalação experimental consiste num circuito fechado com recirculação de água proveniente de um reservatório à pressão atmosférica e localizado abaixo do chão (Figuras 2.1 e 2.2). O circuito conta com uma tubagem em aço galvanizado com um comprimento total de 7 m e um diâmetro interno de 32 mm, uma bomba centrífuga, um contador de água, e a secção de ensaios.

Equipamentos

A bomba usada é uma Grundfos CR5-8, centrífuga e multicelular de oito estágios (Fig. 2.3). As bombas CR são bombas verticais, multicelulares, não auto-ferrantes e possuem as tomadas de entrada e saída de água à mesma cota. A bomba vem equipada com um motor assíncrono trifásico, de acordo com o catálogo do fabricante.

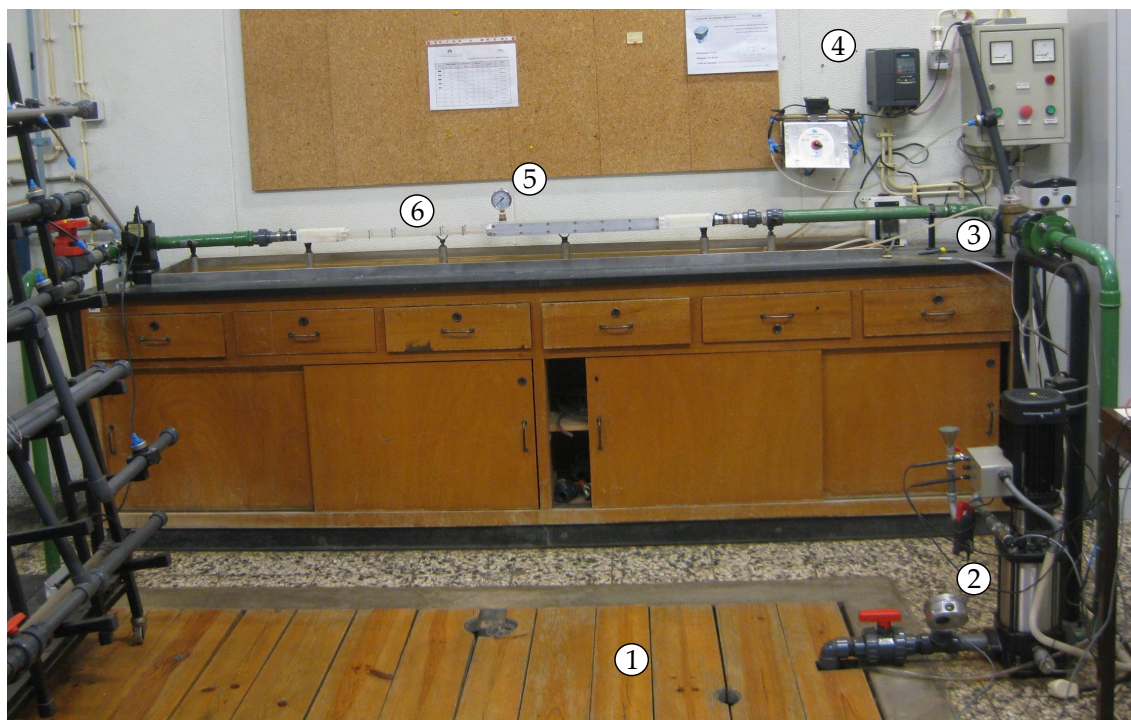


Figura 2.2: Instalação experimental. Os números indicam os mesmos componentes que os da Figura 2.1.



Type	CR5-8 A-A-A-E-HQOE				
Model	A96516991 P31346				
f	50	Hz	P2	1,10	kW
n	2853	min ⁻¹	H _{max}	56,5	m
Q	5,8	m ³ /h	H	40,3	m
p _{max} /t _{max}	16/120	bar/°C	CCW		
Serial No.	0007	Made in Hungary			
MEI ≥	0,57	η _p (%)	58,9	GRUNDFOS X DK-8850 Bjerringbro, Denmark	

Figura 2.3: Bomba Grundfos CR5-8 e respetiva placa com as características.

A velocidade de rotação da bomba foi controlada através de um variador de velocidade da série Micromaster da Siemens, que permite regular a frequência da corrente com que o motor da bomba era alimentado, de 0 a 50 Hz . A frequência de 50 Hz é equivalente a ter o motor diretamente ligado à rede, correspondendo uma velocidade de rotação da bomba de 2853 rpm . Recorrendo a uma lâmpada estroboscópica direcionada à ventoinha do motor da bomba, foi possível determinar, para cada valor da frequência da corrente, a correspondente velocidade da bomba.



Figura 2.4: Variador de velocidades (esquerda) e lâmpada estroboscópica (direita).

Para saber o caudal de água que circula na instalação foi usado um contador volumétrico da Altecnic (Fig. 2.5|esquerda). O valor do caudal é obtido através da contagem do intervalo de tempo, Δt , que demora um dos ponteiros a dar uma volta completa, o que corresponde à passagem de 10 l de água pela instalação. Assim, o caudal em m^3/s , resulta da seguinte expressão:

$$Q = \frac{0.01}{\Delta t} [m^3/s] \quad (2.1)$$

O manómetro usado é do tipo Bourdon e foi instalado na secção de ensaios (Fig. 2.5|direita). Este contacta com o fluido circulante através de um orifício de 2 mm de diâmetro permitindo assim medir a pressão estática relativa à entrada da secção de ensaios. Uma vez que a resolução deste manómetro é de 0.5 bar , procedeu-se à captação e posterior análise de imagem de cada um dos valores medidos, a fim de obter uma maior precisão dos valores da pressão.



Figura 2.5: Contador volumétrico (esquerda) e manómetro de Bourdon (direita).

Secção de ensaios

A secção de ensaios deste estudo foi projetada e desenvolvida no decorrer de trabalhos de investigação anteriores e é composta por três segmentos distintos:

- Um canal retangular formado por quatro placas de 50 *cm* de comprimento. A placa inferior possui uma série de furos nos quais se encaixam os constrangimentos que se pretendem estudar. As quatro placas são unidas com parafusos e porcas. De modo a permitir a observação direta do escoamento, tanto as placas como os constrangimentos são feitas de material acrílico (Fig. 2.6 a 2.8);
- Uma extensão do canal em alumínio de 54 *cm* de comprimento que tem como finalidade promover a chegada ao canal de acrílico de um escoamento completamente desenvolvido (Fig. 2.9). As dimensões da secção de passagem são iguais às das do segmento de acrílico;
- Duas peças em PVC que fazem a ligação das extremidades da secção de ensaios à tubagem do resto do circuito, garantindo uma transição suave de secção circular para retangular e vice-versa (Fig. 2.10). As dimensões da secção retangular de passagem são iguais às das do canal de acrílico.

Os constrangimentos, com os quais se vai gerar cavitação, são pequenas peças prismáticas em acrílico com formas distintas. Estas peças possuem pequenos pinos na face

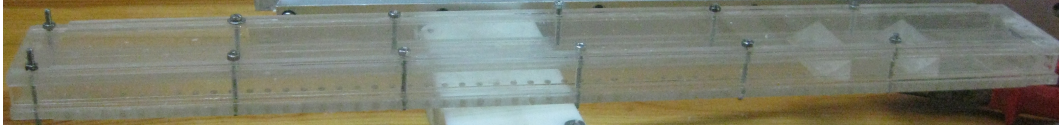


Figura 2.6: Canal de acrílico, onde se vai gerar cavitação.

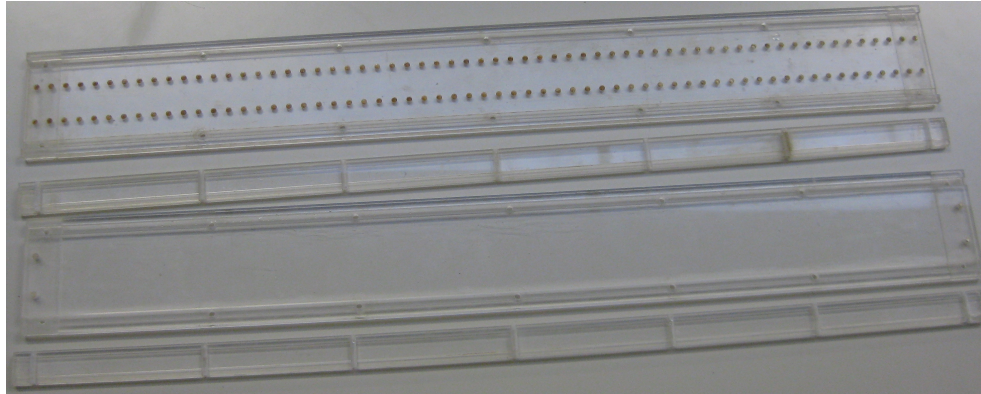


Figura 2.7: Placas constituintes do canal de acrílico.

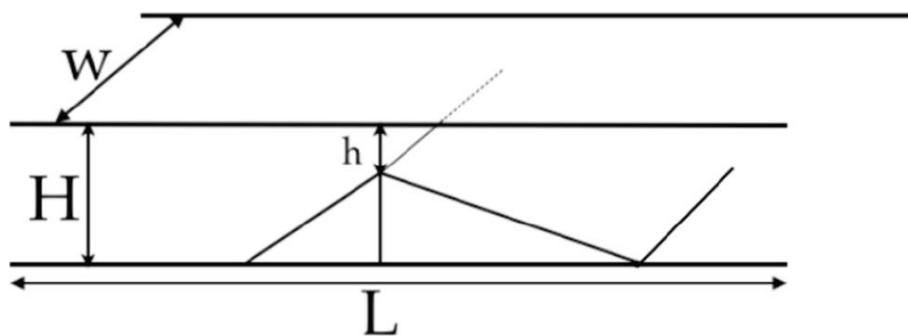


Figura 2.8: Dimensões do canal de acrílico da secção de ensaios: $L = 500 \text{ mm}$, $w = 40 \text{ mm}$, $H = 10 \text{ mm}$, $h = 2 \text{ mm}$ (Gomes, 2015).

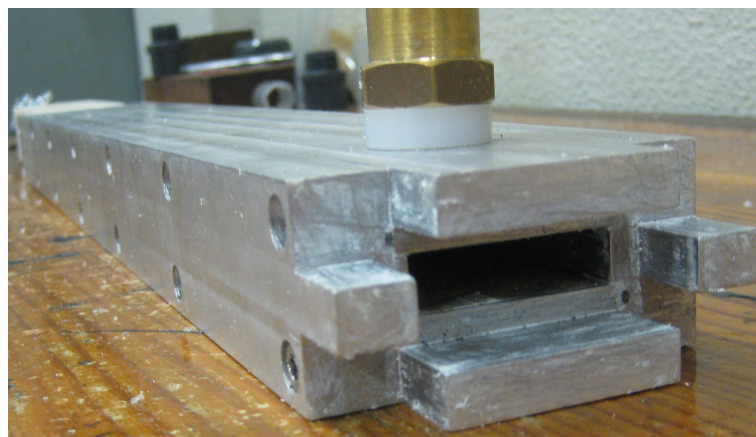


Figura 2.9: Secção de alumínio instalada a montante do canal de acrílico.

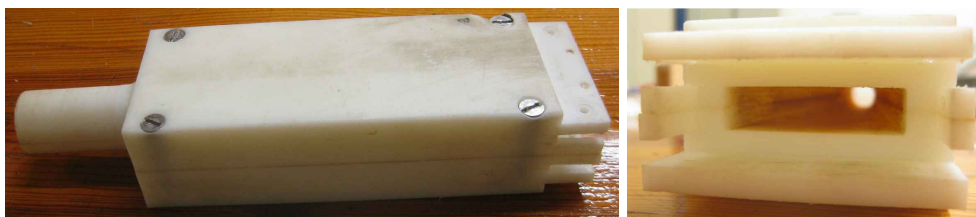


Figura 2.10: Peça em PVC. À direita: pormenor da variação da secção de passagem.

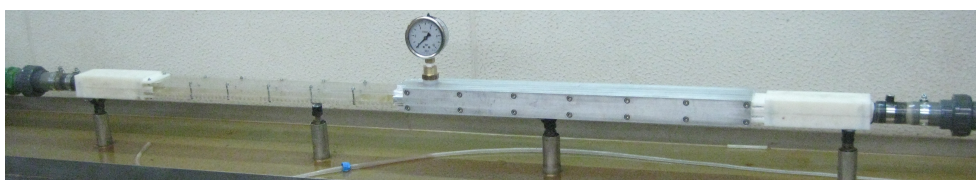


Figura 2.11: Secção de ensaios.

de baixo que encaixam nos buracos da placa inferior de acrílico, permitindo assim a sua fixação no canal. Estes constrangimentos ocupam 8 *mm* da altura e toda a largura do canal em acrílico, o que força a água a atravessar uma secção de passagem retangular com uma área cinco vezes inferior à da secção do canal (Fig. 2.12).

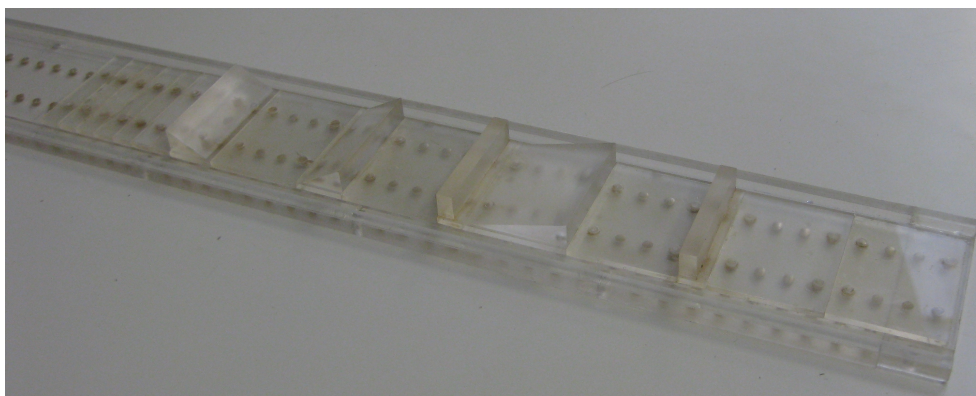


Figura 2.12: Constrangimentos dispostos na placa inferior do canal.

Existem cinco constrangimentos disponíveis para estudo totalizando, no entanto, apenas três formas diferentes em termos bidimensionais:

- dois retângulos iguais;
- dois triângulos retângulos iguais com um ângulo de 30° entre a hipotenusa e o cateto inferior;
- um triângulo retângulo com um ângulo de 15° entre a hipotenusa e o cateto inferior (Fig. 2.13).

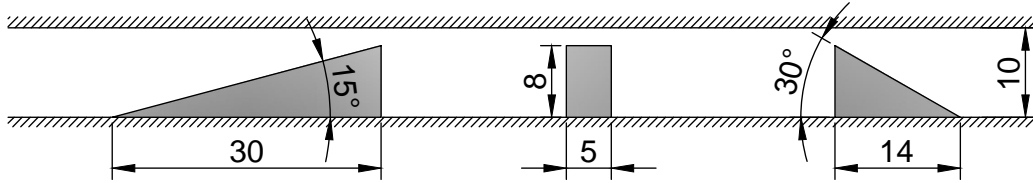


Figura 2.13: Dimensões dos constrangimentos.

Como a Fig. 2.12 sugere, com estas três formas é possível ensaiar mais do que três geometrias diferentes. Para isso basta, por exemplo, inverter o sentido das peças (no caso dos triângulos) de modo a que as rampas fiquem viradas ou para a entrada ou para a saída da secção de ensaios. Também é possível unir duas ou mais peças diferentes, formando assim um novo constrangimento (Fig. 2.14).

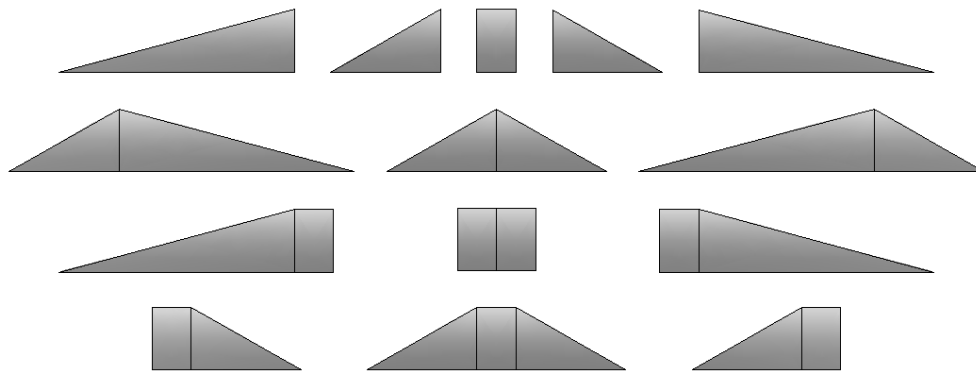


Figura 2.14: Exemplos de geometrias possíveis de estudar.

Apesar de a secção de ensaios ter sido projectada para que os valores da altura das secções de passagem, H e h , não variassem entre cada configuração de constrangimentos, na realidade este facto não se verificou devido a falhas na consistência da vedação e montagem da secção de ensaios para cada nova configuração. Por isso, para cada configuração que se ensaiou, foi necessário medir a altura real do canal, H , com um paquímetro.

Esta variação de alturas tem obviamente consequências no valor da velocidade do fluido sobre o constrangimento. É justamente para ter em consideração esta nova variável que o número de cavitação, σ , adoptado neste trabalho contemplou o valor da velocidade nesse ponto, v_0 .

2.2. Procedimento experimental

Para cada configuração de constrangimentos que se pretendeu estudar, regulou-se a velocidade de rotação da bomba, através do variador de velocidades, de modo a encontrar o ponto de cavitação incipiente, situação em que se começaram a observar as primeiras bolhas. Uma vez encontrado esse ponto, fez-se o levantamento dos valores da pressão à entrada da secção de ensaios, p_1 , e do caudal, Q .

Procurou-se que, de um ensaio para o outro, a cavitação na situação de incipiência fosse em termos fenomenológicos o mais semelhante possível. Para garantir o máximo de objetividade na identificação desta fase, adotou-se sempre o mesmo critério, com base na frequência de ocorrência de aparecimento das bolhas, detetadas visualmente. Em termos práticos, assumiu-se que na situação de cavitação incipiente o fenómeno foi observado com pelo menos uma ocorrência por segundo, com o menor valor de caudal possível.

Posteriormente, aumentou-se a velocidade da bomba até ao seu valor máximo para obter uma fase de cavitação mais desenvolvida. Esta fase do fenómeno foi registada com uma câmara fotográfica. Para melhorar a visualização das estruturas fluído-dinâmicas formadas por cavitação, utilizou-se a lâmpada estroboscópica regulada a uma frequência elevada de pulsos, de modo a obter uma fonte de luz aparentemente constante. A iluminação foi feita por cima da secção de ensaios, transversalmente à observação e captação das imagens.

Para acentuar o contraste das bolhas, foi colocado no segmento de acrílico um pano de fundo escuro do lado oposto ao da visualização (Fig. 2.15).



Figura 2.15: Disposição do pano escuro na secção de ensaios.

3 Apresentação e discussão de resultados

Na primeira fase deste estudo procurou-se estudar o efeito da geometria do constrangimento. As geometrias ensaiadas estão ilustradas na Fig. 3.1:

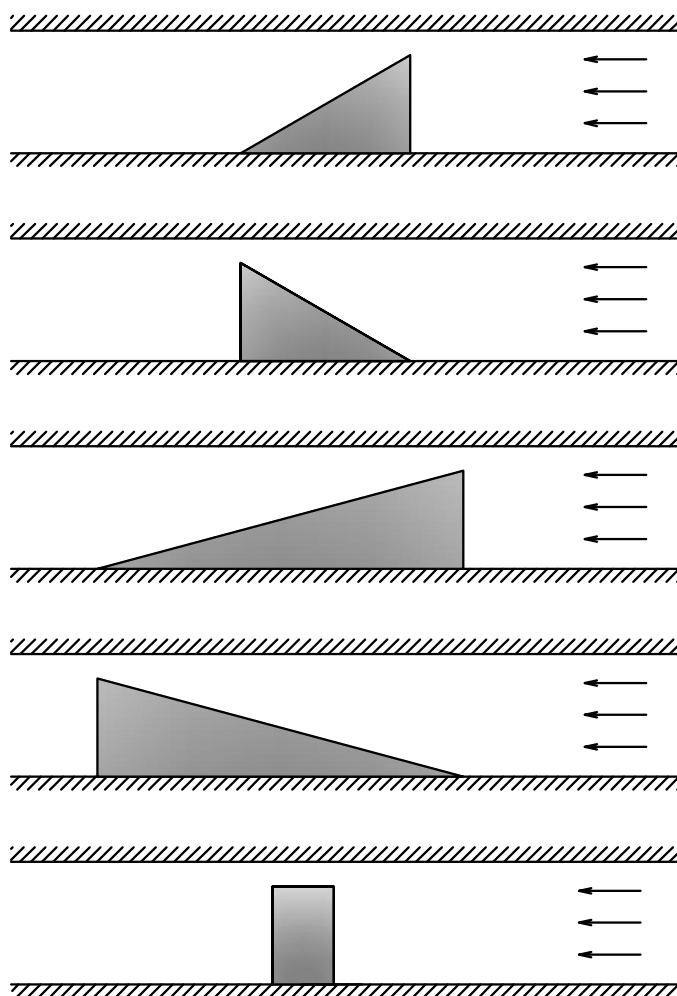


Figura 3.1: Configurações estudadas com um constrangimento.

Numa segunda fase, para as geometrias \triangleleft e \square , adicionou-se um constrangimento e variou-se a distância entre eles, d , em 16, 32, 48 e 80 mm (Fig. 3.2). Porém, na análise, é importante considerar as relações de escala. Nesse sentido, esta distância foi normalizada com o diâmetro hidráulico, D_h , definido na secção de passagem por cima do constrangimento, medido em cada ensaio.

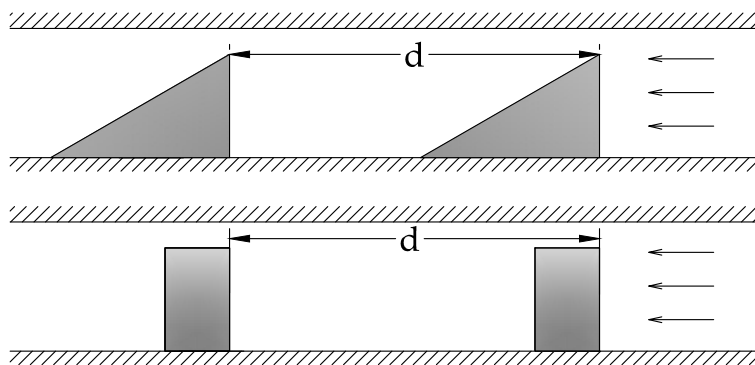


Figura 3.2: Configurações estudadas com dois constrangimentos iguais.

A temperatura da água no reservatório rondou os $15^{\circ}C$. As propriedades da água a esta temperatura estão sintetizadas na Tabela 3.1:

Tabela 3.1: Propriedades termodinâmicas da água líquida à temperatura de $15^{\circ}C$ (Lide, 2005).

Propriedade	Valor
Massa volúmica, ρ	999.1 kg/m^3
Pressão de vaporização, p_v	1705.6 Pa

Para calcular o número de cavitação, usa-se a pressão, p_1 , obtida pelo manómetro e a velocidade no constrangimento, v_0 , calculada usando o caudal medido, Q , e a área da secção de passagem, de acordo com:

$$v_0 = \frac{Q}{wh} \text{ [m/s]} \quad (3.1)$$

sendo a largura w da secção de ensaios constante ($w = 4 \text{ cm}$), e h a altura da secção de passagem por cima do constrangimento medida em cada ensaio.

3.1. Influência da geometria do constrangimento

Os resultados apresentados nesta secção dizem respeito aos ensaios das configurações com um só constrangimento. O gráfico da Figura 3.3 expõe os valores que o número de cavitação assumiu na situação de cavitação incipiente, σ_i , para cada ensaio. Como referido anteriormente no Capítulo 1, o número de cavitação incipiente representa o limite que separa a ocorrência de cavitação da sua ausência. Assim valores do

número de cavitação abaixo de σ_i correspondem a escoamentos cavitantes.

Se o número de cavitação incipiente é mais elevado, significa que o número de cavitação (dependente das características dinâmicas do escoamento) não necessita de diminuir tanto para o fluido cavitante, seja devido a um aumento da velocidade ou da redução da pressão estática a montante do constrangimento.

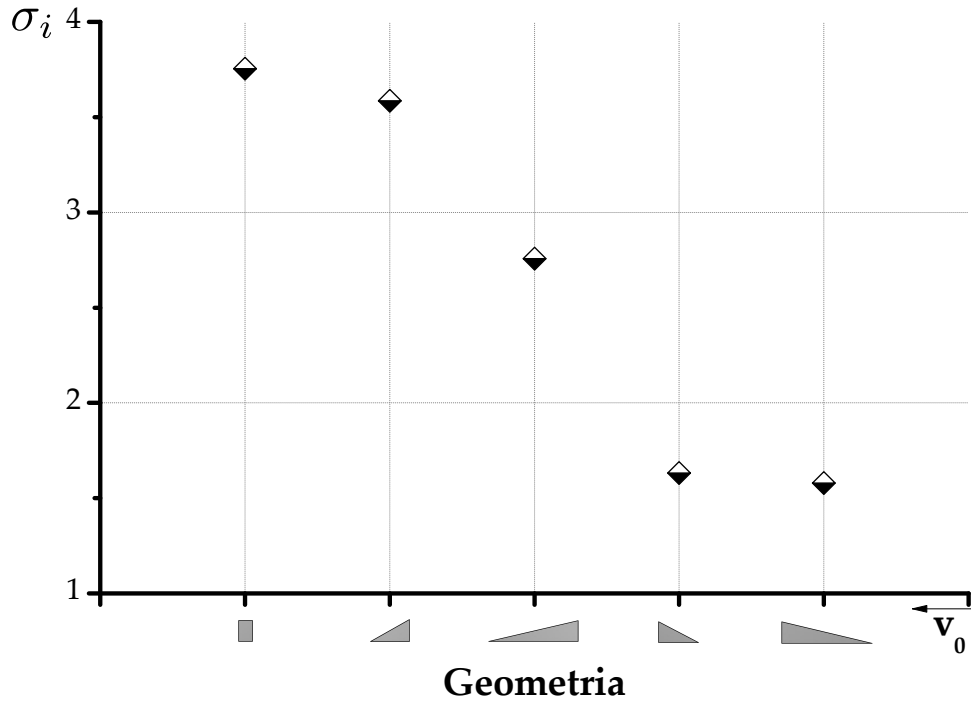


Figura 3.3: Número de cavitação incipiente para as diferentes geometrias analisadas.

A interpretação do gráfico da Figura 3.3 sugere que os constrangimentos com uma parede plana de frente para o escoamento, isto é, originando uma redução brusca da secção de passagem, como é o caso de \square , \triangleleft e \triangle , resultaram num maior número de cavitação incipiente comparativamente às geometrias que permitem uma redução mais gradual da secção de passagem com uma rampa, como é o caso de \triangleright e \triangleleft .

O parâmetro σ_i foi também influenciado pela inclinação da rampa, verificando-se um σ_i superior para a geometria com maior ângulo. Esta influência foi consideravelmente superior no caso dos triângulos cuja rampa se encontrava orientada para jusante, \triangleleft e \triangle , comparativamente às geometrias cuja rampa se direcionava para montante, \triangleright e \triangleleft , onde a influência do ângulo é marginal.

A geometria \triangleleft foi a que proporcionou a redução mais suave da área de passagem

ao escoamento, dando origem ao menor número de cavitação incipiente. Por seu turno, o ensaio com o constrangimento \square , onde tanto a redução como o posterior aumento da secção de passagem foram os mais repentinos, foi o que obteve o maior valor de σ_i .

A Figura 3.4 apresenta as estruturas fluídicas visualizadas em cada ensaio, para o regime mais desenvolvido do fenómeno, com a bomba a trabalhar à velocidade máxima. Esta exhibe a vista lateral da secção de ensaios, processando-se o escoamento da direita para a esquerda. Nestas imagens é possível observar a geração de cavitação através da formação de nuvens de bolhas de várias dimensões.

Da interpretação destas imagens é possível perceber melhor o efeito da redução de σ_i entre os constrangimentos \square , \triangleleft e \triangleleft (Fig. 3.4(a) a 3.4(c)), que reduzem abruptamente a secção de passagem do escoamento à entrada do constrangimento, e os constrangimentos \triangleright e \triangleright (Fig. 3.4(d) e 3.4(e)) que permitem uma redução mais suave. De facto, como σ_i é maior em \square , \triangleleft e \triangleleft , um aumento do caudal, que conduz à redução de σ , promove uma maior intensidade de cavitação nesses constrangimentos do que em \triangleright e \triangleright .

Estes resultados evidenciam a importância da escolha da geometria do constrangimento aquando do projeto de um cavitador, bem como, no caso dos triângulos, da orientação dos mesmos, dependendo se o objetivo é promover ou mitigar a intensidade da cavitação. No caso do tratamento de águas, em que o objectivo é promover a intensidade, os resultados apontam para a escolha de \square .

Em todos os ensaios foi possível constatar a presença de ruído e vibração, mais especificamente na zona das nuvens de cavitação, que se mostraram tão mais intensos quanto maior a intensidade do fenómeno.

3.2. Influência da distância entre dois constrangimentos

3.2.1. Variação da distância entre dois triângulos

Nesta secção apresentam-se os resultados dos ensaios realizados para configurações com dois constrangimentos iguais do tipo \triangleleft , com um ângulo de 30° , variando unicamente a distância entre eles.

O gráfico da Fig. 3.5 relaciona o número de cavitação incipiente, σ_i , com cada

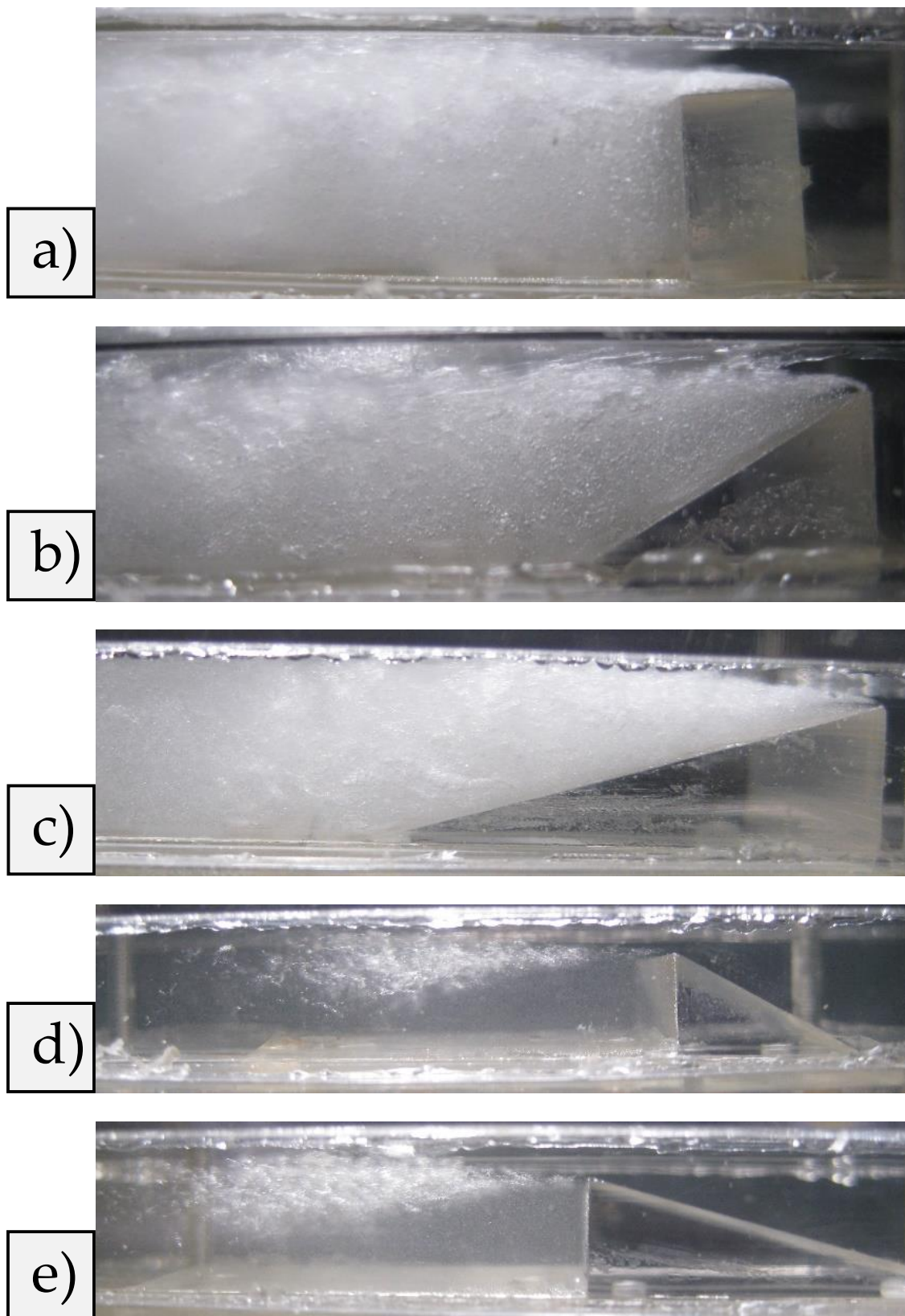


Figura 3.4: Estruturas fluídicas visualizadas nos ensaios com um constrangimento para várias geometrias.

distância normalizada pelo diâmetro hidráulico, d/D_h . A linha horizontal a tracejado localiza o valor de σ_i para o caso de um só constrangimento dessa mesma geometria. É necessário acrescentar que as grandezas medidas no decorrer destes ensaios dizem respeito aos constrangimentos onde a cavitação ocorreu primeiro, independentemente de ter sido no primeiro ou no segundo constrangimento.

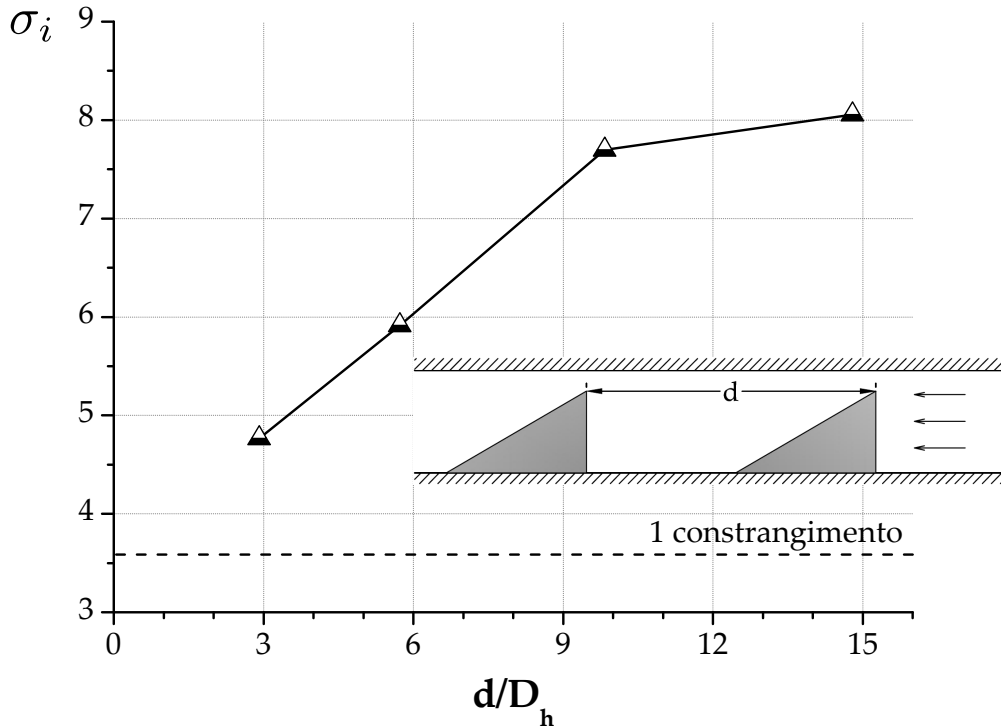


Figura 3.5: Número de cavitação incipiente para diferentes distâncias entre constrangimentos triangulares.

Em primeiro lugar, analisando o gráfico, verifica-se que a introdução de um novo constrangimento \triangleleft conduz ao aumento do número de cavitação incipiente.

Em segundo lugar, o aumento da distância entre os constrangimentos também conduz a um aumento aproximadamente linear deste parâmetro até $d/D_h \approx 10$, estabilizando a partir dessa distância, o que sugere que, a partir de $10D_h$ do constrangimento, o efeito que a distância exerce sobre a incipiência de cavitação mitiga substancialmente.

As imagens obtidas em cada um destes ensaios, para a situação de cavitação mais desenvolvida permitida pela instalação, são apresentadas na Figura 3.6 por ordem da distância menor para a distância maior.

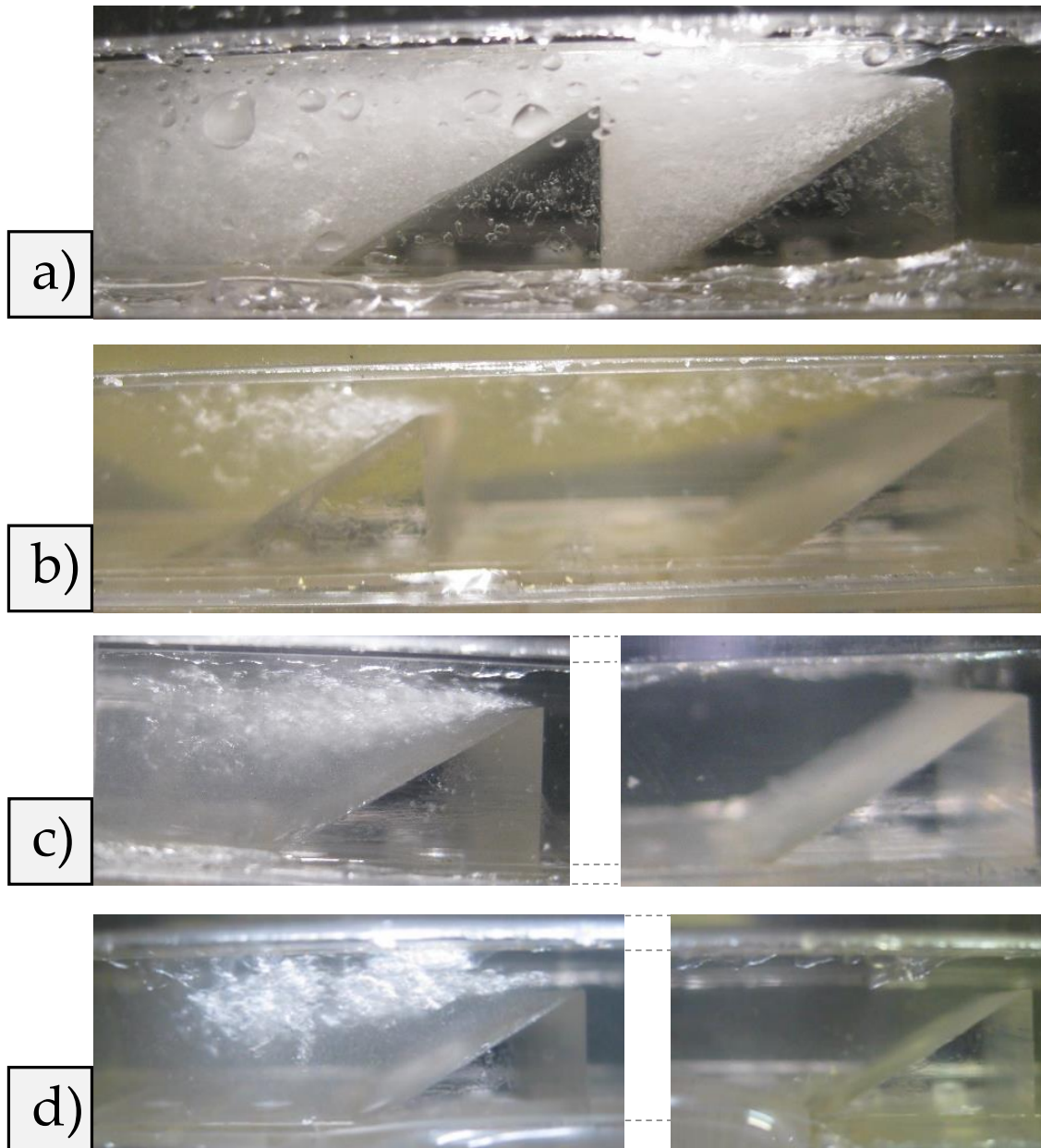


Figura 3.6: Estruturas fluídicas visualizadas nos ensaios para várias distâncias entre dois constrangimentos triangulares. d/D_h : a) 2.91, b) 5.73, c) 9.83 e d) 14.79.

Em termos fenomenológicos, a intensidade de cavitação observa-se como mais intensa no caso da menor distância entre constrangimentos (Fig. 3.6(a)). Para as restantes distâncias, a intensidade de cavitação é semelhante, mas diferem do caso da menor distância.

Com o aumento da distância entre constrangimentos, a intensidade de cavitação altera-se do primeiro para o segundo constrangimento. Assim, para uma distância de $\approx 3D_h$, a cavitação mostrou-se mais violenta no primeiro constrangimento, sendo

parcialmente atenuada pelo segundo constrangimento. Para $d \approx 5.7D_h$ (Fig. 3.6(b)), a nuvem de cavitação foi bastante mais densa no segundo constrangimento, apesar de mais longa no primeiro, e para $d \geq 10D_h$ (Fig. 3.6(c) e 3.6(d)), não se chegou sequer a formar cavitação no primeiro constrangimento.

O aumento de σ_i com a adição de um \triangleleft evidencia que no campo de pressões locais no constrangimento se criaram condições para o fluido cavitatar, numa situação em que tal não teria sido possível com apenas um \triangleleft . O facto de o primeiro constrangimento deixar gradualmente de cavitatar com o aumento da distância entre constrangimentos, indica que a influência exercida pelo segundo \triangleleft sobre o primeiro mitiga, ou seja, esse aproxima-se do caso do constrangimento isolado.

Sugere-se que o aparecimento de cavitação no segundo constrangimento se deva ao facto de a intensidade de turbulência do fluido aumentar significativamente após o primeiro constrangimento (Gogate & Pandit, 2005). Essa intensidade de turbulência afeta a componente flutuante do campo de pressões (Korkut & Atlar, 2002), o que induz a antecipação da ocorrência de cavitação.

3.2.2. Variação da distância entre dois retângulos

À semelhança da secção anterior, registaram-se os dados do número de cavitação incipiente para as configurações com dois constrangimentos iguais, desta vez do tipo \square . As distâncias d ensaiadas foram as mesmas das da secção anterior, cobrindo uma gama semelhante de d/D_h . Também nesta configuração, o valor medido para o número de cavitação incipiente corresponde à primeira ocorrência de formação de bolhas, independentemente de ser num dos constrangimentos, ou em ambos simultaneamente. O gráfico da Figura 3.7 traduz os resultados obtidos, incluindo, com uma linha a tracejado, o valor de σ_i para a configuração com apenas um constrangimento \square .

Ao contrário da configuração $\triangleleft \triangleleft$, com $\square \square$, a adição de um constrangimento diminuiu o número de cavitação incipiente para a condição de menor distância com o segundo constrangimento a $\approx 4D_h$. No entanto, para $d/D_h \geq 6$, σ_i atinge um máximo, decrescendo ligeiramente a partir daí, sugerindo uma tendência a estabilizar para distâncias maiores. A curva do gráfico sugere a existência de um valor ótimo da distância entre constrangimentos para a propensão do aparecimento de cavitação na gama $4 \leq d/D_h \leq 6$.

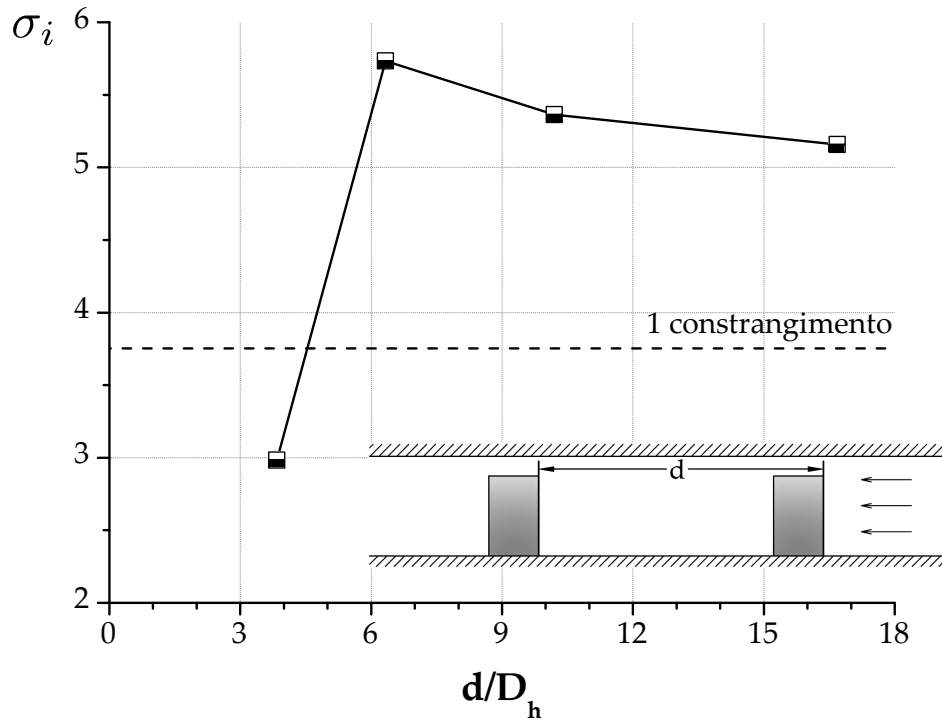


Figura 3.7: Número de cavitação incipiente para diferentes distâncias entre constrangimentos retangulares.

As imagens para este grupo de configurações, obtidas com a bomba na sua velocidade máxima, são apresentadas na Figura 3.8.

De todos os ensaios realizados, o fenómeno revelou-se mais intenso e ruidoso no ensaio da distância de $d/D_h \approx 4$ (Fig. 3.8(a)). Neste ensaio, a distância entre constrangimentos foi suficiente para que estes formassem uma cavidade retangular, à qual está tipicamente associada a produção de ondas acústicas (Tam & Block, 1978), mesmo que neste caso o escoamento estivesse constricto à altura do canal. As estruturas formadas na cavidade formada pelos constrangimentos evidenciaram a presença do vórtice esperado que concentra uma porção das bolhas formadas, para além da nuvem densa e longa formada no segundo constrangimento.

A distribuição do fenómeno pelos dois constrangimentos voltou a depender da distância de um modo semelhante ao ocorrido nos ensaios com $\triangleleft \triangleleft$. Enquanto que a cavitação foi mais intensa no primeiro constrangimento para a menor distância, para a distância $\approx 6D_h$ observou-se uma nuvem muito mais curta e menos densa sobre o primeiro constrangimento (Fig. 3.8(b)). Para $d/D_h \geq 10$ não foi observada qualquer formação de bolhas no primeiro constrangimento (Fig. 3.8(c) e 3.8(d)).

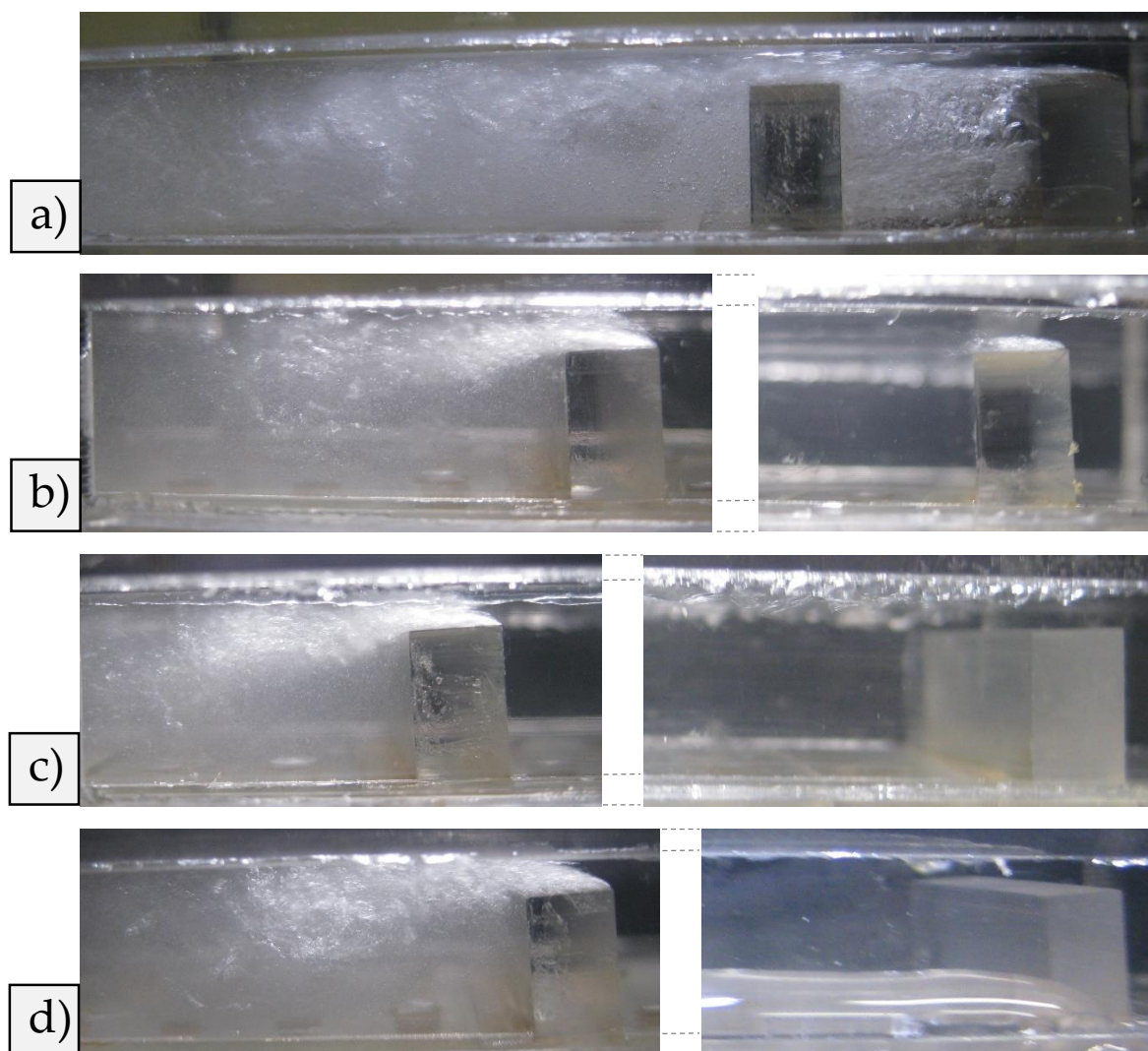


Figura 3.8: Estruturas fluídicas visualizadas nos ensaios para várias distâncias entre dois constrangimentos retangulares. d/D_h : a) 3.84, b) 6.33, c) 10.20 e d) 16.69.

Por fim, salienta-se que nestes quatro ensaios, constatou-se que a nuvem de bolhas no segundo \square foi tão mais denso quanto menor a distância entre constrangimentos, porém não tanto como os que foram observados nos ensaios com um só constrangimento.

Com exceção da menor distância considerada na configuração de dois constrangimentos, não é evidente qualquer variação na intensidade da cavitação com a distância entre este tipo de constrangimentos, seja no ruído, ou na densidade e comprimento das nuvens de cavitação formadas no segundo constrangimento.

4 Conclusões

A cavitação hidrodinâmica tem vindo a suscitar interesse por parte de investigadores como uma potencial técnica alternativa para o tratamento de águas. É através da criação de condições extremas de temperatura e pressão, bem como da produção de radicais livres que a cavitação permite eliminar certas substâncias e bactérias presentes na água. O que torna esta técnica uma alternativa promissora é a eficiência energética na remoção de poluentes e o facto de ser um processo não-químico, não constituindo assim uma agressão ao meio-ambiente.

O principal problema nesta tecnologia deve-se à dificuldade na sua aplicação ao nível industrial. A resolução desta questão passa por uma investigação fundamental mais aprofundada dos parâmetros geométricos e operacionais dos reatores de cavitação, a fim de otimizar a geração do fenómeno com a intensidade pretendida para estimular e/ou amplificar as reacções fisico-químicas necessárias à desinfecção das águas em larga escala.

Neste trabalho foi realizado um estudo da influência paramétrica da geometria e configuração geométrica dos constrangimentos possíveis no *design* de reatores de cavitação na incipiência de cavitação e comportamento das estruturas fluídicas formadas. Nos ensaios foram observadas formações fluido-dinâmicas inerentes ao fenómeno que consistiam em bolhas de diferentes tamanhos, constituindo nuvens de cavitação de diferentes formas.

Relativamente ao parâmetro de cavitação incipiente, relacionado com a propensão para criar cavitação, foram retiradas as seguintes conclusões:

- **A geometria do constrangimento influencia a incipiência de cavitação.**

Os constrangimentos responsáveis por variações mais abruptas na secção de passagem do escoamento contribuíram para uma maior facilidade na ocorrência de cavitação hidrodinâmica. De facto, de entre as configurações com apenas um constrangimento, a configuração com um retângulo, \square , foi a que possibilitou o aparecimento do fenómeno com maior número de cavitação incipiente, σ_i , e, para

as condições máximas de desenvolvimento de cavitação permitidas pela instalação experimental, foi com essa geometria que o fenômeno se revelou mais intenso.

- **O número de constrangimentos e a distância entre eles promove a incipiência de cavitação com maiores números de cavitação.** De um modo geral, a adição de um constrangimento facilitou a ocorrência de cavitação. Para além disto, a distância entre os dois constrangimentos fez variar também, se bem que não da mesma maneira, o parâmetro de cavitação incipiente. No caso da geometria triangular, \triangle , este parâmetro aumentou com a distância entre constrangimentos, enquanto que no caso da geometria retangular, \square , a variação não foi linear, observando-se a possibilidade de haver um valor máximo entre a primeira e segunda distâncias ensaiadas. Recorrendo às condições de maiores caudais fornecidos pela instalação, observou-se que a configuração afeta também a intensidade e a distribuição do fenômeno pelos dois constrangimentos, verificando-se que para maiores distâncias a cavitação só é detetada no segundo constrangimento. Sugere-se que tal se deva à gradual aproximação do primeiro constrangimento da situação em que está isolado, e ao incremento da intensidade de turbulência que influencia a incipiência de cavitação no segundo constrangimento.

Em suma, os resultados experimentais obtidos neste trabalho confirmam a existência da influência dos parâmetros geométricos no comportamento da cavitação, nomeadamente através da adição de constrangimentos, considerando-se que estes devem ser manipulados no sentido de otimizar a geração de cavitação mediante uma maior eficiência energética.

Sugestões de trabalhos futuros

A tarefa de otimização no projeto dos cavitadores baseados em canais semelhantes a esta secção de ensaios passaria por testar novas configurações de constrangimentos, nomeadamente pela adição de um terceiro ou quarto constrangimento, criação de novas geometrias, ou por uma combinação de ambos. No entanto, para outros reatores de cavitação, outros parâmetros geométricos, dependendo do tipo de reator, terão de ser considerados para se encontrar um *design* que, não só potencie eficazmente o desencadeamento do fenômeno com a intensidade pretendida, como também permita a

aplicação deste fenómeno à escala industrial. Assim, é fundamental que se prossiga com a investigação neste campo.

Sugere-se o projecto de uma nova secção de ensaios que permita avaliar outros parâmetros geométricos para serem incluídos em estudos futuros, nomeadamente através da colocação de constrangimentos em mais do que uma face da secção de ensaios, ou da variação controlada das dimensões das secções de passagem do fluido.

Para melhor estudar o comportamento e o movimento das estruturas formadas por cavitação, sugere-se que a obtenção de imagens seja realizada com recurso a uma câmara de alta velocidade.

Anexo A: Procedimento de mudança de configuração

Entre cada ensaio, a mudança da configuração dos constrangimentos implicou a execução de algumas tarefas seguidamente descritas.

A reconfiguração dos constrangimentos propriamente dita é feita mudando a posição e orientação dos constrangimentos na placa inferior da secção de acrílico.

Inicialmente, para evitar eventuais fugas de água entre as placas no decorrer dos ensaios, o segmento de acrílico é vedado com silicone, antes de ser montado e aparafusado (Fig. Anexo A: .1). É necessário que a quantidade de silicone seja suficiente para cobrir por completo todas as superfícies onde as placas contactam umas com as outras. Contudo é igualmente importante que esta não seja em demasia, para que não impossibilite a montagem das peças nem acrescente altura à secção de ensaios, e também para que o excesso de vedante não interfira no escoamento.

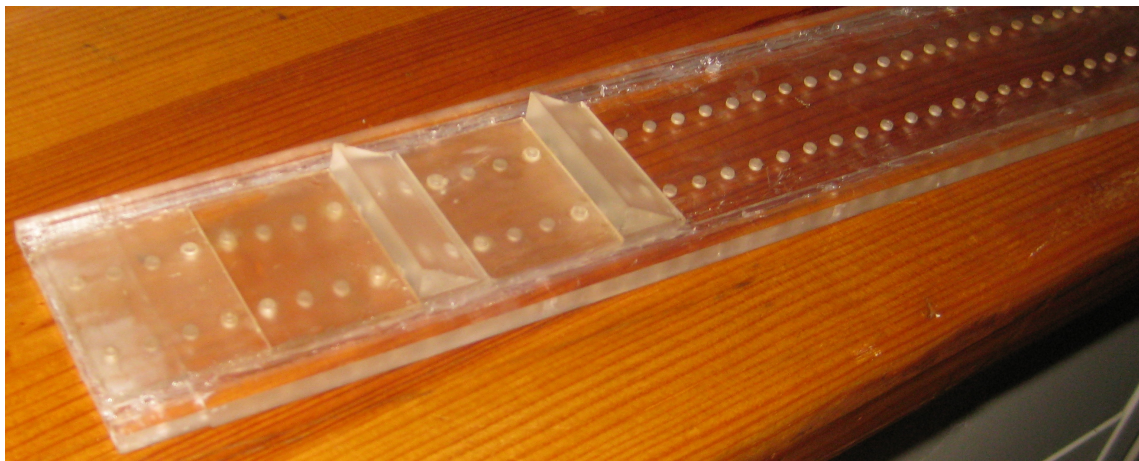


Figura Anexo A: .1: Aplicação de vedante na placa inferior do segmento de acrílico.

Seguidamente uma das peças em PVC, que liga a secção de ensaios à tubagem de retorno, depois de ser também devidamente vedada com silicone, é encaixada e aparafusada à extremidade de saída do canal em acrílico (Fig. Anexo A: .2).

A ligação da extremidade de entrada do canal de acrílico à peça de alumínio é, por

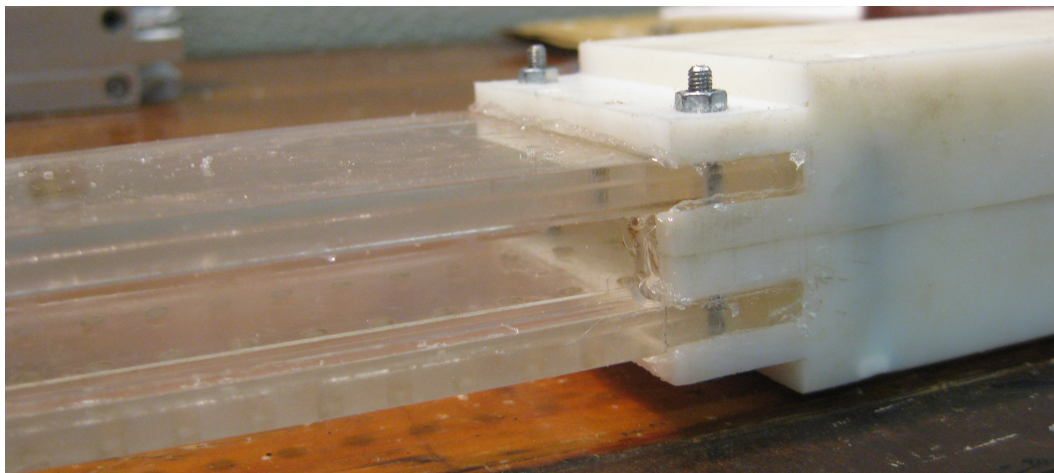


Figura Anexo A: .2: Fixação e vedação da peça em PVC ao segmento de acrílico.

sua vez, feita com cola e veda. De modo a garantir uma melhor fixação, a secção de ensaios é disposta na posição vertical, com o auxílio de um grampo de aperto, ficando a cola a secar em compressão devido à ação do peso da peça de alumínio durante pelo menos duas horas (Fig. Anexo A: .3).



Figura Anexo A: .3: Fixação e vedação da peça de alumínio ao segmento de acrílico.

Após a secagem, a secção de ensaios é por fim instalada no resto do circuito, ficando em condições de iniciar o ensaio.

Bibliografia

- Assis, Maiara P., Filho, José G. D., & Genovez, Ana I. B. 2009. EQUIPAMENTO TIPO JATO CAVITANTE PARA A DESINFECÇÃO DE ÁGUA. *Pages 1–15 of: XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, vol. 55.
- Brennen, Christoffer E. 2005. *Fundamentals of Multiphase Flow*. Vol. 2. Pasadena, California: Cambridge University Press.
- 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.
- Danlos, Amélie, Ravelet, Florent, Sarraf, Christophe, & Mehal, Jean-Hélie. 2012. Study of Passive Control Study of the Cavitation Instability on a Venturi Profile. *Pages 978–981 of: Proceedings of the 8th International Symposium on Cavitation*.
- Franc, Jean-Pierre, & Michel, Jean-Marie. 2005. *Fundamentals of Cavitation*. Grenoble Sciences.
- Fuzier, S., Coudert, S., & Coutier Delgosha, O. 2013. Two phase velocity measurements using LIF-PIV inside the cavitation sheet generated in a venturi. *Pages 1–4 of: 8th International Conference on Multiphase Flow ICMF 2013, Jeju, Korea, May 26 - 31*, vol. 8032.
- Gogate, Parag R. 2002. Cavitation: An auxiliary technique in wastewater treatment schemes. *Advances in Environmental Research*, **6**(3), 335–358.
- Gogate, Parag R., & Kabadi, Abhijeet M. 2009. A review of applications of cavitation

- in biochemical engineering/biotechnology. *Biochemical Engineering Journal*, **44**(1), 60–72.
- Gogate, Parag R., & Pandit, Aniruddha B. 2000. Engineering Design Methods for Cavitation Reactors II : Hydrodynamic Cavitation. *AIChE Journal*, **46**(8), 1641–1649.
- Gogate, Parag R., & Pandit, Aniruddha B. 2001. Hydrodynamic Cavitation Reactors: a State of the Art Review. *Reviews in Chemical Engineering*, **17**, 1–85.
- Gogate, Parag R., & Pandit, Aniruddha B. 2005. A review and assessment of hydrodynamic cavitation as a technology for the future. *Ultrasonics Sonochemistry*, **12**(1-2 SPEC. ISS.), 21–27.
- Gomes, Mário S. 2015. *Cavitação hidrodinâmica para tratamento de águas*.
- Jyoti, K. K., & Pandit, A. B. 2001. Water disinfection by acoustic and hydrodynamic cavitation. *Biochemical Engineering Journal*, **7**(3), 201–212.
- Korkut, E., & Atlar, M. 2002. On the importance of the effect of turbulence in cavitation inception tests of marine propellers. *Pages 29–48 of: Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 458.
- Lide, David R. 2005. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. Boca Raton, Florida: CRC Press.
- Ozonek, Janusz. 2012. *Application of Hydrodynamic Cavitation in Environmental Engineering*. CRC Press.
- Pandit, Aniruddha B., & Kumar, Jyoti K. 2013. *Drinking Water Disinfection Techniques*. Vol. 1. CRC Press.
- Petkovšek, Martin, Zupanc, Mojca, Dular, Matevž, Kosjek, Tina, Heath, Ester, Kompare, Boris, & Širok, Brane. 2013. Rotation generator of hydrodynamic cavitation for water treatment. *Separation and Purification Technology*, **118**, 415–423.
- Sampath Kumar, K., & Moholkar, Vijayanand S. 2007. Conceptual design of a novel hydrodynamic cavitation reactor. *Chemical Engineering Science*, **62**(10), 2698–2711.

Tam, Christopher K. W., & Block, Patricia J. W. 1978. On the tones and pressure oscillations induced by flow over rectangular cavities. *J. Fluid Mech.*, **89**, 373–399.

Tomás, Maria Teresa Dias Lopes Gomes. 1986. *Estudo do fenómeno da cavitação: implementação de técnicas experimentais*. Ph.D. thesis, Universidade do Porto.