



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Ricardo João Batista Mendes

LASER ÓPTICO FLUÍDICA:
DISPERSÃO DE LUZ NUMA SUPERFÍCIE LIVRE LÍQUIDA

VOLUME 1

Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado de Engenharia Mecânica no ramo de Energia e Ambiente orientada pelo Professor Doutor Miguel Rosa Oliveira Panão e apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica

Setembro de 2019

1 2



9 0

FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Laser Óptico Fluídica: Dispersão de Luz numa Superfície Livre Líquida.

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

Laser Optical Fluidics: interaction between light scattering and a free liquid surface.

Autor

Ricardo João Batista Mendes

Orientador

Professor Doutor Miguel Rosa Oliveira Panão

Júri

Presidente Professor Doutor José Manuel Baranda Moreira da Silva
Ribeiro
Professor da Universidade de Coimbra

Orientador Professor Doutor Miguel Rosa Oliveira Panão
Professor da Universidade de Coimbra

Vogais Professor Doutor Almerindo Domingues Ferreira
Professor da Universidade de Coimbra

Coimbra, Setembro, 2019

*"We do have a lot in common.
The same Earth, the same air, the same sky.
Maybe if we started looking at what's the same
instead of always looking at what's different,
...well, who knows?"
Norman J. Grossfeld*

Agradecimentos

Seria errado da minha parte colocar uma ordem qualitativa às pessoas a quem quero agradecer, por isso, a ordem será apenas uma questão temporal de quando as conheci.

Em primeiro lugar, agradecer a toda a minha família que sempre me apoiaram nos momentos em que mais precisava, mesmo quando não o sabia. Em particular á minha Mãe e Pai que tanto me forneceram e disponibilizaram ao longo dos anos

Quero agradecer a todos os meus amigos que fui conhecendo ao longo dos anos, pela amizade, carinho e paciência que tiveram comigo. Em particular, as pessoas que comigo tiveram na residência ao longo da minha vida universitária pela ajuda que deram a desenvolver-me como pessoa e ao meu grupo de amigos mais próximo que, apesar de ás vezes não o dizer, sempre adorei e com quem me posso abrir a 100%.

A todo o corpo docente e não docente, presente tanto pelas escolas como pelos departamentos da Universidade onde passei.

Por último, mas em nada inferior aos outro, muito pelo contrário, que a pesar de fazer parte do tópico anterior, seria errado da minha parte não despende um tópico só para ele. Um grande agradecimento ao Professor Doutor Miguel Rosa Oliveira Panão, não só por me ter aceite sobre a sua orientação, mas principalmente pela ajuda e disponibilidade que sempre teve comigo. Gostei bastante dos conhecimentos que me forneceu, tanto como professor, mas especialmente como orientador.

A todos um Grande e Sincero Obrigado!

Resumo

Sendo a área de análise dos fluídos uma área importante, faz sentido que haja cada vez mais evolução das técnicas para o seu estudo. Sendo a Conectividade Óptica uma técnica usada a alguns anos, faria sentido que mais tarde ou mais cedo, apareça-se uma técnica superior e derivada desta. É aí que entra a técnica laser, Laser Óptico-Fluídica, a qual apesar de ainda estar em desenvolvimento, já demonstra resultados promissores.

A criação de técnicas não intrusivas são cada vez mais um pré-requisito para resultados mais exatos e precisos. Sendo LOF uma técnica que recorre apenas á utilização de um feixe de luz laser, é uma técnica não intrusiva. Esta técnica sendo tão ressentida, é necessário perceber até que ponto poderá ser ou não útil e em que situações.

A maneira mais simples de levar a técnica ao seu limite envolve a modificação das suas variáveis, uma de cada vez, e comparar os vários resultados obtidos. Dado que este não é o primeiro estudo feito com LOF, ajuda que já exista uma base com a qual podemos comparar resultados, e, neste caso, não propriamente avaliar qual é melhor, mas sim, para que situações uma opção ou outra é mais adequada. A técnica recorre a um laser para iluminação pelo interior do jacto, que, interagindo com a superfície dinâmica do fluído criará pontos de brilho que permite avaliar o comportamento dessa superfície. Esses pontos de brilho serão então captados por uma câmara de alta definição que permite a análise das imagens.

Após análise de resultados, obtivemos a presença de interferometria na superfície dinâmica do fluído. Normalmente para a obtenção de interferometria é necessário a utilização de pelo menos dois lasers colocados exteriormente ao jacto, com o intuito de sobrepor os feixes de luz dos lasers, criando assim a interferometria. Em relação á comparação dos valores obtidos com os retirados anteriormente, foram esclarecidas dúvidas em relação aos pontos brilhantes dentro do fluído, bem como uma melhor compreensão dos pontos brilhantes á superfície.

Ainda assim, este não é o limite do estudo da técnica. Ainda perguntas ficam por responder, como a possível polarização da luz laser, que resultados poderia trazer, e o estudo de gotas.

Palavras Chave: Feixe de luz laser, Interferometria, Jacto de líquido vertical, Interação Laser com superfície Dinâmica

Abstract

The analysis of the Fluid Mechanics being one really important field of study, it make sense that there would be an increasing evolution of techniques for its study. Since Optical Connectivity is a technique used for a few years now, it normal that sooner or later, a superior technique would appear or derive from it. This is where this laser technique comes in. Although it is still under development, it already shows promising results.

Creating non-intrusive techniques is increasingly a prerequisite for more accurate results. Since LOF is a technique that requires only the use of a laser light, it is a non-intrusive technique. This technique being so resentful, is necessary to understand to what extent the technique may or may not be useful and in what situations.

The simplest way to push the technique to its limits involves modify several variables, one at a time, and comparing the various results obtained. Since this is not the first study done with LOF, it helps that there is already a quality basis for comparing results. Assessing which one is better is not the objective, but for what situations one option would be more suitable. This technique uses a laser to illuminate the inside of the liquid jet, which, interacting with the dynamic surface will create brightness points that allow us to evaluate the behavior of the surface. These brightness points will then be captured by a high definition camera that allows the analysis of the images.

After analysing the results, we obtained the presence of interferometry in the dynamic surface of the fluid. Normally to obtain it is necessary to use at least two lasers placed outside the jet, in order to overlap the light beams of the lasers, thus creating interferometry. Regarding the comparison of the values obtained with those previously results, doubts were clarified regarding the bright points within the fluid, as well as a better understanding of the bright points on the surface.

Still, this is not the limit of this technique's study. Questions remain to be answered, such as what results could be obtained with the polarization of laser light and where can LOF be used within the study of the fluid drops.

Keywords: laser beam light, interferometry, vertical liquid jet, Laser interaction with dynamic surfaces

Conteúdo

Lista de Figuras	v
Lista de Tabelas	vii
Nomenclatura	ix
1 Introdução	1
1.1 Princípio físico da Laser Óptico-Fluídica	2
1.2 Propagação da luz laser e fenómenos de interferometria	3
1.3 Funcionamento da fibra-óptica	6
1.4 Jacto de líquido livre vertical como estrutura fluídica	7
2 Desenvolvimento da Técnica	
Laser Óptico-Fluídica	11
3 Método Experimental	15
3.1 Instalação laboratorial	15
3.2 Procedimento Experimental	19
3.3 Sistema de visualização	21
4 Resultados e Discussão	23
4.1 Caracterização do jacto	23
4.2 Comparação de Água Destilada com Água da Rede	25
4.3 Posição da Câmara	26
4.3.1 Inclinação da câmara vs Iluminação	27
4.3.2 Tridimensionalidade do líquido com ângulo de Câmara	28
4.4 Significado prático dos resultados obtidos	30

5	Notas conclusivas e trabalho futuro	33
	Bibliografia	35

Lista de Figuras

Figura 1.1	Visão geral das técnicas laser [Modificado de (Albrecht <i>et al.</i> , 2013)]	1
Figura 1.2	Intensidade transversal de um laser com perfil gaussiano captado por uma camara CCD [Retirado de (Doan <i>et al.</i> , 2013)]	4
Figura 1.3	Dispersão de Rayleigh [Adaptado de (Nave, 2000)].	4
Figura 1.4	Padrão de dispersão de Mie em: a)pequenas particulas e b)particulas de maior dimençãõ [Adaptado de (Nave, 2000)].	5
Figura 1.5	Padrão de interferência no volume de controlo em anemometria laser [Retirado de (Albrecht <i>et al.</i> , 2013)].	5
Figura 1.6	Refracção entre dois meios diferentes	6
Figura 1.7	Influência da variação do ângulo de incidência nos modos de dispersão da luz.	7
Figura 2.1	Distribuição radial da intensidade luminosa para (a) ($d_b/d_j < 1$) e (b) ($d_b/d_j > 1$) [Retirado de (Nunes, 2019)].	11
Figura 2.2	Jacto vertical às condições de ensaio $TA = 6000$ e $TE =$: (a) 150; (b) 100; (c) 50. [Retirado de (Nunes, 2019)].	12
Figura 2.3	Exemplo de a) Pontos brilhantes, e b) Traços de brilho; nas Condições $TA = 4000$ e $TE = 150$ [Retirado de (Nunes, 2019)].	13
Figura 2.4	Interpretação de F.Nunes. [Retirado de (Nunes, 2019)].	13
Figura 3.1	Instalação Laboratorial.	15
Figura 3.2	Prisma usado na instalação.	16
Figura 3.3	suporte para o prisma.	16
Figura 3.4	a) Tubo usado na instalação; b) Peça utilizada em ensaios anteriores.	17

Figura 3.5	Ponte de acrilico.	18
Figura 3.6	Sistema de Enchimento.	18
Figura 3.7	Zona do laser.	19
Figura 3.8	Tank do modelo experimental.	20
Figura 3.9	Camara de Alta definição PCC.	21
Figura 3.10	PCC software.	21
Figura 4.1	Comparação entre imagem retirada da dissertação de Francisco Nunes (a) com resultado obtido nesta dissertação (b).	26
Figura 4.2	Representação da área de focagem com o ângulo de Câmara . . .	27
Figura 4.3	Comparação luminosa entre filmagens obtidas com uma taxa de aquisição de 8400pps, tempo de exposição de $10\mu s$ e inclinação da câmara a 10° , 20° e 30°	28
Figura 4.4	Interferometria presente em ensaios obtidas com uma taxa de aquisição de 8400pps, tempo de exposição de $10\mu s$ e inclinação da câmara a : a) 10° ; b) 20° ; e c) 30°	29
Figura 4.5	Representação 2D do jacto vertical e da secção transversal . . .	29
Figura 4.6	Exemplo de zona luminosa com inclinação de Camara de 30° . .	30
Figura 4.7	Visão geral de técnicas de medição laser para fluxos monofásicos e multifásicos	31

Lista de Tabelas

Tabela 3.1	Condições de Todos os Ensaio Realizados	22
Tabela 4.1	Condições de ensaio da Figura 4.1	25

Nomenclatura

A	Área	m^2
a	Aceleração	m/s^2
A_{mp}	Âmplitude das instabilidades	m^2
B	Indução Magnética	T
c	Velocidade da luz	m/s
d	Componente de tamanho	m
$d_f; d_b$	Diâmetro do feixe laser	m
d_j	Diâmetro do jacto	m
E	Intensidade de Campo Electrico	N/C
f	frequência	s^{-1}
f_c	Forças de Campo	N
F_g	Forças da Gravidade	N
F_i	Forças de Inercia	N
f_s	Forças de superfície	N
F_v	Forças de Viscosidade	N
g	Aceleração gravítica	m/s^2

h_0	raio de jacto líquido	m
J	Densidade de Corrente	A/m^2
L	Comprimento	m
n	Índice de Refração	
$O(X)$	Ordem de Grandeza da Variável X	
Q	Caudal	m^3/s
t	tempo	s
TA	Taxa de Aquisição	fps
TE	Tempo de Exposição	μs
u_0	Velocidade capilar	m/s
V	Volume	m^3
v	Velocidade	m/s
v_0	Velocidade do jacto líquido	m/s
v_{ag}	Velocidade da agulha de líquido	m/s
u,v,w	Componentes de Velocidade no Espaço	m/s
x,y,z	Componentes dimensionais no Espaço	m

Números Adimensionais

Fr	Número de Froude
Oh	Número de Ohnesorge
Re	Número de Reynolds
We	Número de Weber

Símbolos Gregos

γ	Tensão superficial	N
λ	comprimento de onda	m
μ	Viscosidade dinâmica	$kg/m.s$
μ_0	Permitividade Magnética no Vazio	$T.m/A$
ρ	Massa específica ou Densidade	kg/m^3
θ_1	Ângulo de Incidência	$^\circ$
θ_2	Ângulo de Refracção ou Reflexão	$^\circ$
ε_0	Permitividade Electrica no Vazio	F/m

Siglas

CCD Charge-Coupled Device

CMOS Complementary Metal-Oxide Semiconductor

DGV Doppler Global Velocimetry

FRS Filtered Rayleigh Scattering

GPD Global Phase Doppler

IPI Interferometric Particle Imaging

LDV Laser Doppler Velocimetry

LFT Laser Flow Tagging

LIF Laser Induced Fluorescence

LOF Laser Óptico-Fluídica

LTV Laser Transit Velocimetry

PCC Phantom Camera Control

PD Phase Doppler

PDV Planar Doppler Velocimetry

PIV Particle image Velocimetry

PTV Particle Tracking Velocimetry

1 Introdução

As técnicas de diagnóstico para a caracterização de escoamentos podem ser intrusivas ou não, mediante o tipo de instrumentos usados. Exemplos de técnicas de diagnóstico intrusivas seriam o uso de um tubo de pitot, ou um anemómetro de fio quente, ambos com o objectivo de medir a velocidade de um escoamento num ponto. No primeiro caso através de uma diferença de pressão, e no segundo caso através da contabilização da perda térmica num fio aquecido por uma corrente eléctrica. As técnicas que recorrem à luz laser não são intrusivas e daí a sua vantagem ao estudo da mecânica de fluidos. A figura abaixo adaptada de Albrecht *et al.* (2013) contém uma visão global das técnicas laser mais usadas em investigação fundamental e aplicada, bem como na indústria. É de salientar que se consideram as quatro dimensões (três espaciais - x , y , z - e uma temporal, t) e dois parâmetros principais associados à dinâmica dos escoamentos monofásicos e multifásicos (velocidade com três componentes - u , v , w - e tamanho, d , *e.g.* diâmetro de uma gota ou espessura de um filme de líquido).

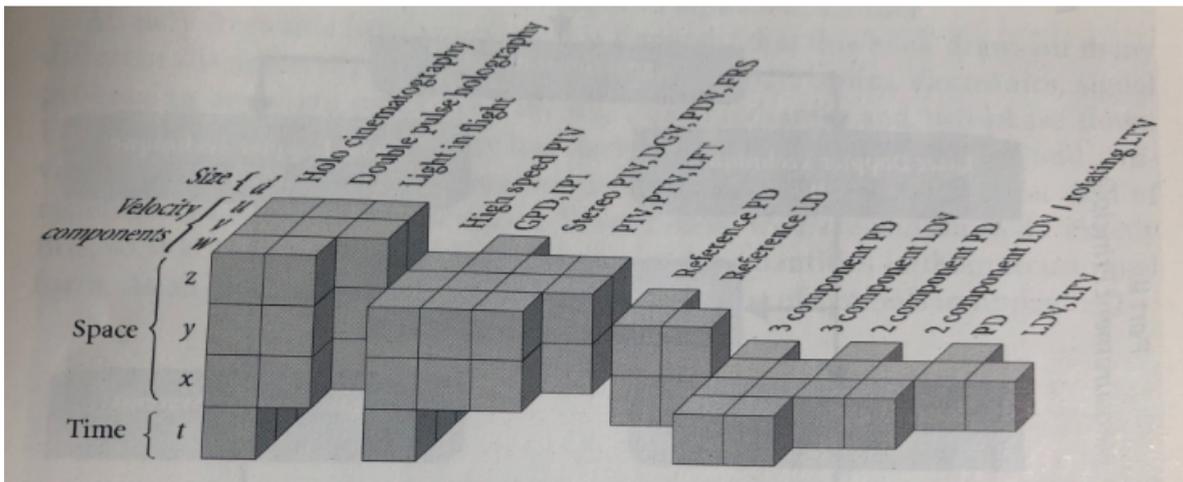


Figura 1.1: Visão geral das técnicas laser [Modificado de (Albrecht *et al.* , 2013)]

No caso da técnica abordada nesta dissertação, a Laser Óptico-Fluídica (LOF), o seu enquadramento neste gráfico é um dos objectivos a explorar através do estudo da

interacção entre a propagação do feixe laser na estrutura fluídica e o comportamento dinâmico da superfície livre formado pela interface entre os dois meios físicos (líquido e gasoso).

1.1. Princípio físico da Laser Óptico-Fluídica

A técnica Laser Óptico-Fluídica (LOF) assenta no princípio da conectividade óptica associada à propagação da luz laser pelas estruturas fluídicas, semelhante ao demonstrado por Colladon no século XIX e que deu origem à fibra óptica. Quando um feixe de luz laser é introduzido, directamente, no interior de uma estrutura fluídica, evita-se a atenuação causada pela sua introdução a partir do exterior.

Esta técnica foi aplicada por Charalampous *et al.* (2009) para caracterizar o comprimento de um jacto líquido associado à formação de um spray. A partir do momento em que se formam gotas, na prática, o meio interrompe a propagação da luz laser, permitindo quantificar com maior rigor o comprimento do jacto, ofuscado pela presença de gotículas em outras técnicas como *Shadowgrafia*. Uma particularidade da técnica de conectividade óptica consiste na presença de partículas que fluorescem num determinado comprimento de onda quando nessas incide a luz laser. Daí que seja uma técnica enquadrada na mesma categoria que a Fluorescência Induzida por Laser (LIF). Embora a LOF assente no princípio da conectividade óptica, a essência da técnica está na interacção entre a luz laser propagada no interior da estrutura fluídica e a superfície livre da mesma, cujo comportamento é dinâmico. Assim, a técnica depende da distribuição espacial da intensidade da luz laser propagada (secção 1.2), do efeito da reflexão total interna do feixe que deu origem à fibra óptica e à possibilidade de ocorrência de fenómenos interferométricos no interior da estrutura fluídica que possam ser transmitidos para o exterior da mesma, mediante a sua curvatura (secção 1.3). Pelo facto de ser usado um jacto de líquido vertical nas experiências realizadas, a secção 1.4 faz uma revisão sucinta do conhecimento reportado na literatura em relação a esta estrutura fluídica.

Além da presente introdução, o Capítulo 2 dedica-se ao percurso realizado no desenvolvimento da técnica LOF. Depois, no Capítulo 3 descreve-se a instalação experimental e as características dos ensaios realizados. A síntese dos resultados obtidos, e respectiva discussão, compõe o Capítulo 4. Por fim, sugere-se algumas conclusões no

Capítulo 5 e sugestões para trabalho futuro.

1.2. Propagação da luz laser e fenómenos de interferometria

Um feixe de luz laser corresponde a uma onda eletromagnética caracterizada por um comprimento de onda e potência, usualmente na gama do visível no que diz respeito à sua aplicação em técnicas de diagnóstico.

As ondas eletromagnéticas são descritas pelas equações estabelecidas por James Clerk Maxwell para os campos eléctrico e magnético (Domb, 2019).

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad (1.1)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (1.2)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (1.3)$$

$$\nabla \times B = \mu_0 \left(J + \frac{\varepsilon_0 \partial E}{\partial t} \right) \quad (1.4)$$

Nas quais, E representa a intensidade do campo eléctrico, B a indução magnética, ε_0 e μ_0 representam as constantes da permitividade eléctrica no vazio e a permeabilidade no vazio, respetivamente. A variável t corresponde ao tempo, J à densidade da corrente e ρ à densidade de carga. Estas equações representam os quatro vectores que caracterizam um campo eletromagnético. Das equações de Maxwell se entende como um campo eletromagnético propagaria a uma dada velocidade, que poderia ser calculada usando medições eléctricas (Kerker, 2013).

Um feixe de luz laser possui a característica de ter uma distribuição de intensidade luminosa, ou perfil, gaussiana (Doan *et al.*, 2013). Um perfil gaussiano implica que a maior intensidade encontra-se no centro do feixe e, à medida que se afasta do centro, este perde intensidade até à periferia. Tal pode ser representado na figura 1.2.

A dispersão de luz a partir de estruturas fluídicas ocorre através de dois modos ópticos, reflexão e refração, e a intensidade luminosa dispersa não é difusa, ou seja, depende do ângulo de colecção da luz dispersa e do tamanho da estrutura fluídica. Se a luz interagir com moléculas de fluido cuja escala de comprimento corresponde

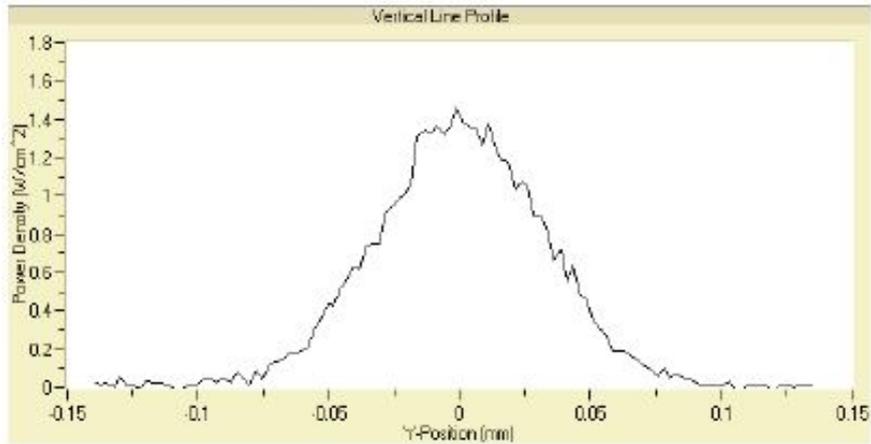


Figura 1.2: Intensidade transversal de um laser com perfil gaussiano captado por uma camera CCD [Retirado de (Doan *et al.* , 2013)]

a menos de um décimo do comprimento de onda, como é o caso das moléculas do ar, a dispersão será denominada por *Rayleigh* (Fig. 1.3). No caso de partículas com tamanhos maiores, o padrão de dispersão obtém-se através das soluções de Mie para as equações de Maxwell (Fig.1.4).

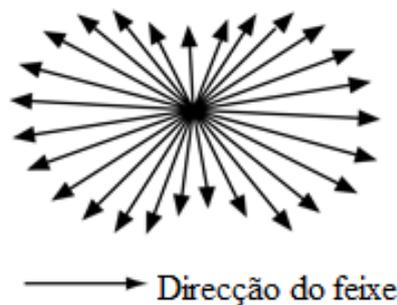


Figura 1.3: Dispersão de Rayleigh [Adaptado de (Nave, 2000)].

No caso de técnicas como a anemometria laser, em que o cruzamento de dois feixes de luz laser produz um padrão de interferência, como o que está representado na figura 1.5.

A interferometria laser é o resultado destes padrões de interferência e consiste numa sobreposição de duas ou mais ondas electromagnéticas, criando um padrão de zonas brancas e zonas escuras.

As zonas brancas formam-se pela sobreposição de picos de máxima intensidade luminosa. Já as bandas escuras representam a sobreposição dos picos de mínima in-

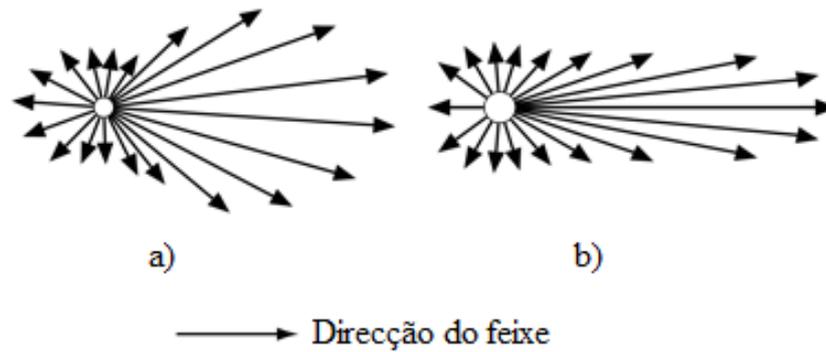


Figura 1.4: Padrão de dispersão de Mie em: a)pequenas partículas e b)partículas de maior dimensão [Adaptado de (Nave, 2000)].

tensidade luminosa.

Quando gotas esféricas produzem um padrão de interferência, com zonas brancas e escuras, este traduz-se num sinal Doppler cuja frequência é proporcional à velocidade. Se o sistema possuir mais do que um fotomultiplicador que adquiere o sinal Doppler em diversas posições angulares, a diferença de fase entre os sinais será proporcional ao diâmetro, dando origem à técnica de anemometria de fase Doppler, uma extensão da primeira.

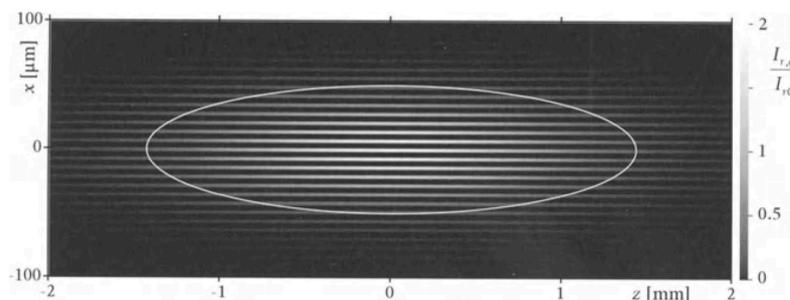


Figura 1.5: Padrão de interferência no volume de controlo em anemometria laser [Retirado de (Albrecht *et al.* , 2013)].

Porém, nas técnicas de anemometria laser e outras, a interferometria é o resultado da configuração pré-estabelecida, ou seja, não provém da interacção entre o feixe propagado no interior de uma estrutura fluídica e a sua superfície livre, como seria o caso da LOF.

Apesar de não existirem dois ou mais feixes laser, formula-se a hipótese que as reflexões internas no interior da estrutura fluídica possam sobrepor-se ao ponto de

gerar fenómenos interferométricos. Nomeadamente, uma das questões levantadas num estudo introdutório a esta técnica refere-se a tracejados de luz presentes no interior de um jacto vertical e na horizontal. Uma das causas possíveis foi atribuída à interferometria laser (Nunes, 2019). Algo a explorar na presente dissertação.

1.3. Funcionamento da fibra-óptica

A reflexão total interna nas experiências de Daniel Colladon é uma das características principais da Laser-Óptico Fluídica. Por outro lado, quando a luz interage com uma superfície livre, ocorrem fenómenos de reflexão e refração. Isto deve-se à diferença de densidade entre os meios onde a luz se propaga.

Um astrónomo Holandês Willebrord Snell desenvolveu uma Lei para a refração que depende de um índice com o mesmo nome. O índice de refração consiste na relação entre a velocidade da luz no vázio (c) e a velocidade da luz no meio onde se propaga (v).

$$n = \frac{c}{v} \tag{1.5}$$

Daí que ao passar de um meio para outro diferente, este índice seja alterado.

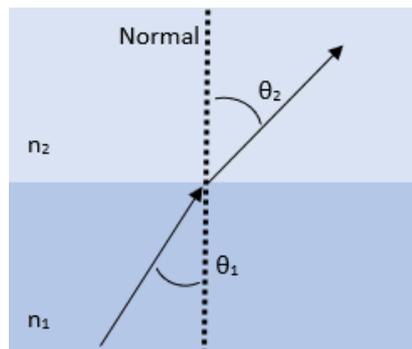


Figura 1.6: Refracção entre dois meios diferentes

A Lei de Snell para a refração relaciona os ângulos de incidência θ_1 e de refração θ_2 , em relação à normal do plano tangente à superfície livre, com os respetivos índices de refração (Ryer & Light, 1997). Tal pode ser representado pela equação (1.7):

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \tag{1.6}$$

Uma das relações mais interessantes é o facto de que, partindo de valores já conhecidos de índice de refração, existe um ângulo θ_1 para o qual, pela equação (1.7), corresponde um ângulo $\theta_2 = 90^\circ$, denominado por ângulo crítico θ_c . Para ângulos superiores ao ângulo crítico, deixa de ocorrer refração, ocorrendo apenas reflexão total (Ryer & Light, 1997).

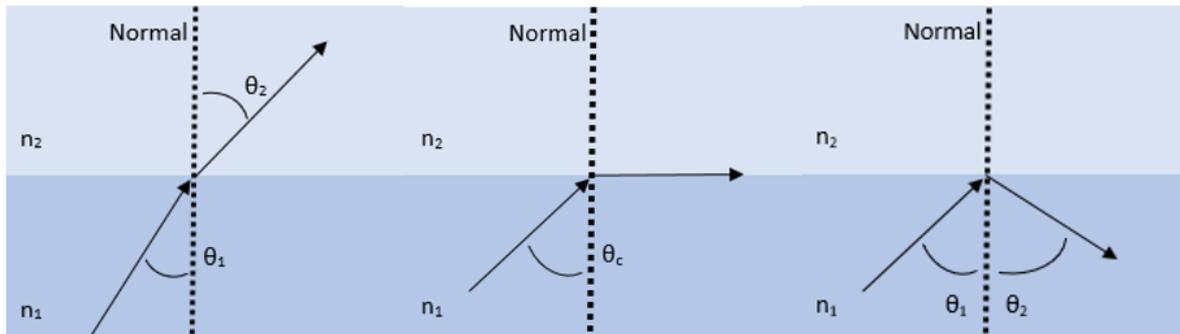


Figura 1.7: Influência da variação do ângulo de incidência nos modos de dispersão da luz.

No caso da fibra óptica, a luz é inserida na fibra de modo a que o ângulo de incidência da luz seja sempre superior ao ângulo crítico. Assim, existem reflexões totais sucessivas que propagarão a luz pela fibra, sem que existam perdas significativas de intensidade luminosa para o exterior da fibra. A técnica LOF usa da reflexão total interna para iluminar a estrutura fluídica até que haja desintegração da mesma noutras estruturas, como ligamentos ou gotas.

1.4. Jacto de líquido livre vertical como estrutura fluídica

A última secção desta introdução, dedica-se à revisão dos principais parâmetros associados às estruturas fluídicas, não só do ponto de vista da sua caracterização, como da interacção que pode ocorrer entre a superfície livre líquida e o feixe de luz.

Define-se jacto vertical todo o fluxo de fluído com forma aproximada de um cilindro vertical. Possuem, por norma, uma zona relativamente estável onde se incorporará pequenas perturbações que iram causar instabilidades ao longo da coluna de fluído.

Quando estas instabilidade aumentam, estas tendem a provocar o rompimento do jacto, formando uma zona de fragmentação, que pode ser visível sobre a forma de gotas ou spray.

O jacto dinâmico permite a avaliação de grandezas físicas como a densidade do fluido em relação ao meio ambiente, as tensões superficiais do líquido ou a viscosidade do fluido.

Partindo agora para a caracterização do jacto, desprezando a influência do factor atmosférico, assumimos assim que a ponta agulheta do fluido pode assumir um movimento vertical oscilatório (Eggers & Villermaux, 2008) de velocidade:

$$v_{ag} = v_0 + A_{mp} \left(\frac{\gamma}{\rho h_0} \right)^{1/2} \cdot \sin(2\pi ft) \quad (1.7)$$

onde podemos assumir que existe uma amplitude das instabilidades A_{mp} em produto com a velocidade capilar $u_o = (\gamma/\rho h_0)^{1/2}$, ao qual é associado um ajuste com a frequência de condução f associada a um comprimento de onda de $\lambda = v_0/f$. (Eggers & Villermaux, 2008)

O decaimento do jacto é essencialmente medido por quatro factores: a amplitude das instabilidades A_{mp} ; pelo número de ondas x , que quando o número de ondas de "Rayleigh", provoca ressonância que aumenta a instabilidade; pelo número adimensional Weber (W_e) que relaciona a energia cinética de uma gota com a energia superficial do jacto; e, por último, o número adimensional de Ohnesorge (Oh) que relaciona as forças da viscosidade com as forças de inercia e as tensões superficiais. (Eggers & Villermaux, 2008)

Estes quatro factores serão assim por defeito as razões pelas deformações presentes no fluido com o qual o feixe laser irá interferir provocando pontos brilhantes.

Este facto é importante, pois explica a existência de perturbações no jacto vertical, pois concluimos que, sendo a água aproximadamente um fluido newtoniano, tensões superficiais causaram deformações ao longo da superfície.

O mesmo acontece no jacto horizontal, mas não explica a curvatura por este atingida. Esta deve-se à força de campo (essencialmente devido à força gravítica), que neste caso são perpendiculares ao escoamento.

Ainda em analogia ao jacto, sendo este um fluido, existem mais dois números adimensionais que convém serem referidos: O número de Reynolds e o número de Froude.

Ambos não são propriamente usados na caracterização do jacto, mas são referentes à caracterização de um fluido.

Com o cálculo do número de Reynolds, poderemos avaliar em que regime, laminar

ou turbulento, se encontram as filmagens, permitindo assim que em trabalhos futuros possa haver uma coerência na comparação de resultados.

O número de Reynolds consiste no quociente entre a força de inércia e a força de viscosidade, que se traduz na equação 1.8.

$$Re = \frac{Fi}{Fv} = \frac{\rho v L}{\mu} \quad (1.8)$$

O Número de Froude consiste no quociente entre a força de inércia e a força da gravidade, pela equação (1.9), presentes no fluido, de modo a qualificar o fluido quanto á sua velocidade.

$$Fr = \sqrt{\frac{Fi}{Fg}} = \frac{v}{\sqrt{gL}} \quad (1.9)$$

Este poderá então ser importante no estudo de áreas como o impacto de gotas, onde será requerido a existência de um jacto rápido de modo que haja ressaltos das gotas em teste.

2 Desenvolvimento da Técnica Laser Óptico-Fluídica

Como foi referido na Secção 1.1, a técnica LOF parte de técnicas como a Conectividade Óptica, devido ao seu funcionamento em quanto técnica.

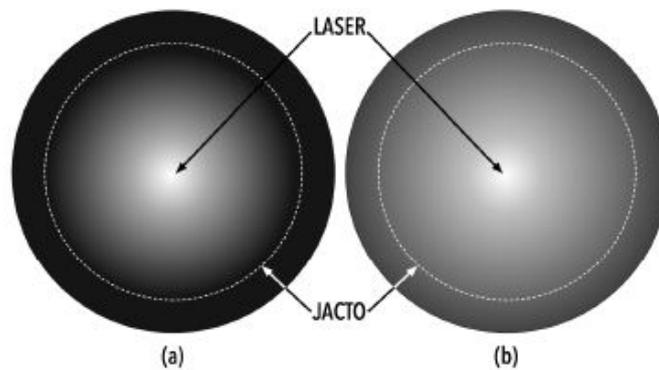


Figura 2.1: Distribuição radial da intensidade luminosa para (a) ($d_b/d_j < 1$) e (b) ($d_b/d_j > 1$) [Retirado de (Nunes, 2019)].

Enquanto técnica, LOF parte do uso de um laser onde a distribuição do feixe de luz é de perfil gaussiano (Secção (Eggers & Villermaux, 2008)), em resultados anteriores foi chegado ao objectivo de que o diâmetro do jacto vertical(d_f) deveria ser inferior ao diâmetro do feixe laser(d_j). Este aspecto é importante para a técnica LOF, pois, de acordo com Nunes (2019), de modo a maximizar a intensidade de luz a propagada pelo interior do jacto, como está ilustrado na figura 2.1.

Outro resultado anteriormente obtido foi a luminosidade de micro bolhas presentes no fluído. Estas funcionavam como particulas refletoras, iluminando assim o interior do fluído.

As micro bolhas podem ainda ser conjugadas a alteração do tempo de exposição com o intuito de iluminar mais ou menos o fluído, como pode ser verificado nas imagens retiradas de ensaios anteriores. (Nunes, 2019)

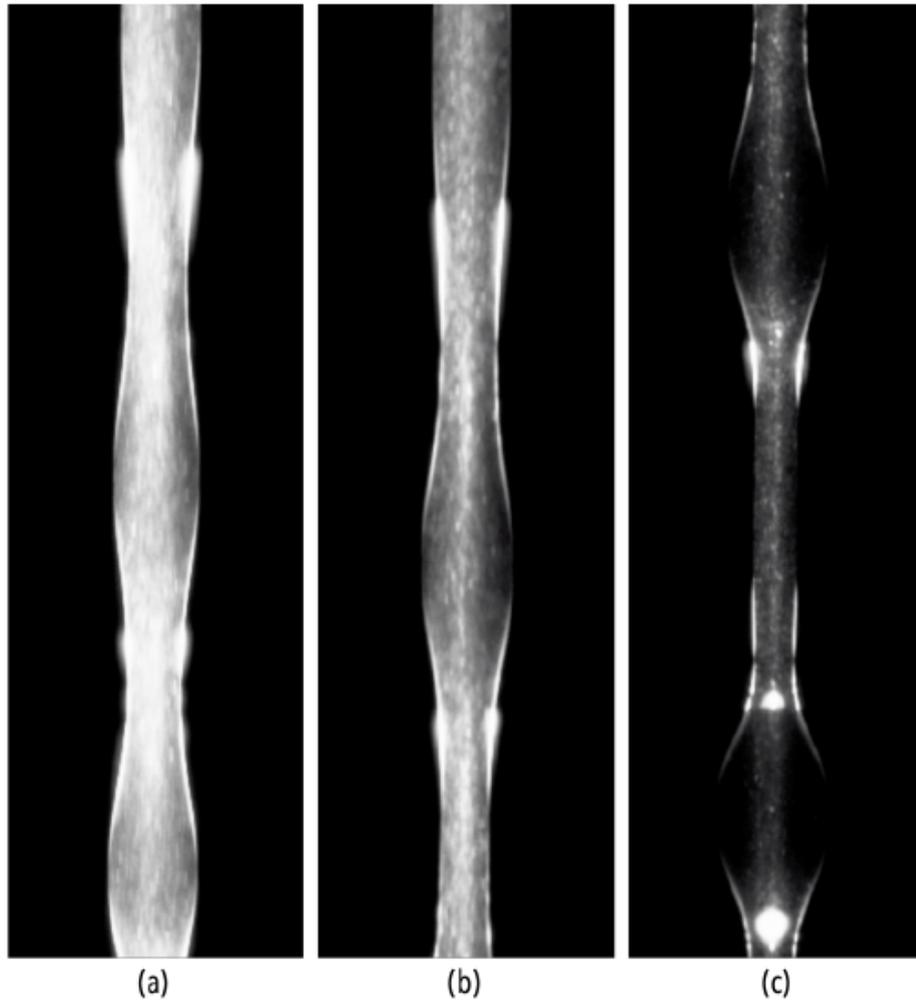


Figura 2.2: Jacto vertical às condições de ensaio $TA = 6000$ e $TE =$: (a) 150; (b) 100; (c) 50. [Retirado de (Nunes, 2019)].

De todos os resultados obtidos em outros ensaios, o mais essencial para LOF foi a presença de pontos e traços de brilho (Figura ??). Toda a técnica têm como base este fenómeno.

Estas zonas brilhates são derivadas de refrações provenientes de interações do feixe laser com a superfície dinâmica da superfície livre líquida. Esta interação só é possível devido à presença de instabilidade na superfície livre, como foi referido na secção 1.4.

Dada a técnica ainda estar em desenvolvimento, esta requer agora maior reconhecimento em outras áreas. A Fase exploratória referente a esta dissertação envolve a eliminação de todas as partículas referentes ao interior do fluido e o foco nas interações entre o feixe laser que se propaga no interior da estrutura fluídica e a superfície livre líquida, onde ocorrerá a dissipação da luz, formando os pontos e traços brilhantes.

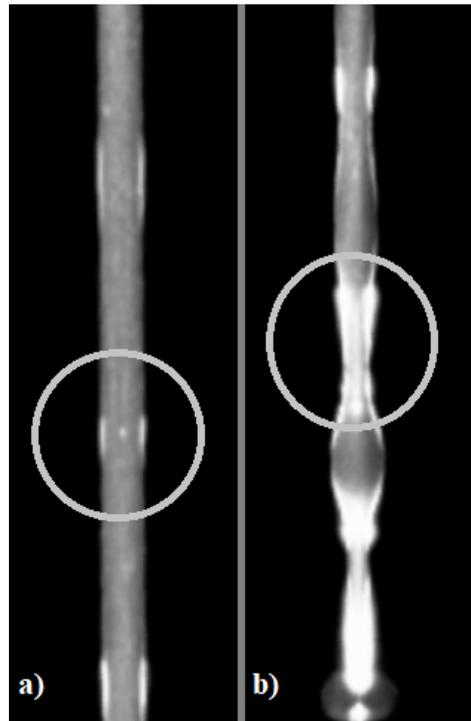


Figura 2.3: Exemplo de a) Pontos brilhantes, e b) Traços de brilho; nas Condições $TA = 4000$ e $TE = 150$ [Retirado de (Nunes, 2019)].

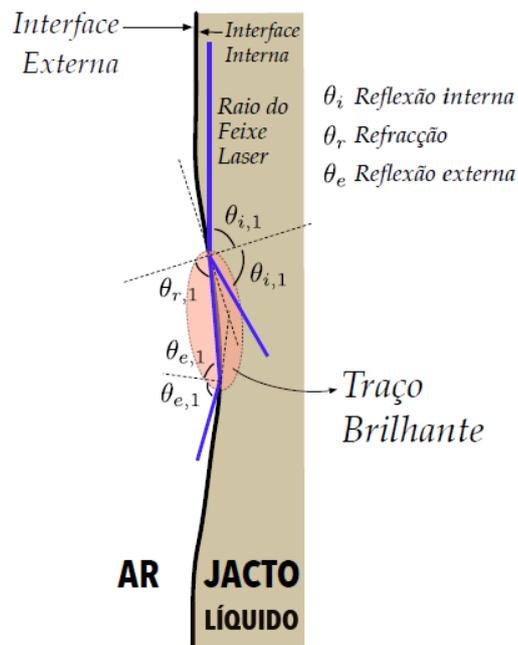


Figura 2.4: Interpretação de F.Nunes. [Retirado de (Nunes, 2019)].

3 Método Experimental

Neste capítulo descreve-se a instalação utilizada nas experiências, incluindo as modificações realizadas em relação a trabalhos anteriores (Nunes, 2019).

3.1. Instalação laboratorial

Essa instalação compõe-se de um Laser de 3 W com um comprimento de onda na gama do azul orientado para que atravesse um furo de 2 mm na base de um depósito de fluido, na direcção vertical, através do qual se forma o jacto líquido. Como o feixe de luz laser está, inicialmente, orientado na horizontal, por meio de um prisma óptico, é desviado em 90° para que a fonte de iluminação do escoamento seja a partir do interior das estruturas fluídicas, como é característico da técnica LOF.



Figura 3.1: Instalação Laboratorial.

As principais diferença entre os dois modelos estão presentes na secção de redirectionamento do laser e no sistema de enchimento.

A zona de redirectionamento do laser presente nesta dissertação é composto: pelo prisma óptico; por duas peças impressas numa impressora 3D; uma placa de acrílico, que funciona como ponte; e por um tubo de acrílico, com uma das extremidade tapada e isolada.

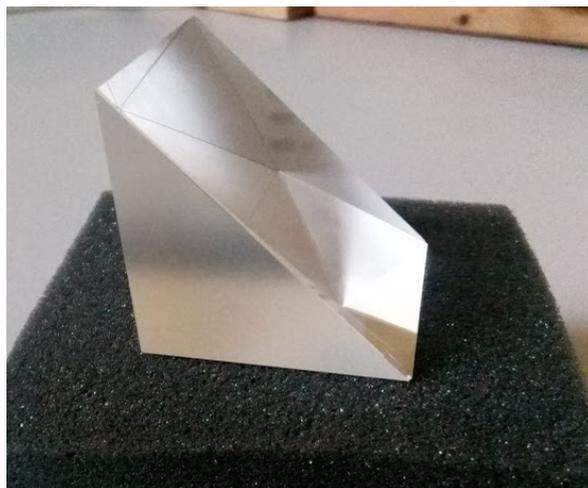


Figura 3.2: Prisma usado na instalação.

O prisma é constituído por vidro N-BK7 da Edmund Optics®, com capacidade para abranger um comprimento de onda na gama dos 350 - 2200 nm. Possui um perfil transversal de triângulo rectângulo com valor dos catetos de 5cm.

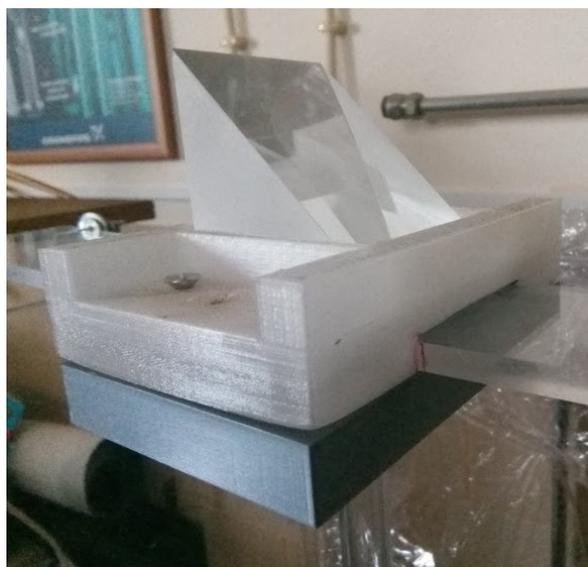


Figura 3.3: suporte para o prisma.

Das duas peças 3D, uma foi utilizada para manter o prisma seguro e que não existisse qualquer rotação em relação ao eixo vertical do prisma. Com essa peça, o prisma após ser pousado na ponte de acrílico não requer mais calibrações. Já a segunda peça, possui um orifício com a mesma dimensão que o tubo e com uma tolerância baixa, de modo que o tubo fica seguro com apenas o atrito entre as duas peças, facilitando o montar/desmontar do tubo.



Figura 3.4: a) Tubo usado na instalação; b) Peça utilizada em ensaios anteriores.

A razão principal da utilização do tubo de acrílico, em relação à peça utilizada anteriormente, é o facto de reduzir substancialmente o risco de infiltração de água pelas superfícies de contacto laterais (pois a peça anterior consistia na colagem de quatro placas de acrílico, de modo a formar um tubo de secção rectangular).

A ponte de acrílico possui agora parafusos nas extremidades, ao contrario do modelo anterior que possuía a ponte apenas pousada sobre o tank, que implica fixação da ponte e que, através do uso dos parafusos, melhora a calibração da ponte.



Figura 3.5: Ponte de acrílico.

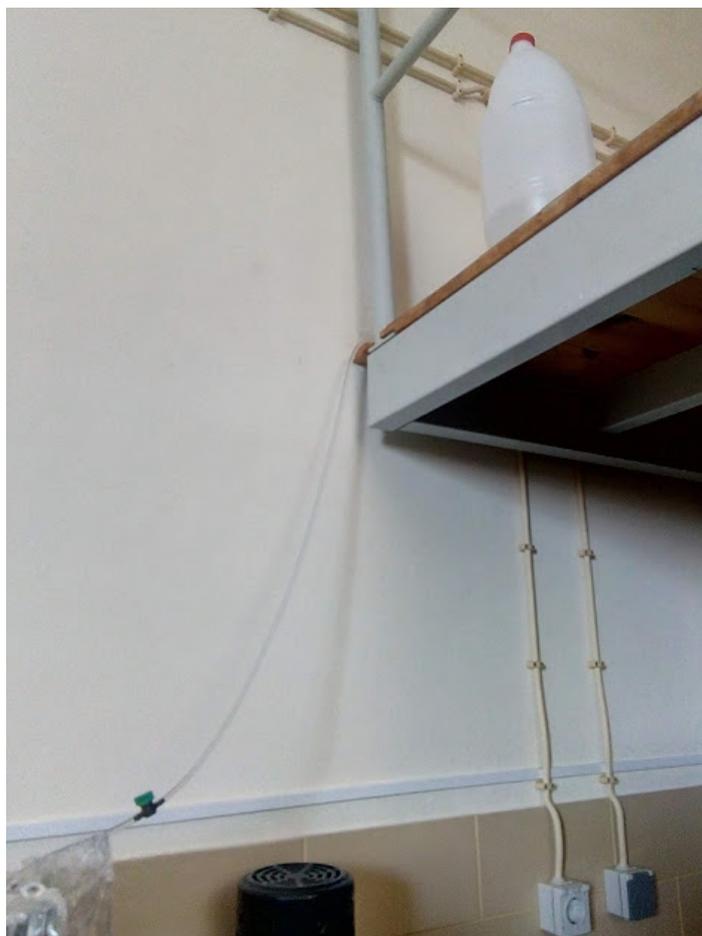


Figura 3.6: Sistema de Enchimento.

3.2. Procedimento Experimental

Falando agora sobre o sistema de enchimento, a primeira e grande diferença está no tipo de água utilizado na experiência. A experiência anterior utilizava água da torneira, enquanto esta utiliza água destilada. Como tal, o sistema de enchimento em vez de ser uma mangueira ligada à torneira, consiste agora numa mangueira ligada a um garrafão de água destilada, numa posição superior em relação à instalação experimental, de modo que a injeção da água no tank seja apenas devido à força de gravidade.

A água destilada foi sendo reutilizada, com a ajuda de um recipiente, que depois seria introduzida no garrafão de água destilada. Esse garrafão tem um furo ligeiramente a cima do fundo, com o intuito de funcionar como um filtro natural, pois as impurezas terão maior probabilidade de serem acumuladas no fundo. A meio dessa mangueira existe uma válvula borboleta para facilitar a abertura e o fecho da corrente de água. Após passagem no tubo, a injeção de água é feita num dos cantos do tank e com uma certa inclinação para tentar introduzir a água o mais suavemente no tank.

O resultado do uso de água destilada e do modo de injeção serão mais tarde referido nesta dissertação no Capítulo 4.



Figura 3.7: Zona do laser.

O maior compromisso tomado na instalação foram os promenores anteriormente referidos, pois era importante ter um sistema fixo, orientavel e flexível. Como tal, a zona do laser, o tank e a camara não sofreram mudanças significativas.

O laser encontra-se numa placa de madeira, que através do uso de um parafuso sem-fim, pode ser facilmente movível verticalmente, mantendo sempre algum nível de precisão. O laser no entanto, encontra-se agora seguro por elásticos (antes estava simplesmente posado na placa de madeira) que, apesar de não ser a melhor maneira de fixar ou nivelar, consegue manter um certo nível de fixação e durante os pequenos toques ao laser, como por exemplo no clique do botão ao ligar e desligar, os elásticos repõem o laser na posição anterior.



Figura 3.8: Tank do modelo experimental.

O deposito de água consiste num tank, com a forma de um cubo, com arestas de comprimento de 31,2cm. Possui um furo de 2mm a meio do fundo, pois, como foi falado na Subsecção ??, queremos utilizar apenas a zona de maior intensidade do laser.



Figura 3.9: Camara de Alta definição PCC.

3.3. Sistema de visualização

A câmara utilizada é a Phantom M340 da Visio Research que, com a presença de um sensor CMOS, permite obter imagem de alta resolução. O software utilizado foi o PCC applications, que permite controlar característica de captação de imagem, como a Resolução, a Taxa de Aquisição, o tempo de exposição e o número de imagens captadas. Já após a captação das imagens, o PCC permite a visualização dos videos gravados, a velocidade do video e a alteração do tamanho do ficheiro.

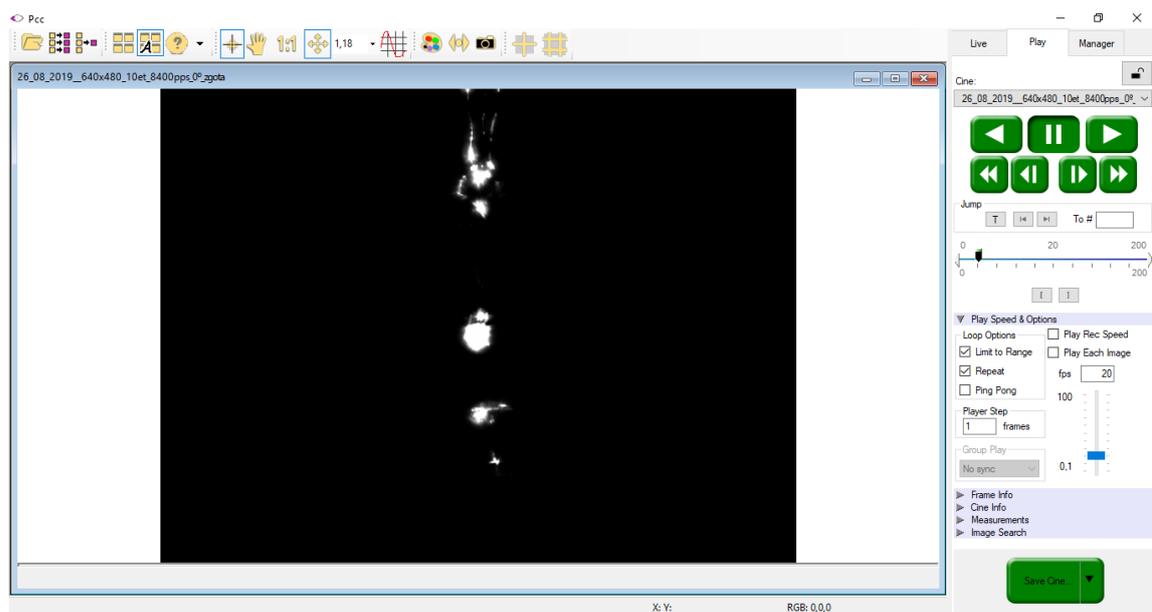


Figura 3.10: PCC software.

Tabela 3.1: Condições de Todos os Ensaio Realizados

Resolução [px×px]	TA [fps]	TE [μ s]	Inclinação de Câmara [°]
512×512	6000	50	0
		100	0
		150	0
640×480	8400	10	-10
		10	-5
		10	0
		10	5
		10	10
		10	15
		10	20
		10	25
		10	30
		100	-10
		100	-5
		100	0
		100	5
		100	10
		100	15
100	20		
100	25		
100	30		
768×768	4000	50	0
		100	0
		150	0
		200	0
1024×1024	2700	300	0
		100	0
		200	0
		300	0
		350	0

4 Resultados e Discussão

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos pela interacção entre a luz laser com a superfície livre do jacto, visando comparar com resultados obtidos anteriormente (Nunes, 2019) e as modificações feitas à instalação para eliminar a existência de bolhas e considerar diferentes ângulo de colecção da luz dispersa. O objectivo da análise visa avaliar as principais limitações da técnica LOF na caracterização de superfícies livres.

Para que os resultados sejam consisos, os dados retirados, que serão comparados com os dados de dissertações anteriores, foram realizados nas condições mais próximas possíveis. Como tal, a câmara foi a mesma, bem como as resoluções, a taxa de aquisição e o tempo de exposição. A alteração principal realizada foi no uso de água destilada, em vez da água da corrente, e do sistema de enchimento, que tinha como intuito reduzir o máximo de bolhas no líquido em questão.

Os resultados que serão comparados entre si, mantiveram-se nas mesmas condições, com excepção da variável em avaliação. Algumas desta variáveis foram os tempos de exposição, as taxa de aquisição e o ângulo de câmara.

Para tentar manter estas condições consisas, o tank foi tapado com película aderente, para tentar reduzir o máximo de impurezas que poderiam cair dentro do recipiente e alterar as condições do líquido.

4.1. Caracterização do jacto

Como referido anteriormente, existem dois números adimensionais que são usados para caracterizar um fluído.

Para determinar do número de Reynolds foi necessario o cálculo da velocidade do líquido. Para tal, foi calculado o caudal que passa pelo orificio da instalação. Sendo os ensaios feitos sempre para uma altura de água entre 10 cm e 12 cm, foi calculado quanto tempo o volume de água entre essas duas alturas demora a passar pelo orificio.

Foi obtido os valores de $t = 480$ s, que, sendo o volume de líquido $V = 0,0018$ m³, se traduz num caudal de $Q = \frac{V}{t} = 3,75 \times 10^{-6} \frac{m^3}{s}$. Com o valor do caudal e da área do orifício (de aproximadamente $A = 3,142m^2$), obtemos $V = \frac{Q}{A} = 1,194 \frac{m}{s}$.

Finalmente, o cálculo do número de Reynolds:

$$Re = \frac{\rho \times V \times d}{\mu} = 2380,86 \quad (4.1)$$

Onde, assumindo que a temperatura ambiente do laboratório fosse de 20° C, temos, para a água $\mu = 1,003 \times 10^{-3}$ Pa.s e $\rho = 1000 \frac{Kg}{m^3}$.

Dado o valor do número de Reynolds ser $10^3 < O(Re) < 10^4$, podemos assumir que os resultados foram obtidos em regime de transição de laminar a turbulento. (Oliveira & Lopes, 2013)

Após qualificação do regime inicial dos ensaios, notamos que o resultado faz sentido, na medida em que, desde o começo do jacto vertical, este começa logo com perturbações na superfície do fluído, como pode ser verificado em qualquer uma das imagens presentes na figura 4.4

Como referido anteriormente na secção ??, o número de Froude é essencial para a qualificação do tipo de escoamento quanto á sua velocidade.

O número de Froude, tendo em conta que existe uma variação de altura de coluna de água, não teremos um valor, mas sim uma gama de valores.

$$Fr_1 = \frac{V}{\sqrt{gL_1}} = 1,1 \quad (4.2)$$

$$Fr_2 = \frac{V}{\sqrt{gL_2}} = 1,2 \quad (4.3)$$

Onde $L_1 = 0,12$ m e $L_2 = 0,10$ m logo, podemos afirmar que o valor do número de Froude varia entre 1,1 e 1,2. Sendo este sempre superior a 1, durante todo o ensaio experimental, podemos afirmar que o escoamento é rápido. (Oliveira & Lopes, 2013)

O facto do escoamento já ser rápido, garante que durante o ensaio, não existirá qualquer mudança de fase, em relação á velocidade do escoamento. Assim, a comparação entre as várias áreas do jacto poderá ser efectuada.

Além deste último promenor, podemos afirmar que, apesar de não existir análise quanto ao estudo do impacto de gotas, este poderia ser efectoadado sem qualquer pro-

blema.

4.2. Comparação de Água Destilada com Água da Rede

Para comparação, originalmente usou-se água da corrente colocada a partir de uma mangueira, como foi utilizado na dissertação de Francisco Nunes. Após colocar a água no recipiente, notou-se um elevado número de bolhas no fluído. Com o sistema a funcionar observou-se, a olho-nu, a presença de bolhas no jacto, daqui a ideia de implementar um sistema que reduzi-se a presença de bolhas no jacto.

Após uso do novo sistema, a primeira observação foi o facto das imagens serem bem mais escuras, o qual foi uma surpresa. Era de se esperar uma redução na iluminação devido á ausencia de particulas, mas não se esperavam imagens tão mais escuras como representado na Figura 4.1.

Na técnica da Conectividade Óptica, o liquido é dopado através da adição de particulas de corante fluorescente, para a melhor visualização. No caso da dissertação de Francisco Nunes, não houve qualquer adição de particulas ao líquido, mas o uso de água de corrente, através da presença de bolhas, provou-se ser uma boa auto-dopagem que permitiu melhor visualização do interior do jacto. Esta melhor visualização deve-se essencialmente aos reflexões do feixe laser nas bolhar, como pode ser visto na figura 4.1 (a).

Tabela 4.1: Condições de ensaio da Figura 4.1

	a)	b)
Resolução [px×px]	512×512	512×512
Taxa de Aquisição [fps]	6000	6000
Tempo de Exposição [μ s]	150	150
Tipo de Líquido	Água da Rede	Água Destilada

Após análise comparativa entre as imagens obtidas com as imagens presentes na dissertação do Francisco Nunes, podemos afirmar que o pontos brilhantes dentro do fluído são provenientes de bolhas anteriormente adicionadas no recipiente através do sistema de enchimento utilizado. Podemos ainda referir, que com água destilada e com o novo sistema de enchimento, ocorreu uma eliminação total dos pontos luminosos

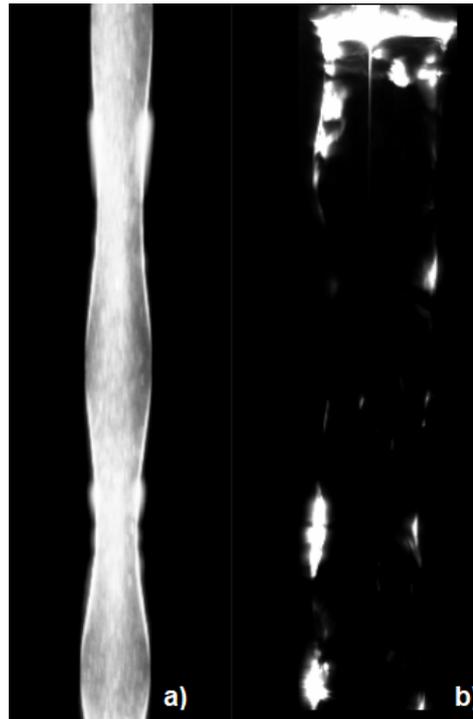


Figura 4.1: Comparação entre imagem retirada da dissertação de Francisco Nunes (a) com resultado obtido nesta dissertação (b).

dentro do fluido. Esta eliminação desses pontos luminosos, permitiu assim o isolamento das interações superficiais entre o laser e a superfície dinâmica do jacto.

4.3. Posição da Câmara

Uma curiosidade posta em causa foi a inclinação da câmara. Se aproximarmos o jacto do fluido vertical a uma figura cilíndrica, a rotação da câmara horizontalmente, não faz qualquer sentido. Mas, se rodarmos a câmara verticalmente, poderemos obter promenores diferentes do normal.

Para os ângulos de câmara, foram usados 0, 5, 10, 15, 20, 25 e 30 graus. A escolha destes valores foi puramente aleatória e por uma questão prática (a menos que se mostra-se necessário, não existia interesse em avaliar todos os graus entre 0 e 30). Os valores foram obtidos com um erro de 0.05 graus. Ângulos superiores a 30 graus começavam a não fazer muito sentido devido à posição da câmara na instalação.

O primeiro obstáculo foi o factor de focagem da câmara, pois, sendo esta técnica bastante focada nas filmagens como estudo da superfície dinâmica do jacto, maior desfocagem implica menor promenor nas imagens. Este factor pode não ser propriamente

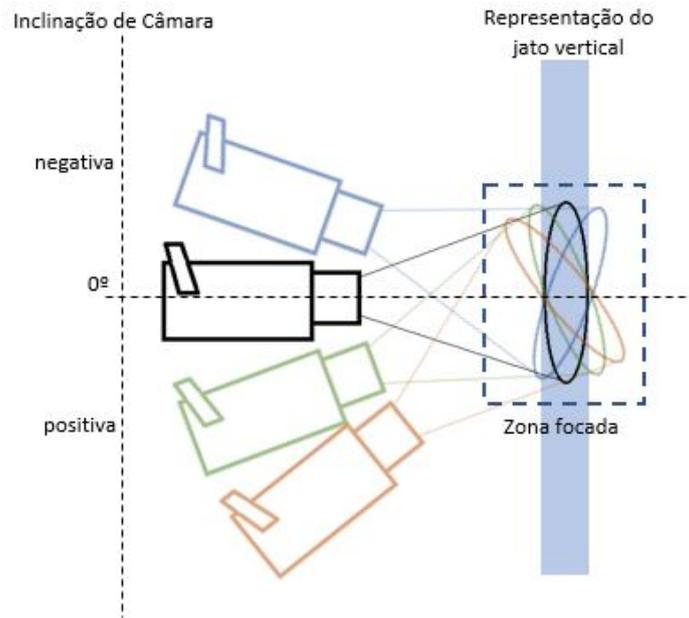


Figura 4.2: Representação da área de focagem com o ângulo de Câmara

um ponto negativo, pois algumas técnicas laser uso precisamente essa desfocagem para melhor visualização de interferometria.

Quando a câmara está na horizontal (0 graus), o eixo pelo qual o jacto circula, é paralelo ao plano captado pela câmara (representado na imagem pela forma oval de cor preta), deste modo, a focagem da camara abrange todo o jacto. O problema começa quando o ângulo da camara aumenta. Maior ângulo de câmara implica maior ângulo entre o jacto e o plano de focagem da camara, como está demonstrado na figura 4.2, representado pelas diferentes formas ovais.

4.3.1. Inclinação da câmara vs Iluminação

A base que inspirou este ensaio, foi o padrão de dispersão de Mie, que foi introduzido no capítulo ???. Segundo a dispersão de Mie, dependente da posição do observador, os níveis de intensidade da luz, irão aumentar ou diminuir. Os resultados foram então avaliados com isto em mente.

Como era de se esperar, com o aumento da inclinação, a intensidade dos pontos luminoso, aumentou. Para além desse factor, o aumento da inclinação também alterou os pontos luminosos, na medida em que, com menor inclinação, os pontos luminosos apenas eram visíveis nas "bordas" (à direita e à esquerda do jacto), como pode ser verificado na imagem 4.4. Para maiores inclinações, os pontos brilhantes, deixaram de

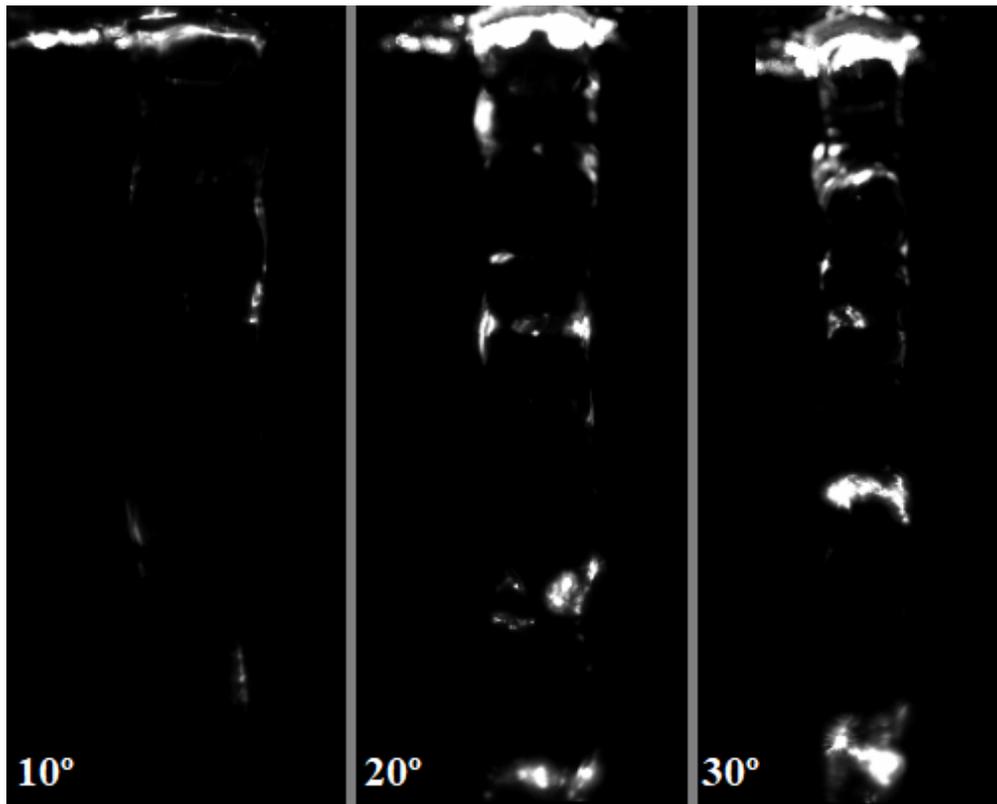


Figura 4.3: Comparação luminosa entre filmagens obtidas com uma taxa de aquisição de 8400pps, tempo de exposição de $10\mu s$ e inclinação da câmara a 10° , 20° e 30° .

ser "pontos", para começarem a tomar um formato aproximado a um "semi-circulo".

Outro promenor bástante interessante é os padrões de interferência, em algumas situações, serem bem delimitados. Estes padrões, como referidos no capítulo ?? são padrões de interferometria laser. Normalmente as técnicas que recorrente á interferometria laser para o estudo de jactos, recorrem á intercepção de dois laser externos. Por outras palavras, a interferometria presente nas instalações é proveniente de factores externos. Mas, neste caso, a interferometria é devido a factores internos.

4.3.2. Tridimensionalidade do liquido com ângulo de Camara

Nas filmagens obtidas pela câmara com um ângulo de 0 graus, obtemos uma imagens com apenas duas dimenções, mas sendo o líquido um objecto tridimensional, é difícil decifrar em que zona, em termos de profundidade, se encontra o brilho. Para uma melhor explicação, partimos da Figura 4.5.

Olhando para a seção rectangular, se o ponto assinalado por X for uma zona luminosa, não conseguimos, a partir da imagem saber se se trata do ponto A ou B, presentes

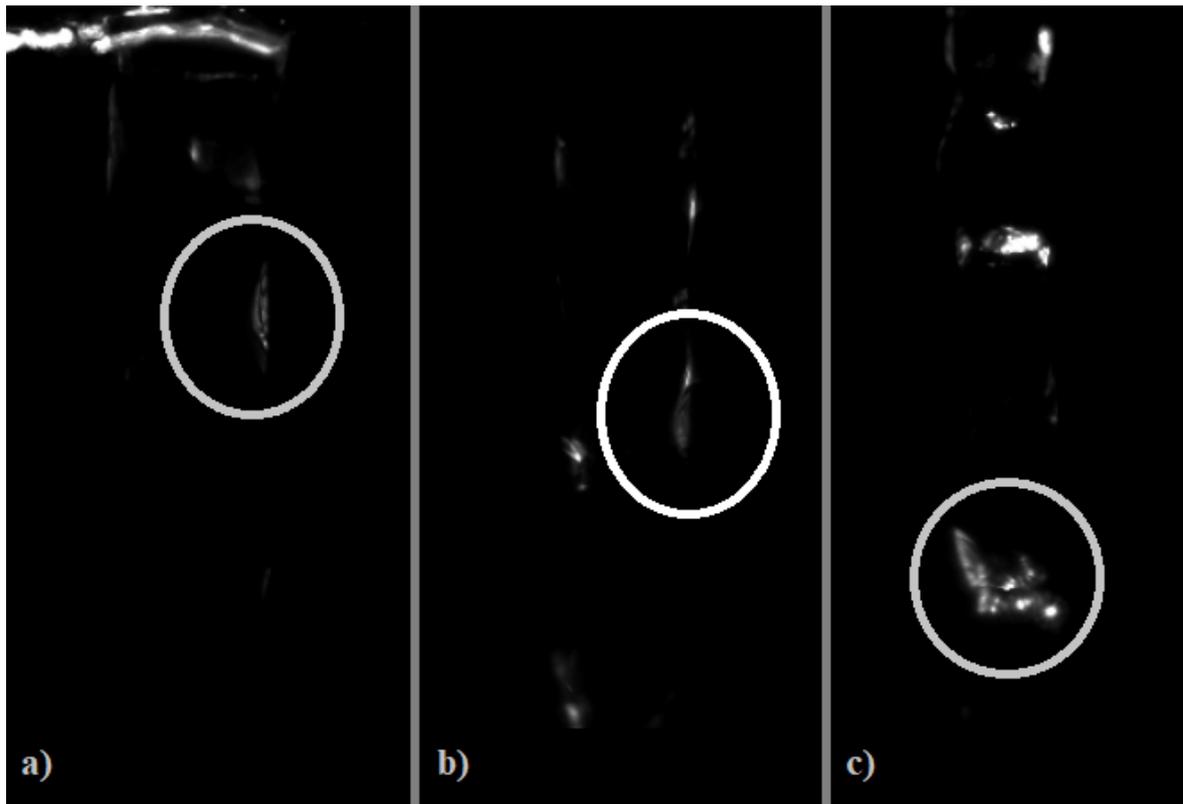


Figura 4.4: Interferometria presente em ensaios obtidas com uma taxa de aquisição de 8400pps, tempo de exposição de $10\mu s$ e inclinação da câmara a : a) 10° ; b) 20° ; e c) 30° .

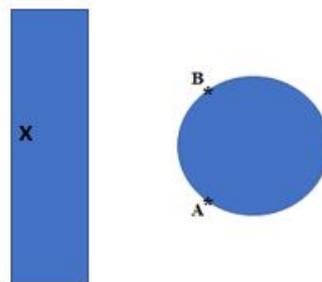


Figura 4.5: Representação 2D do jacto vertical e da secção transversal

na secção circular.

Com o aumento de ângulo de câmara, a efectiva posição da zona luminosa passa a ser mais obvia do que antes.

Exemplo da captação de imagem tendo em conta este promenor, pode ser visto na Figura 4.6, onde se nota bem a posição, em termos de profundidade, da zona brilhante.



Figura 4.6: Exemplo de zona luminosa com inclinação de Camara de 30°

4.4. Significado prático dos resultados obtidos

A técnica LOF, não necessita de dopagem do fluido em questão, ou, por outras palavras, esta pode até ser um factor negativo no estudo na superfície inter-fluídica (água com o ar). A dopagem pode ser usada para melhor visualização do interior do fluido, no entanto, é aconselhado que, no estudo da superfície dinamica, o líquido não seja dopado, para melhor visualização da superfície. Permite análise através de uma técnica não intrusiva, mas que requer algum nível de complexidade. O facto de ser uma técnica não intrusiva, é um factor bastante positivo, pois resulta em resultados mais viáveis e exatos.

A posição da câmara, dependendo da zona do fluido em análise, pode ser uma mais valia. É aconselhavel um tempo de exposição baixo para que a imagem seja o mais instantaneo possivel, no entanto, em alguma situação, maior tempo de exposição é aconselhavel. Também, referido á câmara, têm a possibilidade de providenciar informação sobre a tridimensionalidade do fluido, ao contrário de outras técnicas.

Através da técnica LOF, podemos ainda avaliar o nível de particulas presente no líquido. Ao contrario de técnicas anteriormente utilizadas.

Após análise dos valores retirados, chegamos á conclusão de que, no fundo, LOF

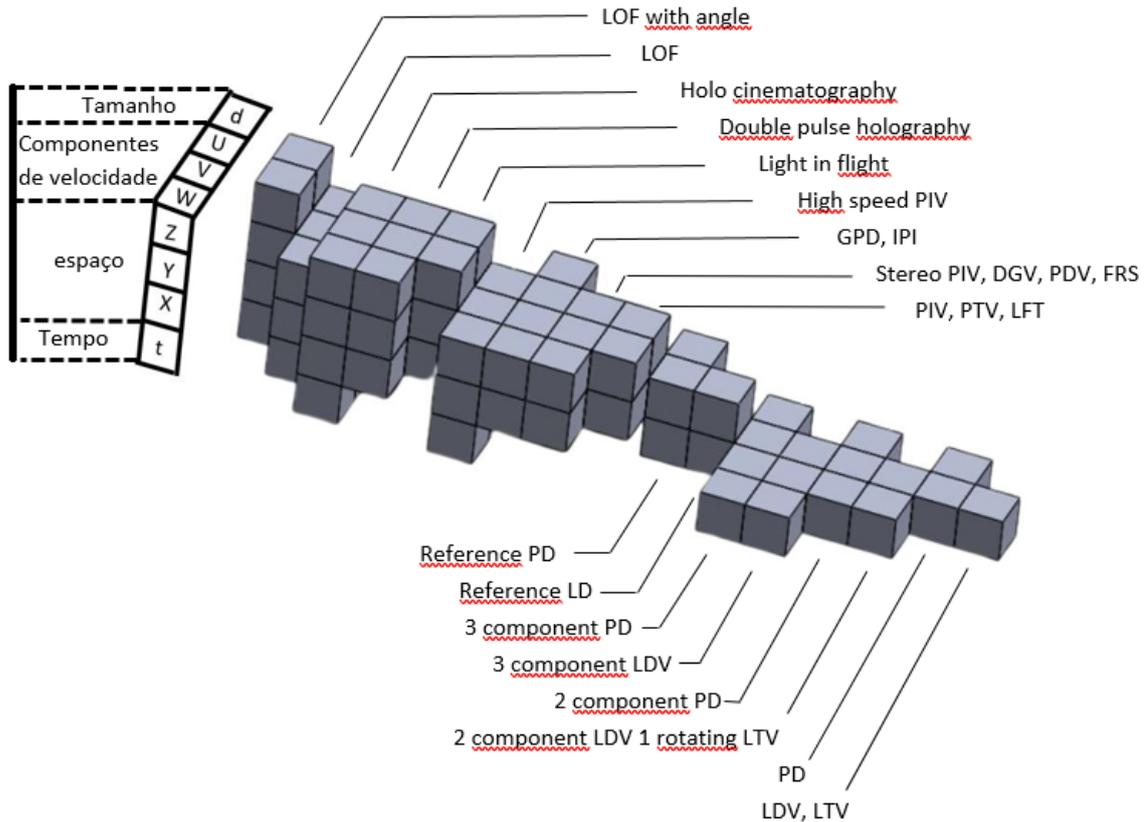


Figura 4.7: Visão geral de técnicas de medição laser para fluxos monofásicos e multifásicos

pode ser dividido em dois tipos diferentes: Com ou sem ângulo.

LOF sem ângulo na câmara, permite avaliação de variáveis como o tamanho, pois deriva da análise de imagens. Sendo estas imagens em duas dimensões, podendo assim avaliar duas das três possíveis dimensões no espaço. Devido ao uso de uma câmara de alta definição, a partir das filmagem podemos avaliar a variável tempo. Por último, graças ao factor tempo, podemos também analisar o factor velocidade, podendo este ser analisado em duas das suas três componentes.

Já em LOF com ângulo na câmara, permite avaliar a mesma variável do tamanho, mas sendo estas imagens em três dimensões, podendo assim avaliar as três possíveis dimensões no espaço. A variável tempo, é igual, no entanto, o factor velocidade terá apenas uma componente.

Visualmente, o LOF pode ser comparado com as outras técnicas através da imagem 4.7.

5 Notas conclusivas e trabalho futuro

Nesta dissertação foi utilizada a técnica LOF num jacto líquido vertical, com o intuito de avaliar as interações entre o feixe de luz laser e a superfície dinâmica desse fluido. As filmagens foram depois obtidas através do uso de uma câmara de alta definição e com recurso ao programa PCC.

Recorreu-se ao uso de água destilada, para esclarecer dúvidas anteriormente deixadas em aberto. Do uso deste tipo de água, obtivemos duas principais conclusões. Como o uso desta, podemos isolar apenas os pontos brilhantes na superfície livre dos pontos dentro do fluido, pois, não possuindo partículas, estas não irão refletir o feixe laser para o exterior do laser. Por outras palavras, apenas a luz laser que interaje com a superfície provocará refrações para o exterior. A segunda conclusão, foi a existência de interferometria proveniente de reflexões internas. Devido ao excesso de iluminação obtido em ensaios com água da corrente, não existia informação suficiente para afirmar a existência de interferometria.

Foi também variado a inclinação da Câmara, com o intuito de obter informações tridimensionais, pois com a Câmara colocada na horizontal, as imagens obtidas seriam sempre bidimensionais. Este revelou-se um aspecto importante na qualificação da técnica LOF em relação a outras técnicas laser já existentes. A quando da classificação de LOF, esta provou-se bastante competitiva, em relação às restantes, devido às variáveis que puderam ser obtidas do fluido.

Como trabalhos futuros, deixo a possibilidade de polarizar a luz do feixe laser, pois poderá influenciar os pontos brilhantes, principalmente as zonas onde ocorre interferometria, e o uso de LOF no estudo de gotas, que tinha sido anteriormente sugerido, mas por uma questão de tempo não pode ser estudado.

Bibliografia

- Albrecht, H-E, Damaschke, Nils, Borys, Michael, & Tropea, Cameron. 2013. *Laser Doppler and phase Doppler measurement techniques*. Springer Science & Business Media.
- Charalampous, G, Hardalupas, Y, & KP Taylor, AM. 2009. Novel technique for measurements of continuous liquid jet core in an atomizer. *AIAA journal*, **47**(11), 2605–2615.
- Doan, Hong Duc, Naoki, Iwatani, & Kazuyoshi, Fushinobu. 2013. Laser processing by using fluidic laser beam shaper. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **64**, 263–268.
- Domb, Cyril. 2019. *James Clerk Maxwell*.
- Eggers, Jens, & Villermaux, Emmanuel. 2008. Physics of liquid jets. *Reports on progress in physics*, **71**(3), 036601.
- Kerker, Milton. 2013. *The scattering of light and other electromagnetic radiation: physical chemistry: a series of monographs*. Vol. 16. Academic press.
- Nave, Carl R. 2000. *Blue Sky and Rayleigh Scattering*.
- Nunes, Francisco. 2019. *LASER ÓPTICO-FLUÍDICA*. M.Phil. thesis, Universidade de Coimbra.
- Oliveira, L. A., & Lopes, A.G. 2013. *Mecânica dos Fluidos*. Lidel.
- Ryer, Alex, & Light, Visible. 1997. *Light measurement handbook*.