



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Engenharia

**Uma abordagem experimental ao vento iónico
gerado por um atuador a plasma
Desenvolvimento de uma instalação schlieren qualitativa
e quantitativa**

Guilherme Filipe Tomé Pereira Santos

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Eletromecânica
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor José Carlos Páscoa Marques

Covilhã, junho de 2018

Dedicatória

Para a minha mãe e para a minha irmã, que estiveram sempre aqui, comigo.

Agradecimentos

Um agradecimento muito especial para o meu orientador Prof. Doutor José Páscoa, não só pela oportunidade concedida em realizar este trabalho, como por toda a disponibilidade, apoio e dedicação que me ofereceu.

Agradeço à Joana por todo o apoio, carinho e paciência, que teve comigo nesta etapa. Obrigado por seres o meu pilar nos bons e nos maus momentos. Sem ti sei que nada disto se teria desenrolado como desenrolou.

Um obrigado ao Frederico Rodrigues, sem o qual a construção da presente dissertação não seria possível, obrigado Fred por toda a disponibilidade, ajuda e conhecimento que me transmitiste.

Por fim um agradecimento a todo o ClusterDEM, por toda a ajuda e apoio que me concederam sempre que precisei e por todos os bons momentos passados no laboratório.

Resumo

Esta dissertação teve como objetivos principais o estudo, projeto, construção e avaliação, de dois sistemas de visualização de escoamento, nomeadamente de dois sistemas schlieren, cujo objetivo final será o emprego destes sistemas como instrumentos de estudo para atuadores a plasma do tipo DBD. Com o intuito de melhor compreender o vento iónico, um fenómeno característico dos atuadores a plasma, que consiste na formação de um "sopro", uma movimentação de ar, que se dá no mesmo sentido em que se dá a formação das descargas de plasma.

No decorrer da presente dissertação, o leitor é guiado pelo processo de criação de dois sistemas schlieren, sistemas estes que após o seu correcto projecto e sua correta montagem, nos permitiram realizar uma vasta gama de ensaios, alguns dos quais temos o prazer de partilhar com o leitor interessado. Existem neste estudo dois tipos principais de ensaios, um desses tipos tem como objetivo principal o estudo do próprio sistema schlieren, a sua calibração, o outro grupo de ensaios visa primeiramente testar o desempenho dos sistemas construídos na avaliação do escoamento induzido por atuadores a plasma, e por fim claro avaliar o próprio escoamento induzido.

Apesar de ambos os sistemas schlieren projetados, terem objetivos diferentes, no que ao estudo do escoamento induzido diz respeito, ambos permitem a visualização do escoamento induzido, por esse motivo é também feita uma pequena comparação entre as visualizações obtidas por ambos os sistemas aqui desenvolvidos. São também realizados ensaios por forma a testar os componentes constituintes de cada um dos sistemas. As dimensões dos alinhamentos utilizados, foram rigorosamente cumpridas, sendo que estas se apresentam como uma das melhores maneiras de melhorar a resolução dos sistemas.

Testaram-se atuadores de plasma do tipo DBD, que foram previamente montados em uma superfície plana e devidamente colocados no local de teste dos alinhamentos Schlieren desenvolvidos, por forma a ser possível visualizar o escoamento induzido pelo mesmo, fenómeno esse que é invisível a olho nú. Os sistemas schlieren mostraram-se sensíveis o suficiente para serem capazes de produzir resultados relativamente ao escoamento induzido pelo atuador a plasma.

A técnica de schlieren orientado para fundo é aqui proposta pela primeira vez para analisar quantitativamente o campo de temperaturas criado, por atuadores a plasma do tipo DBD em funcionamento.

Palavras-chave

Schlieren, Atuador a plasma, DBD, Vento iónico.

Abstract

This dissertation has as main objectives, the study, project and set up of two schlieren systems. The ultimate goal of this dissertation is that the developed systems are sensitive enough, so we can use them to study DBD plasma actuators. In order to better understand the ionic wind, which is a phenomena associated with the plasma actuators, that consists on the formation of a "blow", an air movimentation, which has the same direction of propagation as the plasma has of formation.

During the present dissertation, the reader is guided through the process of creation of two schlieren systems, systems whose after is correct project and after his correct assembly, allowed us to perform a series of different experiments, some of which we have the pleasure to share with the interested reader. There are two main types of experimental test during this dissertation, one of them his main goal is to study and test the schlieren systems themselves, and the other one firstly aims to test the performance of the system when trying to visualize the ionic wind, lastly to evaluate the DBD actuator ionic wind and better understand it.

Despite both project systems have different goals in the study of the DBD, they still have something in common, and that something is that they both can produce visualizations, of the ionic wind, therefore we also compare the performance of both systems and discuss the viability of both as a tool to study the plasma actuators. Also a lot of experimental test are done, in order to test the components of the system. The dimensions we specify during this dissertations are of extreme importance because, the relative distance between components, is one of the best way to increase sensitivity of the system.

The tested DBD plasma actuators were previously mounted on a flat plate, and correctly placed in the test zone of the developed schlieren alignment, which will allow to see what before was invisible, the ionic wind cannot be seen by the human naked eye. The developed systems showed sensitive enough to produce good results about the induced flow of a DBD plasma actuator.

The background oriented schlieren technique is here proposed, for the first time, in order to measure quantitatively, the temperature distributions field, caused by a functioning DBD plasma actuator.

Keywords

Schlieren, Plasma actuator, DBD, Ionic wind.

Uma abordagem experimental ao vento iônico gerado por um atuador a plasma

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Métodos de visualização de escoamento	1
1.2	Métodos óticos de visualização de escoamento	2
1.2.1	Técnicas Schlieren	2
1.2.2	Sistemas schlieren com recurso a lentes	4
1.2.3	Sistemas schlieren com recurso a espelhos	4
1.2.4	<i>Background oriented schlieren</i>	5
1.3	Atuadores a plasma	5
1.4	Objetivos e contextualização do estudo proposto	6
2	Revisão bibliográfica	9
2.1	O schlieren ao longo da história da ciência e da tecnologia.	9
2.2	O schlieren na atualidade	10
2.3	Atuadores a plasma para o controlo de escoamento	11
2.4	O schlieren aplicado ao estudo de atuadores a plasma	12
3	Conceitos teóricos	15
3.1	Teoria dos atuadores a plasma do tipo <i>DBD</i>	15
3.1.1	Métodos experimentais para estimar o consumo energético de atuadores a plasma	17
3.2	Efeitos óticos	18
3.2.1	O objecto de fase, “schliere”	20
3.2.2	A ótica paraxial	20
3.2.3	O princípio de Huygens	20
3.3	Teoria da técnica schlieren	21
3.3.1	As fontes de luz utilizadas nas técnicas schlieren	22
3.3.2	Tipos de espelhos e efeitos dos mesmos sobre o feixe de luz incidente	23
3.3.3	A câmara fotográfica como plano de projeção da técnica schlieren	23
3.3.4	A lâmina de bloqueio de raios refratados	24
3.4	A importância do alinhamento schlieren	24
3.5	O schlieren orientado para o fundo, <i>background oriented schlieren</i>	26
3.5.1	Fundos para a técnica BOS	28
3.5.2	Análise quantitativa de imagens obtidas através da técnica <i>BOS</i>	29
4	Instalação experimental	33
4.1	Aparato experimental para a determinação de potências em atuadores a plasma	33
4.2	Implementação de um sistema de schlieren qualitativo	34
4.2.1	O mecanismo de controlo de bloqueio de raios	36
4.2.2	A construção e escolha da fonte de luz	39
4.2.3	Procedimento para os ensaios realizados com atuadores a plasma	41
4.3	A técnica schlieren quantitativa	41
4.3.1	O processamento das imagens inerente à técnica BOS	44
4.3.2	Os fundos utilizados para o estudo e calibração da técnica BOS	45
4.3.3	A técnica de reconstrução das temperaturas e densidades	51

Uma abordagem experimental ao vento iónico gerado por um atuador a plasma

4.3.4	Ensaio com atuadores a plasma	52
4.4	A construção dos atuadores a plasma do tipo DBD	53
5	Resultados	55
5.1	Resultados da caracterização elétrica dos atuadores a plasma	55
5.2	Estudo de DBD's usando a técnica schlieren de espelho simples fora de eixo.	57
5.3	Resultados obtidos através da técnica schlieren orientado para o fundo	65
6	Conclusões e trabalhos futuros	77
6.1	Conclusões do trabalho desenvolvido	77
6.1.1	Propostas de trabalhos futuros	78
	Bibliografia	81
A	Anexos	87
A.1	Script desenvolvido em Matlab por forma a obter campos de índices refrativos, densidades e temperaturas.	87
A.2	Artigo desenvolvido durante a dissertação	90

Lista de Figuras

1.1	Esquema representativo do fenômeno da refração, fenômeno no qual se baseiam os métodos óticos de visualização de escoamento apresentados na presente dissertação.	2
1.2	Esquema representativo de um alinhamento de Toepler, com a identificação dos elementos óticos constituintes dos mesmos.	3
1.3	Esquema representativo da estrutura e dos elementos constituintes de um atuador a plasma, adaptada de [1].	6
3.1	Representação esquemática do funcionamento de um atuador a plasma do tipo DBD, à esquerda emissão de electrões do eléctrodo exposto para a camada dieléctrica; à direita, emissão de electrões da camada dieléctrica para o eléctrodo exposto; a vermelho nos gráficos da tensão encontram-se identificados os momentos em que se verifica os fenómenos ilustrados.	16
3.2	Diagrama do circuito eléctrico, utilizado por forma a estimar as potências dos atuadores a plasma, utilizando o método da resistência. Adaptada de [2]	17
3.3	Esquema exemplificativo dos princípios óticos associados à técnica schlieren; A amarelo a trajetor de um raio de luz genérico, considerando a não existência do objeto de fase; A vermelho a trajetoria do mesmo raio genérico, considerando desta vez a influência do objeto de fase na mesma.	21
3.4	Diagrama esquemático, de um alinhamento schlieren do tipo Z ; A traço interrompido podemos ver o eixo ótico e a cheio o feixe de luz.	25
3.5	Alinhamentos schlieren de espelho único; a) Alinhamento Schlieren de espelho único, no eixo.; b) Alinhamento Schlieren de espelho único, fora do eixo.	26
3.6	Diagrama esquemático de um alinhamento BOS genérico; Os raios vermelho e azul correspondem à situação experimental sem e com o objeto de fase presente, respetivamente.; A verde, a trajetória que o raio deflectido teria seguido na ausência do objeto de fase, que forma, com a trajetória que o mesmo seguiu após ser deflectido, representado a cheio, o ângulo de deflexão(ε_y); No sensor da máquina encontra-se o deslocamento do pixel entre as duas fotografias (Δy).	27
3.7	Tipos de fundos mais utilizados nas técnicas de schlieren orientado para o fundo; a) Fundo artificial, composto por particulas negras dispersas aleatoriamente em um fundo branco, fornecendo alto contraste. Adaptado de [3]; b) Fundo natural, composto por uma zona com elevada densidades de ramos de árvores retro iluminados. Adaptado de [4]; c) Fundo de feixe de laser disperso, incidindo em uma superfície opaca, cria um padrão muito semelhante aos criados artificialmente. Adaptado de [5].	29
4.1	Diagrama do aparato experimental, utilizado por forma a estimar as potências dos atuadores a plasma, utilizando o método da resistência; 1) atuador a plasma do tipo DBD; 2) Fonte de alimentação de alta tensão e frequência, PVM500; 3) Aparelho de medição das tensões, PicoScope; 4) Sonda de medição; 5) Resistência; 6) "Crocódilos", por forma a fazerem a medição na resistência; 7) Computador, onde serão visualizadas as formas de onda captadas.; Adaptada de [2].	33

4.2	Diagrama esquemático do alinhamento schlieren de espelho único; A amarelo a trajetória dos raios de luz incidentes; A verde a trajetória dos raios de luz refratados e refletidos, que irão incidir novamente no objecto de fase; A azul os raios de luz que não foram bloqueados pela lâmina de corte; A zona identificada a vermelho em frente ao atuador a plasma representa a zona onde se espera encontrar o nosso objeto de fase.	35
4.3	Espelho utilizado no alinhamento experimental presente neste estudo; a) espelho com iluminação ambiente ; a) espelho com iluminação ambiente, iluminação ativa através de uma fonte de luz pontual e um objeto de fase presente na frente do espelho, que neste caso é o calor libertado pela combustão de um incenso. . . .	36
4.4	Fotografia do mecanismo desenvolvido por forma a movimentar a lâmina de corte, com uma precisão de 0.001mm. Este mecanismo baseia-se em um principio simples, possuindo uma calha guia e uma quelha deslizante, permite o movimento horizontal de uma viga que tem colada a sua lâmina de bloqueio de raios refratados. O deslizamento da quelha deslizante dá-se aquando da movimentação do micrómetro digital.	37
4.5	Várias fotografias schlieren todas elas com cortes diferentes, ms mantendo o mesmo objeto de fase, o mesmo espelho e a mesma fonte de iluminação; a) 0% de corte; b) 6% de corte; c) 12% de corte; d) 18% de corte; e) 24% de corte; f) 30% de corte; g) 36% de corte; h) 42% de corte; i) 48% de corte; j) 54% de corte; k) 60% de corte; l) 66% de corte; m) 72% de corte; n) 78% de corte; o) 84% de corte; p) 90% de corte; q) 100% de corte.	38
4.6	Fotografia da fonte de luz utilizada no presente estudo, na imagem apresentada a fonte encontra-se ligada, sendo perceptível o ponto por onde o feixe de luz diverge. A fonte de luz é composta por um lâmpada LED que se encontra atrás da superfície opaca, esta superfície bloqueia a passagem dos raios, permitindo que passem apenas pela pequena abertura que possui, tornando assim esta fonte luminosa em uma fonte pontual.	39
4.7	Fotografias schlieren das diferenças de densidade causadas no ar, pelo calor proveniente da chama de uma vela, fazendo uso de fontes luminosas com diferentes potências; a) 7 Watts ; b) 8 Watts; c) 9 Watts ; d) 15 Watts.	40
4.8	Diagrama esquemático do alinhamento de schlieren orientado para o fundo instalado experimentalmente. Apresentam-se também os componentes, necessários ao funcionamento do DBD, tal como a fonte de alimentação e o próprio DBD. Podemos ver ainda o Picoscope, instrumento utilizado para medir as tensões aplicadas no atuador a plasma do tipo DBD. e a UC da máquina, que é a interface que faz ligação câmara, computador.	43
4.9	Fotografia da instalação experimental, no laboratório do clusterDEM, com a identificação dos respetivos componentes. Alinhamento schlieren compacto.	44
4.10	Visualização do calor produzido pela chama de uma vela. Fotografia capturada com recurso à técnica BOS, cujo tratamento foi realizado em <i>Matlab</i>	45
4.11	Fundos artificiais, de partículas dispersas, criados através do software PIVlab, partículas de 2 pixeis; a) 200000 partículas ; b) 500000 partículas ; c) 600000 partículas ; d) 900000 partículas.	46

Uma abordagem experimental ao vento iónico gerado por um atuador a plasma

4.12	Fotografias obtidas através da técnica BOS, das diferenças de densidade causadas no ar pela chama de uma vela, após determinação dos deslocamentos das partículas constituintes do fundo; Ensaios para fundos com diferentes números de partículas constituintes; a) 300000 Partículas ; b) 600000 partículas.	48
4.13	Fotografias obtidas através da técnica BOS, das diferenças de densidade causadas no ar pela chama de uma vela, após determinação dos deslocamentos das partículas constituintes do fundo; Ensaios para fundos com diferentes números de partículas constituintes; a) 800000 Partículas ; b) 900000 partículas.	49
4.14	Fotografias obtidas através da técnica BOS, das diferenças de densidade causadas no ar pela chama de uma vela, após determinação dos deslocamentos das partículas constituintes do fundo; Ensaios para fundos com diferentes números de partículas constituintes, o presente fundo apresenta 130000 partícula constituintes.	50
4.15	Fluxograma contendo as várias etapas necessárias ao correto processamentos de dados, com vista à obtenção de dados quantitativos de fotografias schlieren. . .	52
4.16	Atuadores a plasma do tipo DBD, utilizados no presente estudo; a) 1.2 mm de espessura; b) 0.9 mm de espessura; c) 0.6 mm de espessura; d) 0.3 mm de espessura.	54
5.1	Visualização da forma de onda da tensão e corrente no atuador a plasma do tipo DBD.	55
5.2	Resultados obtidos para o consumo energético, para quatro atuadores a plasma do tipo DBD, cuja camada dielétrica apresenta espessuras diferentes.	56
5.3	Visualização do escoamento induzido por um atuador a plasma do tipo DBD com uma camada dielétrica, com 0.3 mm de espessura, montado em uma superfície plana e que atua a tensões de: a) 4kVpp ; b) 5kVpp; c) 6kVpp; d)7kVpp; e) 8kVpp ; f) 9kVpp.	57
5.4	Visualização do escoamento induzido por um atuador a plasma do tipo DBD com uma camada dielétrica, com 0.6 mm de espessura, montado em uma superfície plana e que atua a tensões de: a) 4kVpp ; b) 5kVpp; c) 6kVpp; d)7kVpp; e) 8kVpp ; f) 9kVpp.	59
5.5	Visualização do escoamento induzido por um atuador a plasma do tipo DBD com uma camada dielétrica, com 0.9 mm de espessura, montado em uma superfície plana e que atua a tensões de: a) 4kVpp ; b) 5kVpp; c) 6kVpp; d)7kVpp; e) 8kVpp ; f) 9kVpp.	61
5.6	Visualização do escoamento induzido por um atuador a plasma do tipo DBD com uma camada dielétrica, com 1.2 mm de espessura, montado em uma superfície plana e que atua a tensões de: a) 4kVpp ; b) 5kVpp; c) 6kVpp; d)7kVpp; e) 8kVpp ; f) 9kVpp.	63
5.7	Visualização do momento inicial da formação do escoamento induzido.	64
5.8	Campo de densidades, obtido através da técnica BOS, no centro do campo de densidades podemos ver uma redução significativa na densidade do ar ambiente, causada pelo aquecimento do mesmo devido à presença da chama de uma vela. .	65
5.9	Campo de temperaturas, obtido através da técnica BOS, no centro do campo de temperaturas podemos ver uma temperatura mais elevada do que a do meio envolvente, devido ao facto de este ter sido aquecido pela chama de uma vela. . .	66

Uma abordagem experimental ao vento iônico gerado por um atuador a plasma

5.10 Resultados de um estudo semelhante ao desenvolvido na presente dissertação; a) Reconstrução das densidades do ar aquecido pela chama de uma vela; b) Reconstrução das temperaturas do ar aquecido pela chama de uma vela; Imagem adaptada de [3]	67
5.11 Campo de deslocamentos obtidos através da técnica BOS, para um atuador a plasma do tipo DBD a funcionar em regime contínuo e com uma camada dielétrica com 0.3 mm de espessura.	68
5.12 Campo de deslocamentos obtidos através da técnica BOS, para o atuador a plasma do tipo DBD a funcionar em regime contínuo e com uma camada dielétrica com 0.6 mm de espessura.	69
5.13 Campo de deslocamentos obtidos através da técnica BOS, para o atuador a plasma do tipo DBD a funcionar em regime contínuo e com uma camada dielétrica com 0.9 mm de espessura.	70
5.14 Campo de deslocamentos obtidos através da técnica BOS, para o atuador a plasma do tipo DBD a funcionar em regime contínuo e com uma camada dielétrica com 1.2 mm de espessura.	71
5.15 Campo de temperaturas obtido através da técnica BOS, para o atuador a plasma do tipo DBD a funcionar em regime contínuo e com uma camada dielétrica com 0.3 mm de espessura.	72
5.16 Campo de temperaturas obtido através da técnica BOS, para o atuador a plasma do tipo DBD a funcionar em regime contínuo e com uma camada dielétrica com 0.6 mm de espessura.	72
5.17 Campo de temperaturas obtido através da técnica BOS, para o atuador a plasma do tipo DBD a funcionar em regime contínuo e com uma camada dielétrica com 0.9 mm de espessura.	73
5.18 Campo de temperaturas obtido através da técnica BOS, para o atuador a plasma do tipo DBD a funcionar em regime contínuo e com uma camada dielétrica com 1.2 mm de espessura.	73
5.19 Resultados obtidos num estudo sobre as características térmicas dos atuadores a plasma do tipo DBD; a) Variação da temperatura em função da distância ao eletrodo exposto; b) Variação da temperatura em função do tempo de funcionamento do atuador; Imagem adaptada de [6]	74
5.20 Resultados obtidos num estudo sobre as características térmicas dos atuadores a plasma do tipo DBD; Variações da temperatura normalizada em direção oposta ao eletrodo exposto, para quatro formas de onda, do sinal de entrada, diferentes; Imagem adaptada de [6].	75

Nomenclatura

Acrónimos

BOS	Background Oriented Schlieren
CCD	Charge Couple Device
CCU	<i>Camera control unit</i>
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
DBD	Dielectric Barrier Discharge
DSLR	<i>Digital Single Lens Reflex</i>
LED	<i>Light emitting diode</i> , Diodo emissor de luz.
PIV	Particle image velocimetry
SLR	<i>Single Lens Reflex</i>
UC	Unidade de controlo

Símbolos Gregos

Δx	Deslocamento sofrido pelo raio de luz segundo o eixo dos xx , [m]
Δy	Deslocamento sofrido pelo raio de luz segundo o eixo dos yy , [m]
$\Delta y'$	Deslocamento virtual sofrido pelo raio de luz segundo o eixo dos yy , [px]
ΔZ_D	Metade da espessura do objeto de fase
ϵ_0	Permissividade do vácuo, [$C^2 N^{-1} m^{-2}$]
ϵ_x	Deflexão angular do raio de luz, segundo o eixo dos xx
ϵ_y	Deflexão angular do raio de luz, segundo o eixo dos yy
λ	Comprimento de onda
λ_D	Comprimento de Debye, [m]
ϕ	Potencial elétrico, [V]
ρ	Densidade do gás sob estudo [kg/m^3]
ρ_0	Densidade do gás do meio ambiente [Kg/m^3]

Símbolos Latinos

\bar{P}_a	Potência média do atuador a plasma, [W]
\vec{E}	Vetor do campo magnético [T]
c_0	Velocidade da luz no vácuo[m/s]
d_A	Diâmetro da abertura do diafragma da máquina, [m]

Uma abordagem experimental ao vento iônico gerado por um atuador a plasma

d_d	Componente do desfoque geométrico relativa a ruído proveniente de luz externa
d_i	Desfoque geométrico
d_{total}	Desfoque geométrico total
f	Distância focal [m]
F_B	Força mássica, <i>Body force</i> , [N]
$I(t)$	Corrente instantânea de entrada ao terminais do atuador, [A]
K	Constante de Gladstone-Dale
L	Espessura do objeto de fase; Extensão do objeto de fase ao longo do eixo ótico [m]
M	Fator de ampliação
n	Índice de refração
n_0	Índice de refração do meio envolvente
n_p	Número de períodos da corrente
P	Pressão do meio ambiente, [Pa]
$P_a(t)$	Potência instantânea do atuador a plasma, [W]
R	Constante universal dos gases perfeitos, [$Jkg^{-1}k^{-1}$]
T	Temperatura, [K]
T_0	Temperatura do meio ambiente
T_0	Temperatura do meio envolvente, [K]
T_c	Período da corrente, [Hz]
$V(t)$	Tensão instantânea de entrada ao terminais do atuador, [V]
Z_A	Distância entre o objeto de fase e a lente da câmara , [m]
Z_B	Distância entre o fundo e a lente da câmara , [m]
Z_D	Distância entre o fundo e o objeto de fase , [m]
Z_i	Distância entre a lente da câmara e o sensor da câmara , [m]
c	Velocidade da luz no meio sob análise [m/s]

Capítulo 1

Introdução

Neste capítulo pretende-se familiarizar o leitor com o estudo que irá ser realizado no decorrer desta dissertação, tal como também com as diferentes temáticas que o mesmo engloba. Para tal será aqui feita uma descrição geral e abrangente das mesmas, ficando uma descrição mais detalhada reservada para capítulos posteriores, por forma a que os conceitos aqui abordados possam maturar de forma correta na mente do leitor e para que estes não se enleiem com as nuances mais intrincadas que iremos abordar mais adiante. Em adição a isso, é também aqui feita uma descrição e contextualização do estudo a que o autor se propõe a realizar.

1.1 Métodos de visualização de escoamento

Os métodos de visualização de escoamento, são técnicas muito presentes na mecânica de fluidos experimental e desempenham um papel crucial no que ao entendimento do comportamento de certos escoamentos diz respeito, pois permitem a inspeção visual de fenómenos que ocorrem em meios transparentes, sejam eles líquidos ou gasosos, fenómenos estes que de outra forma não seriam visíveis ao olho humano. Apesar de a sua importância a nível qualitativo não dever ser desconsiderada, uma das características mais importantes das referidas técnicas é que a maior parte delas permite também a extração de dados quantitativos referentes a diversas características do escoamento sujeito a análise. Devemos ainda referir que estas técnicas são não intrusivas, o que significa que estas, não perturbam de modo algum o escoamento analisado, ao contrário das técnicas que fazem uso de sondas ou aparelhos de medição, que pela necessidade de colocação da referida sonda ou aparelho em um ponto do escoamento irá ocorrer necessariamente uma perturbação do próprio escoamento.

Geralmente os métodos de visualização de escoamento são divididos em três grandes grupos. Sendo um desses grandes grupos os métodos de adição de material, que consistem essencialmente em misturar partículas de um material visível com o fluido, geralmente transparente, constituinte do escoamento a estudar. Deve-se ter em conta de que as partículas adicionadas, para além de visíveis, devem apresentar características semelhantes às do fluido em questão, nomeadamente densidades o mais próximas possível. Para que possamos assumir que as ditas partículas não interferem com o escoamento e que apresentam o mesmo movimento que ele, assim sendo, analisando o movimento das partículas visíveis obtemos informações acerca do escoamento invisível ao olho nu. O segundo grande grupo é o grupo de maior interesse no âmbito da presente dissertação, uma vez que são os métodos que iremos utilizar no nosso estudo e dão pelo nome de métodos óticos. Este tipo de métodos é sensível a variações no índice de refração do meio a analisar. A zona do campo sujeito a análise que apresenta variações no índice de refração, denomina-se geralmente em ótica por, objeto de fase, sendo que quando a luz atravessa este objeto é desviada da sua trajetória sem que mais nenhuma das suas restantes características seja alterada. Podemos então, com recurso às ferramentas certas, captar o objeto de fase em uma imagem fotográfica, devido ao desvio induzido nos raios de luz pelo mesmo. Por fim o terceiro grupo, que combina conceitos presentes nos dois anteriormente descritos,

podemos-nos referir a ele como , marcação do campo de escoamento através da adição de energia e calor. Este método é semelhante aos anteriores no sentido em que apesar de não ser adicionado nenhum material é adicionada energia ao sistema, mais especificamente a algumas partículas constituintes do sistema. Geralmente essa energia é fornecida na forma de calor, o que implica que as partículas que receberam essa energia possam ser visualizadas através de métodos óticos[7].

1.2 Métodos óticos de visualização de escoamento

Os métodos óticos de visualização de escoamento baseiam-se na interação das ondas de luz com o escoamento de um fluido. Após esta interação ocorrem alterações no raio de luz, essas alterações possuem informações acerca do estado do escoamento com o qual a luz interagiu. A informação contida nos raios de luz que atravessam o objeto de fase, ou raios refratados, pode ser extraída dos mesmos de várias formas, sendo uma delas através da captação dos referidos raios e posterior comparação com os raios incidentes, ou seja com os raios não afetados pelo objeto de fase.

Da interação entre a onda de luz e o objeto de fase, existem diversas características da referida onda de luz que podem sofrer alterações como consequência desta interação. Os diferentes métodos óticos existentes são classificados de acordo com a propriedade da luz à qual são sensíveis. Os métodos que iremos estudar na presente dissertação são sensíveis a variações na direção da do raio de luz refratado e dão pelo nome de técnicas schlieren. Mas para que o leitor fique com uma visão abrangente daquilo que constitui os métodos óticos de visualização de escoamento devemos também referir, que existem métodos sensíveis a variações de amplitude dos raios refratados, as chamadas medições por extinção. Existem também métodos sensíveis à variação de frequência dos raios refratados, Doppler Schlieren. E por fim métodos sensíveis a variações na polarização de fase dos raios refratados, a interferometria. Apesar de todas as técnicas acima se basearem em alterações de diferentes propriedades dos raios de luz, há algo que todas elas têm em comum, que é que a informação contida nos raios refratados, deve ser integrada no caminho que o raio de luz atravessa [7].

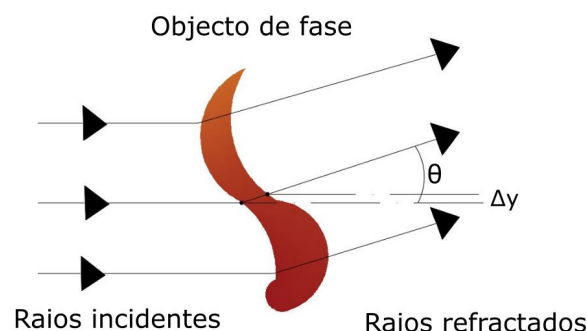


Figura 1.1: Esquema representativo do fenómeno da refração, fenómeno no qual se baseiam os métodos óticos de visualização de escoamento apresentados na presente dissertação.

1.2.1 Técnicas Schlieren

Agora que o leitor já tem uma visão geral sobre os métodos de visualização de escoamento e algum conhecimento mais aprofundado no que ao métodos óticos diz respeito, torna-se agora

Uma abordagem experimental ao vento iónico gerado por um atuador a plasma

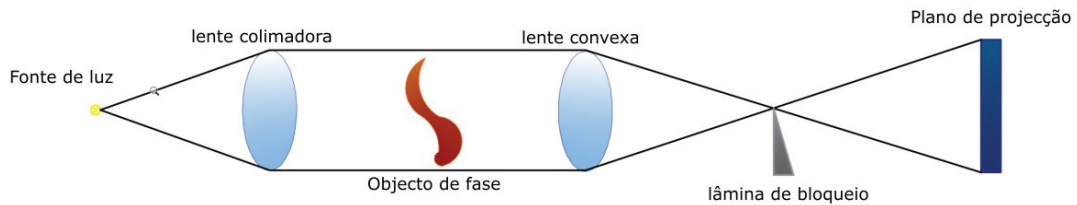


Figura 1.2: Esquema representativo de um alinhamento de Toepler, com a identificação dos elementos óticos constituintes dos mesmos.

o momento apropriado para introduzir, a técnica específica que iremos aqui desenvolver que é a técnica schlieren. O nome da técnica que iremos aqui utilizar foi adotado da palavra Alemã "Schliere" para definir as inhomogeneidades locais de um meio transparente, uma palavra sem correspondência na nossa lusofonia, mas que se refere às visualizações que se conseguem ver em dias de grande calor, por exemplo do calor a ser dissipado de uma estrada de alcatrão. Este nome é agora usado para designar um conjunto de técnicas, que com recurso câmaras espelhos fontes luminosas e lentes, permite a visualização e avaliação das referidas inhomogeneidades. Para que o leitor possa ter uma melhor noção daquilo em que consiste um alinhamento schlieren descrevemos aqui um dos primeiros alinhamento alguma vez concebidos, que se encontra ilustrado abaixo na figura 1.1 e dá pelo nome de alinhamento de Toepler, em honra ao cientista que iremos conhecer um pouco melhor em capítulos seguintes.

Neste alinhamento podemos ver à esquerda a fonte de luz, que será a responsável pela emissão dos raios de luz que irão ser "curvados" pelo objeto de fase. Em seguida observamos uma lente colimadora, que causa com que os raios que a atravessam se tornem paralelos entre si. Continuando a nossa análise na mesma direção temos em seguida a zona de teste, é neste zona que se deve colocar o objeto de fase que se pretende estudar. Seguidamente uma lente convergente faz com que, os raios que atravessaram as diferenças de densidade no espaço, sejam convergidos para um ponto focal. Nesse mesmo ponto focal, é colocada uma lâmina de corte, cuja função é obstruir a passagem dos raios refratados em um determinada direção. Por fim os últimos componentes deste alinhamento são a lente e a câmara utilizados para captar a luz que atravessa todo este alinhamento [7].

Agora que o leitor tem um conhecimento geral sobre como as técnicas e alinhamentos schlieren funcionam, é chegada a hora de introduzir as duas técnicas schlieren que irão ser utilizadas no decorrer da presente dissertação. Que são elas o sistema schlieren de espelho único, que foi utilizado por forma a obter resultados qualitativos de fenómenos em meios transparentes, este alinhamento é muitas vezes referido também como alinhamento autocolimador. O outro sistema utilizado foi um sistema de schlieren orientado para o fundo, do inglês *Background Oriented Schlieren*, ou tipicamente BOS. Este segundo alinhamento foi utilizado por forma a que com recurso a um pós processamento das fotografias obtidas, se pudessem extrair dados quantitativos das mesmas. Estes alinhamentos e processamentos serão discutidos em maior detalhe em capítulos seguintes.

1.2.2 Sistemas schlieren com recurso a lentes

Os sistemas schlieren construídos com base em lentes, foram os arquétipos de onde derivaram toda a panóplia de alinhamentos que existem hoje em dia, foram dos primeiros alinhamentos utilizados para este tipo de visualizações.

Devido ao facto de os objetos que se pretendem visualizar com esta técnica serem objetos muito ténues é necessário que as lentes utilizadas neste tipo de alinhamento tenham bons requisitos de acabamento/polimento (pelo menos $\lambda/2$, sobre o diâmetro da lente). Além disso, aquando do uso de sistemas schlieren que fazem uso de lentes, devem ser tidas em conta as aberrações cromáticas e esféricas, que são inerentes às lentes utilizadas. Quanto à presença de estrias ou marcas nas lentes, desde que sejam poucas, bem definidas e em sítios conhecidos, as mesmas não interferem de forma significativa com os resultados[8].

As aberrações esféricas estão normalmente presentes em lentes esféricas, que são utilizadas para fazer raios de luz convergir e este tipo de aberração afeta todo o campo de visão. Esta aberração surge devido ao facto que se considerarmos os diferentes raios de luz que se propagam paralelos ao eixo ótico, estes apresentam diferentes distâncias do respetivo eixo, o que causará com que a luz convirja em pontos diferentes, ou seja existirão vários pontos focais diferentes, e zonas de entropia luminosa, por forma a podermos minimizar este tipo de aberração o diâmetro da lente deve também ser minimizado, aproximando assim todos os raios do eixo ótico.

As aberrações cromáticas derivam da incapacidade de uma lente de focar eficientemente todos os diferentes comprimentos de onda que estão presentes em um raio de luz, o que significa que alguns comprimentos de onda se possam apresentar desfocados após um raio de luz atravessar uma lente[9].

1.2.3 Sistemas schlieren com recurso a espelhos

Os sistemas schlieren com recurso a espelhos, são os sistemas mais utilizados hoje em dia e tal como nos sistemas com lentes, também devemos ter alguns requisitos em relação à forma do espelho e ao seu nível de acabamento/polimento. Em termos de forma, é necessário um espelho convexo ou esférico por forma a serem obtidos os resultados esperados, em alguns alinhamentos são utilizados mais do que um espelho, quando tal acontece deve ser tido o cuidado de que os espelhos utilizados sejam gémeos[8].

Em termos de polimento, diferentes autores têm utilizado diferentes níveis de polimento mas Holder et. al. [10] recomenda um nível de polimento mínimo de $\lambda/4$ por cada vinte e cinco milímetros de diâmetro do espelho.

Por forma a serem evitadas aberrações no espelho, deve ser tido em consideração a razão entre a distância focal do espelho e o seu diâmetro, ainda segundo Holder, estes valores devem estar entre 6 e 12. Também devemos ter em conta que a maioria dos espelhos são desenhados para aplicações no eixo e portanto, caso a fonte de luz ou a câmara estejam desviados do eixo ótico, surge uma aberração denominada, aberração vírgula, que causa que a imagem produzida não tenha uma iluminação uniformemente distribuída. Uma das vantagens do uso de espelhos para a construção de sistemas schlieren é que estes, ao contrário das lentes não produzem qualquer tipo de aberração cromática, uma vez que nos espelhos o índice de refração não é função do comprimento de onda do raio de luz [9].

1.2.4 *Background oriented schlieren*

Este tipo de alinhamento é o mais recente avanço nas técnicas de schlieren. A diferença principal deste tipo de sistemas para os mencionados anteriormente reside na simplicidade do alinhamento e no tratamento que as imagens recolhidas necessitam. Esta técnica ao contrário das técnicas schlieren com luz paralela, mencionadas anteriormente, não faz uso de material ótico como espelhos ou lentes, o que a torna bastante mais económica e portátil do que as mencionadas anteriormente[11].

O campo de visão neste tipo de schlieren não é limitado pelo diâmetro de espelhos ou lentes, mas sim pelo tamanho do fundo utilizado, geralmente são utilizados dois tipos de fundos nesta técnica, sendo um deles os fundos sintéticos, geralmente impressos e retro iluminados por lâmpadas. Sendo os outros os fundos naturais como, campos agrícolas, superfícies rochosas e até mesmo o disco do sol, estes permitiram aos experimentalistas captar fotografias de objetos e fenómenos de dimensões várias vezes superiores ao permitido pelas técnicas com recurso a espelhos ou lentes, tais como aviões [12],[13].

Apesar de tudo esta técnica também apresenta algumas limitações, por exemplo, devido ao facto de ser necessário o uso de softwares de *cross correlation*, capazes de avaliar pares de imagens, causa com que a resolução das imagens obtidas seja inferior à das obtidos por técnicas schlieren tradicionais com recurso a espelhos, devido ao facto de os softwares fazerem uma média na sua janela de interrogação[14]. Por forma a aumentar a sensibilidade da técnica BOS é necessário aumentar a janela de interrogação utilizada no software de *cross correlations*, mas esse aumento deve ser ponderado, uma vez que o mesmo poderá causar perda de resolução na imagem obtida [15].

Outra das maiores dificuldades encontradas na técnica BOS é a obtenção de um bom foco simultâneo, no fundo e no objeto de fase a ser estudado, isto implica que a câmara utilizada tenha uma profundidade de campo suficiente para abarcar a distância a que estes dois se encontram um do outro, com um foco razoável [14].

1.3 Atuadores a plasma

Iremos agora explorar a motivação por detrás da construção de tais sistemas de visualização de escoamento. Motivação essa que advém da necessidade do estudo mais detalhado das propriedades e características do escoamento induzido por um atuador a plasma do tipo DBD, *Dielectric Barrier Discharge*, descarga sobre barreira dielétrica.

Existem diversas implementações de atuadores a plasma mas na presente dissertação apenas iremos estudar o tipo DBD, e como tal podemos então ver na figura abaixo a constituição de um atuador a plasma deste tipo. O funcionamento destes dispositivos baseia-se na ionização do ar através de uma tensão alternada elevada, como podemos ver os atuadores a plasma do tipo DBD, consistem essencialmente em dois elétrodos, um exposto e outro coberto, separados por uma camada de material dielétrico, camada esta que impede a formação de um arco elétrico entre os elétrodos positivo e negativo, e permite ainda a acumulação de gás ionizado nas proximidades do elétrodo exposto. Na figura 1.3, podemos observar que os elétrodos devem ser ligados a uma fonte de corrente alternada, com alta tensão e frequência, sendo que o elétrodo exposto deve ser ligado ao terminal positivo e o elétrodo coberto ou encapsulado deve ser ligado ao terminal negativo [16].

Os mecanismos através dos quais se dá a formação de plasma, são tema, ainda hoje, de debate entre a comunidade científica, uma vez que existem diversas teorias explicativas deste

Uma abordagem experimental ao vento iónico gerado por um atuador a plasma

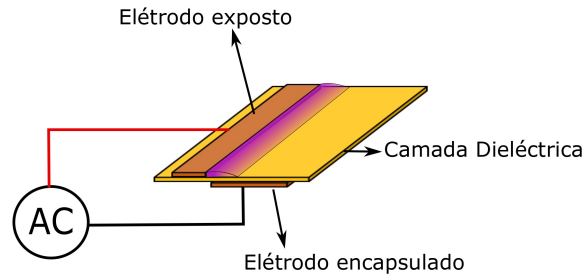


Figura 1.3: Esquema representativo da estrutura e dos elementos constituintes de um atuador a plasma, adaptada de [1].

fenómeno. Apesar de tudo é consensual que a formação do plasma se deva à interação entre as partículas ionizadas, e partículas em repouso do meio envolvente. Existem na literatura [17], [18], diversas tentativas de modelar atuadores a plasma do tipo DBD com o objetivo de simular os princípios físicos subjacentes ao processo de ionização que ocorre nestes dispositivos. A existência de uma força mássica, *body force*, explica com relativa precisão o efeito de formação do plasma à escala macroscópica, iremos portanto em secções mais adiante explorar a natureza desta força e como a mesma se relaciona com os mecanismo de formação de plasma.

Para a construção destes dispositivos, são geralmente usados, como materiais dielétricos, Kapton, Teflon, vidro de quartzo ou cerâmica Macor, sendo que os dois primeiros por se encontrarem comercialmente na forma de fitas, são fáceis de manipular simplificando portanto o processo de construção destes dispositivos e tornando-os uma escolha popular entre os experimentalistas da área. Apesar da listagem de materiais acima, o que deve ficar claro para o leitor é, que se procura para este componente do atuador a plasma um material com propriedades isolantes. Quanto aos eletrodos é corrente o uso de fita de folha de cobre [16],[19].

1.4 Objetivos e contextualização do estudo proposto

O presente estudo surge da necessidade de caracterização e avaliação do escoamento induzido por um atuador a plasma do tipo DBD, tal como das suas capacidades térmicas, a importância desta caracterização reside no facto de a mesma possibilitar um projeto mais eficiente, detalhado e direcionado deste tipo de atuadores [20],[1]. Para esse fim são propostas ao decorrer da presente dissertação, duas técnicas de visualização de escoamento diferentes. Sendo uma delas com propósitos de avaliação qualitativos e outra com propósitos quantitativos. Por forma a testar as técnicas propostas foram então projetados e construídos e testados os respetivos alinhamentos óticos diferentes. É também descrita a metodologia de processamento de dados com vista à obtenção de um campo de densidades e temperaturas referentes ao escoamento induzido pelo atuador a plasma.

Pretende-se então no presente estudo o projeto e construção, de um sistema de visualização de escoamento ótico, suficientemente sensível por forma a possibilitar a visualização e posterior extração de dados quantitativos, referentes ao escoamento induzido de um actuador a plasma do tipo DBD, também ele projetado e construído no laboratório do ClusterDEM.

A presente dissertação tem também como objetivo realizar uma análise, fisico-matemática, necessária à extração de dados de sistemas schlieren. Tal como posteriormente elaborar um có-

Uma abordagem experimental ao vento iônico gerado por um atuador a plasma

algoritmo computacional que permita a extração de dados qualitativos a partir de imagens capturadas com recurso às técnicas schlieren.

Tem-se também como objetivo, o estudo e análise do comportamento do escoamento induzido, produzido por atuadores a plasma do tipo DBD em regime estacionário, tal como em regime não estacionário, nomeadamente nos momentos iniciais de formação do dito escoamento.

Capítulo 2

Revisão bibliográfica

Pretende-se com o presente capítulo realizar um enquadramento do trabalho realizado, dando ao leitor uma perspetiva da evolução e do estado atual do conhecimento no que diz respeito aos meios óticos de visualização de escoamento, . Serão aqui abordadas as diferentes temáticas estudadas.

2.1 O schlieren ao longo da história da ciência e da tecnologia.

Os métodos óticos de visualização de escoamento, têm estado presentes na mecânica de fluidos experimental há já bastante tempo, e têm desempenhado um papel crítico para o avanço do conhecimento nesta área ao longo da história.

A primeira imagem Schlieren de que existe registo, é atribuída ao Dr. Robert Hooke em 1672, pouco depois da invenção do microscópio e do telescópio. Certo dia enquanto estudava um processo de avaliação de qualidade de lentes, Hooke, teve a oportunidade de observar com recurso a duas velas e uma lente, as diferenças no índice de refração do ar causadas pela chama de uma das velas. Sendo que esta estaria a ser iluminada pela referida, segunda vela que se encontrava atrás desta a uma distancia considerável.

Apesar da sua descoberta, ninguém investigaria este assunto até décadas mais tarde, Foucault apresentar à comunidade científica o teste da lâmina. Destinado também este, uma vez mais, ao teste de defeitos em lentes, sendo que este teste representa o primeiro uso de um mecanismo de bloqueio de raios refratados, que se veio a provar mais tarde como uma prática fundamental para o desenvolvimento dos métodos óticos aqui sujeitos a análise. [21]

Inspirado no trabalho trabalho de Foucault, aquele que se assumiu como o pai da técnica Schlieren, August Toepler, viu na prática de bloqueio de raios refratados potencial para estudar mais do que apenas aberrações nas lentes. Explorando então a mesma no sentido de a tornar um instrumento científico, capaz de revelar as diferenças de densidade de um meio, ao olho humano. Sendo assim responsável pela criação de um dos primeiros alinhamentos de schlieren de sempre, que ficaria imortalizado como o alinhamento de Toepler.[22]

Esta técnica viria a auxiliar anos mais tarde Ernst Mach nos seus estudos no campo da aerodinâmica supersónica, permitindo-lhe visualizar fenómenos como as ondas de choque em torno de uma bala ou ver pela primeira vez na história da humanidade um jato supersónico [23] [24]. Já no século 20 um dos maiores impulsionadores dos métodos óticos de visualização foi Hubert Schardin, apaixonado pela Física de alta velocidade e tubos de choque, deixou-nos na sua obra mais notória [25], uma vasta panóplia de alinhamentos óticos shlieren, com vista à visualização e estudo de escoamentos supersónicos que ainda hoje são utilizados, foi também o responsável pela criação de um novo método schlieren que viria a ser popularizado como rainbow schlieren. Aplicou estas técnicas aos mais variados casos de estudo, foi durante a segunda guerra mundial quando era diretor do instituto de balística e física técnica da Luftwaffe que nos deixou um outro grande contributo na área [26].

Não poderíamos claro falar de métodos óticos sem mencionar Jack North, que introduziu

às técnicas de schlieren uma alternativa à lâmina de corte de raios refratados com os filtros de gradiente e mais tarde os filtros multicolor .[27] [28] Além disso, em conjunto com D.W. Holder que estudava na altura o tema do voo a velocidades transónicas, criaram uma das obras consideradas mais importante na literatura subordinada a esta temática, onde concentram o conhecimento adquirido ao longo do seu trabalho relativamente a estas técnicas e boas práticas a elas associadas[29].

Mais recentemente devemos também destacar o trabalho desenvolvido por Weinstein nas técnicas de Schlieren com um campo de visão amplo, o mesmo conseguiu ultrapassar uma das maiores dificuldades impostas por esta técnica, que é precisamente as dimensões do objeto de estudo serem necessariamente reduzidas.

Weinstein inspirado pelo trabalho dos seus predecessor científicos, decidiu usar o sol como a sua fonte de luz, sendo que este se encontra imensamente distante (150 milhões de quilómetros distante, para ser mais preciso), usando um alinhamento de lentes e um sistema de corte dentro de um telescópio, Weinstein fotografou um avião que realizava um voo a uma velocidade superior à do som. Assim sendo as ondas de choque criadas pelo jacto T-38 foram registadas nas imagens capturadas por Weinstein, sendo que esta foi na altura a imagem Schlieren com maior campo de visão alguma vez capturada[30].

2.2 O schlieren na atualidade

Após conhecermos a história por detrás da técnica Schlieren, tal como algumas das personalidades científicas que com recurso à mesma empurraram a ciência e a tecnologia um pouco mais avante. Devemos agora referir que a revolução digital, que tão bem conhecemos, que remoldou, como se de barro se tratasse, a sociedade, naquilo que hoje conhecemos como sociedade moderna. Como toques cuidadosos de mão de oleiro a revolução digital teve o seu impacto e causou alterações mais ou menos profundas em todos os campos da ciência em geral, e nas técnicas óticas de visualização de escoamento em particular, muniu-nos de ferramentas como câmaras de alta velocidade e resolução, softwares de tratamento e processamento de imagens, entre muitas outras, graças às quais a técnica Schlieren foi capaz de evoluir no sentido de produzir resultados não só qualitativos mas também quantitativos, o que a coloca em um novo patamar de importância académica.

A técnica schlieren tem sido utilizada nas mais diferentes áreas do conhecimento, sendo que, a sua vertente quantitativa, tem a maior expressividade na área da colorimetria e transferência de calor, Alvarez Herrera et al. [31], deixa-nos uma leitura compreensiva sobre a obtenção de campos de densidades e temperaturas, a partir de imagens schlieren captadas com recurso a um alinhamento, geralmente referido como, alinhamento tipo Z, que envolve a utilização de dois espelhos parabólicos, a técnica proposta faz uso de um processo de calibração capaz de relacionar diretamente níveis de intensidade de cada pixel com a posição da lamina de corte, permitindo assim o calculo do ângulo de refração e posteriormente os parâmetros de interesse já referidos. Também na área da propulsão as técnicas schlieren tornaram-se um ferramenta muito útil permitindo o estudo quantitativo e qualitativo dos escoamentos causados por propulsores. Em [32] podemos ver como a referida técnica pode ser utilizada por forma a avaliar e otimizar jatos propulsores de acordo com as características do escoamento induzido pelos mesmos, o referido escoamento é visualizado com recurso a um alinhamento schlieren do tipo Z, verificou-se nas fotografias schlieren obtidas que a variação da razão de pressão e do ângulo do jato, causam uma variação no escoamento induzido, cuja forma , que no seu ponto

ótimo se apresenta como um padrão de diamante, também varia apresentando padrões triangulares e retangulares. Mas para que não se fique com a ideia de que a técnica schlieren apenas permite o estudo de ondas de alta pressão, e para que o leitor tenha uma correta ideia da versatilidade da técnica, convém também referir que as ondas de baixa pressão, tal como as ondas sonoras, podem também ser visualizadas e estudadas com recurso a imagens schlieren, tal como fez Harvey em [33] onde com recurso a um alinhamento schlieren de espelho único, são captadas ondas sonoras em imagens schlieren e em seguida as imagens são processadas por forma a reconstruir o sinal correspondente à onda captada em imagem. Este sistema funciona portanto como um microfone schlieren, e permite a reconstrução de um campo de som sem necessitar de estar em contacto direto com ele.

Um dos avanços mais notáveis nas técnicas aqui sujeitas a análise, e que não podemos deixar de referir, é a criação da uma variante das técnicas schlieren, denominada de 'synthetic schlieren' pelo seu criador, que apresentou esta técnica à comunidade científica em [34]. Apesar de ter sido originalmente denominada como 'synthetic schlieren', devido ao facto de as fotografias capturadas necessitarem de um pós tratamento, com recurso a softwares de tratamento de imagem, por forma a revelarem as inhomogeneidades do meio, na verdade esta técnica viria mais tarde a ser popularizada e difundida com o nome 'Background Oriented Schlieren', ou BOS. A utilização desta técnica permite simplificar bastante os alinhamentos utilizados, uma vez que muitos dos componentes são aqui substituídos por técnicas e softwares de análise e tratamento de imagens. Ao contrário das técnicas schlieren suas parentes, no BOS não são utilizadas as lâminas de corte, nem os espelhos parabólico, ao invés disso é utilizado um fundo, que contenha um padrão e apresente um contraste considerável, uma fonte de luz e uma câmara. Em adição a isso a técnica BOS também nos permite obter campos de visão maiores quando comparados com os obtidos pelas técnicas schlieren tradicionais, uma vez que o campo de visão nestas últimas referidas técnicas se encontra limitado pelo diâmetro do espelho, ou espelhos, utilizados nos alinhamentos.[35].

Devido às suas características, a técnica BOS, quando combinada com técnicas de tomografia permite a visualização e análise de escoamentos em três dimensões, um dos mais notáveis exemplos de aplicação do referido método foi produzido por Raffael et al. [36], onde foram visualizados e posteriormente, analisados os vórtices criados pelas lâminas das hélices de um helicóptero, tal como os campos de densidades criados em torno das mesmas. Raffael realizou diversos estudos, tanto durante o voo em frente a alta velocidade, como durante o voo curvando a alta velocidade do helicóptero, como com o helicóptero pousado, com recurso a esta técnica. Os estudos por ele realizados permitiram uma avaliação do desempenho da hélice e contribuíram em muito para o projeto e otimização do helicóptero BO 105 , o facto de a técnica BOS ser portátil o suficiente por forma a ser possível a realização de ensaios durante o voo da máquina e portanto durante o seu funcionamento pleno, permitiu uma análise bastante precisa e completa não só do comportamento dos vórtices em torno das hélices, mas como também das interações entre estes e eliminou sérias restrições que são geralmente impostas por testes realizados com o helicóptero em repouso[37].

2.3 Atuadores a plasma para o controlo de escoamento

Os atuadores a plasma do tipo DBD, são o tipo de atuadores a plasma hoje em dia mais estudado pelas mais variadas razões, mas algumas das quais consistem em características do dispositivo como o facto de este apresentar uma massa, volume e consumos energéticos re-

duzidos, enquanto ao mesmo tempo é capaz de apresentar tempos de resposta reduzidos. A sua arquitetura também se mostra robusta uma vez que este dispositivo não apresenta partes mecânicas móveis[38] [39].

Um dos maiores campos de aplicação de atuadores a plasma do tipo DBD é no controlo da separação do escoamento. Elisa Pescini et. al. [40], deixa-nos um estudo atual e compreensivo sobre as capacidades dos atuadores a plasma em atrasarem a separação do escoamento. Com recurso a um perfil LPT, guia-nos através das suas experiências, uma série de extensos ensaios em túneis de vento e com recurso a técnicas como a velocimetria de partículas, de onde resulta uma demonstração das capacidades dos DBD's para diferente ângulos de ataque do perfil e velocidades do escoamento externo, de evitar a separação do escoamento em torno do mesmo.

Controlo da esteira também é um assunto muito estudado no campo dos DBD's, Thomas et al. [41] deixa-nos estudos sobre a influencia dos atuadores DBD, na esteira criada pelo escoamento em torno de um cilindro, tendo conseguido reduzir significativamente o tamanho e velocidade desta, com recurso a DBD's montados na superfície do cilindro. São também abordados neste estudo parâmetros como a influencia do número de Reynolds no desempenho do DBD, e são propostas algumas geometrias de disposições do DBD's por forma a ampliar as capacidades dos DBD's.

Apesar de a maioria das aplicações dos atuadores a plasma DBD, se encontrarem no campo do controlo de escoamento, não significa que estas se limitem a isso, aliás estes dispositivos apresentam características que os permitem ser utilizados em outras áreas, como seja a de transferência de calor, uma das aplicações nesta área é no arrefecimento por película, do inglês, *Film Cooling*, que é um método de arrefecimento muito utilizado em turbinas de aviões, em que com recurso a uma película de ar são arrefecidas as lâminas da turbina. Jin-Lu Yu deixa-nos em [42], uma abordagem compreensiva a como os atuadores a plasma, podem ser utilizados por forma a otimizar este tipo de arrefecimento. Com recurso a uma simulação numérica é avaliada a forma como certas características inerentes ao DBD, como a velocidade do escoamento induzido, a potencia aplicada e o numero de atuadores utilizados, influenciam o processo arrefecimento.

Outra aplicação na área da transferência de calor, que encontramos para os atuadores a plasma, é na prevenção da formação de gelo e também no degelo de por exemplo asas de aviões. Frederico Rodrigues deixa-nos em [1], uma detalhada abordagem experimental ao mecanismos físicos que são inerentes à formação de calor, no atuador a plasma do tipo DBD. Com recurso a uma técnica inovadora, baseada em princípios calorimétricos, este autor quantifica a energia calorífica gerada pelos atuadores a plasma e investiga também a influência do material dielétrico utilizado, tal como a espessura do mesmo, neste fenómeno de geração de calor.

2.4 O schlieren aplicado ao estudo de atuadores a plasma

Na presente secção iremos abordar alguns realizados a atuadores a plasma do tipo DBD, *dielectric barrier discharge*, que tenham sido realizados com recurso a técnicas schlieren com o objetivo de enquadrar o leitor com o estudo experimental que será feito nos próximos capítulos. Como já vimos anteriormente as técnicas schlieren são sensíveis a variações na densidade de fluidos, o que o faz com que estas técnicas, sejam apropriadas para o estudo do escoamento induzido por atuadores a plasma, uma vez que este é derivado de diferenças de densidade existentes na zona de formação do plasma.

Cristofolini et. al. [43], utiliza um alinhamento schlieren com configuração do tipo Z, com

Uma abordagem experimental ao vento iônico gerado por um atuador a plasma

o objetivo de poder obter informações sobre o mecanismo de transferência de quantidade de movimento das partículas carregadas para as partículas neutras, que ocorre durante o processo de formação de plasma, em um atuador DBD, cujos eletrodos são feitos de cobre e o material dielétrico utilizado foi Teflon. Cristofolini, realiza estudos em atuadores funcionando em modo pulsado e também em modo contínuo, utilizando a técnica schlieren para visualizar e caracterizar a morfologia dos vórtices gerados, no funcionamento em modo pulsado. E propõe ainda a técnica schlieren, como forma de obtenção de informação sobre os campos de velocidades associados aos escoamento induzido do DBD. Demonstrando para isso uma relação de proporcionalidade entre a velocidade do escoamento induzido na direção perpendicular ao eletrodo exposto e a densidade do ar.

Bal Krishan e P.K. Panigrahi aprofundam em [44], com recurso a um alinhamento schlieren do tipo Z, o estudo e caracterização dos vórtices formados por um atuador DBD quando este funciona em modo pulsado. Foram avaliados neste estudo os efeitos da amplitude do sinal aplicado e do duty cycle do mesmo no processo de formação de vórtices. Em adição às técnicas schlieren, neste estudo foram também utilizadas técnicas PIV, *Particle Image Velocimetry*, que quando combinadas com os dados recolhidos das fotografias schlieren, permitem obter uma distribuição espacial do campo de velocidades do escoamento induzido pelo atuador a plasma.

Foram registadas neste estudo diferenças entre os três primeiros vórtices formados em modo pulsado. Sendo que apresentam entre eles diferentes tamanhos e uma evolução diferente. Graças às técnicas PIV utilizadas, foi possível perceber que o primeiro vórtice formado se desloca com uma velocidade inferior à dos vórtices seguintes. É por fim estabelecida uma comparação entre o funcionamento em regime pulsado e contínuo. Onde se conclui que em regime contínuo, são obtidas velocidades maiores na direção do escoamento induzido do que em modo pulsado, mas em modo pulsado obtemos uma espessura muito superior para o escoamento induzido do que em modo contínuo.

Atsushi komuro et. al. [38] deixa-nos um estudo onde, com recurso à técnica schlieren, e com o objetivo de estudar a área do controlo de escoamento com recurso a atuadores a plasma, avalia o comportamento do escoamento em torno de um perfil de uma asa NACA0015. O comportamento deste é avaliado em duas situações com condições diferentes, sendo uma com o perfil da asa simples e outra mantendo todas as condições exepcto de que é aplicado um atuador a plasma do tipo DBD na parte frontal da asa. Deste estudo surgem vários resultados de onde o autor concluiu que o ângulo de ataque da asa era determinante para a maneira como o DBD irá afetar o escoamento, para além de que o escoamento induzido por um atuador a plasma é constituído por uma zona de aquecimento e uma zona de escoamento induzido, sendo que ambas interagem com o escoamento externo e por vezes entre si, dependendo do ângulo de ataque do perfil da asa, são também propostos diversos trabalhos futuros, por forma a aprofundar o conhecimento nesta área.

Capítulo 3

Conceitos teóricos

Agora que o leitor está familiarizado com as técnicas que aqui irão ser utilizadas e com o objeto de estudo da presente dissertação, tal como enquadrado historicamente com os estudos realizados no passado distante e menos distante, que fizeram uso da presente técnica, é então necessário agora aprofundar um pouco mais o nosso conhecimento relativo a estas mesmas técnicas, por forma a sermos capazes de projetar um sistema schlieren, sensível o suficiente, para detetar as diferenças de densidade, causadas no ar circundante por um atuador a plasma do tipo DBD. Neste capítulo serão introduzidos conceitos indispensáveis à compreensão e descrição dos sistemas que se pretendem montar.

3.1 Teoria dos atuadores a plasma do tipo *DBD*

Os atuadores a plasma DBD, são dispositivos capazes de ionizar localmente o ar através de um campo elétrico, desta ionização resultam iões livres, que devido ao campo magnético presente são acelerados, assumindo o sentido e direção do referido campo, estes aceleram por sua vez, o ar adjacente à superfície do DBD, criando-se assim o fenómeno conhecido como vento iónico.

O processo de formação do plasma e consequentemente do vento iónico, pode ser explicado tendo em conta o ciclo da tensão aplicada, como fazem Corke e Ferry em [45] e [16] respetivamente, onde nos explicam que, durante a primeira metade do ciclo da tensão, ou seja à medida que o eléctrodo exposto vai ficando mais negativo, os eletrões deslocam-se do eléctrodo exposto para a superfície do dielétrico, ocorrendo durante este processo colisões entre eletrões e colisões entre eletrões e moléculas de ar. À medida que os eletrões carregam o material dielétrico, o potencial deste vai aumentando, quando este iguala o potencial do eléctrodo exposto cessa a formação de plasma. Na segunda metade do ciclo da tensão o eléctrodo exposto é carregado positivamente, o que causa agora uma deslocação dos eletrões do material dielétrico para o eléctrodo exposto, causando novamente a colisão de partículas e a ionização das partículas neutras formando novamente plasma. Podemos agora entender que o processo de formação de plasma ocorre duas vezes a cada ciclo da corrente, apesar do seu carácter intermitente, como estes dispositivos são geralmente operados a altas frequências, na ordem dos kHz, ou por outras palavras, na ordem dos milhares de ciclos por segundo, não é visível esta intermitência ao olho humano. Abaixo na figura 3.1 podemos ver uma esquematização do processo acima referido.

Devemos ainda referir, para que o leitor não fique com uma ideia reduzido do modo de funcionamento destes dispositivos, que os mesmo podem ser atuados de forma estacionaria ou não estacionária. Sendo que na primeira, os dispositivos são continuamente alimentados com um sinal de alta tensão e frequência de corrente alternada, enquanto no segundo o sinal apresenta um comportamento intermitente alternando entre o estado ligado e desligado, de acordo com o pretendido pelo experimentalista [46].

Por forma a explicarmos a formação do vento iónico, devemos referir que o ar adjacente à superfície do DBD é acelerado devido à transferência de quantidade de movimento dos iões para o ar circundante. Os processos através dos quais essa transferência de quantidade

Uma abordagem experimental ao vento iónico gerado por um atuador a plasma

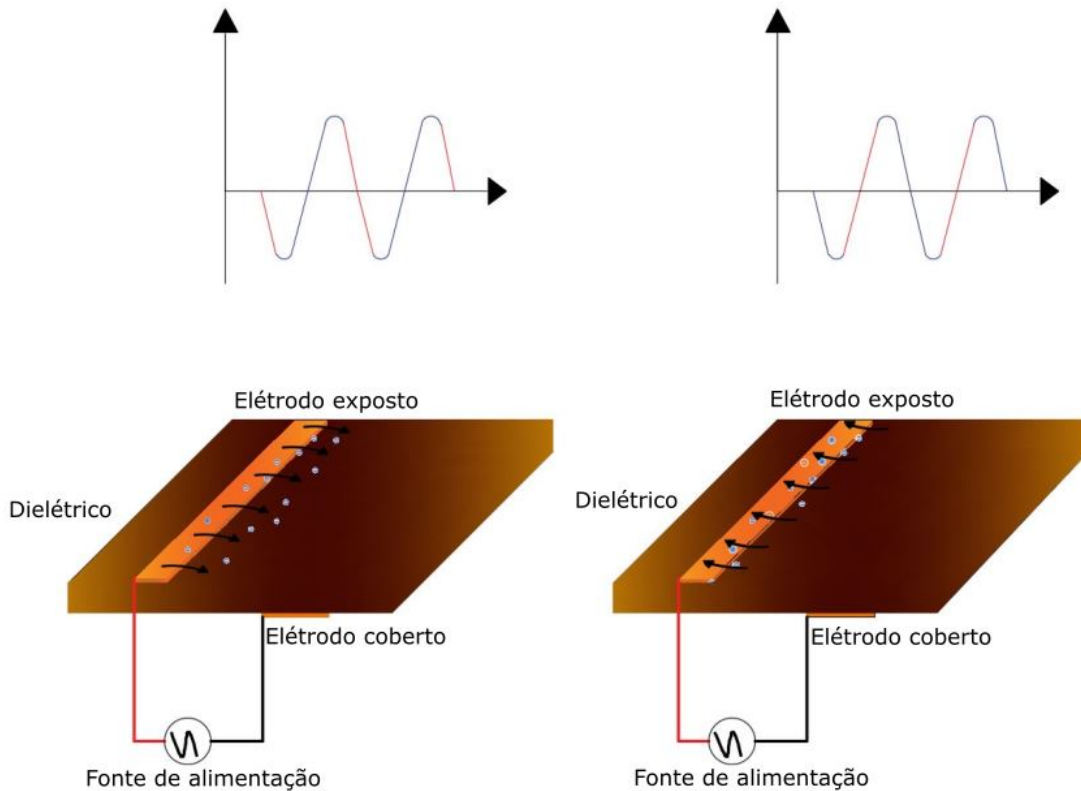


Figura 3.1: Representação esquemática do funcionamento de um atuador a plasma do tipo DBD, à esquerda emissão de electrões do eléctrodo exposto para a camada dieléctrica; à direita, emissão de electrões da camada dieléctrica para o eléctrodo exposto; a vermelho nos gráficos da tensão encontram-se identificados os momentos em que se verifica os fenómenos ilustrados.

de movimento ocorrem são na literatura modelados como uma *body force*, força mássica [47]. Sendo esta proporcional à amplitude da tensão aplicada e do volume de plasma formado na superfície do atuador, esta força é representada por um vetor que se orienta segundo o gradiente do campo eléctrico. Segundo Post & Corke et. al. [45] podemos então expressar força por volume de plasma como um vetor, cujo módulos nos é dado pela equação abaixo.

$$F_B = \left(-\frac{\varepsilon_0}{\lambda_D^2} \phi\right) \vec{E}. \quad (3.1)$$

Em que ε_0 representa a permissividade do vácuo, sendo que a permissividade refere-se à capacidade que um determinado meio tem de se polarizar aquando da existencia de campos eléctricos externos, λ_D representa o comprimento de Debye, esta grandeza é muito utilizada em plasmas, como medida de quão longe se propagam os efeitos electroestáticos associados a uma carga presente no plasma, ϕ o potencial eléctrico uma unidade de medida da capacidade que um determinado corpo tem de atrair ou de repelir cargas, ou seja de realizar trabalho. \vec{E} o vetor do campo magnético que é por sua vez, dado por:

$$\vec{E} = -\vec{\nabla} \phi. \quad (3.2)$$

3.1.1 Métodos experimentais para estimar o consumo energético de atuadores a plasma

A caracterização elétrica dos atuadores a plasma do tipo DBD, constitui uma ferramenta de extrema importância, no que à avaliação do desempenho e comparação do mesmo entre atuadores diz respeito. Devido às características inerentes ao sinal de entrada do atuador a plasma, a potência não pode ser medida diretamente, com recurso a material experimental convencional, como é o exemplo de um multímetro. Foram portanto desenvolvidos métodos experimentais para a determinação do mesmo. Na presente dissertação iremos abordar e utilizar, para caracterizar os nossos atuadores a plasma, o método da corrente elétrica [48],[49],[2].

No método da corrente, por forma a se poder determinar a potência instantânea, devem primeiro ser capturadas as formas de onda da tensão e da corrente. Em seguida através de uma multiplicação ponto a ponto destas duas, é então obtida a potência instantânea para um conjunto de instantes de tempo, com recurso à formulação abaixo indicada.

$$P_a(t) = V(t) * I(t). \quad (3.3)$$

Onde $V(t)$ representa a tensão de entrada ao terminais do atuador, $I(t)$ representa a corrente e por fim $P(t)$ é a potência instantânea. Após obtidas as várias potências instantâneas podemos então estimar a potência média em n_p períodos (T_c) da corrente, com recurso à formulação abaixo apresentada.

$$\bar{P}_a = \frac{1}{n_p T_c} \int_0^{n_p T_c} V(t) * I(t) dt. \quad (3.4)$$

Geralmente por forma a se obterem as formas de onda da tensão, é utilizada uma sonda de alta tensão, que é colocada em volta do cabo que liga ao terminal positivo do atuador a plasma. A forma de onda da corrente pode ser obtida, utilizando uma resistência ligada em série com o actuador, como podemos ver na imagem abaixo apresentada.

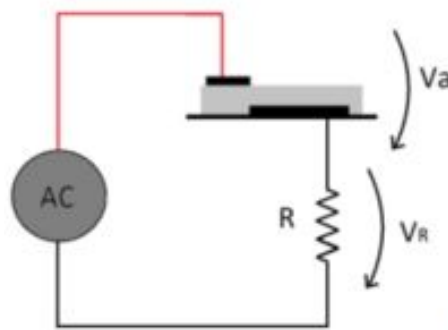


Figura 3.2: Diagrama do circuito elétrico, utilizado por forma a estimar as potências dos atuadores a plasma, utilizando o método da resistência. Adaptada de [2]

Neste método é colocada uma resistência, com um valor conhecido R , entre o eletrodo coberto e o *ground*. A colocação deste resistência permite então a medição da tensão através de métodos convencionais, uma vez que a tensão na resistência apresenta valores baixos o

suficientes para tal. Para este método podem ser utilizadas resistências com valores na gama dos 1 a 100 Ohms. Uma vez que a impedância das resistências é muito baixa quando comparada com a do atuador a plasma, esta não afeta então o funcionamento do dito atuador. Por fim a corrente é então calculada através da tensão medida na resistência, V_r , recorrendo à lei de Ohm.

3.2 Efeitos óticos

Seguindo Eustace et al. [9], a luz é constituída por várias frentes de onda. Essas frentes de onda, consistem em propagações energéticas, que se deslocam de um ponto, a sua fonte, para um outro ponto. As frentes de onda apresentam características tais como, uma fase constante ao longo de toda a onda e oscilações periódicas, na direção de propagação da frente de onda.

Em ótica geométrica, é assumido que a luz se propaga numa direção bem definida. O caminho que esta radiação eletromagnética segue pode ser denominado de raio de luz. Um raio de luz é uma maneira simplificada de idealizar as frentes de onda. Os raios possuem direção e não possuem fase, o que significa que os raios não interagem entre si. Raios de luz tal como ondas, possuem uma fonte e uma direção de propagação e devem ser representados em diagramas óticos como linhas finas com setas indicando a direção dos mesmos. Esta simplificação é feita com o intuito de melhor entender o comportamento geométrico, da propagação no espaço, das ondas eletromagnéticas que compõem a luz. Devemos ainda acrescentar que em meios homogêneos os raios de luz propagam-se em linha reta.

Os métodos óticos de visualização de escoamento, como já foi referido anteriormente são sensíveis a variações no índice de refração do meio sujeito a análise. Uma vez que o índice de refração de um meio está diretamente relacionado, com a densidade do mesmo, estes métodos tornam-se então ferramentas úteis, pela informação geométrica e espacial que nos oferecem. Informações sobre as variações na densidade e conseqüentemente, temperatura do fluido sob análise, informações essas que podem ser de natureza qualitativa, ou com o tratamento e poder computacional correto, podem também ser de natureza quantitativa.

Os métodos óticos de visualização de escoamento englobam diversas técnicas. Para que o leitor fique com uma pequena noção, a sombografia, schlieren, interferometria e PIV são algumas delas[50]. Sendo que as técnicas propostas no presente estudo pertencem à família das técnicas schlieren, e que as mesmas são sensíveis a variações do índice de refração de um determinado meio, torna-se então pertinente a definição de índice de refração, que matematicamente falando é dada pela equação abaixo apresentada.

$$n = \frac{c}{c_0}. \quad (3.5)$$

Na equação 3.5 temos presentes duas variáveis, que são eles, c_0 que corresponde à velocidade da luz no vácuo e c corresponde à velocidade da luz no meio de estudo, é de notar que o índice de refração é uma grandeza adimensional e que, no seu sentido prático, deve ser interpretado como o número de vezes menor que a velocidade de propagação da luz no meio de estudo é em relação à sua propagação no vácuo. A importância de este tipo de técnicas ser sensível às variações desta grandeza, advém do facto de o índice de refração de um material estar diretamente relacionado com a sua densidade e conseqüentemente ser portanto também dependente dos valores de temperatura do meio [51]. Essa relação direta que existe entre estas

Uma abordagem experimental ao vento iónico gerado por um atuador a plasma

duas grandezas é descrita pela equação de Clausius-Mosotti, equação essa que pode ser simplificada na equação de Gladstone-Dale 3.6, quando o meio de estudo em causa é gasoso, tal como se verifica no nosso estudo.

$$n - 1 = K\rho. \quad (3.6)$$

Sendo que ρ representa a densidade do gás sujeito a análise e K representa a constante de Gladstone-Dale, sendo que esta constante é dependente da composição do gás que estamos a estudar e também, mas muito menos significativamente, do comprimento de onda da luz que atravessa o referido gás. O termo do lado esquerdo da equação dá pelo nome de refratividade do gás e depende da temperatura, densidade e pressão do mesmo. [52]

O fenómeno de refração que ocorre na luz quando esta atravessa um objeto de fase, está bem descrito na literatura, Weyl at. al. [53], mostra-nos como se comporta a curvatura adquirida pelos raios de luz após atravessarem um objeto de fase e a sua dependência dos gradientes do índice de refração, que podem ocorrer na direção do eixo dos xx , yy ou zz . Se assumirmos que os desvios do eixo do zz , eixo ótico, sofridos pelo raio de luz são negligenciáveis, mas que determinados raios podem abandonar a zona de teste com uma curvatura não negligenciável, e também que os valores de dx/dz e dy/dz , são muito inferiores à unidade, podemos então descrever matematicamente a curvatura de um raio de luz pelas equações abaixo apresentadas [7].

$$\frac{\partial^2 x}{\partial z^2} = \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial x}, \quad \frac{\partial^2 y}{\partial z^2} = \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial y}. \quad (3.7)$$

A equação 3.7 descreve a curvatura de um raio de luz ao atravessar um objeto de fase com um determinado gradiente de índices de refração ($\frac{\partial n}{\partial n}$) segundo o eixo do x e outro segundo o eixo dos y . Realizando uma integração ao longo do eixo ótico, nas equações acima apresentadas obtemos então as respetivas componentes, x e y , da deflexão angular, que ainda tendo em conta o assumido anteriormente, que dx/dz e dy/dz são muito inferiores à unidade, são dadas pelas equações 3.8, abaixo apresentadas [52].

$$\varepsilon_x = \frac{1}{n} \int \frac{\partial n}{\partial x} dz, \quad \varepsilon_y = \frac{1}{n} \int \frac{\partial n}{\partial y} dz. \quad (3.8)$$

Da equação 3.8 e 3.7 podemos ver o desvio sofrido pelos raios de luz se dá em direção às zonas de maior índice de refração. Podemos ainda assumir, que para um objeto de fase, bidimensional, com um comprimento L ao longo do eixo ótico, que a deflexão angular é dada pela 3.9, onde n_0 representa o índice de refração do meio ambiente envolvente [52].

$$\varepsilon_x = \frac{L}{n_0} \frac{\partial n}{\partial x}, \quad \varepsilon_y = \frac{L}{n_0} \frac{\partial n}{\partial y}. \quad (3.9)$$

As expressões aqui apresentadas, contêm informações que nos irão acompanhar de todo o nosso estudo. É importante reter que a refração, o desvio dos raios da sua trajectória, é causado pela existência de gradientes, diferenças, no índice refrativo de um meio. O que nos leva a concluir que a técnica schlieren não tem capacidade de analisar meios homogéneos, em termos de índice de refração.

Nas equações acima apresentadas, são desconsideradas as possíveis interações entre os raios

de luz. Dependendo do caso de estudo do experimentalista, o uso de um feixe de luz coerente, paralela, pode não ser essencial uma vez que poucos fenômenos são dispersivos o suficiente para causar a separação cromática da luz[7].

3.2.1 O objecto de fase, “schliere”

Nesta secção pretende-se que o leitor conheça um pouco melhor, os objetos que são possíveis visualizar com recurso às técnicas schlieren. Vimos já no Capítulo 1, que a técnica schlieren é sensível a variações do índice de refração do ar, portanto podemos inferir que o nosso objeto de fase, será um objeto cujo índice refrativo apresentará uma diferença do índice refrativo do meio envolvente.

Os objetos de fase podem conter gradientes no índice refrativo, em várias direções. Os gradientes do índice refrativo podem estar orientados segundo o eixo dos xx , dos yy ou dos zz . Apesar de o caso tri-dimensional não ser abordado no decorrer desta dissertação, que se concentra essencialmente em métodos de análise do caso bidimensional. Por forma a realizar uma análise tri-dimensional é necessário recurso a técnicas como a holografia, tomografia e estereoscopia [54], [55].

Objetos de fase, ou schlires, podem ocorrer em vários tipos de materiais sejam eles sólidos líquido ou gasosos. resultam geralmente, no caso líquido e gasoso de diferenças de temperatura, grandes velocidades nos escoamentos ou devido à mistura de gases ou líquidos com características diferentes. No caso dos sólidos a existência de schlires, deve-se principalmente à formação de inclusões no material aquando do seu fabrico, ou a diferenças de espessura no mesmo[52].

3.2.2 A ótica paraxial

Ao longo do decorrer da dissertação, iremos utilizar várias vezes a aproximação paraxial, decidimos portanto que para que o leitor veja claramente o quadro que pretende aqui pintar, introduzir esse conceito. A ótica paraxial está incluída na ótica de primeira ordem, que se preocupa com o estudo e determinação das propriedades, de sistemas óticos perfeitos, desconsiderando a existência de aberrações, e considerando que, todos os raios de luz possuem um caminho ótico linear e que os ângulos de refração sofridos pelos mesmos são muito pequenos[56].

Apesar de sabermos, que os ângulos de refração causados por um objeto de fase são muito diminutos, consideramos que por forma a conceder não só conhecimento mas também, tato ao leitor, é importante que ele tenha noção do quão pequenos são os ângulos de refração causados por um objeto de fase. Nas técnicas schlieren uma refração de 200 arcsegundos, é considerada uma refração elevada, devemos referir ainda que os arcsegundos são uma unidade angular tipicamente utilizada em telescopia e 1 radiano corresponde a aproximadamente 206264.8 arcsegundos. Agora que temos noção do quão pequenos são os ângulos de refração existentes nas técnicas schlieren é intuitivo inferir, que os mesmos quando são expressos em radianos são essencialmente iguais aos valores das suas tangentes e dos seus senos, conseqüentemente o cosseno destes ângulos é aproximadamente 1. Sendo que estas aproximação são utilizadas no decorrer da presente dissertação [52].

3.2.3 O principio de Huygens

Este é um principio empírico, que afirma que, quando os raio de luz pertencentes a um feixe luminoso encontram um objeto de fase, um meio que apresenta uma densidade diferente

Uma abordagem experimental ao vento iônico gerado por um atuador a plasma

daquela do meio em que se propaga, os pontos na superfície do objeto de fase devem ser consideradas como fontes luminosas para a nova propagação que irá ser feita neste meio com densidade diferente. Além disso as frentes de onda propagam-se sempre à velocidade da luz local, ou seja, do meio em que estão inseridas. Aplicando este conceito às refrações que ocorrem em meios não homogêneos, este princípio diz-nos que um raio de luz é sempre dobrado em direção às zonas que possuem o maior índice de refração, o que nos meios gasosos significa consequentemente que todos os raios serão dobrados em direção a zonas que possuem uma densidade mais elevada. Este princípio define assim portanto qual a direção de um determinado ângulo de refração, quando um raio de luz encontra a fronteira entre dois meios com densidades diferentes, na nossa técnica esta fronteira representa a fronteira entre o objeto de fase e o meio circundante [57],[52].

3.3 Teoria da técnica schlieren

Pretendemos agora, com o conteúdo desta secção, que o leitor depois de ter entendido o comportamento, em termos de deslocação, da luz em uma determinada região no espaço, que pode ou não apresentar regiões com diferenças nos gradientes do índice de refração. Entenda também como iremos manipular a luz por forma torná-la nossa ferramenta, por forma a que a mesma nos revele o que a nossa modesta visão não enxerga e que dessa forma ilumine não só os nossos olhos como também as nossas mentes. Esta secção pretende dar ao leitor um perspectiva, sobre aspetos técnicos referentes aos alinhamentos schlieren. Aspetos essenciais relacionados com os diversos componentes e a interação entre os mesmos. Apesar de existirem alguns equipamentos schlieren comerciais, prontos a montar e utilizar, a grande maioria dos alinhamentos utilizados hoje em dia são ainda "caseiros", o que, apesar de tudo, contribuiu em muito para o avanço desta técnica, uma vez que está inerente à mesma um espírito *maker*, faça você mesmo, que inspira criatividade nos experimentalistas e que permitiu que estas técnicas se mantivessem atuais ao longo da história, uma vez que surgem constantemente os mais diversos tipos de alinhamentos óticos e técnicas de processamento de dados.

Por forma a entendermos os princípios óticos associados ao método schlieren acompanhemos agora a nossa leitura com a figura 3.3 que representa, talvez o alinhamento schlieren mais simples alguma vez montado, mas que ilustra em toda a sua simplicidade, perfeitamente bem o conceito físico que torna toda esta técnica possível.

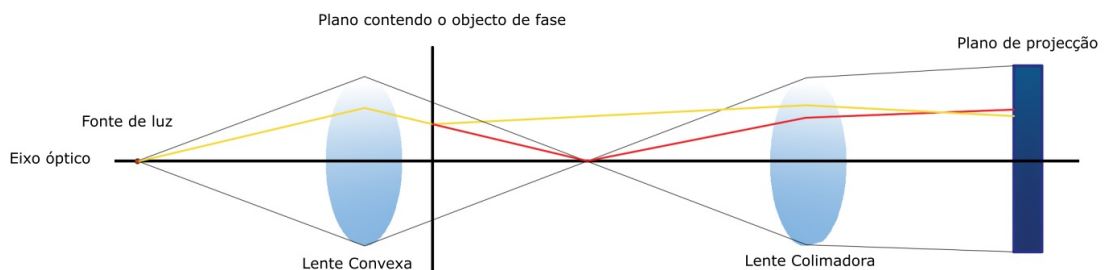


Figura 3.3: Esquema exemplificativo dos princípios óticos associados à técnica schlieren; A amarelo a trajetória de um raio de luz genérico, considerando a não existência do objeto de fase; A vermelho a trajetória do mesmo raio genérico, considerando desta vez a influência do objeto de fase na mesma.

Como podemos ver na figura 3.3 é importante notar que o plano onde se encontra o objeto de fase e o plano de projeção são simétricos em relação à lente convexa. O que significa que todos os raios de luz irão intersectar estes dois planos da mesma forma e mantendo a sua posição relativa entre si, o que, distanciando-nos dos termos óticos que o rigor científico exige, significa, que no plano de projeção será formada uma imagem do plano onde se encontra o objeto de fase. Esta formação de imagem é um fenómeno independente do desvio que os raios de luz sofrem ao atravessarem o objeto de fase. Caso não existisse qualquer objeto de fase neste alinhamento, a imagem que se iria formar no plano de projeção seria a imagem da fonte de luz, devido à existência de um objeto de fase, os raios que atravessam o mesmo, são desviado da sua trajetória, o que faz com que os mesmos, quando abandonam o objeto de fase, o façam com um determinado ângulo, denominando desvio angular, devido a este desvio a imagem que este raio irá formar no plano de projeção irá apresentar uma posição que está deslocada um certa distância das imagens dos restantes raios, sendo que esta distancia depende do desvio angular sofrido pelo raio em questão [58].

O facto de estes sistemas serem maioritariamente caseiros também levou a um extensivo estudo e aperfeiçoamento dos diversos componentes constituintes destes sistemas. Como já foi visto anteriormente os sistemas schlieren baseiam-se em alinhamentos óticos, capazes de ampliar e tornar visíveis os fenómenos refrativos em um determinado meio, fazem parte deste tipo de alinhamentos, componentes como fontes luminosas, espelhos, lentes, lâminas e câmaras. Falaremos nas subsecções que se seguem um pouco mais sobre estes componentes.

3.3.1 As fontes de luz utilizadas nas técnicas schlieren

Como é já sabido pelo leitor os alinhamentos schlieren necessitam de uma fonte de luz, como é também reforçado pela figura 3.3. Idealmente deveria ser usada uma fonte de luz com as dimensões o mais pequenas possível. Denominada de *point light source*, fonte de luz pontual, na prática essas fontes de luz foram conseguidas até meados do século XX, pelos experimentalistas socorrendo-se de tubos de xénon, lâmpadas de filamentos incandescentes, lasers entre outros. Obstruindo toda a luz e deixando apenas uma abertura, o mais pequena possível por onde passaria a luz produzida pela lâmpada[8]. No entanto desde o início do século XXI, com o desenvolvimento da tecnologia LED, *light emitting diode*, as fontes de luz utilizadas nos sistemas schlieren têm-se cada vez mais baseado nesta tecnologia. Uma vez que cada vez mais esta, é assumida como fonte de luz científica, tendo o seu desempenho já sido extensamente testado na literatura [59],[60],[61].

Nos dias de hoje existe uma variada gama de LED's disponíveis no mercado, podendo portanto ser difícil, para o iniciante das técnicas schlieren escolher o adequado às suas necessidades. Aquando desta escolha o mesmo deve ter em atenção as seguintes características do LED, diâmetro do emissor, comprimento de onda da luz emitida, intensidade luminosa e ângulo de emissão do feixe luminoso. Em termos do diâmetro do emissor, o experimentalista deve optar pelo menor diâmetro possível, sendo recomendado que no máximo o diâmetro do mesmo não ultrapasse o milímetro. Em termos de ângulo de emissão do feixe luminoso, o ideal será que este iguale o número-f, do componente óptico onde irá incidir, tipicamente um espelho ou uma lente. No que diz respeito à intensidade luminosa, deve-se escolher o LED mais luminoso possível, uma vez que geralmente luz a mais não causa problemas nas visualizações, sendo que o mesmo não e pode dizer de luz a menos. Por fim em termos de comprimento de onda, é uma informação importante, quando se pretende explorar as capacidades quantitativas destas técnicas[35].

3.3.2 Tipos de espelhos e efeitos dos mesmos sobre o feixe de luz incidente

Nas técnicas schlieren são utilizados vários tipos de espelhos, todos eles com características e portanto propósitos diferentes, espelhos parabólicos, concavos e planos são alguns dos mais utilizados aquando da montagem de um alinhamento schlieren. A grande vantagem da utilização de espelhos ao invés da utilização de lentes na contração de alinhamentos schlieren reside no facto de os mesmos proporcionarem uma maior campo de visão, do que as lentes, permitindo assim analisar amostras com dimensões superiores.

Os espelhos parabólicos utilizados na construção de telescópios, são geralmente indicados para as técnicas schlieren, recorrendo portanto os experimentalistas muitas vezes a este tipo de espelhos para montar o seu aparato. Os espelhos parabólicos fora de plano, são espelhos capazes de criar um feixe de luz colimada, paralela, a partir de um feixe de luz divergente, este tipo de espelhos é utilizado principalmente em alinhamentos schlieren do tipo Z. Os espelhos côncavos, são um tipo de espelho esférico, capaz de convergir os raios de luz incidente, sejam eles paralelos ou divergentes, nas técnicas schlieren o alinhamento em que este é usado mais frequentemente é o schlieren de espelho único. Por fim os espelhos planos, são espelhos cuja função é apenas refletir a luz incidente, este tipo de espelhos pode ser usado em todos os alinhamentos, a função dos mesmos não passa tanto pela manipulação dos raios de luz, mas sim pelo direcionamento dos mesmos, uma vez que com recurso a múltiplas reflexões os alinhamentos schlieren podem geralmente ser encurtados em comprimento, que pode ser uma questão crucial para o experimentalista [52],[58],[62].

Em termos de acabamento como já foi visto na literatura diferentes autores utilizam diferentes níveis de acabamento. Apesar de isso Holder et. al. estabelece que os espelhos devem ter um acabamento mínimo de $\lambda/4$, por cada 20 mm de diâmetro do espelho, e que o erro de figura total do mesmo não deve ultrapassar o 1λ . Ainda segundo Holder, um espelho deve ter no mínimo uma espessura que seja igual a 12% - 17% do diâmetro do mesmo, por forma a que o mesmo tenha estabilidade.

3.3.3 A câmara fotográfica como plano de projeção da técnica schlieren

Este é um dos componentes mais importantes nos alinhamentos schlieren, pois o mesmo limita diretamente a resolução e portanto qualidade dos resultados obtidos através das fotografias capturadas. Hoje em dia, e uma vez mais graças à revolução digital, o processo de captação de fotografias schlieren e análise das mesmas torna-se mais simples, rápido e intuitivo do que nunca. As câmaras mais utilizadas na construção de alinhamentos schlieren são as máquinas do tipo DSLR, *Digital Single Lens Reflex*, que hoje em dia são capazes de produzir imagens com uma quantidade muito superior de mega pixeis, quando comparadas com as suas predecessoras, as câmaras SLR, *Single Lens Reflex*, além disso certos processos como o ajuste da exposição tornam-se imensamente mais simples devido ao facto de a visualização das fotografias capturadas poder ser feita no instante imediatamente seguinte à captura, evitando assim o tempo de espera associado à revelação das fotografias.

Por forma a ajustar a montagem experimental ao seu problema, existem hoje uma vasta panóplia de lentes que podem se acopladas às câmaras digitais utilizadas pelo experimentalista, a utilização da lente certa permite ao experimentalista fazer alinhamentos com diferentes extensões e campos de visão. Se o experimentalista tiver requisitos elevados no tempo de captura de imagens, se quiser por exemplo observar fenómenos muito céleres, o mesmo deve ter em atenção o tempo de fecho da máquina e o tempo de processamento do sensor utilizado pela

máquina, uma vez que o mais célere destes dois, será o limitador do intervalo de tempo em que o experimentalista pode captar imagens[35].

Um outro cuidados a ter na hora da escolha da câmara a utilizar, deve ser o sensor que a mesma possui. Tipicamente para aplicações de schlieren, são usados sensores do tipo CCD, do inglês, *Charge Couple Device*, ou CMOS, também do inglês, *Complementary Metal Oxide Semiconductor*. Sendo que as máquinas equipadas com sensores CCD, se mostram muito populares entre experimentalistas da técnica schlieren, devido à sua elevada resolução espacial, o seu reduzido tempo de captura, que se apresenta na ordem dos micro-segundos e também por possuírem um obturador eletrónico, em detrimento do mecânico, uma vez que este segundo pode interferir com os resultados, devido a vibrações causadas pelo seu movimento [63],[64].

3.3.4 A lâmina de bloqueio de raios refratados

Geralmente este componente não apresenta requisitos técnicos muito altos, uma simples lâmina de barbear, é indicada para o efeito pretendido, apenas a sua colocação no alinhamento é muito delicada. Se a lâmina for horizontalmente orientada, o nosso alinhamento será sensível a variações no índice de refração no eixo dos yy. Ou seja a lâmina de bloqueio afeta os raios refratados cujas componentes são perpendiculares à lamina [52].

À medida que a lâmina de bloqueio é movida por forma a bloquear mais e mais, o ponto focal, a intensidade da iluminação que se consegue visualizar na fotografia, deve diminuir uniformemente[50]. Em termos de percentagem de corte do ponto focal, o experimentalista deve ajustar o nível de corte às especificações do seu alinhamento e do seu objecto de fase, uma vez que diferentes experiencias podem apresentar diferentes necessidades, mas na literatura [65] é recomendado, que este ajuste seja feito em função da gama dinâmica, devem ser tiradas várias fotos de calibração, com a lâmina em diferentes posições e deve ser escolhida para a lâmina a posição que nas fotos de ensaio, com o objecto de fase a ser estudado, produziu resultados com uma maior gama dinâmica.

3.4 A importância do alinhamento schlieren

Agora que o leitor conhece os princípios físicos inerentes à técnica schlieren, tal como os componentes necessários à montagem de um sistema deste género, iremos juntos analisar diversos alinhamentos possíveis, iremos apesar de tudo focar a nossa análise em sistemas constituídos por espelhos, deixando de fora os alinhamentos baseados em lentes.

Um dos alinhamentos mais populares entre os experimentalistas da técnica schlieren, é o alinhamento do tipo z que se encontra representado na figura 3.4. Este alinhamento faz uso de dois espelhos parabólicos fora de eixo, uma fonte de luz, uma câmara, uma lâmina de bloqueio e opcionalmente uma lente convexa. Como podemos observar o feixe de luz divergente, proveniente da fonte de luz é colimado pelo primeiro espelho parabólico e direcionado para o segundo espelho parabólico, entre estes dois espelhos encontra-se o objeto de fase, que será então atravessado por um feixe de luz, agora paralela, os raios de luz do referido feixe ao incidirem no segundo espelho parabólico são convergidos, em direção à câmara. Entre a câmara e o segundo espelho parabólico situa-se o ponto focal, local onde convergem todos os raios provenientes do espelho parabólico. Nesse ponto deve ser colocada a lâmina de corte, com uma percentagem de corte de luz a ser ajustada às necessidades experimentais do caso de estudo em questão [52],[66].

Uma abordagem experimental ao vento iônico gerado por um atuador a plasma

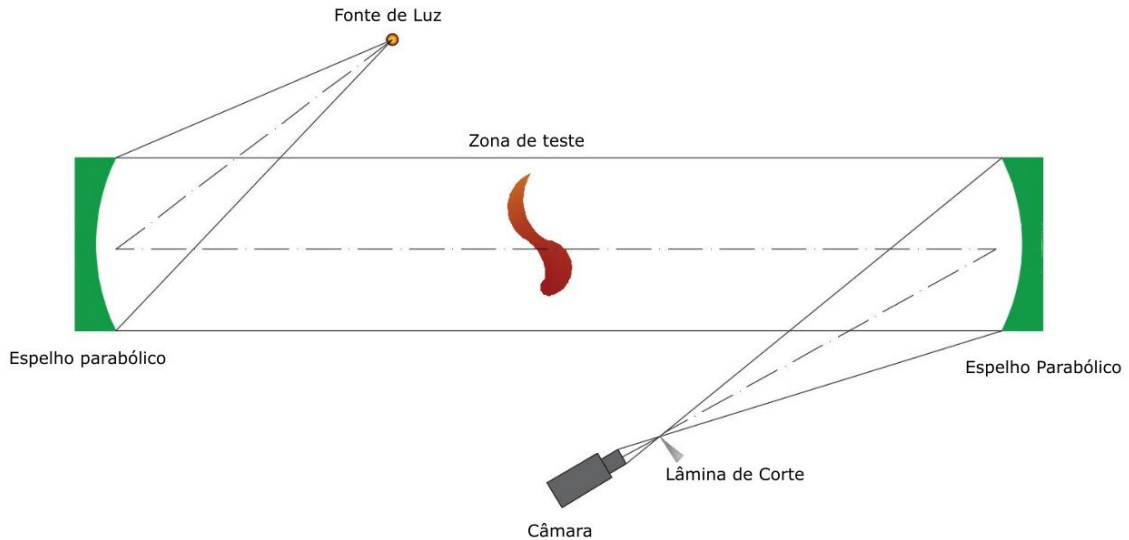


Figura 3.4: Diagrama esquemático, de um alinhamento schlieren do tipo Z ; A traço interrompido podemos ver o eixo óptico e a cheio o feixe de luz.

Em seguida ao alinhamento do tipo Z, os alinhamentos de espelho único são os mais utilizados pela comunidade científica. Sendo o mais popular deles o alinhamento coincidente de espelho único. Este alinhamento faz uso de um espelho esférico, convexo, uma fonte de luz, uma lâmina de corte e uma câmara. A zona de teste neste tipo de alinhamento, localiza-se diretamente à frente do espelho, na zona onde estão presentes os raios divergentes, provenientes da fonte de luz e também os raios convergentes, provenientes do espelho. Idealmente, cada ponto do objeto de fase é atravessado duas vezes pelo mesmo raio, o que significa que o raio irá ser desviado da sua trajetória duas vezes, antes de chegar ao plano de projeção. Devido ao facto de os desvios angulares sofridos pelos raios serem pequenos e pela distancia do espelho ao objeto de fase ser reduzida. O desvio dos raios ocorrer duas vezes não prejudica a técnica, aliás, pelo contrário, melhora os resultados. Sendo que este alinhamento apresenta assim uma sensibilidade duas vezes maior à dos alinhamentos seus parentes, como seja o alinhamento tipo Z. Em que cada raio de luz apenas atravessa o objeto de fase uma vez. A lâmina de corte utilizada neste alinhamento deve ser refletora, ou um divisor de raios, por forma a poder refletir os raios vindos do espelho que estão a convergir para a lente da câmara. Sendo o posicionamento desta lâmina um dos passos mais complicados neste alinhamento, por vezes o mesmo é convertido em um alinhamento de espelho simples, mas fora de eixo. Este tipo de alinhamento fora de eixo está sujeito a aberrações já descritas anteriormente, como a aberração virgula, apesar disso esse alinhamento é perfeitamente capaz de produzir visualizações com elevada qualidade[52],[67].

Os alinhamentos acima ilustrados necessitam de um espelho esférico. Caso o experimentalista apenas disponha de um espelho parabólico, deve fazer uso de uma lente corretora podendo assim corrigir a forma do feixe de luz que sai da fonte em direção ao espelho. As lentes corretoras, são lentes que geralmente apresentam uma aberração esférica, que apresenta sinal oposto à aberração do espelho. Sem o uso desta lente, será complicado para o experimentalista obter um corte uniforme no ponto focal, com a lâmina de corte, o que causará com que consequentemente as fotografias captadas não possuam a capacidade de reproduzir o objeto de fase de uma forma precisa[52].

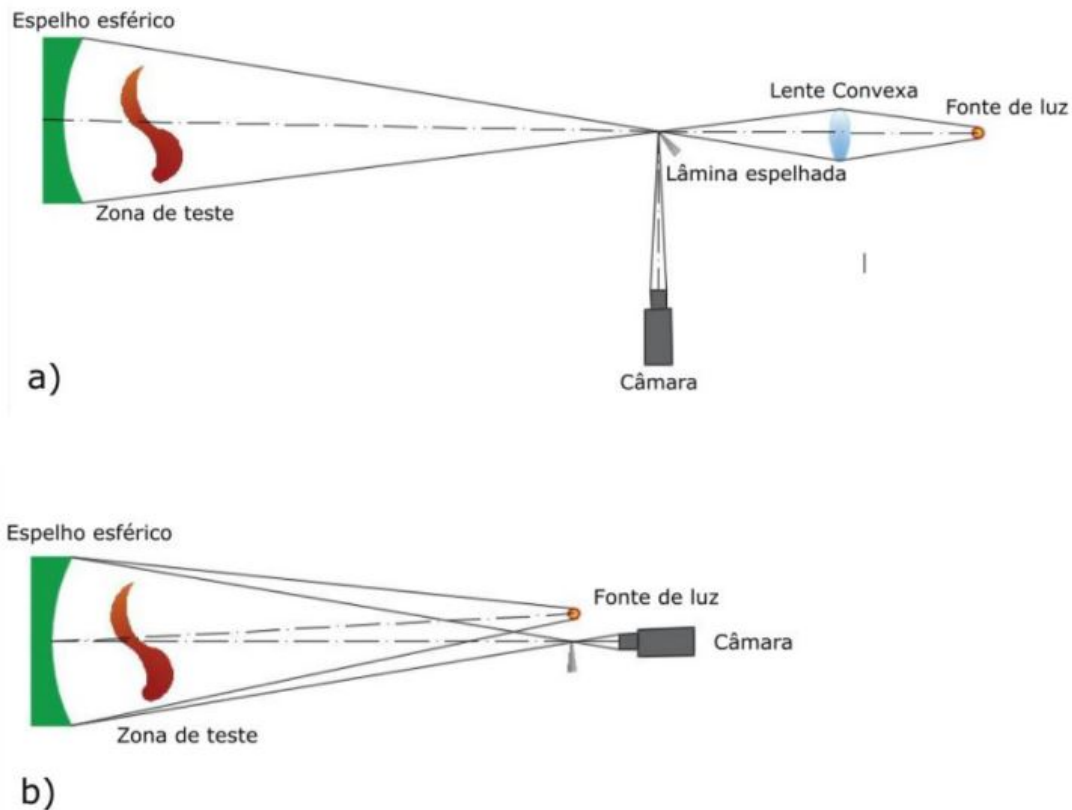


Figura 3.5: Alinhamentos schlieren de espelho único; a) Alinhamento Schlieren de espelho único, no eixo.; b) Alinhamento Schlieren de espelho único, fora do eixo.

3.5 O schlieren orientado para o fundo, *background oriented schlieren*

Como já foi discutido anteriormente na presente dissertação, esta técnica é a mais recente inovação no campo dos métodos óticos de visualização e faz uso de pouco material ótico e de softwares de avaliação de imagens. O princípio de funcionamento nuclear desta técnica, é a comparação através de métodos numéricos de fotografias schlieren na presença e ausência do objeto de fase, sendo que estas fotografias devem ser captadas contra um fundo previamente deliberado e otimizado para o efeito, fenómeno, que se pretende captar. Nos presentes métodos, é utilizada a distorção dos fundos, que é causada pela deflexão dos raios luz aquando do encontro dos mesmos com o objeto de fase, como forma de se obter informação sobre o referido objeto de fase[68].

Por forma a facilitar a compreensão, de esta técnica schlieren, encontra-se abaixo na figura 3.6, uma representação de um alinhamento do tipo BOS. Como podemos ver os raios de luz deslocam-se deste o fundo escolhido, até ao sensor da máquina, passando ainda antes disso pela lente da mesma. Como já foi dito, nesta técnica são captadas duas imagens, uma delas em que o objeto de fase está presente entre a lente da câmara e o fundo escolhido e outra em que o mesmo não está presente, sendo estas duas fotografias se encontram representadas na figura 3.6 por um mesmo raio genérico, pertencendo o vermelho à imagem em que não se encontra presente o objeto de fase e o azul diz respeito à situação em que o objeto de fase está presente.

As duas fotografias que resultam deste processo podem então ser analisadas através de

Uma abordagem experimental ao vento iônico gerado por um atuador a plasma

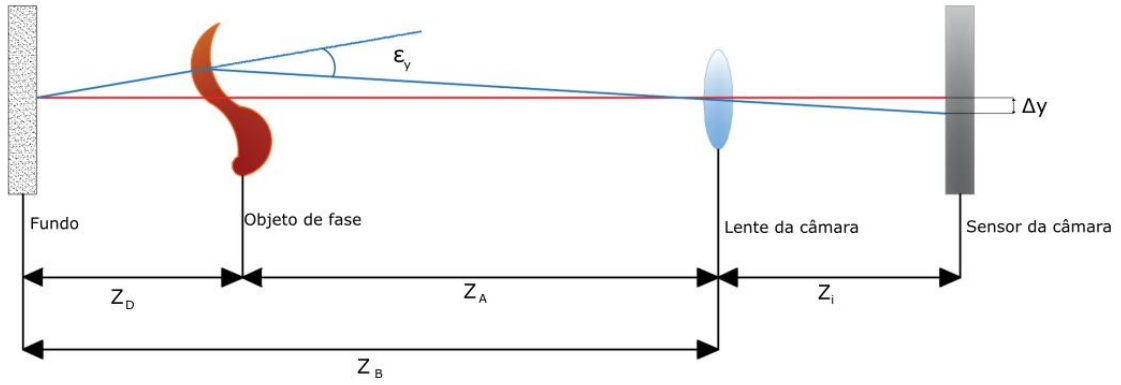


Figura 3.6: Diagrama esquemático de um alinhamento BOS genérico; Os raios vermelho e azul correspondem à situação experimental sem e com o objeto de fase presente, respectivamente.; A verde, a trajetória que o raio deflectido teria seguido na ausência do objeto de fase, que forma, com a trajetória que o mesmo seguiu após ser deflectido, representado a cheio, o ângulo de deflexão(ε_y); No sensor da máquina encontra-se o deslocamento do pixel entre as duas fotografias (Δy).

algoritmos de correlação já existentes, desenvolvidos, testados e otimizados para aplicações PIV por exemplo. Desta análise através de algoritmos de correlação, o experimentalista consegue obter os deslocamentos existentes na imagem de fundo (Δy) . Por forma a podermos fazer uso da presente técnica necessitamos de assumir que os nossos ângulos de deflexão são pequenos. Assim sendo podemos utilizar a seguinte fórmula por forma a determinar o deslocamento Δy que os raios apresentam.

$$\Delta y = Z_D M \varepsilon_y = Z_D \frac{Z_i}{Z_B} \varepsilon_y. \quad (3.10)$$

Como podemos ver da fórmula acima, M , que corresponde ao fator de ampliação, pode ser obtido através do quociente entre a distância da lente da máquina ao sensor da mesma e a distância entre a lente da câmara utilizada e o fundo. Correlacionando a figura 3.6 com a equação 3.10, o deslocamento de cada raio é então obtido pelo produto da distância entre o objeto de fase e o fundo, o fator de ampliação e o desvio angular sofrido pelo raio. Procedendo a algumas simplificações podemos também escrever o deslocamento na seguinte forma.

$$\Delta y = f \left(\frac{Z_D}{Z_D + Z_A - f} \right) \varepsilon_y. \quad (3.11)$$

Sendo que Z_A representa a distância entre o objeto de fase e a lente da câmara e f representa, a distância focal inerente à lente utilizada. Os sistemas BOS, devem estar bem focados no fundo escolhido, uma vez que o que iremos captar serão deslocações do mesmo [11].

Ainda, se observarmos atentamente a geometria apresentada na figura 3.6, podemos ver que $\Delta y'$, o deslocamento virtual da imagem, dado em pixels por frame, se pode relacionar com o deslocamento real da imagem Δy , dado em metros por frame, ou sabendo o tempo entre fotografias em metro por unidade de tempo, através da seguinte formulação[68].

$$\frac{\Delta y'}{Z_B} = \frac{\Delta y}{Z_i} = \frac{\Delta y}{f}. \quad (3.12)$$

Uma abordagem experimental ao vento iônico gerado por um atuador a plasma

Um problema inerente à técnica BOS é o problema do foco, uma vez que este tipo de alinhamento está geralmente focado no fundo, este é um fator limitante para a resolução com que é possível capturar o objeto de fase. Chama-se a esta dificuldade o desfoque geométrico e pode ser expresso matematicamente, após a introdução do conceito de diâmetro de abertura, ao leitor, este diâmetro de abertura diz respeito ao diafragma da máquina fotográfica utilizada, e qual o diâmetro do mesmo para uma fotografia em específico. Assim sendo, temos que o desfoque geométrico é dado, matematicamente pela equação 3.13, devemos ainda referir que este desfoque acontece na lente da câmara [14].

$$d_i = d_A \left[1 - \frac{1}{f} M' (Z_A - f) \right]. \quad (3.13)$$

Na equação 3.13, d_A refere-se ao diâmetro da abertura utilizada na câmara fotográfica e $M' = \frac{Z_i}{Z_A}$, sendo que Z_i representa a distância entre a lente e o sensor da câmara e Z_A a distância entre o objeto de fase e a lente da câmara. Outra fonte de desfoque, para além da geometria do alinhamento e da lente utilizada, é a difração da luz proveniente do fundo, na literatura essa componente do desfoque é dada pela equação 3.14, abaixo apresentada [14].

$$d_d = \frac{2.44f}{d_A(M+1)\lambda}. \quad (3.14)$$

Onde λ representa o comprimento de onda da luz utilizada para iluminar o fundo utilizado, por forma a podermos calcular o desfoque total devemos então recorrer à equação 3.15, que considera o desfoque proveniente de estas duas fontes [14].

$$d_{total} = \sqrt{d_d^2 + d_i^2}. \quad (3.15)$$

Começamos agora a reparar que a construção e definição da geometria de um alinhamento schlieren do tipo BOS, assenta em um equilíbrio entre as distâncias escolhidas, lente utilizada e a abertura da mesma, como podemos ver para aberturas de lente, d_A , superiores, o desfoque causado pela difração é menor mas o desfoque geométrico aumenta. Contudo nos resultados experimentais o desfoque geométrico é o que causa maior erro, pelo que geralmente neste tipo de alinhamentos, são utilizadas aberturas da câmara reduzidas, o que implica que os experimentalistas façam então uso de fontes de luz mais poderosas [14].

3.5.1 Fundos para a técnica BOS

A temática dos fundos para a técnica de schlieren orientado para o fundo, é um tópico de estudo extenso, existindo diversos autores que concentraram os seus esforços na otimização deste. Existem vários tipos de fundos que podem ser usados nesta técnica mas os requisitos para os mesmos residem geralmente na presença de um padrão, aleatório ou não, com uma determinada frequência espacial e cujas características constituintes do dito padrão, apresentem elevado nível de contraste entre si [69].

Geralmente são usados fundos artificiais, impressos em folhas de papel, lona ou paredes, contendo grelhas ou traços horizontais ou verticais, ou mais comumente, fundos negros com

Uma abordagem experimental ao vento iónico gerado por um atuador a plasma

diversas partículas brancas dispersas aleatoriamente pelo mesmo, um tipo de fundo muito semelhante aos obtidos nas técnicas PIV. Diversos estudos demonstram que, em fundos de partículas dispersas, o tamanho das partículas utilizadas não é fator determinante para os resultados obtidos. Sendo então o fator verdadeiramente decisivo, o número de pixels cada uma ocupa no sensor da câmara utilizada. Na literatura Raffel et. al.[14] deixa-nos a recomendação de que as partículas devem apresentar cerca de dois a a cinco pixels, dependendo da sensibilidade desejada, diminuindo o tamanho das partículas caso seja necessário um aumento na sensibilidade do sistema. Este tipo de fundos artificiais é especialmente popular em aplicações em túneis de vento[70].

Outro tipo de fundos utilizados nesta técnica são os denominados, fundos naturais. Estes fundos consistem em uma paisagem natural que contenha um padrão com um uma elevada frequência espacial, como prados floridos, superfícies rochosas, entre outros. Apesar de estes geralmente não serem capazes de produzir resultados tão apurados, como os fundos artificiais de partículas distribuídas, são capazes de produzir campos de visão muito superiores. Existem uma série de características a nível de padrão e textura que são necessárias por forma a produzir resultados. Este tipo de fundo é também extensamente abordado na literatura "Schliereana". Estes apresentam algumas dificuldades adicionais aquando da extração de características, pois muitas vezes certas características do fundo alteram a sua posição entre fotografias, por efeitos externos[4],[71].

O terceiro tipo de fundos utilizados nesta técnica são os fundos de feixe de laser disperso, conhecidos em terras inglesas como, *laser speckle*. Estes fundos consistem essencialmente na projeção de um feixe de luz coerente que foi disperso através de uma lente, em um plano de projeção. O uso deste tipo de fundos apresenta requisitos diferentes dos vistos anteriormente, por forma a obter melhor sensibilidade recomenda-se uma distância curta entre o objeto de fase e o fundo, além disso, aquando do uso deste tipo de fundos o foco da câmara deve estar no objeto de fase e não no fundo, como habitualmente está nas técnicas de schlieren orientado para o fundo [72],[5].

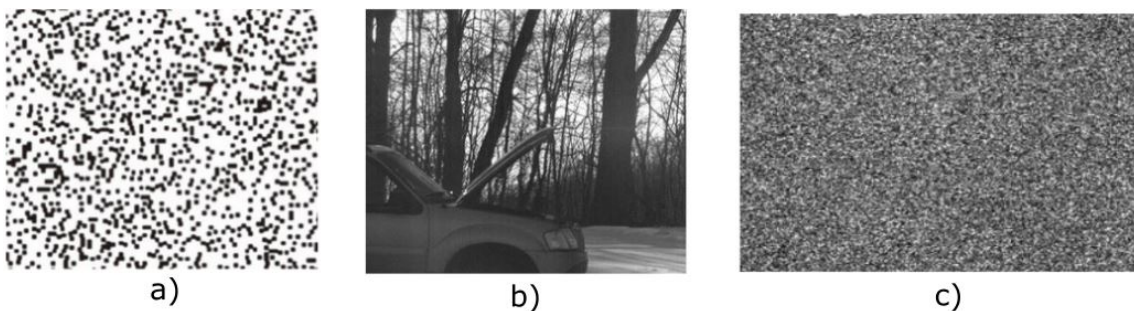


Figura 3.7: Tipos de fundos mais utilizados nas técnicas de schlieren orientado para o fundo; a) Fundo artificial, composto por partículas negras dispersas aleatoriamente em um fundo branco, fornecendo alto contraste. Adaptado de [3]; b) Fundo natural, composto por uma zona com elevadas densidades de ramos de árvores retro iluminados. Adaptado de [4]; c) Fundo de feixe de laser disperso, incidindo em uma superfície opaca, cria um padrão muito semelhante aos criados artificialmente. Adaptado de [5].

3.5.2 Análise quantitativa de imagens obtidas através da técnica BOS

Nesta secção pretendemos transmitir ao leitor o processo de avaliação quantitativa por forma a obter uma distribuição densidades de um meio gasoso, a partir de uma imagem obtida através da técnica BOS. Este tipo de análise quantitativa não era antes praticável, uma vez que

mesma requer uma integração na área de estudo, mas hoje em dia com o poder computacional disponível, isso tornou-se uma operação simples de realizar[35].

Os alinhamentos BOS, são únicos, no sentido em que por forma a extrair das suas fotografias informação quantitativa não é necessário, ao contrário do que é verificado nas restantes técnicas schlieren, façam elas uso de espelhos ou lentes, qualquer tipo de lente de calibração, é apenas necessário conhecer determinados parâmetros relativos à geometria do alinhamento utilizado. Após capturadas as duas imagens, uma na presença do objeto de fase e outra sem ele, as mesmas são submetidas a um tratamento, utilizando um algoritmo de relação cruzada, *cross correlation*, como já é sabido. O que ainda é desconhecido pelo leitor é a forma como esse tratamento, processamento, ocorre. Pois bem, em uma fase inicial as fotografias, a zona de análise, será subdividida em janelas de interrogação, sendo que a análise será feita em cada uma destas janelas de interrogação, o que faz com que a mesma seja então a responsável pela resolução espacial que iremos ter nos resultados obtidos desta análise, ou seja, para o leitor mais concentrado nos aspetos práticos do procedimento, este parâmetro irá definir o número de vetores deslocamento que irão resultar da nossa análise. Este parâmetro, as janelas de interrogação, podem ser definidas por forma a serem adjacentes entre elas, ou por forma a se sobreporem, parcialmente, sendo que esta segunda opção permite também um aumento na resolução espacial dos resultados.

Recordando a figura 3.6 e alguns conceitos já introduzidos no decorrer da presente dissertação, sabemos já que a técnica BOS se baseia no deslocamento local de características do fundo, sabemos também que este deslocamento se deve ao desvio do raio de luz proveniente do fundo da sua normal trajetória, sabemos ainda que cada raio de luz comporta informação sobre o gradiente espacial dos índices refrativos integrados ao longo do seu caminho. Por esta razão, os deslocamentos no plano da imagem podem ser relacionados com os gradientes locais de densidade. Segundo a literatura [15] podemos relacionar os deslocamentos obtidos no fundo com os gradientes do índice de refração através das equações abaixo apresentadas.

$$\Delta x = \frac{Z_D Z_i}{Z_B} \frac{1}{n_0} \int_{Z_D - \Delta Z_D}^{Z_D + \Delta Z_D} \frac{\partial n}{\partial x} dz, \quad \Delta y = \frac{Z_D Z_i}{Z_B} \frac{1}{n_0} \int_{Z_D - \Delta Z_D}^{Z_D + \Delta Z_D} \frac{\partial n}{\partial y} dz \quad (3.16)$$

Onde Δx e Δy representam os deslocamentos verificados no fundo, na direção horizontal e vertical respetivamente, Z_D como podemos observar, na figura 3.6, refere-se à distância existente entre o fundo e o objeto de fase, mais precisamente, entre o fundo e o plano central do objeto de fase. ΔZ_D refere-se a metade da espessura do objeto de fase, n é o índice refrativo no interior do objeto de fase e n_0 é o índice refractivo do meio envolvente, ambiente. Por fim, z , refere-se à direção da linha de visão.

A partir do campo de deslocamentos de pixels e sabendo que estes são proporcionais aos gradientes do índice de refração, quer na direção horizontal, quer na direção vertical, tal como é demonstrado nas equações 3.16, podemos então determinar a distribuição de índices de refração em uma determinada zona do espaço, resolvendo a equação de Poisson que pode ser derivada das equações acima apresentadas, 3.16 e que tem o seguinte aspeto[3].

$$\frac{\partial^2 n}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 n}{\partial y^2} = \left(\frac{Z_D Z_i}{Z_B} \frac{1}{n_0} \right) \left[\frac{\partial \Delta x}{\partial x} + \frac{\partial \Delta y}{\partial y} \right]. \quad (3.17)$$

Após a determinação dos deslocamentos no fundo, através de um software de análise de

Uma abordagem experimental ao vento iônico gerado por um atuador a plasma

imagem, a resolução da equação de Poisson acima apresentada (3.17), necessita ainda que lhe sejam atribuídas condições de fronteira por forma a que a sua resolução e posterior obtenção dos campos de índices refrativos sejam possíveis.

Capítulo 4

Instalação experimental

Neste capítulo iremos guiar o leitor pelo processo de projeto e montagem de dois sistemas schlieren diferentes. Iremos primeiramente abordar um sistema schlieren que tem como propósito permitir uma avaliação qualitativa do escoamento induzido por um atuador a plasma, que nos permita obter visualizações do mesmo, por forma a obtermos informações sobre o comportamento do mesmo. Em seguida iremos estudar um alinhamento de natureza quantitativa, que nos permitirá obter informações, mais pormenorizadas sobre o escoamento induzido, tais como o campo de densidades do mesmo.

4.1 Aparato experimental para a determinação de potências em atuadores a plasma

Na figura abaixo podemos ver, um diagrama representativo da montagem laboratorial utilizada, por forma a determinar o consumo energético dos atuadores a plasma utilizados no presente estudo. Foram utilizados no presente estudo, atuadores a plasma com diferentes espessuras da camada dielétrica, mas todas as camadas dielétricas eram feitas de fita de capton e todos os elétrodos eram feitos de cobre. Os atuadores como se pode ver são alimentados pela fonte de tensão PVM500, uma fonte capaz de fornecer alta tensão e alta frequência, necessária ao funcionamento dos atuadores. Por forma a realizar as medições é utilizado o PicoScope, que é um equipamento capaz de, através de uma interface gráfica, transformar um computador em um poderoso osciloscópio. ligada ao osciloscópio temos uma sonda que permite efetuar as medições na resistência [2].

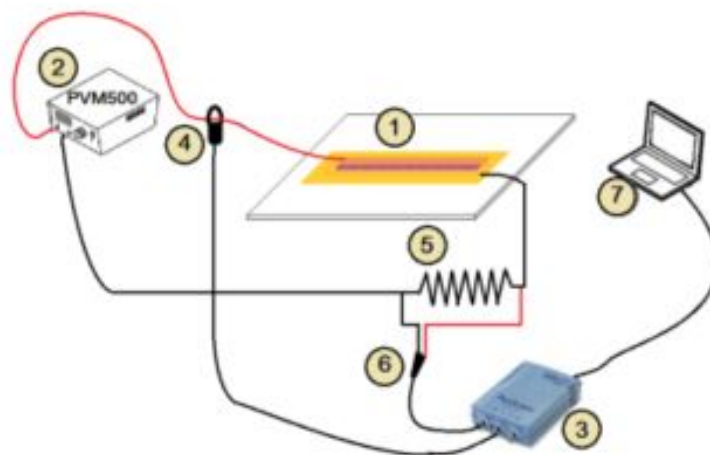


Figura 4.1: Diagrama do aparato experimental, utilizado por forma a estimar as potências dos atuadores a plasma, utilizando o método da resistência; 1) atuador a plasma do tipo DBD; 2) Fonte de alimentação de alta tensão e frequência, PVM500; 3) Aparelho de medição das tensões, PicoScope; 4) Sonda de medição; 5) Resistência; 6) "Crocodilos", por forma a fazerem a medição na resistência; 7) Computador, onde serão visualizadas as formas de onda captadas.; Adaptada de [2].

Podemos ver em 5 está representada a resistência utilizada. A resistência que foi escolhida para o presente estudo apresenta uma impedância de 100Ω e uma tolerância de 1%. Foi escolhida esta resistência, devido à sua grande estabilidade perante grandes variações de temperatura. Sendo ue a resistência apresenta um coeficiente de temperatura de 50 ppm, o que significa que a impedância da resistência apenas varia $0.00005\Omega/C$, sendo assim esta variação desprezável na nossa avaliação.

4.2 Implementação de um sistema de schlieren qualitativo

Como já vimos em secções anteriores, existe uma grande variedade de alinhamentos e técnicas schlieren, de entre as quais podemos escolher qual utilizar de acordo com o objetivo pretendido com o estudo. No nosso caso experimental, uma vez que nesta fase apenas pretendemos obter visualizações qualitativas, o alinhamento adotado para produzir tais resultados, foi o alinhamento schlieren de espelho simples fora de eixo. Este alinhamento mostra-se atrativo para o experimentalista uma vez que faz uso de poucos componente óticos, o que reduz portanto a complexidade inerente ao alinhamento dos mesmos, acrescentando a isto temos ainda que devido à disposição dos componentes e consequentemente, da trajetória seguida pelo feixe de luz, a mesma atravessa o objeto de fase duas vezes, o que aumenta, aliás, duplica a deflexão dos raios e consequentemente a sensibilidade da técnica, permitindo assim visualizações mais apuradas, com maior contraste do que em outras técnicas. Apesar das vantagens referidas, devemos alertar o leitor, de que este alinhamento devido ao facto de ser um alinhamento fora de eixo, pode apresentar aberrações, e é especialmente suscetível à aberração tipo virgula, já discutida em capítulos anteriores, pelo que o experimentalista deve ter esse fenómeno em consideração aquando do alinhamento dos componentes óticos, para que o faça de forma a reduzir ao máximo a presença deste tipo de aberrações [67],[73],[74].

Devemos ainda frisar que o local escolhido para a recolha de imagens schlieren, não deve ter iluminação ambiente, sendo que a fonte de luz pontual deve ser a única fonte de luz no espaço de recolha das imagens. Com esse propósito o local de testes escolhido para a realização dos ensaios laboratoriais, foi devidamente escurecido, com recurso a um plástico de cor preta e opaco, foram tapadas todas as entradas de luz exterior, conseguindo-se assim um ambiente experimental totalmente escuro, esta cautela previne a interferência de luz exterior nas medições efetuadas.

Abaixo podemos ver um diagrama esquemático da instalação experimental desenvolvida, cujo objetivo é a visualização do escoamento induzido por um atuador a plasma do tipo DBD. Ou seja com base no já visto anteriormente, as diferenças de densidade causadas no ar ambiente, que se devem à ionização do mesmo junto do elétrodo exposto, serão o nosso objeto de fase. Sabemos já também que o ar ionizado junto do elétrodo exposto é posteriormente aclarado em uma direção normal ao referido elétrodo, ou seja o nosso objeto de fase ira surgir por cima do elétrodo exposto e irá estender-se em uma direção normal a este. O diagrama esquemático destina-se à compreensão das distâncias empregadas aquando do alinhamento dos componentes óticos.

Em termos de material ótico o alinhamento utilizado faz uso de uma fonte luz LED [75], que foi escolhida de entre um conjunto de lâmpadas LED, com diferentes potências. A construção e escolha da fonte de luz são abordadas em maior detalhe em subsecções mais adiante. Como breve descrição, podemos já adiantar ao leitor que, entre a fonte de luz e o espelho foi colocada uma superfície opaca. Superfície essa que impede a passagem dos raios de luz. Seguidamente foi

Uma abordagem experimental ao vento iônico gerado por um atuador a plasma

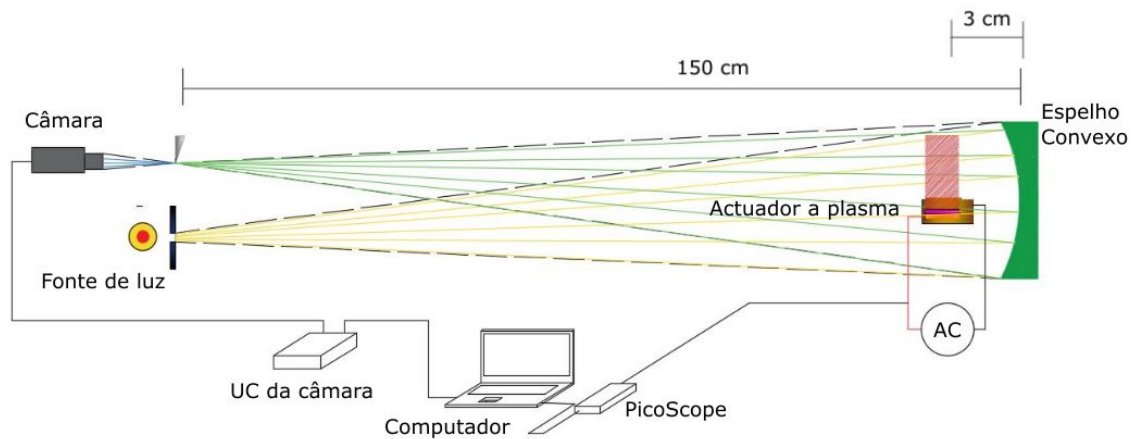


Figura 4.2: Diagrama esquemático do alinhamento schlieren de espelho único; A amarelo a trajetória dos raios de luz incidentes; A verde a trajetória dos raios de luz refratados e refletidos, que irão incidir novamente no objecto de fase; A azul os raios de luz que não foram bloqueados pela lâmina de corte; A zona identificada a vermelho em frente ao atuador a plasma representa a zona onde se espera encontrar o nosso objeto de fase.

feito nessa superfície opaca um furo, cujo diâmetro é conhecido. Esse furo permite a passagem de raios de luz, que irão divergir desde o mesmo até ao espelho, atravessando, antes de chegar a este, o objeto de fase.

O espelho utilizado é um espelho convexo de telescópio. Apresenta um diâmetro de 15.5 cm e uma distância focal de 0.75 m. Devemos realçar que a distância focal do espelho utilizado neste tipo de alinhamento, é um fator condicionante de qual o comprimento que o alinhamento possuirá, sendo portanto determinante para o espaço que a instalação experimental irá ocupar. O experimentalista deve ainda ter em consideração que o tamanho do espelho utilizado condiciona o tamanho do objeto de fase a ser analisado, uma vez que as regiões do objeto de fase que se encontrem fora dos limites do espelho, não serão captados por esta técnica. Abaixo encontram-se duas fotografias do espelho utilizado no presente estudo. Em uma delas o espelho encontra-se iluminado e com um objeto de fase na sua frente, e na outra o espelho encontra-se sem iluminação nem objeto de fase.

A câmara utilizada no presente alinhamento experimental foi uma câmara CCD C10600-10B ORCA-R2. Esta câmara possui um sensor do tipo CCD com dimensões de $2/3''$, característica esta que deve ser tida em consideração aquando da escolha da lente a utilizar em conjunto com esta câmara. A interface entre a câmara escolhida e o computador é feita através da unidade de controlo da câmara (CCU)C10600-10B [76].

A câmara utilizada apresenta dimensões reduzidas e um elevado desempenho. Por forma a ser possível alcançar grandes velocidades de transferência da imagem captada pelo sensor para o computador é utilizada uma interface IEEE1394b. A presente câmara foi desenvolvida com o propósito de satisfazer requisitos como alta qualidade e precisão das imagens capturadas, sendo que a mesma se destina a aplicações científicas ou industriais de elevada precisão.

As imagens captadas pela câmara utilizada apresentam 1344×1024 pixels e podem ser diretamente transferidas para o computador através da interface IEEE1394b. Os referidos pixels apresentam uma geometria quadrada, o que como veremos em secções mais adiante irá facilitar o processamento de imagem necessário à obtenção de dados quantitativos a partir de fotografias schlieren. Esta câmara apresenta ainda um modo de leitura de alta velocidade, que é uma ferramenta útil quando se pretenda captar instantes de tempo muito pequenos de um determi-

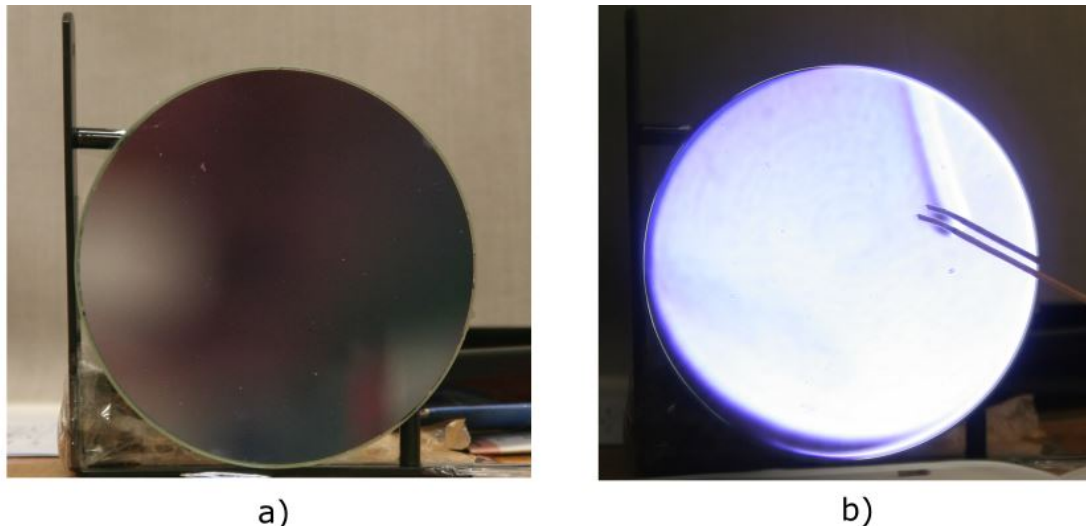


Figura 4.3: Espelho utilizado no alinhamento experimental presente neste estudo; a) espelho com iluminação ambiente ; a) espelho com iluminação ambiente, iluminação ativa através de uma fonte de luz pontual e um objeto de fase presente na frente do espelho, que neste caso é o calor libertado pela combustão de um incenso.

nado fenómeno. Devemos por fim referir que este equipamento não necessita de um obturador mecânico e apresenta um sistema de refrigeração a ar, tendo também a possibilidade de ainda ser adicionado um sistema de refrigeração a água, por forma a estabilizar o desempenho da câmara nas mais variadas condições experimentais.

4.2.1 O mecanismo de controlo de bloqueio de raios

Como é já sabido pelo leitor, nas técnicas schlieren que fazem uso de espelhos ou de lentes, é necessário também um mecanismo de bloqueio de raios refratados, por forma a que estes não alcancem o plano de projeção, neste caso o sensor da câmara fotográfica utilizada. Este bloqueio dos raios refratados deve ser feito no ponto focal, que é causado pelo facto de o espelho convexo, convergir o feixe de luz, sendo que este converge a uma distância do espelho que é igual a duas vezes distância focal do mesmo, que é uma característica inerente ao espelho utilizado, que já foi referida em subsecções anteriores. Portanto este ponto focal encontra-se a 1.5 m do espelho convexo utilizado, o corte deve então ser aí realizado. O facto de este ponto focal apresentar dimensões muito diminutas, torna o seu corte, ou bloqueio, uma tarefa de elevada precisão e rigor. O ponto focal deverá apresentar o mesmo diâmetro da fonte de luz utilizada, caso tal não se verifique, o experimentalista deve verificar novamente as dimensões do seu alinhamento, uma vez que isto é um indicador claro, de que alguma delas estará mal. Abaixo podemos ver o sistema de bloqueio de corte do ponto focal, desenvolvido para este sistema schlieren, que consiste essencialmente em dois perfis em "U" soldados na forma de um "T", que desliza em uma calha, empurrado por um micrómetro, que confere ao nosso corte uma precisão de 0.001 mm , permitindo-nos assim calibrar o nosso sistema por forma a visualizar variações de densidade muito pequenas, como as verificados no caso do vento iónico produzido por um DBD, por forma a concluir a descrição do mecanismo de corte do ponto focal, devemos ainda referir que colado ao "T" metálico se encontra a lâmina de corte, que está à mesma altura que o espelho e a fonte de luz.

Com recurso ao desenvolvido mecanismo de movimentação da lâmina de corte, foi-nos então possível realizar ensaios por forma a podermos escolher qual o melhor corte por forma

Uma abordagem experimental ao vento iónico gerado por um atuador a plasma

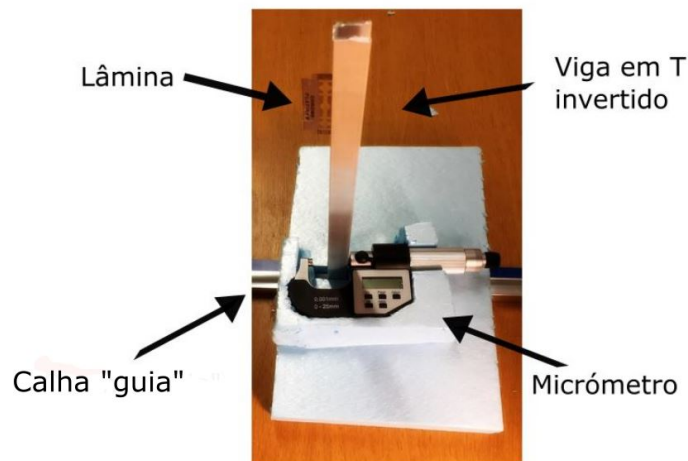


Figura 4.4: Fotografia do mecanismo desenvolvido por forma a movimentar a lâmina de corte, com uma precisão de 0.001mm. Este mecanismo baseia-se em um princípio simples, possuindo uma calha guia e uma quelha deslizante, permite o movimento horizontal de uma viga que tem colada a sua lâmina de bloqueio de raios refratados. O deslizamento da quelha deslizante dá-se aquando da movimentação do micrómetro digital.

a obter fotografias schlieren com o maior contraste e definição possíveis. Os ensaios realizados por forma a otimizar o corte efetuado ao ponto focal causado pelo espelho consistiram então, na visualização e captação fotográfica das diferenças de densidade causadas no ar pelo calor libertado pela chama de uma vela, considerando diferentes percentagens de corte do ponto focal, pela lâmina de bloqueio. Primeiramente nos ensaios efetuados procedeu-se à medição do ponto focal criado pelo espelho, sendo que a mesma coincidiu com o diâmetro da nossa fonte de luz, que é aproximadamente 0.5 cm. Em seguida a lâmina de corte foi colocada em uma posição muito próxima do corte do ponto focal, mas sem que esta afeta-se o mesmo, sendo esta condição designada como 0% de corte após isso é então capturada uma fotografia, em seguida, e com recurso ao mecanismo anteriormente descrito o corte foi aumentado 6% dos 0.5 mm e foi capturada outra fotografia. Este processo foi repetido até se alcançar um corte de 90% onde claramente as leituras e interpretações já não são corretas.

Os resultados para os testes acima referidos apresentam-se abaixo ilustrados na figura 4.5, o objetivo deste teste é o de perceber qual o efeito do corte no ponto focal nas imagens finais, tal como facilitar a escolha do corte que iremos utilizar no nosso estudo nos atuadores a plasma, uma vez que a sensibilidade da técnica está diretamente relacionada com o nível de corte que existe no ponto focal.

Uma abordagem experimental ao vento iônico gerado por um atuador a plasma

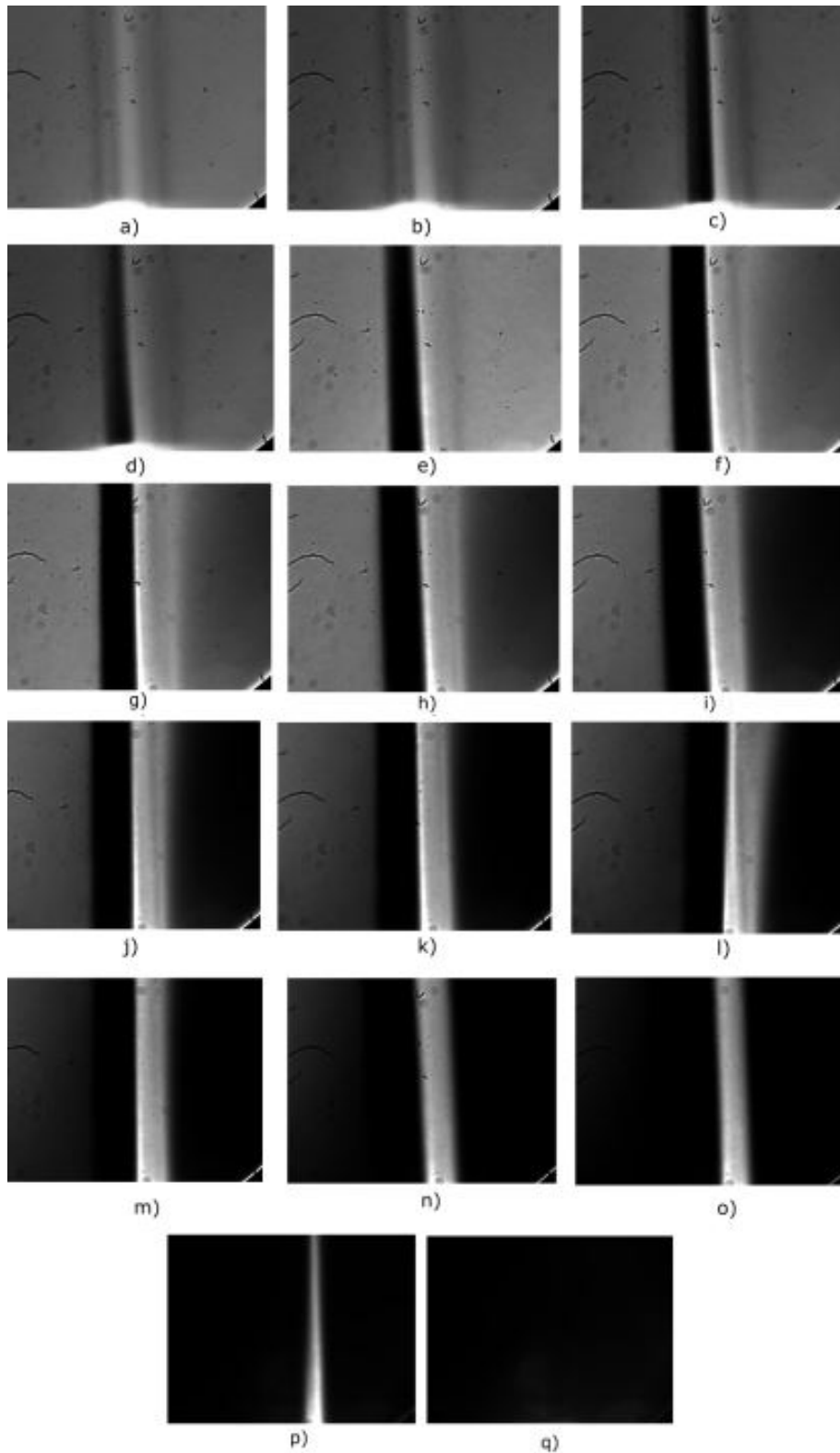


Figura 4.5: Várias fotografias schlieren todas elas com cortes diferentes, ms mantendo o mesmo objeto de fase, o mesmo espelho e a mesma fonte de iluminação; a) 0% de corte; b) 6% de corte; c) 12% de corte; d) 18% de corte; e) 24% de corte; f) 30% de corte; g) 36% de corte; h) 42% de corte; i) 48% de corte; j) 54% de corte; k) 60% de corte; l) 66% de corte; m) 72% de corte; n) 78% de corte; o) 84% de corte; p) 90% de corte; q) 100% de corte.

Uma abordagem experimental ao vento iónico gerado por um atuador a plasma

Como podemos observar a partir do teste realizado, à medida que aumentamos a percentagem de corte do ponto focal, vemos também um aumento na definição e contraste do objeto de fase, permitindo-nos assim observar as diferenças de densidade causadas no ar pelo calor libertado pela chama de uma vela, com maior facilidade. Mas isto apenas é verdade até termos cortado aproximadamente 72 % do ponto focal, pois a partir desse momento o aumento de corte causa exatamente o contrário, causa com que o objeto de fase deixe de ser perceptível para o experimentalista, uma vez que toda, ou praticamente, toda a luz é obstruída e não chega ao sensor da máquina, luz suficiente para formar uma imagem clara do objeto de fase, obtendo-se então a partir de esse ponto imagens escuras, que dificultam a sua interpretação e consequentemente o estudo do fenómeno em causa. Devemos também reparar que para cortes abaixo dos 22% do ponto focal, também produzem imagens schlieren pouco apropriadas para o estudo do objeto de fase em causa, uma vez que o contraste e a definição dos objetos de fase se tornam muito pequenos, tornando difícil a perceção dos fenómenos que ali ocorrem. Deste ensaio podemos verificar que o corte ideal, dependendo ainda do alinhamento, fonte de luz e câmaras utilizadas, deve-se situar algures entre os 22% e os 72% de corte, devendo o experimentalista, ajustar o corte dentro desta gama às suas necessidades experimentais, devemos ainda referir que quanto menores forem as diferenças de densidades causadas no meio ambiente, maior sensibilidade será necessária nesta técnica e portanto maior deverá ser a percentagem do corte do ponto focal, mas sempre tendo em consideração que o mesmo não deve obstruir a passagem dos raios de luz de interesse para o experimentalista, ou produzir imagens escuras ou desfocadas.

4.2.2 A construção e escolha da fonte de luz

A fonte de luz, a utilizar em sistemas schlieren, deve ser uma fonte de luz pontual. Por forma a conseguirmos obter tal fonte de luz, foi utilizado um candeeiro, que foi revestido com material refletor, a saída dos raios de luz é também obstruída, sendo posteriormente, realizado um furo no material que obstruí esta saída. Esse furo é feito com uma agulha de aproximadamente 0.5 mm e constitui o local de saída do feixe luminoso que irá posteriormente iluminar o espelho utilizado. Abaixo na figura 4.6 podemos ver uma imagem da fonte de luz utilizada no presente estudo.

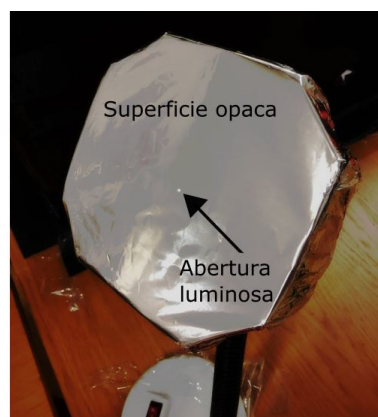


Figura 4.6: Fotografia da fonte de luz utilizada no presente estudo, na imagem apresentada a fonte encontra-se ligada, sendo perceptível o ponto por onde o feixe de luz diverge. A fonte de luz é composta por um lâmpada LED que se encontra atrás da superfície opaca, esta superfície bloqueia a passagem dos raios, permitindo que passem apenas pela pequena abertura que possui, tornando assim esta fonte luminosa em uma fonte pontual.

Por forma a obtermos um sistema schlieren o mais eficiente possível, foram feitos ensaios

Uma abordagem experimental ao vento iônico gerado por um atuador a plasma

com recurso a diferentes potências luminosas para a nossa fonte, os referidos ensaios, consistiram na captura de imagens das diferenças de densidade causadas no ar pela chama de uma vela, fazendo uso de diferentes potências luminosas, apesar de a lâmpada utilizada ser sempre do tipo LED, pelos motivos já referidos em secções anteriores. Abaixo podemos ver representado na figura abaixo, as imagens obtidas para as diferentes potências. É importante referir, que a lâmina de bloqueio foi mantida na mesma posição durante todos os ensaios, bloqueando aproximadamente 50% do ponto focal. Foi escolhida esta percentagem de corte devido ao facto de a mesma produzir fotografias com uma elevada gama dinâmica de cinzentos e um elevado contraste. Devemos ainda referir que em todas as fotos a exposição e abertura do diafragma da lente, foi mantido constante.

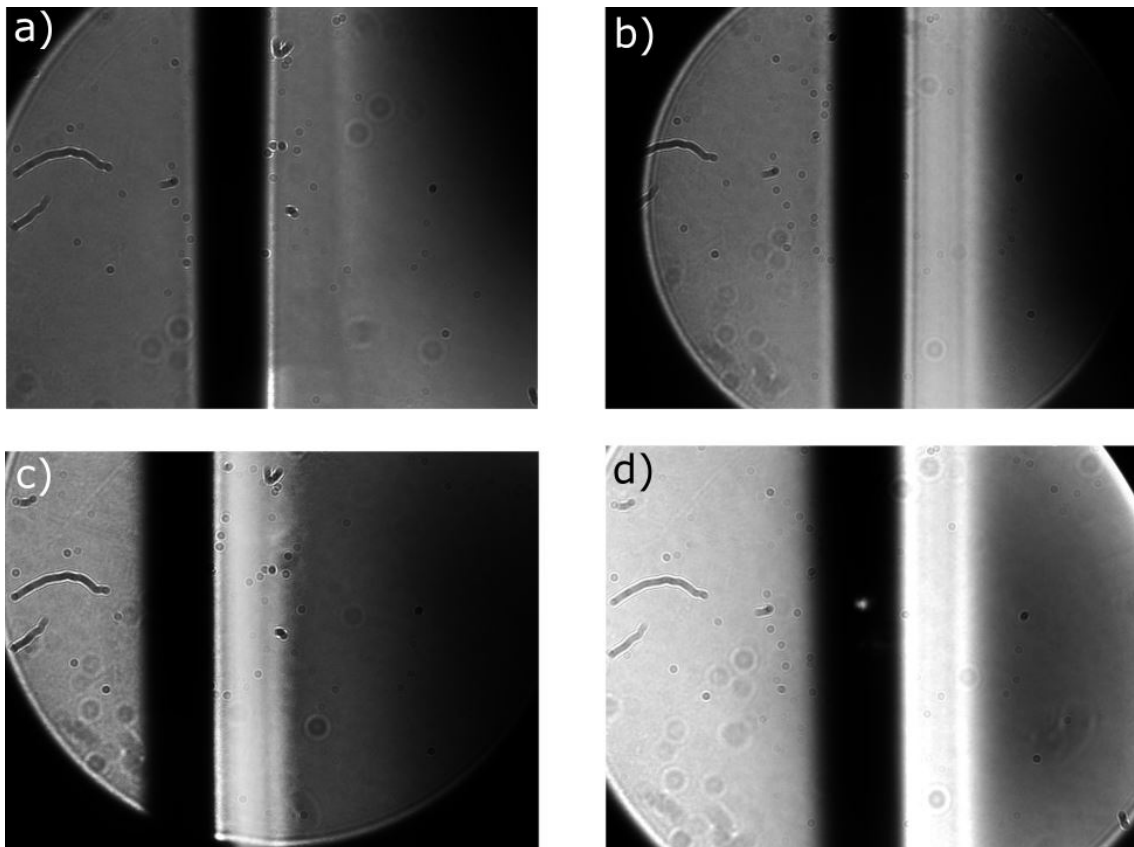


Figura 4.7: Fotografias schlieren das diferenças de densidade causadas no ar, pelo calor proveniente da chama de uma vela, fazendo uso de fontes luminosas com diferentes potências; a) 7 Watts ; b) 8 Watts; c) 9 Watts ; d) 15 Watts.

Como podemos ver na imagem acima apresentada, a fonte de luz utilizada mostrou-se capaz de produzir imagens schlieren, em todas as potências consideradas. Apesar disso podemos também ver que, à medida que é aumentada a potência da fonte luminosa, também os níveis de branco em todas as fotografias capturadas, aumentam, ou seja, as mesmas apresentam maior luminosidade, conforme maior potência, o que seria já de esperar. Outra característica e talvez mais importante para a nossa visualização, é o aumento do contraste nas fotografias. Que como pode ser observado no presente ensaio, aumenta à medida que é aumentada a potência da fonte luminosa. O aumento do contraste como podemos ver, permite uma melhor percepção do objeto de fase. Se a luminosidade não for suficiente para realçar o objeto de fase, não existe contraste que consiga destacar o mesmo. Podemos então agora entender que deve haver um equilíbrio entre o brilho e o contraste das imagens capturadas.

Uma abordagem experimental ao vento iônico gerado por um atuador a plasma

Após realização do presente ensaio e posterior avaliação das fotografias capturadas, utilizando o procedimento experimental acima descrito, foi decidido que, a fonte de luz a utilizar na presente dissertação, deveria apresentar uma potência de 15W. Como podemos ver nas imagens acima apresentadas, a referida potência, para um corte constante de cerca de 50%, foi a que apresentou melhores resultados qualitativos. Apesar de o brilho apresenta na imagem ser bastante elevado para um corte de 50% do ponto focal, optamos por esta fonte luminosa, uma vez que este brilho pode ser ajustado com recurso à lâmina de corte, que cortando uma percentagem superior do ponto focal permite uma redução no brilho das imagens capturadas.

4.2.3 Procedimento para os ensaios realizados com atuadores a plasma

Após a correta calibração do sistema foram descobertos quais os parâmetros que nos possibilitariam visualizar as diferenças de densidade causadas no ar por um atuador a plasma do tipo DBD. Utilizando este alinhamento foram estudados quatro atuadores a plasma, todos eles com espessuras diferentes, no que à camada dielétrica diz respeito, Esse estudo foi realizado com o objetivo de visualizar quais as diferenças no escoamento induzido, que são causadas pela espessura da camada dielétrica.

Primeiramente, antes da realização dos ensaios é necessário proceder à montagem e calibração do alinhamento ótico, tal como à montagem dos componentes necessários ao funcionamento do DBD's. Seguidamente, após todo o equipamento estar devidamente, montado e calibrado, os ensaios respeitantes aos atuadores a plasma consistiram nas seguintes etapas:

1. Aplicação da tensão de 4 kVpp ao atuador.
2. Aguardar 180 segundos.
3. Captação de 4 fotografias.
4. Repetir o processo acima, até à tensão máxima de funcionamento de cada um dos atuadores a plasma.

Como podemos ver em cada ensaio foi testada uma gama de tensões pico a pico, que permite entender o comportamento do escoamento induzido pelos vários DBD's, para diferentes potências. O compasso de espera feito no passo 2, tem o intuito de estabilizar o escoamento induzido pelo atuador a plasma, uma vez que uma fotografia representa apenas um instante de tempo, devemos ter em atenção que o escoamento fotografado deve estar estável, por forma a não cairmos no risco de fotografar um fenómeno temporário.

Os resultados para os referidos ensaios encontram-se, tal como a sua discussão, em capítulos mais adiante da presente dissertação, e os mesmo contribuem para o melhor entendimento, compreensão do comportamento do escoamento induzido pelo atuador a plasma.

4.3 A técnica schlieren quantitativa

A técnica de schlieren orientado para o fundo foi proposta em 2017 por Guo e Liu, num artigo publicado no Chinese Physics B [3]. No âmbito da presente dissertação esta técnica foi adaptada para analisar as características dos atuadores a plasma. Por forma a aprofundarmos o nosso estudo dos atuadores a plasma do tipo DBD e também por forma a aprofundarmos o nosso estudo dos meio óticos de visualização, nomeadamente as técnicas Schlieren, decidimos

então desenvolver um técnica schlieren que produzisse não só resultados qualitativos, visualizações, mas também resultados quantitativos, referentes ao escoamento induzido pelo atuador. A técnica que foi escolhida foi a técnica de schlieren orientado para o fundo, uma técnica que permite um campo de visão muito amplo e portanto permite a análise de objeto com dimensões superiores e que faz uso de alinhamentos simples, não requerendo muitos elementos óticos. A técnica escolhida permite a quantificação, obtenção de campos de índices de refração, de densidades e de temperaturas, permitindo-nos assim avaliar mais profundamente o escoamento induzido pelo atuador a plasma. Devido o facto de fazer uso de poucos componentes óticos esta técnica revela-se altamente atrativa em termos de da relação custo x resultado.

Abaixo podemos ver uma imagem que representa um diagrama esquemático, do alinhamento BOS utilizado por forma a produzir as fotografias schlieren em questão, como podemos ver neste alinhamento fazemos uso de componente já nossos conhecidos e já previamente descritos, em secções anteriores da presente dissertação, tais como a câmara CCD utilizada, tal como lente acoplada à mesma, a unidade de controlo da câmara, o computador, o *picoscope*, a fonte de alimentação e o atuador a plasma são todos componentes já nossos conhecidos. O único componente, que não se pode, ou não se deve, designar de componente ótico, é o fundo utilizado, como já vimos em subsecções anteriores o fundo escolhido influência fortemente os resultados obtidos, por isso este é um componente do nosso alinhamento, vital, para o bom funcionamento da técnica e para a obtenção de resultados válidos. As distâncias aqui utilizadas, são fruto de vários ensaios e testes laboratoriais, por forma a afinar o nosso sistemas aos requisitos, necessários à visualização do escoamento induzido por um atuador a plasma Um dos aspetos que o experimentalista deve ter em consideração aquando do alinhamento dos componentes óticos é que na presente técnica a sensibilidade da mesma depende do alinhamento dos componentes utilizados, em especial temos que o quociente entre a distância do objeto de fase à lente (Z_A), e da lente ao fundo utilizado (Z_B), deve ser minimizado por forma a aumentar a sensibilidade do sistema, demos ainda referir que o valor de Z_B também deve ser maximizado tanto quanto possível, por forma a aumentar a sensibilidade da técnica, no entanto deve-se ter em atenção que o aumento deste comprimento é restringido pela profundidade de campo da lente utilizada, uma vez que é experimentalmente desejável um bom foco da câmara, em ambos, o objeto de fase e o fundo utilizado. Apesar de tudo algum desfoque no objeto de fase pode ajudar à melhor visualização dos mesmo, mas uma quantidade exagerada de desfoque no mesmo pode também comprometer os resultados. Devido á natureza da técnica schlieren orientada para o fundo, existirá sempre algum tipo de desfoque no objeto de fase, cabe portanto ao experimentalista não aceitar fotografias desfocadas e ajustar o seu alinhamento até que as mesmas apresentem qualidade.

Uma abordagem experimental ao vento iônico gerado por um atuador a plasma

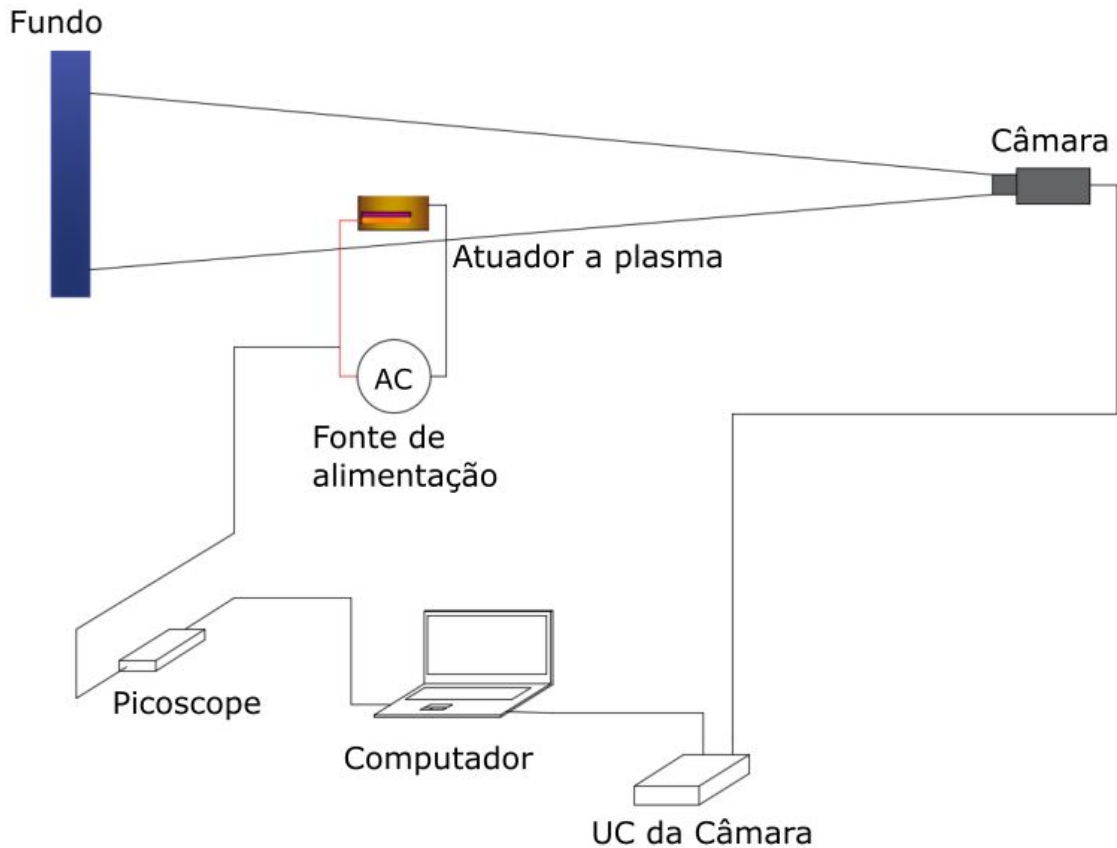


Figura 4.8: Diagrama esquemático do alinhamento de schlieren orientado para o fundo instalado experimentalmente. Apresentam-se também os componentes, necessários ao funcionamento do DBD, tal como a fonte de alimentação e o próprio DBD. Podemos ver ainda o Picoscope, instrumento utilizado para medir as tensões aplicadas no atuador a plasma do tipo DBD, e a UC da máquina, que é a interface que faz ligação câmara, computador.

Como podemos ver no diagrama acima, no presente alinhamento a luz proveniente do fundo utilizado, é projetada no sensor da câmara utilizada, atravessando antes disso, o objeto de fase caso o mesmo esteja presente. A presente técnica baseia-se como já foi referido anteriormente na comparação de duas imagens, sendo que uma delas é obtida na presença do objeto de fase e a outra na sua ausência. Esta comparação entre as imagens capturadas é feita com recurso a um *software* que contém algoritmos de *cross-correlation*, cujo funcionamento detalharemos mais adiante, mas para já é importante que se saiba que esse *software*, tem a capacidade de através da comparação entre duas imagens determinar qual o deslocamento de determinadas partículas presentes no fundo de uma imagem para a outra, sendo que este deslocamento é expresso em px/frame e o mesmo é causado pelo desvio que as diferenças de densidade presentes no ar causam à luz que as atravessa. Após a obtenção deste campo de deslocamentos, através do algoritmo de *cross-correlation*, podemos então seguidamente socorrendo-nos de métodos numéricos descritos mais adiante, determinar valores referentes a características do escoamento induzido, tais como o campo de densidades do mesmo ou de temperaturas. Abaixo fica uma fotografia da nossa instalação experimental.

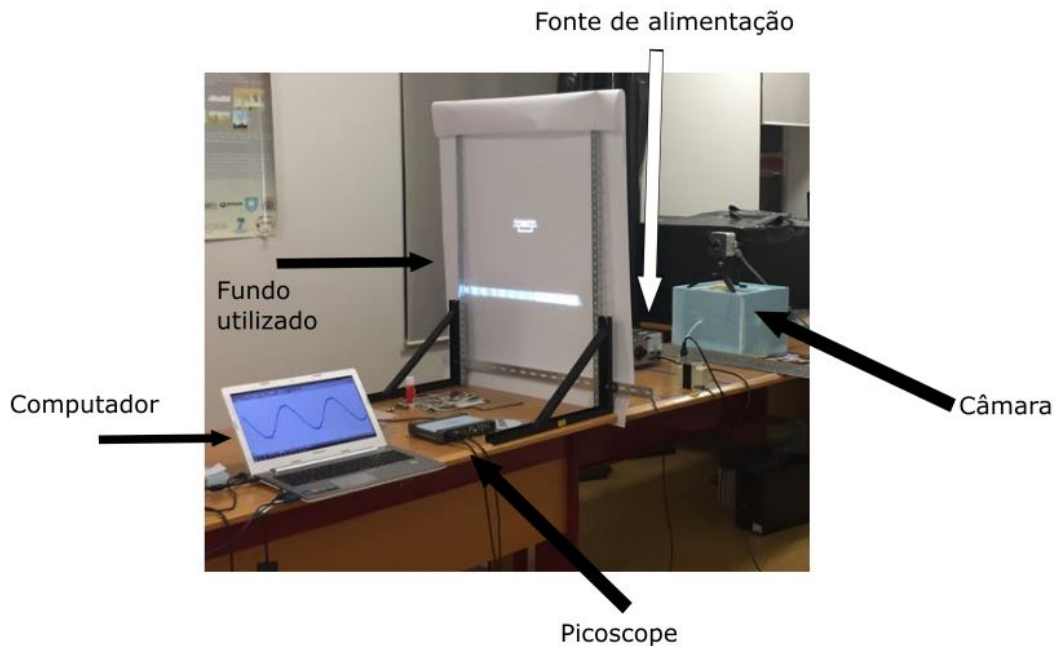


Figura 4.9: Fotografia da instalação experimental, no laboratório do clusterDEM, com a identificação dos respetivos componentes. Alinhamento schlieren compacto.

4.3.1 O processamento das imagens inerente à técnica BOS

A presente técnica schlieren, BOS, é também conhecida por *synthetic schlieren*, pelo facto de que as imagens capturadas por si só não revelam o objeto de fase, as mesmas necessitam de um tratamento para revelar as diferenças de densidade presentes no meio sujeito a análise. Nesse sentido existem então várias abordagens possíveis a este problema. Por forma a produzir meramente visualização qualitativas o experimentalista pode simplesmente subtrair a imagem de referência à imagem capturada na presença do objeto de fase, esta subtração consiste em processo bastante simples que pode ser feito por exemplo com recurso à *toolbox* de processamento de imagem, presente no *software Matlab*, com recurso ao comando `'imsubtract'`. Caso o leitor seja melhor versado em *Adobe Photoshop* também poderá realizar a subtração nesse software colocando as duas imagens em camadas sobrepostas e colocando a camada da imagem que se pretende subtrair no modo *Difference*. Abaixo deixamos uma figura do resultado da subtração de duas imagens capturadas, uma ao calor libertado pela chama de uma vela, outra apenas ao fundo, na ausência de escoamento.

Apesar de o processo de subtração de imagens produzir resultados quantitativos, o mesmo não tem a capacidade de produzir resultados quantitativos, que são o presente objetivo do nosso estudo. Por forma a podermos retirar informações sobre o par de imagens capturados, necessitamos de recorrer ao *software open source PIVlab*, este software é uma aplicação do *Matlab*, mas no entanto possui a sua própria interface gráfica e o seu próprio ambiente de trabalho, diferente e independente do ambiente de trabalho do *Matlab*. Os formatos de imagem suportados por este software consistem em `.bmp`, `.jpg`, ou `.tiff`, este software possui também ferramentas, nomeadamente filtros, que permitem um pré-processamento das imagens por forma a que o *software* capte melhor as partículas, melhorando também assim os resultados. Este software

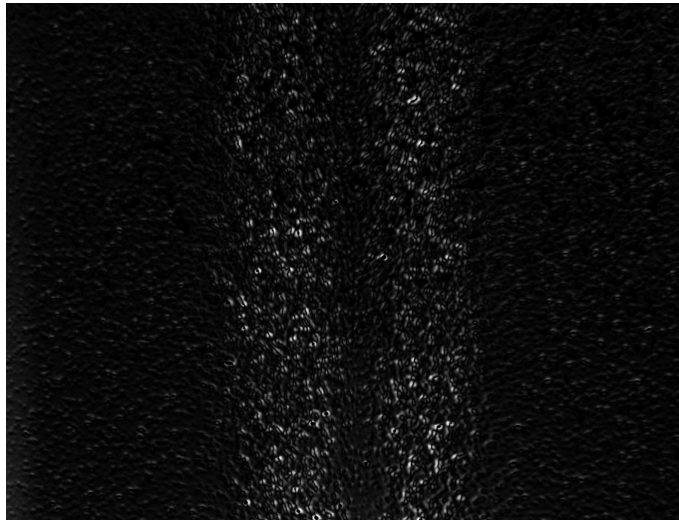


Figura 4.10: Visualização do calor produzido pela chama de uma vela. Fotografia capturada com recurso à técnica BOS, cujo tratamento foi realizado em *Matlab*.

compara as duas imagens importadas pelo utilizador e determina o deslocamento das partículas presentes, de uma imagem para a outra, por forma a fazer isto, o mesmo possui dois algoritmos, o algoritmo *direct cross correlation* e o algoritmo *multi pass window deformation*. Este software permite ainda ao utilizador realizar uma calibração das imagens, a qual após inserirmos uma imagem, podemos marcar nela uma linha e definir qual o comprimento dessa linha no objeto real, após a marcação da linha o software fornece então uma correspondência em pixeis, sendo assim possível ao experimentalista determinar a relação que existe entre as distâncias em pixeis e as distâncias reais. Por fim existe ainda uma função de validação de vetores, que permite ao experimentalista, filtrar os seus resultados, removendo pequenos erros residuais, como no caso, vetores que apresentem valores muito afastados da média esperada. Abaixo podemos ver uma captura de ecrã do referido software.

Após processarmos as imagens no software PIVlab, o nosso resultado é um campo de vetores, cujo módulo, deve ter como interpretação o deslocamento das partículas no fundo escolhido, devido à deflexão sofrida pela luz, aquando do contacto com o objeto de fase. Estes valores serão da maior importância aquando da reconstrução dos campos de densidade e temperaturas.

Aquando do uso do software PIVlab, é necessária a definição de uma janela de interrogação, neste passo devemos ter cuidado para que as dimensões da mesma não sejam inferiores às dimensões das partículas utilizadas, em adição a isso, devemos considerar que por forma a termos uma boa resolução nos resultados a janela de interrogação também não deve ser demasiado grande. Nos ensaios realizados na presente dissertação o tamanho utilizado para a janela de interrogação foi de 32 x 32 ou de 16 x 16 pixeis, dependendo das necessidades dos alinhamentos, objetos de fase e respetivos ensaios no geral.

4.3.2 Os fundos utilizados para o estudo e calibração da técnica BOS

Como já vimos em secções anteriores da presente dissertação, existem vários tipos de fundos para a técnica BOS, mas o fundo que iremos utilizar na presente técnica é um fundo artificial. Sabemos também que o fundo utilizado na técnica BOS, é um dos elementos a ter em maior atenção, uma vez a sensibilidade da técnica dependerá do fundo escolhido. Geralmente existem três tipos de fundo artificial utilizados experimentalmente, padrões de ponto regulares,

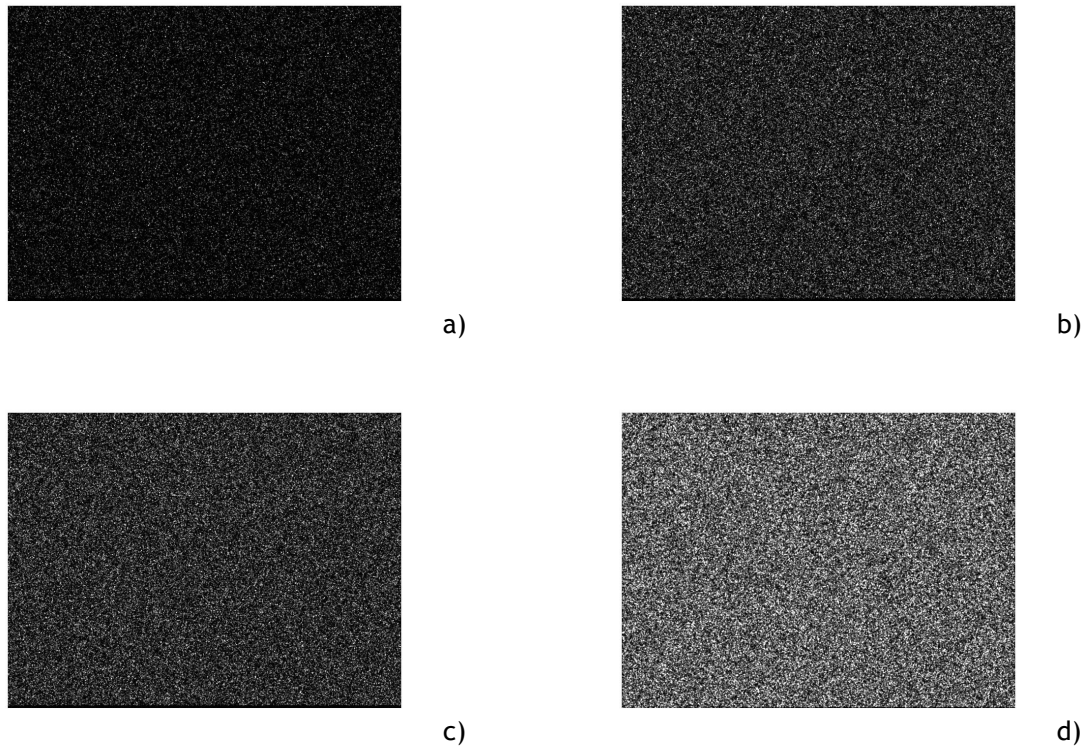


Figura 4.11: Fundos artificiais, de partículas dispersas, criados através do software PIVlab, partículas de 2 pixels; a) 200000 partículas ; b) 500000 partículas ; c) 600000 partículas ; d) 900000 partículas.

irregulares e um terceiro grupo denominado *Wavelet-noise*, ruído oscilante.

Os fundos de pontos distribuídos regularmente apresentam algumas desvantagens, devido ao facto de apresentarem um comportamento periódico em toda a sua extensão, isto pode causar com que por exemplo se a janela de interrogação definida pelo experimentalista for de tamanho igual ou superior ao período do padrão, os resultados não serão válidos. Quanto aos fundos de ruído oscilante, foram desconsiderados para o presente estudo devido o facto de induzirem uma grande quantidade de desfoque nas imagens obtidas, assim sendo o fundo empregado na presente dissertação, consiste em em fundo de pontos distribuídos aleatoriamente .Que é alias o tipo de fundo sintético mais utilizado experimentalmente pela comunidade científica.

Como já vimos a presente técnica baseia-se na deteção da movimentação, das partículas constituintes do fundo, portanto o tamanho, quantidade e dispersão das mesmas são fatores a ter em consideração aquando da escolha do fundo. Em termos de tamanho das partículas, como já foi referido anteriormente, temos da literatura que as partículas devem apresentar entre 2 a 3 pixels de diâmetro, sendo que este diâmetro se refere ao tamanho das partículas na imagem capturada pela câmara CCD e não ao tamanho das mesmas no fundo utilizado.

Os fundos utilizados por forma a captar fotografias schlieren, foram feitos utilizando uma aplicação *open source*, para o *software Matlab*, no qual podemos então especificar determinados parâmetros, tais como o número de pixels referentes à altura e à largura desejadas para a imagem final, número de partículas presentes na imagem final, diâmetro das partículas e o um distanciamento máximo que o diâmetro das partículas pode ter, em relação ao diâmetro definido, foi utilizado no presente estudo um tamanho de 2 pixels, com um desvio máximo de 0.5 deste valor. Acima mostramos uma imagens de vários fundos de pontos distribuídos criados com recurso ao *software* acima referido.

Por forma a melhorarmos o nosso alinhamento, foram realizados ensaios com vista a oti-

Uma abordagem experimental ao vento iónico gerado por um atuador a plasma

mizar o fundo escolhido, ensaios esses que consistiram, na captura de fotografias schlieren, das diferenças de densidade causadas no ar, pelo calor libertado pela chama de uma vela, com diferentes fundos. A diferença entre todos os fundos utilizados para o referido ensaio, reside no facto de todos os fundos possuírem um número diferente de partículas entre si, mantendo as restantes características dos mesmos, constantes. abaixo podemos ver uma imagem, onde se encontram os fundos sujeitos a análise na presente dissertação.

Após a captura dos pares de imagens, para os diferentes fundos, os mesmos foram submetidos a uma análise e com recurso ao software *PIVLab*, onde foram determinados os deslocamentos das partículas, abaixo podemos ver os resultados do presente estudo, para os fundos de 300000 e 600000 partículas.

Como podemos ver na figura abaixo apresentada, o deslocamentos máximo e mínimo das partículas mantêm-se constantes nos dois fundos testados, o que é consistente com o facto de estarmos a analisar o mesmo objeto de fase nos dois casos, mas podemos ver que no fundo com 300000 partículas existe uma zona no lado superior esquerdo do objeto de fase que, devido à baixa densidade de partículas naquela região do fundo, não está bem definida, podemos ver que essa zona apresenta algumas melhorias na definição no fundo com 300000 partículas, mas podemos ainda entender que algo não está correcto uma vez que o objecto de fase devia apresentar um nível superior de simetria, por esse motivo apresentamos então ainda mais abaixo os resultados dos ensaios relativos a fundos com 800000 e 900000 partículas constituintes.

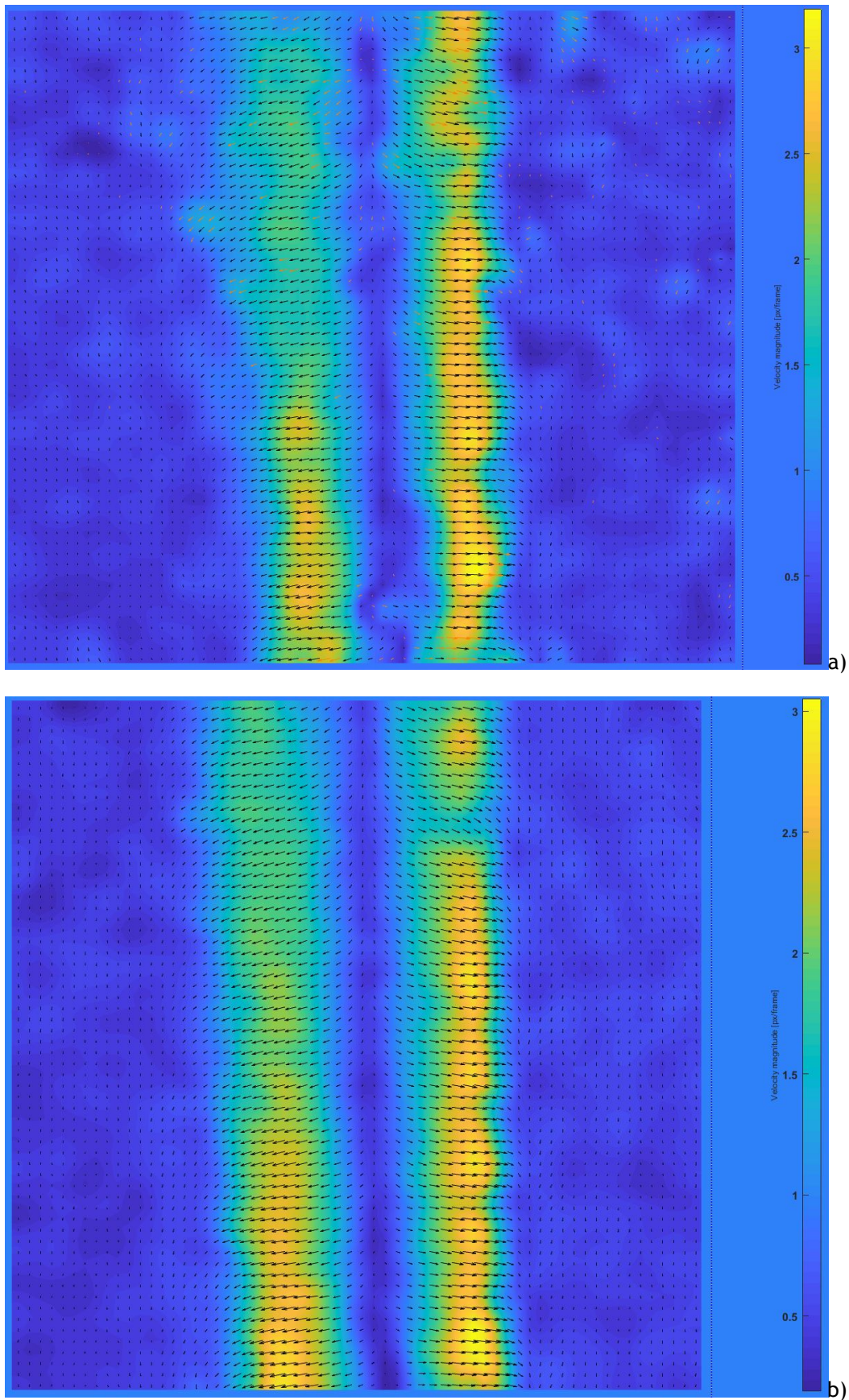


Figura 4.12: Fotografias obtidas através da técnica BOS, das diferenças de densidade causadas no ar pela chama de uma vela, após determinação dos deslocamentos das partículas constituintes do fundo; Ensaios para fundos com diferentes números de partículas constituintes; a) 300000 Partículas ; b) 600000 partículas.

Uma abordagem experimental ao vento iônico gerado por um atuador a plasma

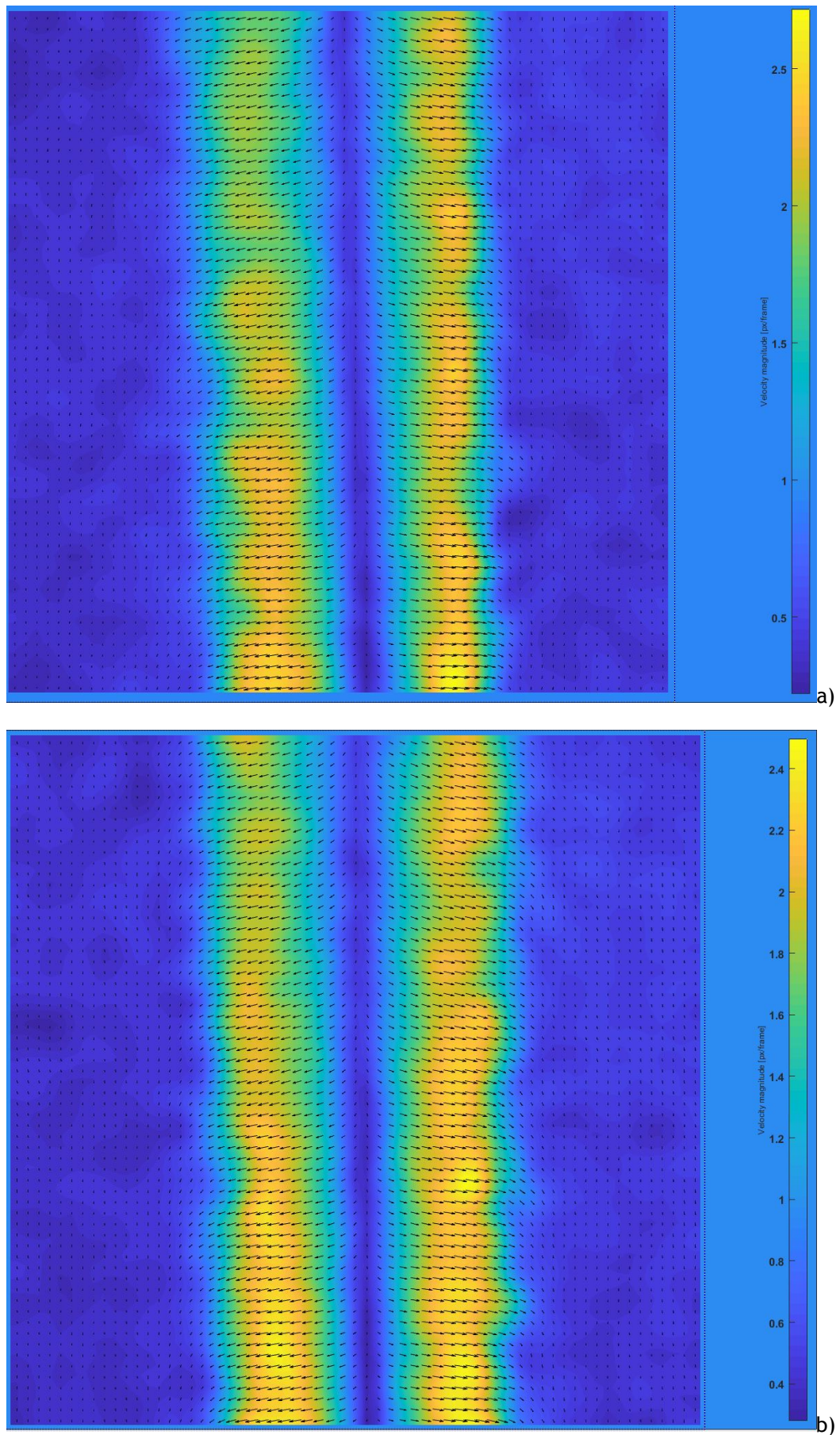


Figura 4.13: Fotografias obtidas através da técnica BOS, das diferenças de densidade causadas no ar pela chama de uma vela, após determinação dos deslocamentos das partículas constituintes do fundo; Ensaios para fundos com diferentes números de partículas constituintes; a) 800000 Partículas ; b) 900000 partículas.

Uma abordagem experimental ao vento iônico gerado por um atuador a plasma

Devemos agora notar que ambos os fundos apresentam melhorias significativas quando comparados com os dois apresentados anteriormente, vemos também que o fundo de 900000 apresenta melhor definição do objeto de fase do que o fundo de 800000, o que nos leva a querer que quanto mais partículas, melhor definição iremos obter, ora pois essa é uma ideia errônea e ingênua, uma vez que logicamente, estando o fundo limitado às dimensões definidas pelo experimentalista, se este aumentar o número de partículas indefinidamente, o fundo irá saturar, ou seja, as partículas irão começar a sobrepor-se, e eventualmente o fundo será apenas da cor das partículas. Por forma a ilustrar o acima referido, foi posteriormente realizado um teste a um fundo consistido por 130000 partículas, cujos resultados se apresentam abaixo.

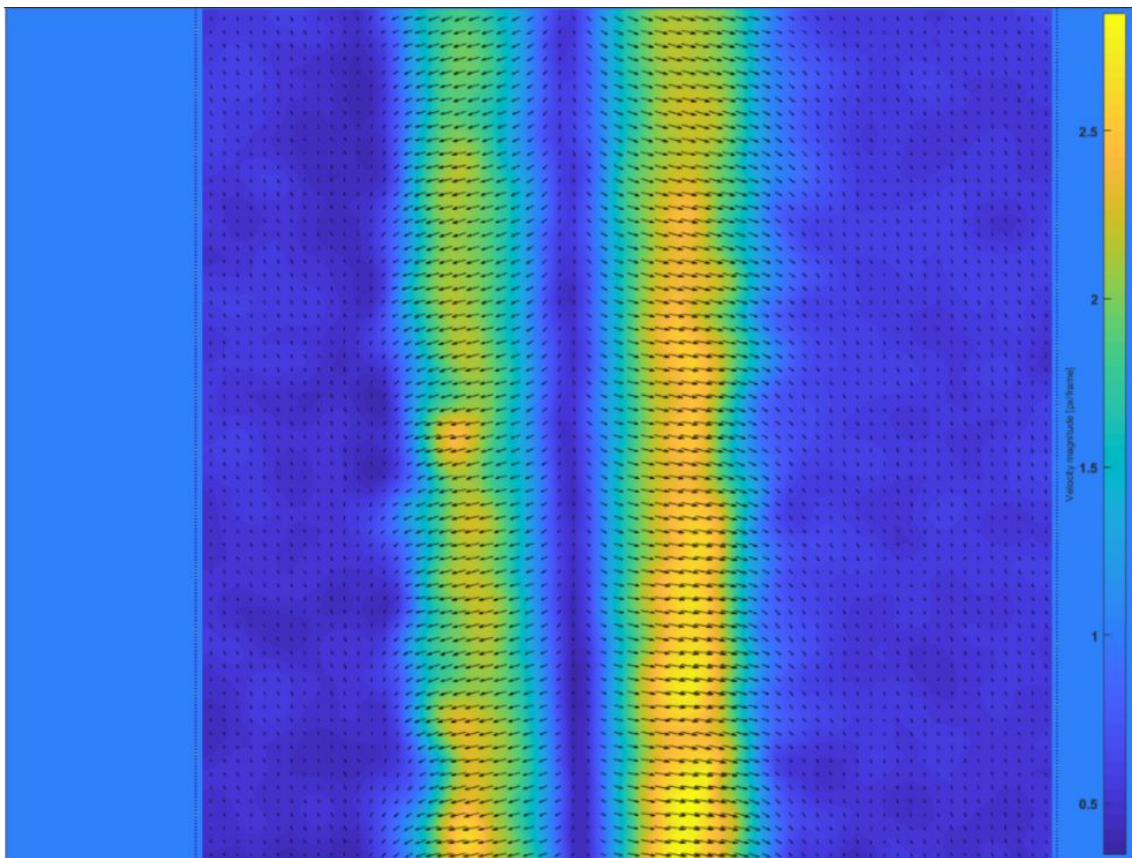


Figura 4.14: Fotografias obtidas através da técnica BOS, das diferenças de densidade causadas no ar pela chama de uma vela, após determinação dos deslocamentos das partículas constituintes do fundo; Ensaios para fundos com diferentes números de partículas constituintes, o presente fundo apresenta 130000 partículas constituintes.

Como podemos ver a partir de um determinado número de partículas, começamos a perder a definição no objeto de fase, isto é devido ao elevado número de partículas no fundo, e devido à sua sobreposição, que quando é excessiva, causa com que as partículas que passam a ser analisadas, não são as definidas pelo experimentalista no *software*, mas sim os espaços do fundo que sobram entre os aglomerados de partículas, e o aumento for tão elevado, que o fundo passe a ser constituído exclusivamente de partículas, o objeto de fase tornar-se-à então novamente invisível.

4.3.3 A técnica de reconstrução das temperaturas e densidades

O deslocamento das partículas no fundo que como já vimos pode se obtido através de um software que possua um algoritmo de *cross correlation*, no nosso caso em específico o PI-Vlab, como já vimos em capítulos anteriores é um dado de carácter quantitativo, que nos permite calcular parâmetros de interesse. Recordemos a equação 3.16 descrita no capítulo 3, olhando novamente para esta equação, vemos agora que o nosso campo de deslocamentos corresponde precisamente às variáveis Δx e Δy , além disso e uma vez que os valores fora do integral são constantes e referentes a parâmetros do alinhamento utilizado e do meio envolvente, ou seja são facilmente mensuráveis pelo experimentalista e permitem ao mesmo o calculo do valor das variações do índice de refração, no intervalo do espaço onde se encontra o nosso objeto de fase sujeito a análise. Vemos aqui então uma relação de proporcionalidade entre os deslocamentos das partículas do fundo e os índices de refração presentes no meio sujeito a análise, tanto na direção do eixo do xx como na direção do eixo dos yy e segundo a literatura [3], a equação de Poisson que descreve a distribuição dos índices de refração no espaço sujeito a análise, pode ser derivada das equações 3.16, e tem a forma apresentada no capítulo 3, equação 3.17. Uma vez obtidos os deslocamentos no fundo é ainda necessária a introdução de condições de fronteira por forma a resolver a equação de Poisson. Geralmente as fronteiras assumem-se distantes do objeto a analisar e portanto não interferente com o escoamento do mesmo, portanto, antes do inicio de cada ensaio é medida a temperatura do ar ambiente com recurso a um termómetro, e consultada uma tabela de índices de refração, é então usado o valor obtido da tabela como valor para as condições de fronteira, aquando da resolução da equação de Poisson.

A resolução da equação de Poisson é feita com recurso a um script desenvolvido para o *software Matlab*, o *script* utilizado baseia-se em métodos iterativos por forma a resolver a dita equação, nomeadamente utiliza o método das diferenças finitas, com um esquema de quarta ordem.

Após a resolução da equação de Poisson o experimentalista fica na posse de um campo de índices de refração bi dimensional após isso a distribuição do campo de densidades pode ser facilmente calculado com recurso à relação de Gladstone-Dale, que se encontra apresentada na equação abaixo

$$\rho = \frac{n - 1}{K}. \quad (4.1)$$

Sendo ρ a densidade que pretendemos determinar, n o índice de refração obtido, e K a constante de Galdstone Dale, já discutida em capitulos anteriores, que é uma constante que apresenta um valor de aproximadamente $2.27 * 10^{-4} m^3/kg$, para o ar e para luzes com comprimentos e onda na gama do visível. Após a obtenção do campo de densidades o experimentalista pode ainda obter o campo de temperaturas a partir dos dados que já possui, apesar de que o processo para a obtenção de temperaturas pode ser um pouco mais traiçoeiro, pois a temperatura depende não apenas da densidade mas também da pressão, como nos é dito na equação de estado dos gases, que podemos ver abaixo.

$$P = \rho * R * T. \quad (4.2)$$

Onde P é a pressão, R é a constante dos gases que é aproximadamente 287 para o ar às condições normais, e T é a temperatura. Contudo para casos experimentais abertos ao ambiente

Uma abordagem experimental ao vento iônico gerado por um atuador a plasma

em que o movimento do fluido gasoso é completamente livre, a hipótese que o escoamento está sujeito a uma pressão constante é razoável, consequentemente caso o experimentalista faça uso desta hipótese, pode também determinar a distribuição de temperaturas utilizando a equação abaixo apresentada.

$$T = \frac{\rho_0 T_0}{\rho}. \quad (4.3)$$

Onde ρ_0 representa a densidade do gás do meio envolvente, tal como T_0 representa a temperatura do meio envolvente, ambos estes parâmetros devem então ser medidos antes, ou depois dos ensaios laboratoriais, por forma a obter a distribuição de temperaturas no plano do objeto de fase.

Apesar da descrição acima feita, deixamos ainda abaixo, por forma a facilitar a compreensão do leitor, um fluxograma contendo as várias etapas no que diz respeito ao processo de obtenção de dados quantitativos, de fotos schlieren.

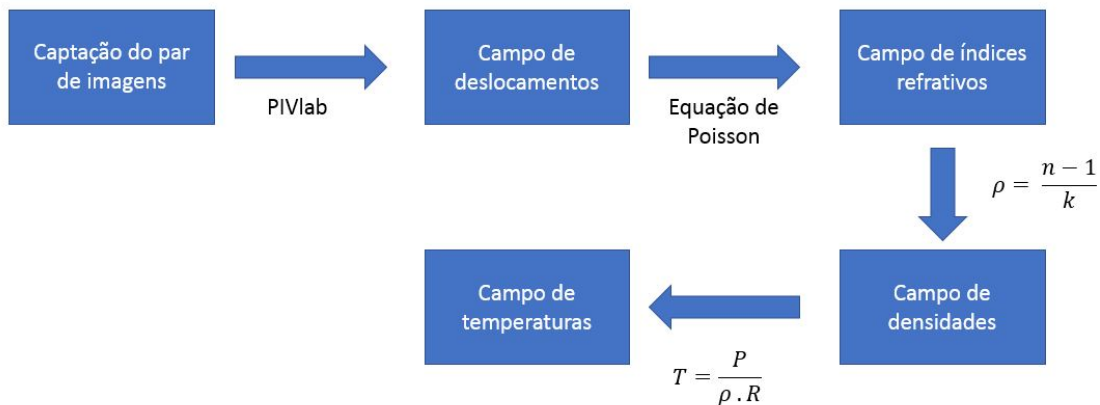


Figura 4.15: Fluxograma contendo as várias etapas necessárias ao correto processamento de dados, com vista à obtenção de dados quantitativos de fotografias schlieren.

4.3.4 Ensaios com atuadores a plasma

Após terem sido levados a cabo todos os ensaios acima referidos, e se ter alcançado uma sensibilidade considerada satisfatória, o alinhamento previamente descrito foi então utilizado para estudar quatro atuadores a plasma, todos eles com camadas dielétricas de espessuras diferentes. Os presentes ensaios foram realizados no seguimento dos ensaios feitos para a técnica schlieren de espelho simples, pelo que nos ensaios referentes apenas foi testada uma tensão pico a pico. Sendo o motivo disso o facto de o objetivo deste ensaio ser, entender qual a influência da espessura da camada dielétrica, na porção de potência elétrica que é dissipada em calor e na porção que é dissipada sob a forma de trabalho, nomeadamente, formação de escoamento induzido. Pretende-se também avaliar o comportamento do atuador a plasma do tipo DBD em termos de dissipação de calor produzido pelo eletrodo exposto.

Os ensaios laboratoriais consistiram primeiramente, na montagem e alinhamento cuidadoso de todos os componentes óticos do sistema, tendo em consideração não apenas as distâncias relativas entre componentes, mas também as alturas e as possíveis lateralidades, sendo este um

Uma abordagem experimental ao vento iônico gerado por um atuador a plasma

processo de elevada minúcia e rigor, por forma a garantir a maior precisão possível dos resultados obtidos. Devemos referir que as distâncias relativas utilizadas no presente alinhamento foram de 2.15 m entre o fundo e o objeto de fase e 1.55 m entre o objeto de fase e a lente da objetiva utilizada, tendo assim o nosso alinhamento uma extensão de 3.70 m, a distância da lente ao sensor da máquina é de 0.15 m, este é um dado de extrema importância para cálculos a serem efetuados. A tensão escolhida para os referidos ensaios foi de 9 kVpp, uma vez que esta confere uma boa gama de comportamentos entre diferentes espessuras de camada dielétrica.

Após a montagem e alinhamento de todos os componentes, referentes ao funcionamento do atuador a plasma e referentes à captura de imagens schlieren, foi primeiramente capturada uma fotografia de calibração, que consiste em uma fotografia que contenha algum objeto mensurável, por forma a ser possível identificar no *software PIVlab*, qual a relação entre os pixels da imagem capturada e as distâncias no mundo físico, real, no nosso caso foi utilizada uma fita métrica encostada ao fundo. É muito importante que a calibração desta relação seja feita no fundo, e não no plano do objeto de fase, uma vez que estamos a medir o deslocamento das partículas presentes no fundo. Seguidamente após a calibração feita, é capturada uma fotografia do fundo na ausência do objeto de fase, ou seja, com o atuador a plasma desligado. Tendo sido capturada essa imagem o atuador é ligado, e deixado funcionar cerca de 180 segundos, a 9kVpp, por forma a que o escoamento induzido por este atinja um comportamento constante, passados 180 segundos de funcionamento é capturada outra imagem, que como é simples de inferir, contém um objeto de fase. Este processo foi repetido para os quatro atuador a plasma do tipo DBD com camadas dielétricas de espessuras diferentes.

Os resultados referentes aos ensaios acima descritos, podem ser encontrados, tal como a sua discussão, no capítulo 5 da presente dissertação e pretende-se com os mesmos contribuir para o melhor entendimento do funcionamento dos atuadores a plasma do tipo DBD, mais especificamente para o melhor entendimento dos seus mecanismos de dissipação de energia sob a forma de calor ou sob forma de trabalho.

4.4 A construção dos atuadores a plasma do tipo DBD

Os atuadores a plasma utilizados no presente estudo são constituídos por uma camada dielétrica de Kapton, e por um eletrodo exposto e outro coberto, ambos de cobre. Por forma a construir a camada dielétrica foi utilizada fita de kapton, sendo que previamente, se procedeu à medição da espessura da mesma, com recurso a um micrómetro, e a fita apresenta uma espessura de aproximadamente 0.06 mm. A construção da camada dielétrica a utilizar no nosso atuador a plasma do tipo DBD, baseia-se então na sobreposição de várias camadas desta fita de kapton. Possibilitando-nos esta técnica a criação de camadas dielétricas com diferentes espessuras. Aquando da construção da camada dielétrica com recurso a esta técnica o experimentalista deve ter em atenção, cada vez que aplica uma nova camada de kapton, sobre a anterior, para que não deixe bolhas de ar entre as duas camadas, pois isso irá afetar o desempenho do atuador e promover a degradação precoce do eletrodo.

Os eletrodos exposto e coberto, na presente configuração apresentam-se assimétricos. Tal disposição dos mesmos facilita a ligação da fonte de alimentação aos terminais dos mesmos e não afeta de forma alguma a formação do plasma.

Na figura abaixo apresentada mostram-se quatro atuadores a plasma, todos eles com camadas dielétricas com espessuras diferentes, mas todos eles com dimensões iguais, sendo que todos eles apresentam 5 cm de largura e 4 cm de altura, os eletrodos exposto e coberto apre-

Uma abordagem experimental ao vento iônico gerado por um atuador a plasma

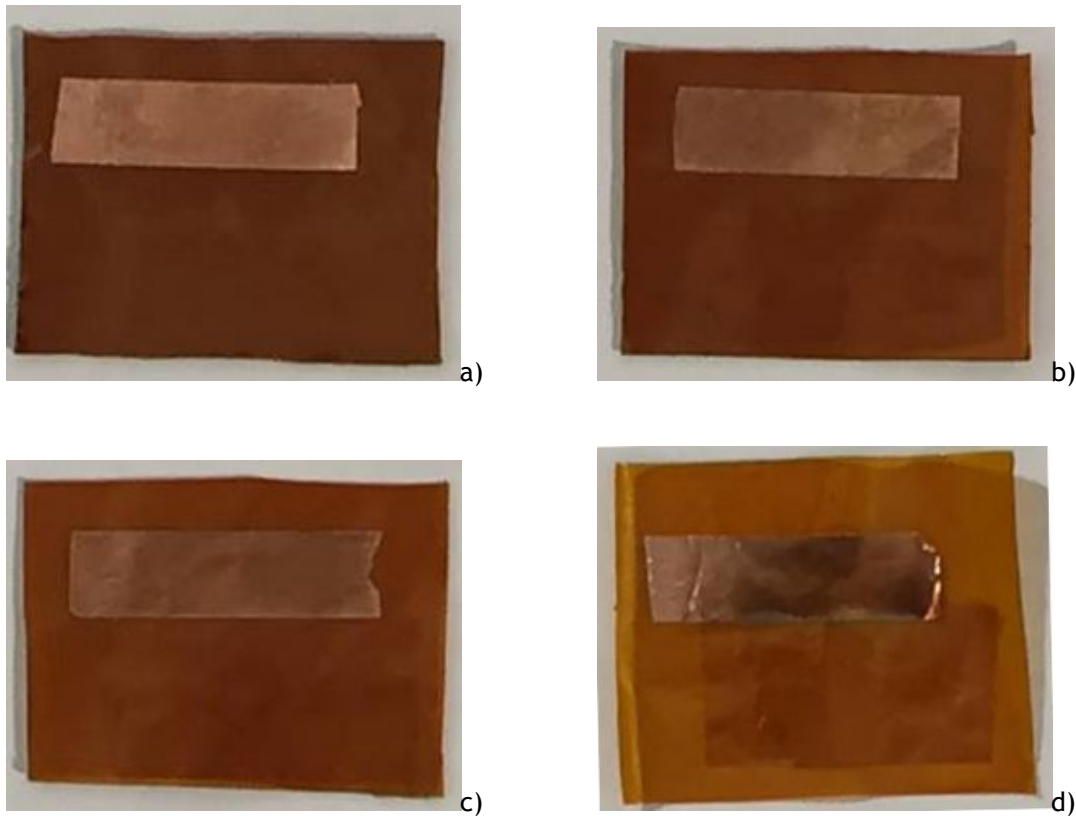


Figura 4.16: Atuadores a plasma do tipo DBD, utilizados no presente estudo; a) 1.2 mm de espessura; b) 0.9 mm de espessura; c) 0.6 mm de espessura; d) 0.3 mm de espessura.

sentam ambos uma largura de 3.5 cm, sendo que 0.5 cm são destinados a fazer a ligação à fonte de alimentação, a nossa região de formação de plasma apresentará então 3 cm. As reduzidas dimensões desta região de formação de plasma são intencionais, uma vez que queremos que o nosso objeto de fase seja o menos espesso possível, pois estando nós a capturar fotografias e a realizar uma análise quantitativa em duas dimensões, quanto menor for a espessura do objeto de fase, menor será o erro que estamos a induzir por realizar a consideração de o nosso objeto ser bidimensional.

Tal como já foi referido em secções anteriores da presente dissertação, por forma a se proceder à ionização do ar criando aquilo que é gerlamente designado por plasma, os atuadores devem ser alimentados por uma fonte de corrente alternada que seja capaz também de oferecer alta tensão e alta frequência. Para esse fim foi então utilizada uma fonte PVM500 que é capaz de nos oferecer correntes, tensões e frequências com os requisitos anteriormente referidos. Esta fonte é fabricada pela *Information Unlimited* e é capaz de debitar uma tensão alternada de até 20 kVpp e uma frequência na gama entre os 20 e os 50 kHz. A corrente debitada pela mesma, pelo outro lado apresenta valores reduzidos, podendo ir tão baixo como 10 mA e a potência da mesma é de aproximadamente 200 W. Esta fonte é ainda capaz de fornecer um sinal de alimentação alternado periódico sinusoidal, ou injetar outro determinado ciclo de trabalho.

Capítulo 5

Resultados

No presente capítulo iremos apresentar e discutir os resultados obtidos nos ensaios com atuadores a plasma, com recurso à técnica schlieren de espelho simples e à técnica de schlieren orientado para o fundo, pretende-se com estes resultados caracterizar o escoamento induzido por um atuador a plasma do tipo DBD e estudar a influência da espessura da camada dielétrica do atuador, no escoamento induzido gerado pelo mesmo.

5.1 Resultados da caracterização elétrica dos atuadores a plasma

Na presente secção iremos expor e discutir os resultados obtidos, através das técnicas de estimativa da potência consumida por um DBD, discutidas já em capítulos anteriores. A análise do consumo energético é feita para atuadores a plasma com diferentes espessuras da camada dielétrica.

As formas de onda da tensão e da corrente foram capturadas. Podemos ver na figura abaixo um exemplo de uma forma de onda capturada durante os ensaios laborariais. Abaixo apresenta-se representada a forma de onda que diz respeito ao atuador de 0.6mm durante o seu funcionamento a 5 kVpp.

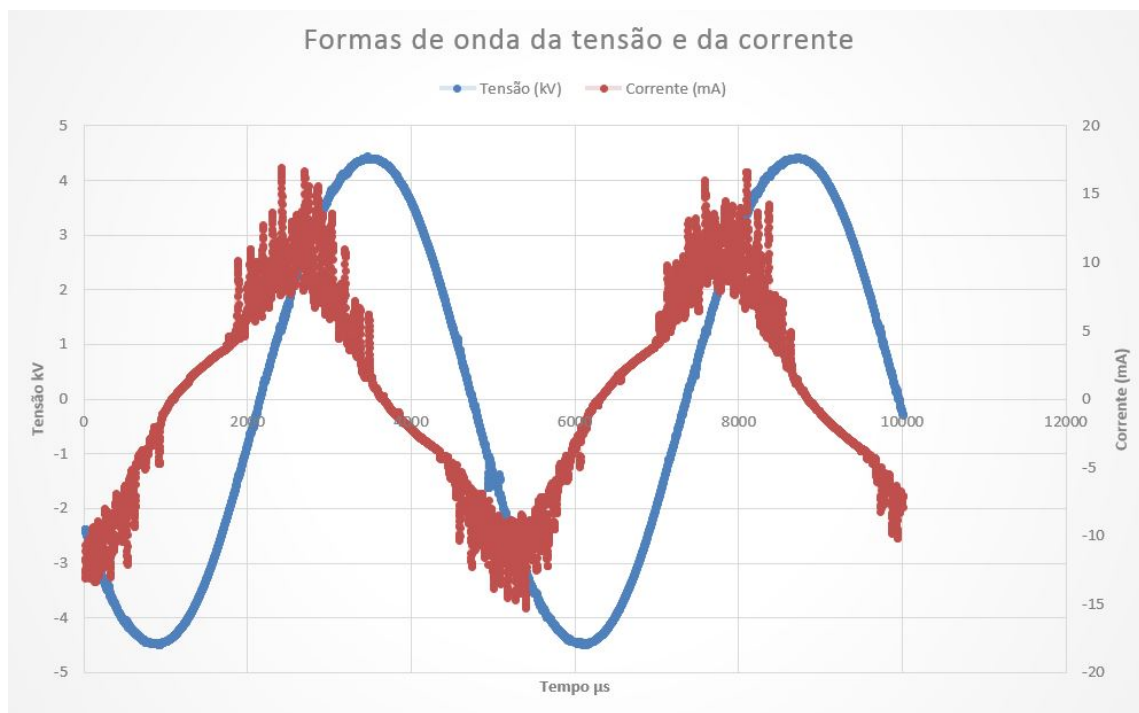


Figura 5.1: Visualização da forma de onda da tensão e corrente no atuador a plasma do tipo DBD.

Como podemos ver a forma de onda respeitante à tensão apresenta uma forma altamente sinusoidal. Enquanto a forma de onda da corrente, apesar de também seguir a mesma tendência, apresenta uma forma diferente, tendo diversos picos ao longo da sua onda. Estes picos,

Uma abordagem experimental ao vento iônico gerado por um atuador a plasma

correspondem a momentos de microdescargas, por parte do atuador a plasma, micro descargas essas que causam alterações bruscas na impedância da camada dielétrica. Como podemos ver estes picos surgem cerca de duas vezes por ciclo da corrente, ao mesmo tempo que é formado plasma sobre a barreira dielétrica. Seguidamente analisamos o consumo energético dos atuadores a plasma do tipo DBD. Como já foi referido este consumo energético foi estimado para os atuadores com camadas dielétricas de 0.3 , 0.6 , 0.9 e 1.2 mm de espessura, todos eles feitos do mesmo material. Utilizando os dados referentes à tensão e à corrente o consumo energético foi então calculado com recurso à formulação 3.4. Abaixo podemos ver um gráfico representativo dos resultados obtidos, sendo que foram testadas uma gama de tensões aplicadas de 4 kVpp a 9 kVpp e a frequência utilizada é de 24 kHz.

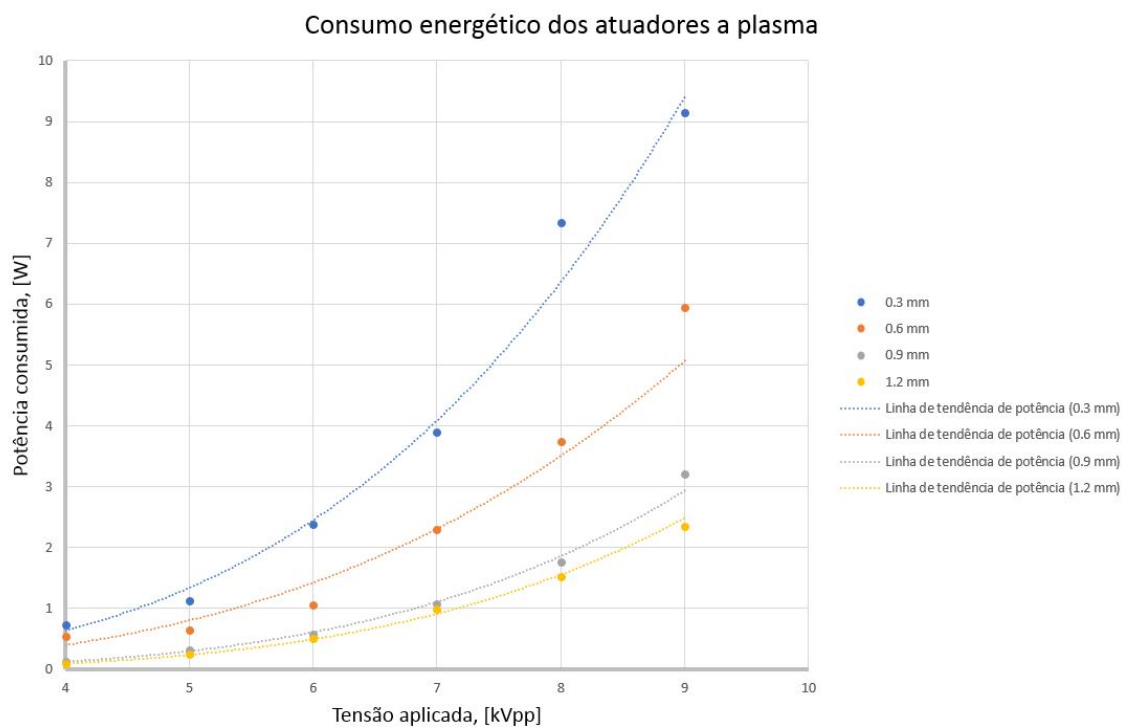


Figura 5.2: Resultados obtidos para o consumo energético, para quatro atuadores a plasma do tipo DBD, cuja camada dielétrica apresenta espessuras diferentes.

Como podemos ver o atuador 0.3 mm é o que apresenta um maior consumo energético. Durante os ensaio, foi também verificado que este atuado é o que apresenta uma tensão de funcionamento máxima mais baixa.

Podemos ver que a um aumento da espessura da camada dielétrica corresponde uma diminuição da potência consumida. Experimentalmente, também nos foi possível verificar que, um aumento de espessura na camada dielétrica, também causa com que a formação do plassma apenas se dê para tensões mis elevadas. A título de exemplo, enquanto no atuador a plasma de 0.3 mm esta formação se dá perto dos 6kVpp , em um atuador de 1.2 mm tal fenómeno apenas se verifica aos 7 ou 8 kVpp.

5.2 Estudo de DBD's usando a técnica schlieren de espelho simples fora de eixo.

Nesta secção iremos apresentar os resultados obtidos, através da técnica schlieren de espelho simples, como já vimos em secções anteriores, esta técnica e o objetivo destes ensaio laboratoriais apresentam um carácter qualitativo, permitindo ao experimentalista obter uma melhor noção, e dotando-o de um maior tato no que ao vento iónico gerado por um atuador a plasma do tipo DBD diz respeito.

Abaixo podemos ver os resultados obtidos para o atuador a plasma de cinco camadas que apresenta uma espessura de 0.3 mm , sendo que este é o atuador que apresenta a camada dielétrica menos espessa de todos os quatro testados, o mesmo não suporta tensões tão elevadas quanto os restantes, sendo que o dielétrico do mesmo se degrada aquando da aproximação dos 10 kVpp.

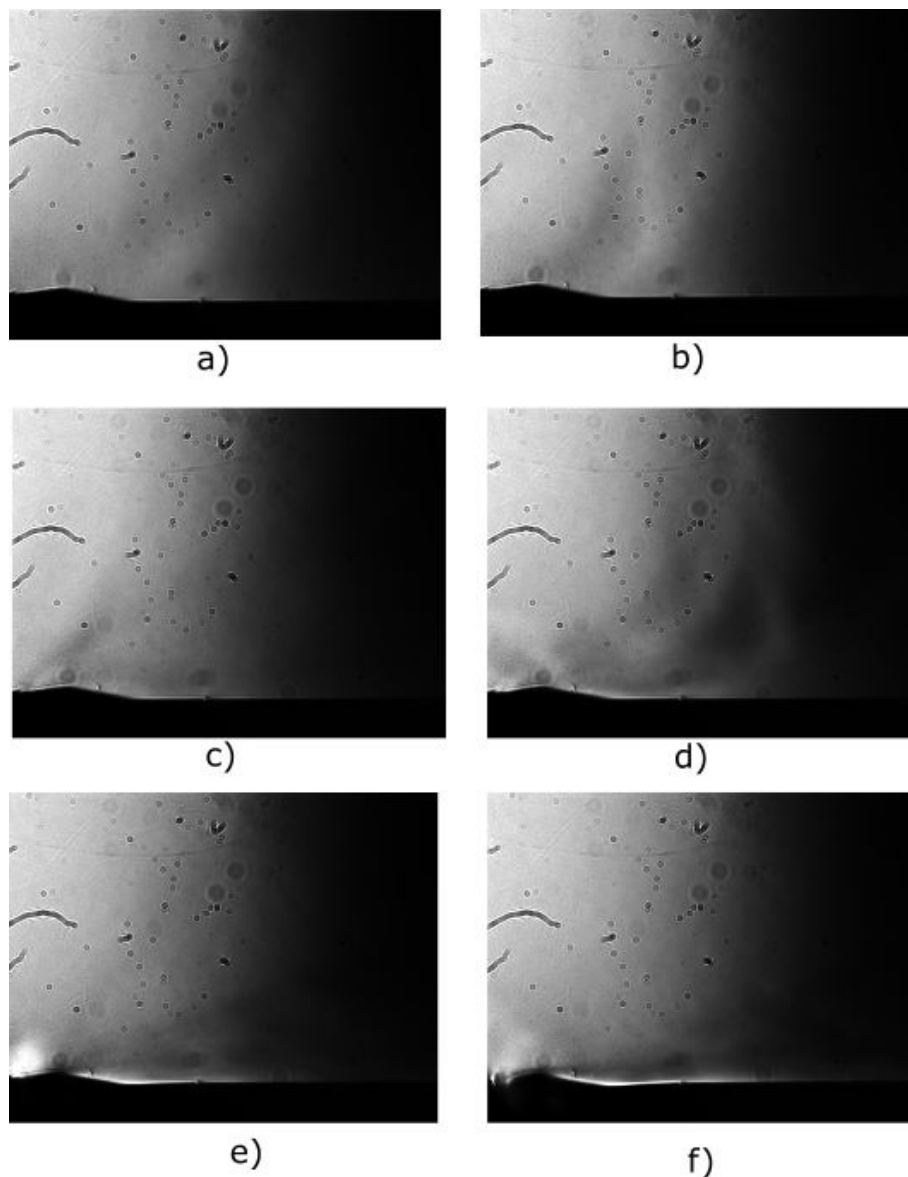


Figura 5.3: Visualização do escoamento induzido por um atuador a plasma do tipo DBD com uma camada dielétrica, com 0.3 mm de espessura, montado em uma superfície plana e que atua a tensões de: a) 4kVpp ; b) 5kVpp; c) 6kVpp; d)7kVpp; e) 8kVpp ; f) 9kVpp.

Uma abordagem experimental ao vento iónico gerado por um atuador a plasma

Como podemos ver no presente atuador para as tensões de 4 kVpp, 5 kVpp e 6 kVpp o escoamento induzido é praticamente impercetível, sendo apenas possível visualizar pequenas libertações de calor na zona acima do eléctrodo exposto, que se movimentam também na direcção do escoamento induzido. Conseguimos observar para as tensões de 7 , 8 e 9 kVpp, inicialmente, para a tensão de 7 kVpp, um aumento da libertação de calor e uma aproximação maior do mesmo em direcção à zona do escoamento induzido pelo atuador a plasma, em seguida, nas tensões de 8 e 9 kVpp, podemos observar que o calor libertado pelo eléctrodo exposto integra então, passa a fazer parte, do escoamento induzido pelo nosso atuador a plasma do tipo DBD, atuando assim como uma espécie de partícula marcadora na nossa técnica, permitindo uma melhor visualização do escoamento induzido pelo atuador a plasma.

Na página seguinte podemos ver as fotografias obtidas nos ensaios realizados com um atuador a plasma do tipo DBD, com 10 camadas, a que corresponde uma espessura da camada dielétrica de 0.6 mm, como podemos ver devido à sua maior espessura a degradação da camada dielétrica ocorre mais tarde do que no caso do atuador com 0.3 mm de espessura. No presente caso a degradação da camada dielétrica ocorre aquando da aproximação da tensão aplicada a valores de 12 kVpp.

Uma abordagem experimental ao vento iônico gerado por um atuador a plasma

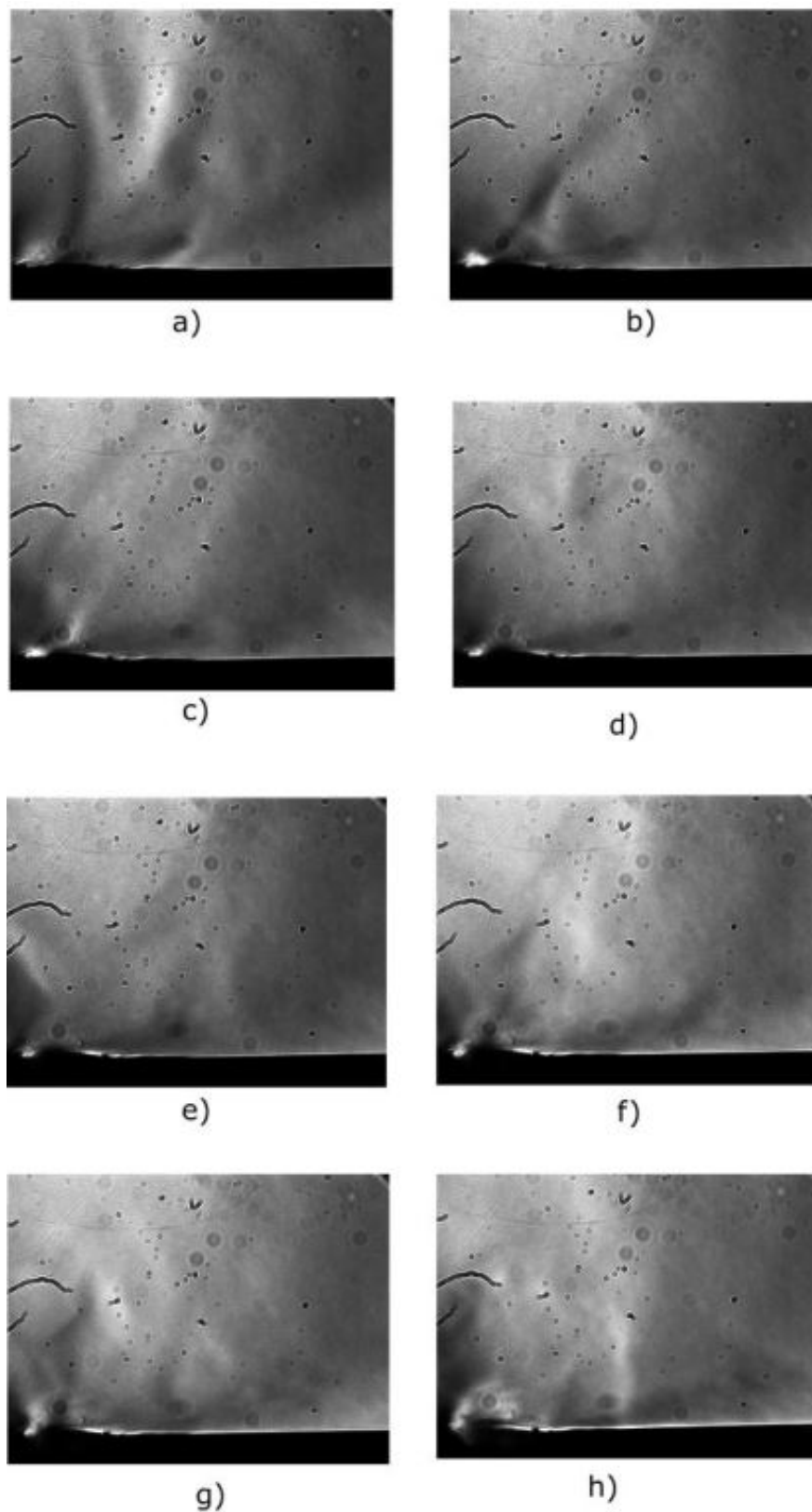


Figura 5.4: Visualização do escoamento induzido por um atuador a plasma do tipo DBD com uma camada dielétrica, com 0.6 mm de espessura, montado em uma superfície plana e que atua a tensões de: a) 4kVpp ; b) 5kVpp; c) 6kVpp; d)7kVpp; e) 8kVpp ; f) 9kVpp.

Uma abordagem experimental ao vento iônico gerado por um atuador a plasma

Primeiramente devemos notar que para o atuador de 0.6 mm existe um geração de calor muito superior, no elétrodo exposto, em relação à geração de calor verificada no atuador de 0.3 mm, tal como podemos ver para a tensão de 4 kVpp, existe um geração de calor na zona acima do elétrodo exposto muito elevada, tal como já vimos esta geração de calor é benéfica para a nossa técnica, pois quando o escoamento induzido pelo atuador a plasma tem força o suficiente para integrar nele o calor dissipado pelo elétrodo exposto, o mesmo vai melhorar as nossas visualizações. Podemos ver que para o atuador de 0.6 mm o escoamento induzido ganha essa força nas tensões de 6 a 8 kVpp, onde se verifica que a maior parte do calor produzido pelo elétrodo exposto do atuador a plasma é dissipado no escoamento induzido. Nas tensões de 9 a 11 kVpp, verificamos que apesar de existir um aumento no escoamento induzido e na sua velocidade, também existe um aumento na dissipação de calor do elétrodo exposto, sendo que o escoamento induzido não conseguiu dissipar todo o calor produzido nestas tensões e o mesmo é então dissipado para a zona diretamente acima do elétrodo exposto.

Iremos agora analisar os resultados referentes ao atuador com uma camada dielétrica com uma espessura de 15 camadas, que corresponde a uma espessura de 0.9 mm, novamente registamos um aumento na tensão na qual se verifica o rompimento da camada dielétrica, em relação aos atuadores testados anteriormente. A camada dielétrica com uma espessura de 0.9 mm, rompe com a aproximação da tensão aplicada a valores de aproximadamente 13 kVpp, mais 1 kVpp do que no atuador com 0.6 mm. Na página seguinte podemos então ver as imagens obtidas com recurso à técnica schlieren de espelho simples fora de eixo, para o atuador a plasma do tipo DBD, com uma camada dielétrica de 0.9 mm de espessura.

Uma abordagem experimental ao vento iônico gerado por um atuador a plasma

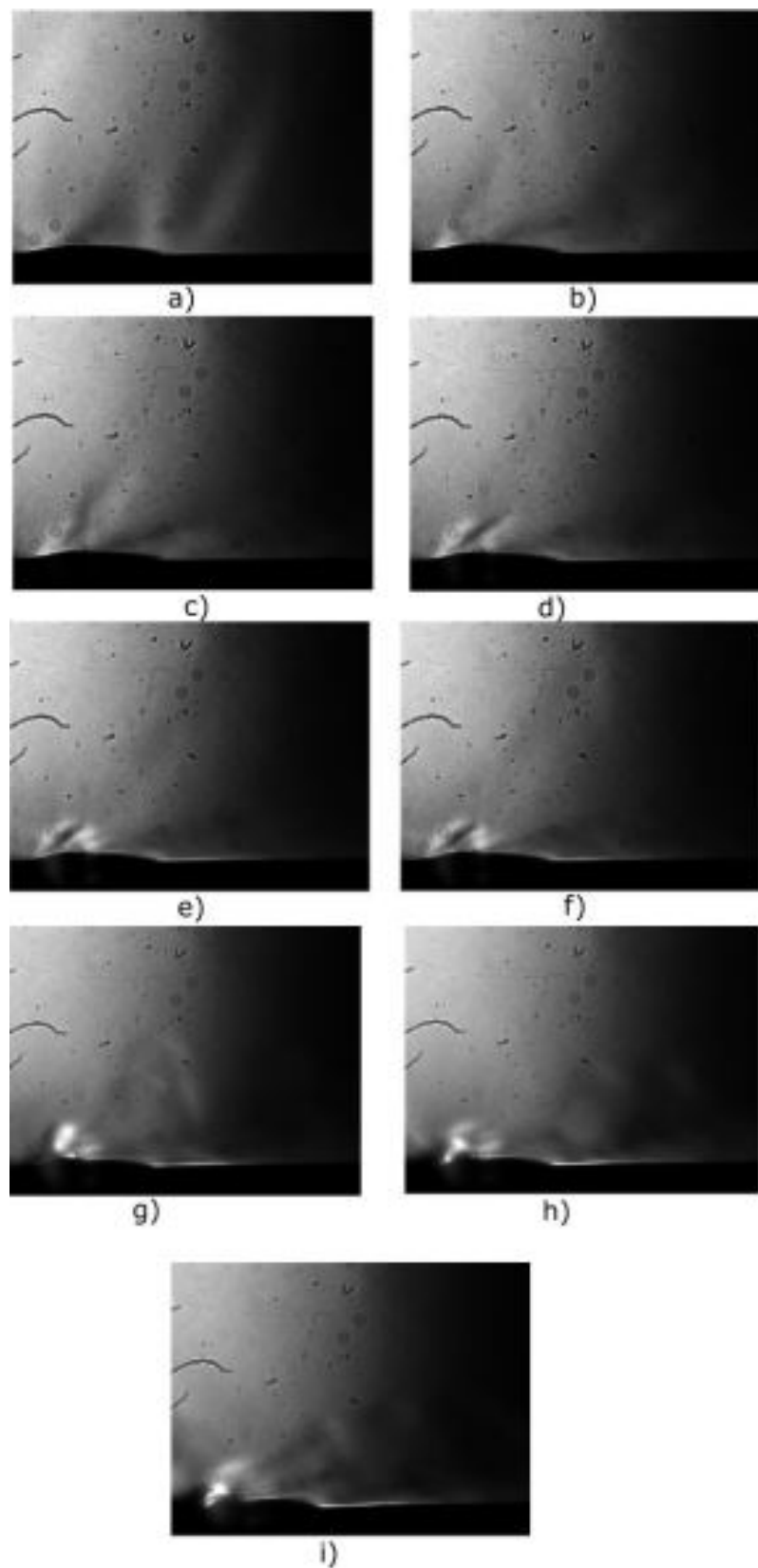


Figura 5.5: Visualização do escoamento induzido por um atuador a plasma do tipo DBD com uma camada dielétrica, com 0.9 mm de espessura, montado em uma superfície plana e que atua a tensões de: a) 4kVpp ; b) 5kVpp; c) 6kVpp; d)7kVpp; e) 8kVpp ; f) 9kVpp.

Uma abordagem experimental ao vento iónico gerado por um atuador a plasma

Inicialmente quando analisamos os resultados obtidos para o atuador a plasma de 0.9 mm, o seu comportamento parece-nos em tudo semelhante ao atuador de 10 camadas, uma vez que a visualização do escoamento induzido ocorre na mesma tensão que o atuador anteriormente apresentado. Mas devemos reparar, que este DBD de 15 camadas apresenta uma relação entre a produção de calor no eléctrodo exposto e a geração de escoamento induzido, que permite dissipar de forma muito eficiente todo o calor produzido no eléctrodo exposto. Como podemos ver praticamente para todas as suas tensões de funcionamento, não existe dissipação de calor na parte superior do eléctrodo exposto, sendo que toda a dissipação do calor se dá no escoamento induzido. Os resultados para este atuador DBD, que inicialmente se mostraram muito semelhantes aos anteriores, mostram-se agora muito promissores, uma vez que este atuador aparenta então ter uma boa eficiência, devido ao bom comportamento verificado no escoamento, tanto no escoamento respeitante ao calor dissipado no eléctrodo exposto como no escoamento respeitante ao vento iónico gerado pelo atuador a plasma do tipo DDD.

Por fim podemos ver na figura da página seguinte os resultados obtidos para o ensaio realizado com um atuador a plasma com uma camada dielétrica de 1.2 mm . Este atuador foi o que permitiu melhores visualizações, fornecendo assim uma informação mais detalhada sobre ambas as vertentes que existem neste escoamento, tanto a vertente do escoamento induzido propriamente dito, como a componente respeitante ao calor dissipado pelo eléctrodo exposto que sendo ela, para determinadas tensões aplicadas, afetada de tal modo pelo escoamento induzido pelo atuador a plasma, que se torna parte integrante do mesmo. Vejamos melhor abaixo na figura.

Como podemos ver, novamente a visualização do escoamento induzido ocorre aos 6kVpp (imagem c)), repare-se que comparando com as visualizações anteriores nas tensões de 6 kVpp, o escoamento induzido para este atuador a plasma, encontra-se com uma definição superior à dos anteriores, o que é indicador, de que o calor produzido pelo eléctrodo exposto está a ser dissipado pelo escoamento induzido, sendo que outro, fortíssimo, indicador deste mesmo facto é a ausência de calor por cima do eléctrodo exposto, vendo-se aliás apenas uma espécie de pequena bolha, que nos indica que existe calor naquela zona.

Novamente podemos ver que a partir de uma certa tensão aplicada a geração de calor no eléctrodo aumenta, não sendo acompanhada por uma aumento de velocidades no escoamento induzido capaz de integrar todo aquele calor, assim sendo o calor é dissipado por convecção, sendo que esta massa de ar quente devido a estar nas imediações do escoamento induzido é acelerada na direção deste. Podemos ver que até à tensão de 10 kVpp a dissipação de calor no escoamento induzido é eficiente, para tensões superiores a isso, o escoamento induzido já não consegue dissipar todo o calor produzido, criando-se assim projecções de calor durante o funcionamento do actuador a plasma. Devemos ainda referir que o eléctrodo exposto do presente atuador apenas rompeu aos 15 kVpp.

Por fim e uma vez que as fotografias capturas nos ensaios acima discutidos, foram capturas com o DBD em funcionamento constante, achámos que no âmbito da presente dissertação deveríamos também caracterizar o início do funcionamento do atuador a plasma, e portanto também o início da formação do escoamento induzido. O início da formação do escoamento induzido é caracterizado pela formação de vórtices, uma vez que o ar ionizado e posteriormente acelerado colide, no início do seu movimento, com uma massa de ar em repouso, o ar ambiente, abaixo podemos ver uma imagem schlieren que captura o fenómeno referido.

Uma abordagem experimental ao vento iônico gerado por um atuador a plasma

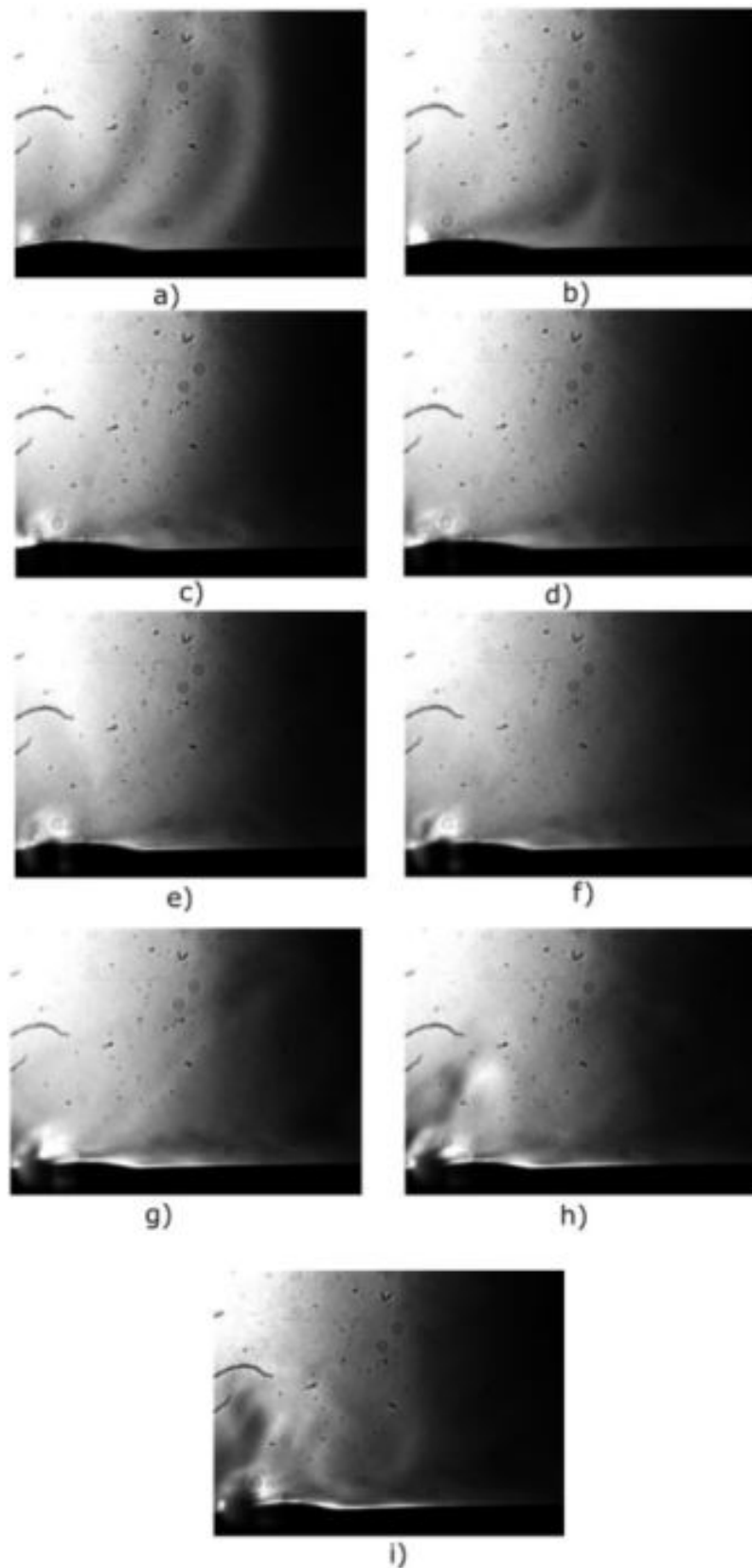


Figura 5.6: Visualização do escoamento induzido por um atuador a plasma do tipo DBD com uma camada dielétrica, com 1.2 mm de espessura, montado em uma superfície plana e que atua a tensões de: a) 4kVpp ; b) 5kVpp; c) 6kVpp; d)7kVpp; e) 8kVpp ; f) 9kVpp.

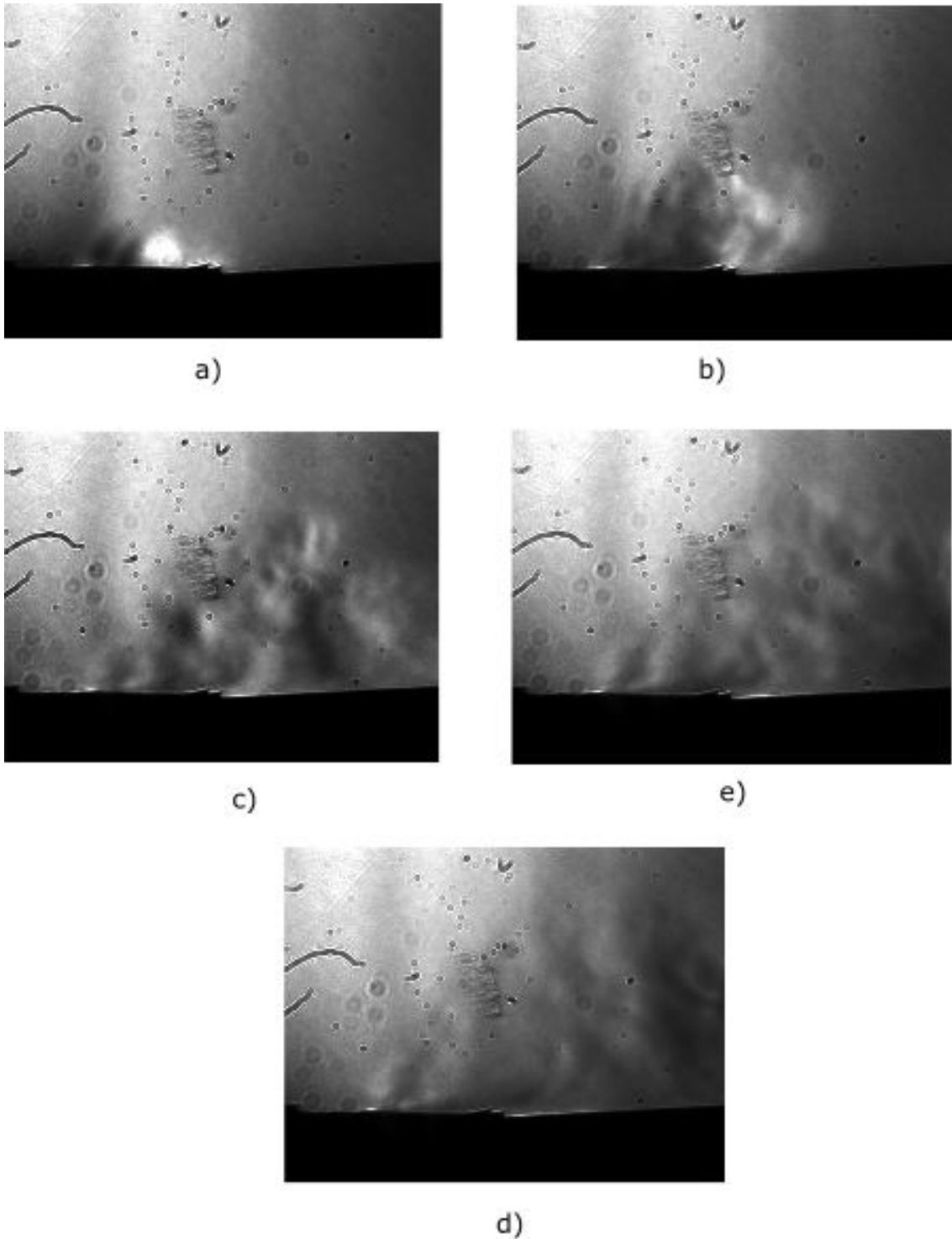


Figura 5.7: Visualização do momento inicial da formação do escoamento induzido.

Como podemos ver a partir dos resultados obtidos, a técnica de schlieren de espelho simples, foi uma mais valia para o nosso estudo. No sentido em que nos conferiu um melhor entendimento do comportamento do escoamento induzido por um atuador a plasma do tipo DBD. Ponderando agora os experimentalistas focaram-se em ensaios mais específicos. a sensibilidade alcançada através deste alinhamento permitiu a observação detalhada do comportamento do escoamento induzido.

Com base nos resultados acima apresentados podemos então reparar que o escoamento

Uma abordagem experimental ao vento iónico gerado por um atuador a plasma

induzido aumenta conforme aumentamos a tensão, mas que reduz conforme aumentamos a espessura da camada dielétrica. Podemos ver também que existem duas componentes associadas à potência consumida pelo atuador a plasma. Sendo uma respeitante ao escoamento induzido e outra respeitante ao calor dissipado pelo eléctrodo exposto.

Podemos ainda observar que para determinados níveis de tensão o escoamento induzido mostra-se capaz de dissipar por convecção forçada o calor gerado pelo eléctrodo exposto. Sendo que esta capacidade de dissipação será melhor estudada mais adiante. Quando o vento iónico não é capaz de dissipar o calor gerado pelo eléctrodo exposto, o mesmo dissipa-se por convecção natural, sendo que para esses níveis de tensão a dissipação de calor é mais baixa, causando portanto um aumento na temperatura do eléctrodo exposto e um conseqüente degradação da camada dielétrica.

5.3 Resultados obtidos através da técnica schlieren orientado para o fundo

Na presente secção pretende-se apresentar os resultados obtidos, nos ensaios levados a cabo com recurso ao alinhamento schlieren orientado para o fundo, que como já vimos em secções anteriores é uma técnica de carácter quantitativo, permitindo-nos quantificar diversos parâmetros, tal como visualizar os mesmos, sendo que se revela uma técnica muito completa. Por forma a calibrarmos o nosso sistema e por forma a garantirmos o correto funcionamento do mesmo, após a montagem, foi realizado um ensaio de calibração, no qual foram quantificadas as diferenças de densidade causadas no ar pelo calor libertado pela chama de uma vela, através da técnica BOS e comparados os resultados obtidos com os já existentes na literatura os resultados para o presente ensaio encontram-se abaixo apresentados.

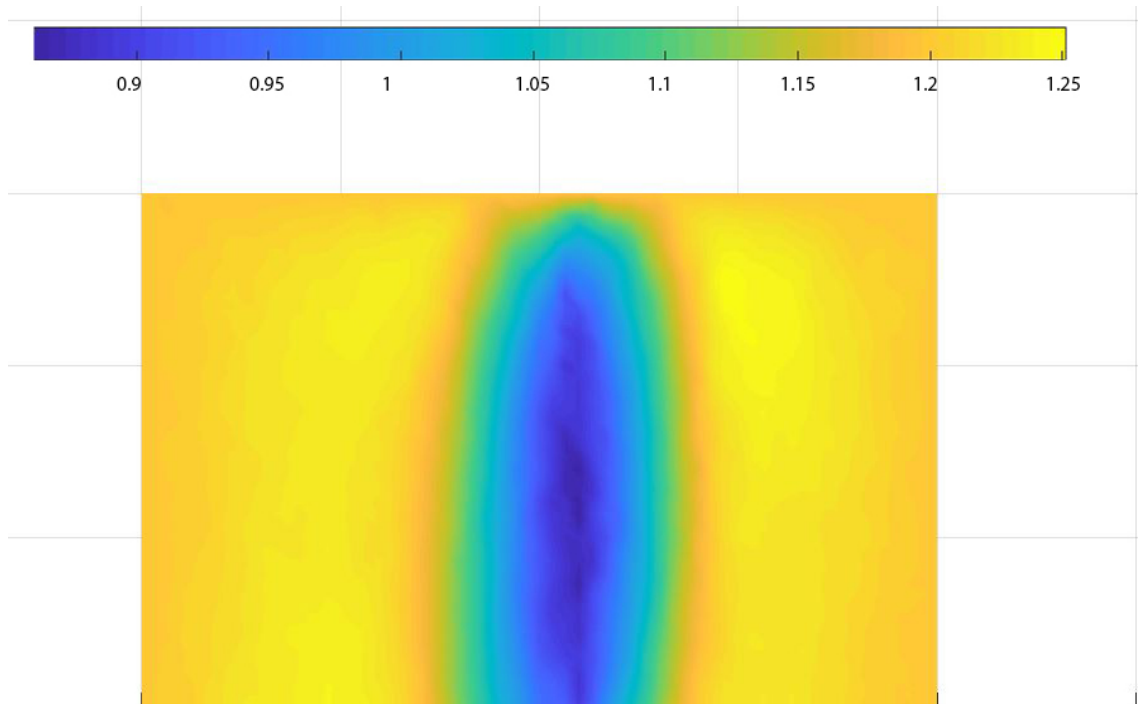


Figura 5.8: Campo de densidades, obtido através da técnica BOS, no centro do campo de densidades podemos ver uma redução significativa na densidade do ar ambiente, causada pelo aquecimento do mesmo devido à presença da chama de uma vela.

Uma abordagem experimental ao vento iónico gerado por um atuador a plasma

Como podemos nos resultados apresentados acima, verificamos que o campo de densidades, apresenta na periferia do objeto de fase, densidades superiores às quantificadas no interior do objeto de fase, o que é coerente e era já esperado pelos experimentalistas, Podemos ainda verificar de existe uma variação de cerca de $0.40\text{kg}/\text{m}^3$ na densidade do ar ambiente, quando o objeto de fase está presente. Com bas nas formulações já apresentadas em capítulos anteriores, foi também calculada a distribuição de temperaturas no espaço e no plano do objecto de fase, uma vez que entre a densidade e a temperatura existe uma relação direta. Podemos ver os campos de temperatura obtidos então através da referida relação, na imagem apresentada abaixo.

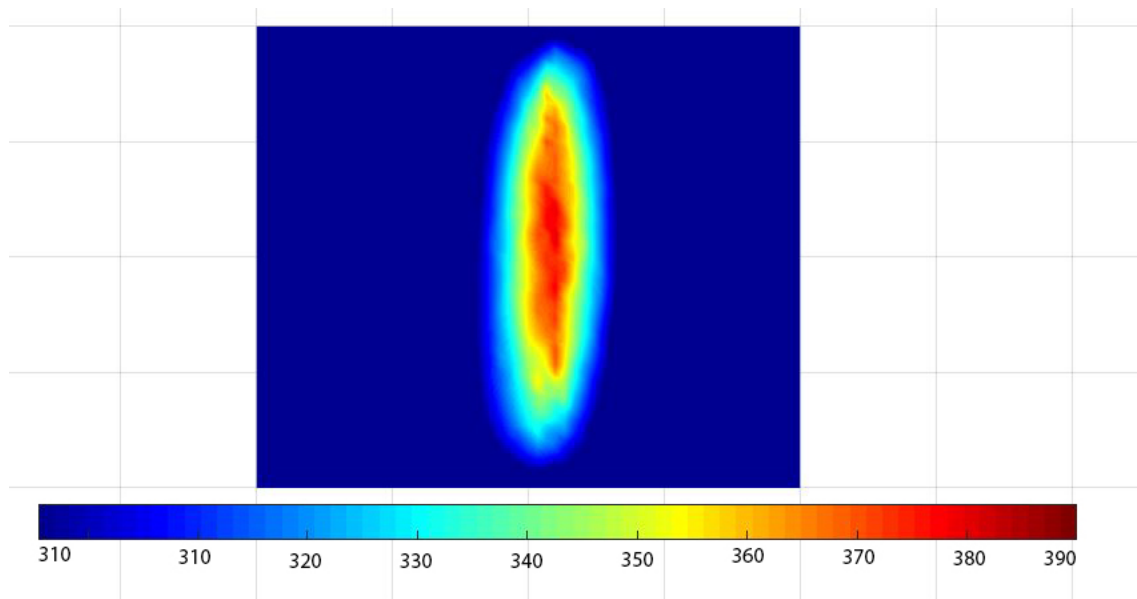


Figura 5.9: Campo de temperaturas, obtido através da técnica BOS, no centro do campo de temperaturas podemos ver uma temperatura mais elevada do que a do meio envolvente, devido ao facto de este ter sido aquecido pela chama de uma vela.

Como é observável na imagem acima apresentada os valores de temperatura, na região do espaço imediatamente acima de uma vela sofre uma variação de temperatura de aproximadamente 100 graus, considerando que a temperatura ambiente é de 295.5 K e que mesmo no centro do nosso objeto de fase, alcançamos os níveis de temperatura máximos indicados na escalas. Sendo que o centro do nosso objeto de fase apresenta aproximadamente 390 K. Podemos também ver que se forma um gradiente de temperaturas que aumenta à medida que nos aproximamos do centro do objeto de fase e diminui à medida que nos afastamos do mesmo.

Os resultados acima apresentados foram então posteriormente comparados com resultados obtidos através da mesma técnica e com procedimentos semelhantes aos utilizados na presente dissertação existentes na literatura [3]. Após comparação dos resultados, foi observado que no estudo elaborado na presente dissertação, os resultados obtidos se aproximam muito dos obtidos na literatura. Apesar de os valores absolutos obtidos na literatura e na presente dissertação serem efetivamente diferentes, tal facto pode ser explicado por a vela utilizada em ambos os estudos não ser a mesma, ou por a temperatura ambiente ser diferente, entre um conjunto de outros fatores poderem não ser iguais, apesar de tudo isso podemos considerar que existe uma proximidade muito grande entre os resultados. Enquanto na literatura a variação de densidades se apresenta na casa dos $0.45\text{kg}/\text{m}^3$, no nosso estudo apresenta-se na casa dos $0.35\text{kg}/\text{m}^3$, existe portanto uma diferença entre os nossos resultados e os presentes na literatura de

Uma abordagem experimental ao vento iónico gerado por um atuador a plasma

cerca de 0.1 kg/m^3 , ou seja de cerca de 8% .

Relativamente à reconstrução de temperaturas , enquanto na literatura existe um variação de temperaturas de 200 graus, na presente dissertação essa variação é de cerca de 90 graus. Como podemos ver apesar das diferenças, os resultados obtidos apresentam-se na mesma ordem de grandeza e relativamente próximos entre eles. Este facto indica-nos de que o procedimento levado a cabo por forma a reconstruir as temperaturas e densidades está correto e a produzir resultados, também eles corretos.

Na presente dissertação tentou-se ainda medir as variações de temperatura no ar, causadas pela chama da vela com um termómetro, mas devido à resolução do mesmo, os resultados obtidos não eram corretos. Por esse motivo comparamos o nosso estudo com os já existentes na literatura, sempre tendo em atenção os detalhes de cada um, por forma a termos segurança nos resultados que estamos a produzir. Abaixo deixamos os resultados obtidos na literatura, para que se possa ter uma melhor noção comparativa dos resultados.

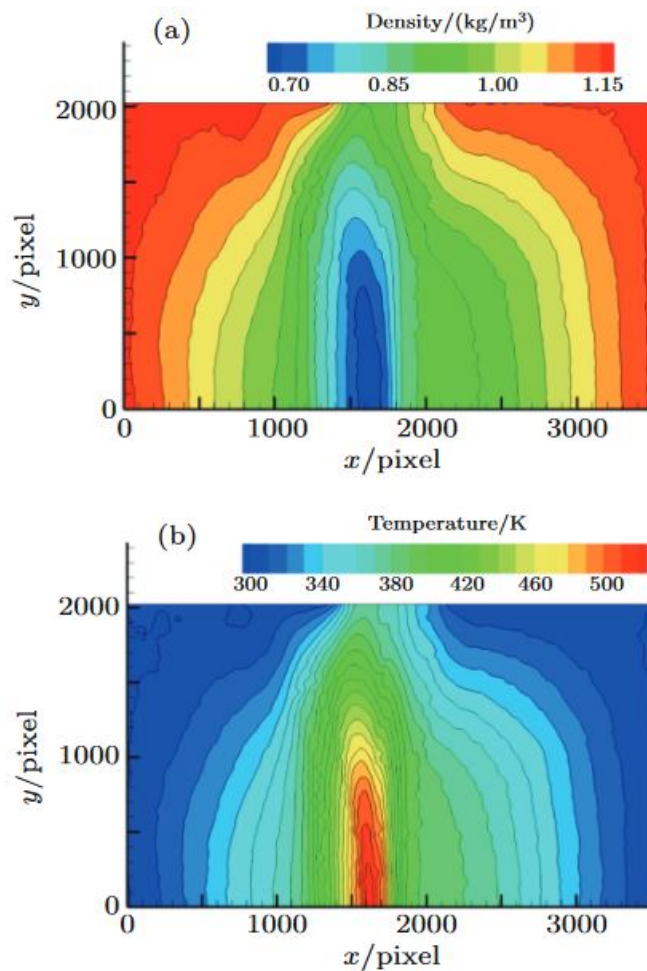


Figura 5.10: Resultados de um estudo semelhante ao desenvolvido na presente dissertação; a) Reconstrução das densidades do ar aquecido pela chama de uma vela; b) Reconstrução das temperaturas dor ar aquecido pela chama de uma vela; Imagem adaptada de [3]

Como já foi referido em secções anteriores, foi realizado um estudo ao escoamento induzido pelo atuador a plasma e uma avaliação à sua capacidade de dissipação de calor produzido pelo eléctrodo exposto. Uma vez que já sabemos do estudo produzido com recurso à técnica schlieren que com o aumento da tensão existe um aumento na produção de calor pelo eléctrodo exposto,

Uma abordagem experimental ao vento iónico gerado por um atuador a plasma

iremos agora analisar a influência da espessura da camada dielétrica na capacidade de dissipação de calor dos atuadores a plasma do tipo DBD. O presente ensaio baseia-se na captura de imagens schlieren do calor dissipado pelo vento iónico de quatro atuadores a plasma com diferentes espessuras na camada dielétrica e a funcionarem todos na mesma tensão pico a pico de 9 kVpp. abaixo apresentamos os resultados do referido estudo

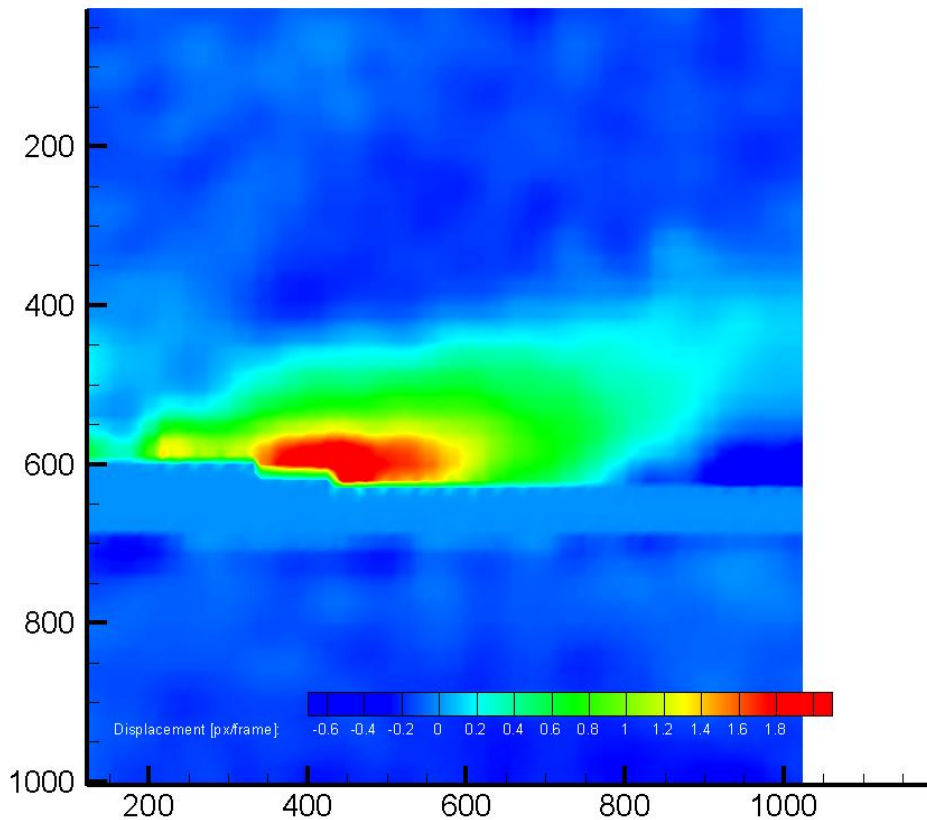


Figura 5.11: Campo de deslocamentos obtidos através da técnica BOS, para um atuador a plasma do tipo DBD a funcionar em regime contínuo e com uma camada dielétrica com 0.3 mm de espessura.

Como podemos observar para o atuador de 0.3 mm, obtivemos desvios máximos das partículas da ordem dos 1.8 px frame, que são deslocamentos bastante elevados considerando que no presente estudo as partículas utilizadas possuem 3 pixeis. Podemos observar que os maiores desvios, e conseqüentemente maiores temperaturas, se dão na zona de formação do escoamento induzido, mantendo-se o ar envolvente a uma temperatura mais ou menos constante, o que demonstra eficiência deste atuador em dissipar o calor produzido pelo eléctrodo exposto, através de um mecanismo de convecção forçada, que é a formação do escoamento induzido, em detrimento da dissipação desse mesmo calor por mecanismos de convecção natural. Conseguimos ainda observar, que o escoamento induzido produzido por este atuador plasma tem velocidades suficientemente elevadas para manter o calor dissipado em contacto com a superfície onde o atuador está montado, numa extensão de aproximadamente 600 pixeis, o que corresponde a aproximadamente 9 cm, Seguidamente podemos observar abaixo os resultados obtidos para o atuador de 0.6 mm , constituído por 10 camadas de kapton.

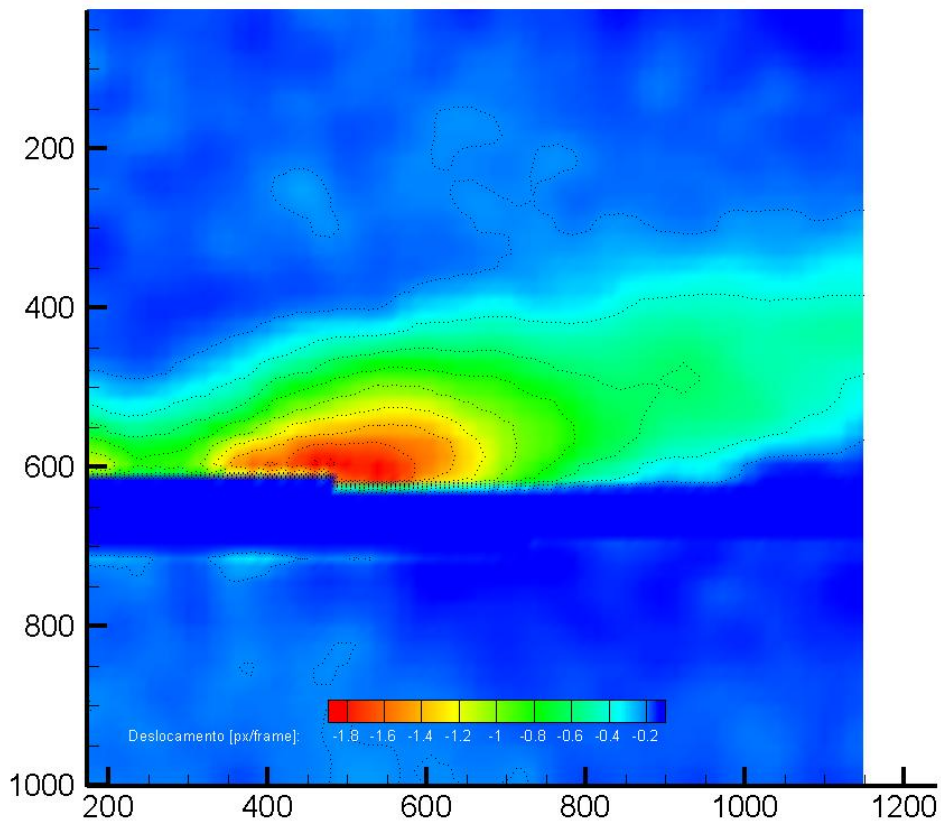


Figura 5.12: Campo de deslocamentos obtidos através da técnica BOS, para o atuador a plasma do tipo DBD a funcionar em regime contínuo e com uma camada dielétrica com 0.6 mm de espessura.

Comparativamente com o atuador a plasma de 0.3 mm os deslocamentos que se verificam no atuador de 0.6 mm são muito semelhantes, apresentando também deslocamento máximo de 1.8 pixeis por frame. Devemos realçar que o facto de os valores presentes na escala serem positivos ou negativos não diz respeito à temperatura que adiante iremos determinar, o sinal neste caso refere-se à direcção em que se dá a deflexão dos raios de luz, sendo portanto o interesse de foco dos presentes ensaios, não o sinal mas sim a magnitude dos referidos deslocamentos. Como podemos reparar no presente atuador de 0.6 mm de espessura, o calor dissipado mantém-se adjacente à superfície plana utilizado, em uma extensão de aproximadamente 800 pixeis, o que corresponde a 12 cm. Isto indica que o presente atuador tem uma capacidade superior de dissipação de calor do que o anteriormente estudado, para uma tensão aplicada de 9 kVpp.

Seguidamente apresentamos os resultados obtidos para o atuador a plasma de 0.9 mm, sendo que a camada dielétrica deste é constituída por 15 camadas de fita de kapton.

Como podemos ver na imagem abaixo apresentada, o atuador de 0.9 mm de espessura apresenta deslocamentos menores do que os apresentados acima, sendo o deslocamento máximo das partículas do fundo, causado por este atuador, de 0.9 pixeis, o que indica que as temperaturas presentes no escoamento do presente atuador são menores do que as temperaturas presentes nos escoamentos anteriores. Podemos também ver que apesar de o atuador de 0.9 mm apresenta uma dissipação muito boa de calor, o que é coerente com os resultados obtidos no teste

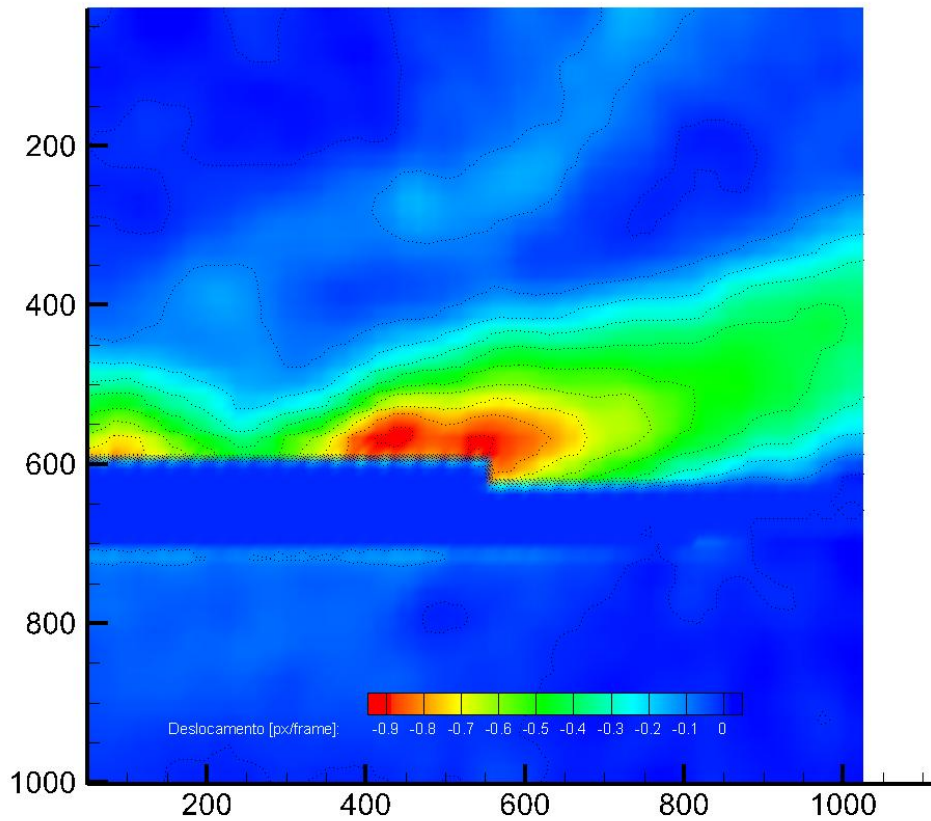


Figura 5.13: Campo de deslocamentos obtidos através da técnica BOS, para o atuador a plasma do tipo DBD a funcionar em regime contínuo e com uma camada dielétrica com 0.9 mm de espessura.

realizado com recurso à técnica schlieren de espelho simples, existe ainda assim algum calor a ser dissipado através do eléctrodo exposto por mecanismos de convecção natural, podemos também ver que esse calor parece ser influenciado pelo escoamento induzido, mas ainda assim, este último, não consegue integrar no seu escoamento esta porção de calor que podemos observar na zona por cima do eléctrodo exposto. Podemos ainda ver que em termos de manter o calor adjacente à superfície plana utilizada, este atuador tem um desempenho semelhante ao de 0.3mm, de e devemos voltar a frisar, os níveis de temperaturas produzidas por um e por outro serem diferentes.

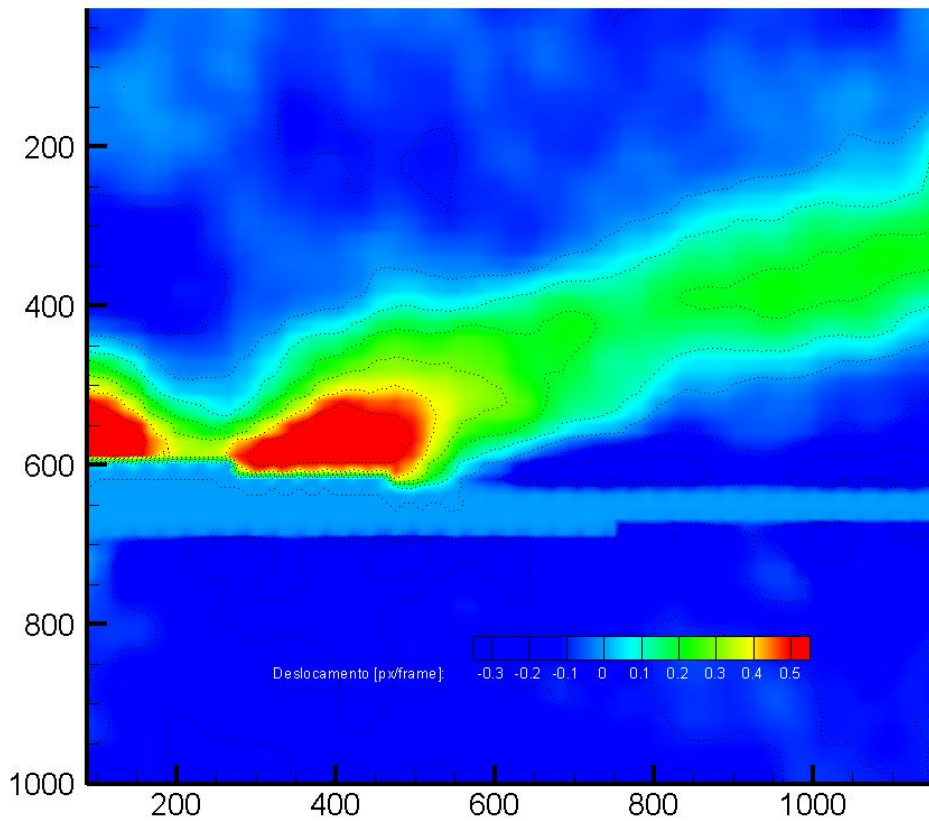


Figura 5.14: Campo de deslocamentos obtidos através da técnica BOS, para o atuador a plasma do tipo DBD a funcionar em regime contínuo e com uma camada dielétrica com 1.2 mm de espessura.

Como podemos ver o atuador com maior espessura 1.2mm é o que apresenta desvios mais reduzidos de todos os atuadores a plasma ensaiados, para a tensão de 9 kVpp, o que é correspondente a ser o que produz temperaturas mais baixas no eléctrodo exposto, podemos ver que para a tensão de 9 kvpp a dissipação do calor produzido pelo eléctrodo exposto através do escoamento induzido, é muito pouco eficiente, uma vez que podemos observar que o vento iónico deste DBD para esta tensão não tem a capacidade, ou seja a velocidade, para "colar", o ar aquecido à superfície plana à qual este está fixo. Afetando ainda assim a trajetória do mesmo, que se orienta como podemos ver no sentido do vento iónico e sendo capaz de manter o mesmo adjacente à placa placa, numa extensão de aproximadamente, 480 pixeis o que corresponde a aproximadamente 7.2 cm, que é a extensão mais curta de entre todos os atuadores a plasma do tipo DBD testados.

Seguidamente são apresentados os resultados para as reconstruções dos campos de temperaturas do ar envolvente do atuador a plasma, estas reconstruções foram feitas com recurso à mesma metodologia descrita no capítulo 4 da presente dissertação, com a qual foi analisado o ar por cima da chama de uma vela.

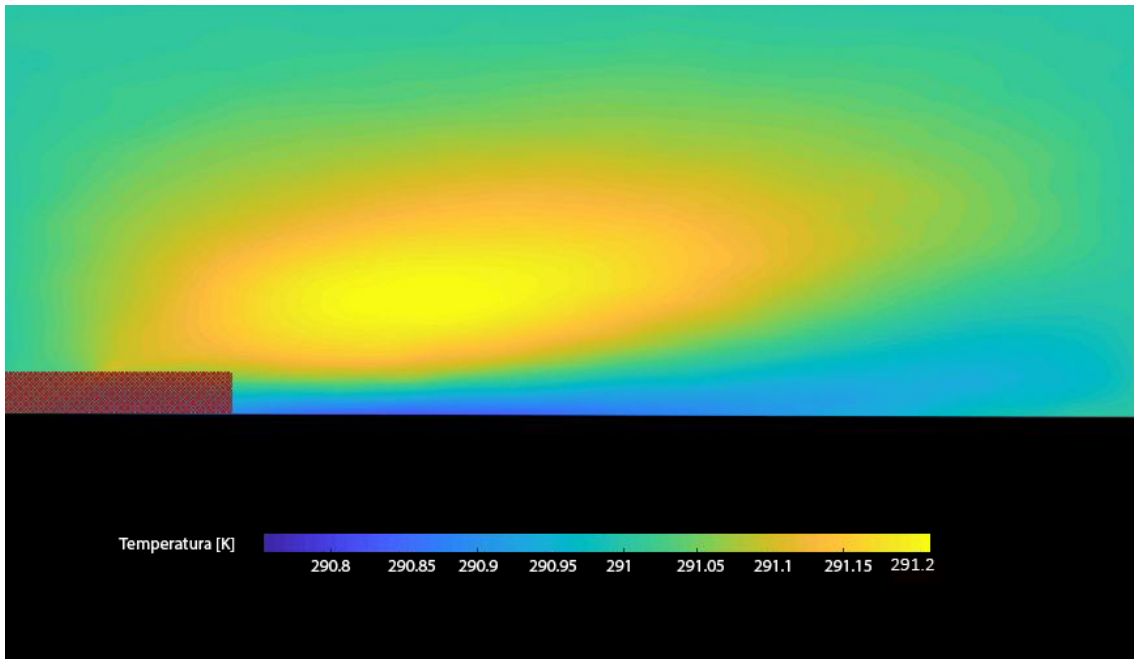


Figura 5.15: Campo de temperaturas obtido através da técnica BOS, para o atuador a plasma do tipo DBD a funcionar em regime contínuo e com uma camada dielétrica com 0.3 mm de espessura.

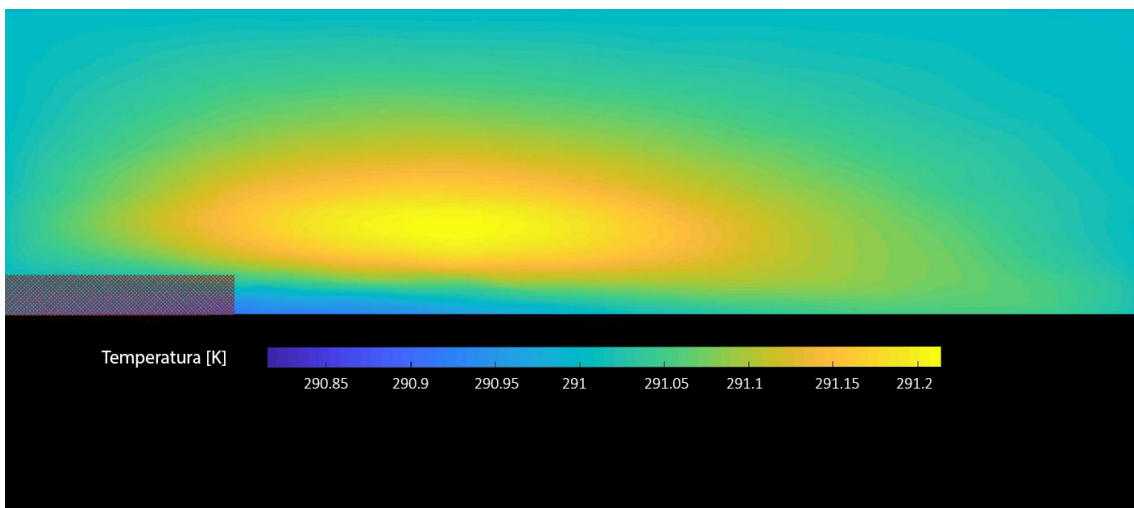


Figura 5.16: Campo de temperaturas obtido através da técnica BOS, para o atuador a plasma do tipo DBD a funcionar em regime contínuo e com uma camada dielétrica com 0.6 mm de espessura.

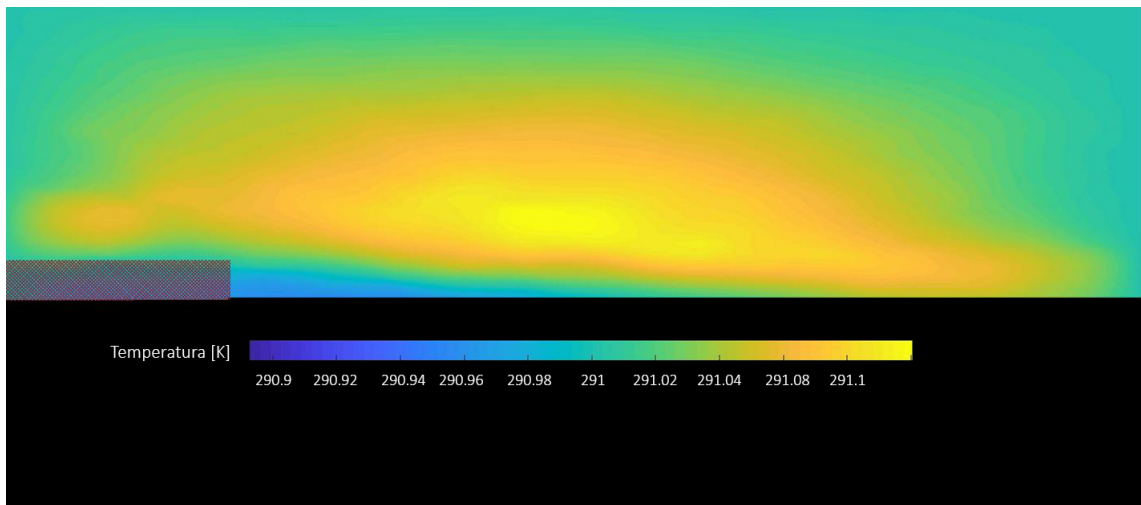


Figura 5.17: Campo de temperaturas obtido através da técnica BOS, para o atuador a plasma do tipo DBD a funcionar em regime contínuo e com uma camada dielétrica com 0.9 mm de espessura.

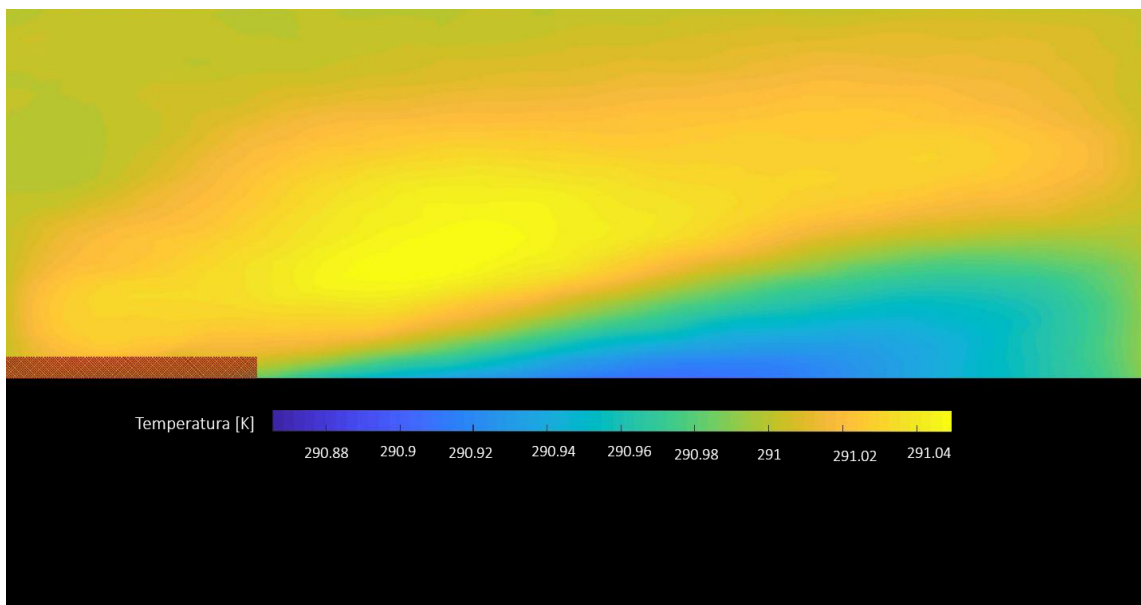


Figura 5.18: Campo de temperaturas obtido através da técnica BOS, para o atuador a plasma do tipo DBD a funcionar em regime contínuo e com uma camada dielétrica com 1.2 mm de espessura.

Como podemos observar a a partir dos resultados abaixo apresentados apesar de a aplicação dos métodos numéricos necessários à extração das temperaturas, afetar bastante a resolução das imagens sujeitas a análise, devido a vários fatores que serão discutidos no capítulo seguinte, ainda assim os valores extraídos em determinados pontos são significativos e contêm valores que devem ser interpretados.

Como podemos ver o atuador a plasma do tipo DBD que apresenta a temperatura mais elevada no seu escoamento é o atuador a plasma de 0.3 mm, e o de 0.6 mm que apresentam no seu escoamento induzido temperaturas d 291.2 K. Pelo contrário o atuador a plasma que apresentou menores temperaturas máximas no seu escoamento induzido foi o atuador com a camada dielétrica mais espessa de 1.2 mm, apresentando este temperaturas de 291 K no seu escoamento, como tínhamos já visto este atuador era também o que produzia velocidades menores no seu escoamento induzido uma vez que era o que mantinha o calor menos tempo adjacente à superfície plana utilizada.

Por forma a termos uma melhor noção da validade dos resultados em causa, comparam-se então os resultados aqui obtidos com os obtidos em estudos semelhantes presentes na literatura. Que apesar de serem realizados com recurso a técnicas e instrumentações diferentes, servem aqui de referência, como método de avaliação da qualidade dos resultados obtidos pelos sistemas schlieren aqui montados.

Rakshit Tirumala et. al. [6], realiza um estudo relativo às características térmicas dos atuadores a plasma do tipo DBD. Por forma a evar a cabo esse estudo socorre-se de técnicas como a termografia infravermelha. São testados atuadores a plasma com espessuras da camada dielétrica entre 2 a 4 mm, enquanto no nosso estudo os atuadores possuem ente 0.3mm e 1.2mm de espessura. Esses mesmos atuadores são testados com tensões da ordem 10 a 20 kV, enquanto no nosso ensaio a tensão aplicada foi de 9kV. Devemos também referir que as temperaturas medidas no referido estudo, são medidas na superfície da camada dielétrica, enquanto na presente dissertação o estudo apenas quantifica o calor no meio gasoso envolvente e não na superfície do atuador. Abaixo deixamos uma imagem dos resultados obtidos no referido estudo, para que o leitor possa ter uma melhor noção do grau de precisão que o alinhamento BOS, construído ao decorrer da presente dissertação possui.

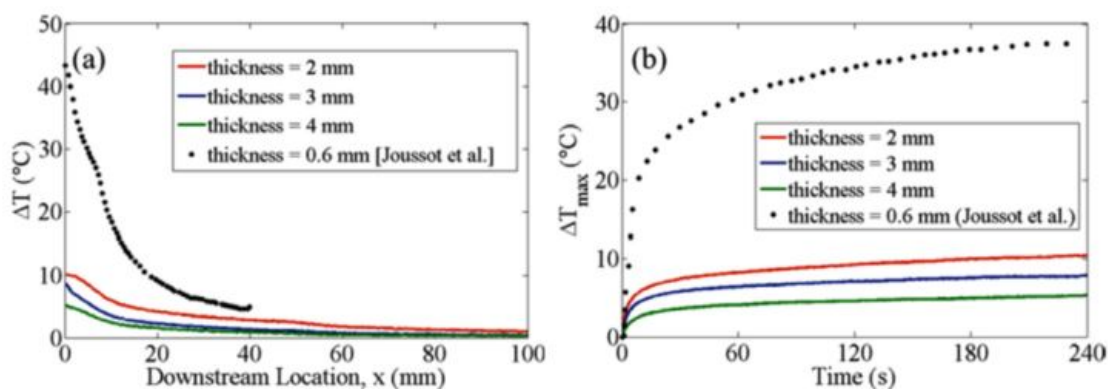


Figura 5.19: Resultados obtidos num estudo sobre as características térmicas dos atuadores a plasma do tipo DBD; a) Variação da temperatura em função da distância ao eletrodo exposto; b) Variação da temperatura em função do tempo de funcionamento do atuador; Imagem adaptada de [6]

No referido estudo foi ainda feita uma avaliação da variação da temperatura na camada dielétrica, à medida que nos afastamos do eletrodo exposto, para diferentes formas de onda, podemos ver abaixo os resultados obtidos, e considerar a forma de onda sinusoidal, como com-

Uma abordagem experimental ao vento iônico gerado por um atuador a plasma

parativa com os resultados da presente dissertação.

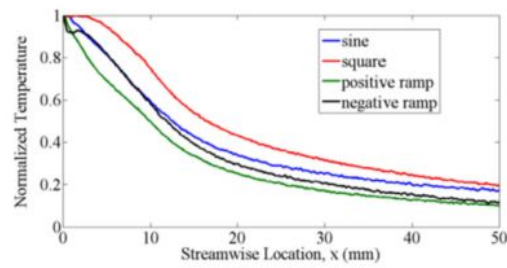


Figura 5.20: Resultados obtidos num estudo sobre as características térmicas dos atuadores a plasma do tipo DBD; Variações da temperatura normalizada em direção oposta ao eletrodo exposto, para quatro formas de onda, do sinal de entrada, diferentes; Imagem adaptada de [6].

Como podemos ver apesar das diferenças experimentais que se verificam entre a presente dissertação e estudos referidos, podemos observar alguma concordância nos resultados obtidos nas duas técnicas.

Capítulo 6

Conclusões e trabalhos futuros

No presente capítulo são apresentadas as conclusões retiradas ao decorrer da presente dissertação, além disso, são também feitas algumas sugestões referentes a possíveis trabalhos futuros, por forma a continuar a aperfeiçoar ou a explorar novas vertentes de análise ou que possam ser oferecidas pelos sistemas schlieren.

6.1 Conclusões do trabalho desenvolvido

A presente dissertação realizada no gabinete ClusterDEM, teve como objetivo o aprofundamento do estudo do vento iónico gerado por um atuador a plasma, para tal foram desenvolvidos dois sistemas schlieren que permitiram a visualização do escoamento induzido pelo atuador. Analisa-se ainda a vantagem da aplicação deste tipo de sistemas ao estudo de atuadores a plasma do tipo DBD, nomeadamente, o baixo custo das técnicas e a qualidade da informação obtida.

Primeiramente e ainda falando dos atuadores a plasma, nos ensaios que foram realizados com os mesmos, foi-nos possível verificar que a camada dielétrica exerce uma enorme influência no desempenho dos referidos atuadores, nomeadamente na tensão máxima suportada pelo mesmo, o que influencia o seu desempenho e durabilidade. Verifica-se uma degradação superior da camada dielétrica para camadas menos espessas.

Os resultados obtidos através da técnica schlieren de espelho simples permitiam confirmar a capacidade deste tipo de técnica de produzir resultados referentes ao escoamento induzido por atuador a plasma do tipo DBD. Além do escoamento induzido, percebemos também nestes ensaios com recurso a esta técnica, que também nos era possível observar o calor dissipado pelo eléctrodo exposto através de mecanismos de convecção natural. Os ensaios realizados com espelho permitiram perceber que o escoamento induzido produzido por um atuador a plasma aumenta conforme se aumenta a tensão aplicada. Neste ensaio percebemos também que à medida que a tensão aumenta também o calor dissipado pelo eléctrodo exposto tal como o escoamento induzido aumentam. Nesses ensaio foi possível perceber que existem tensões ideais para a dissipação de calor no eléctrodo exposto através do escoamento induzido, ou seja, por mecanismos de convecção forçada, uma vez que a partir de uma determinada tensão o escoamento induzido por um atuador a plasma é capaz de integrar em si o calor produzido pelo eléctrodo exposto, dissipando desta forma o ar quente que se encontra naquela região do espaço e tornando o funcionamento do DBD mais eficiente e demonstrando as capacidades destes dispositivos para serem utilizados em aplicações de *film cooling*. Neste ensaio foi ainda possível perceber que apesar das variações de densidade existentes no ar devido ao escoamento induzido, as técnicas schlieren apresentam dificuldade em captar apenas o escoamento induzido, por vários motivos, mas especialmente, porque as diferenças de densidade que são causadas no ar ambiente por este são muito reduzidas.

Neste ensaio conclui-se ainda, que as visualizações obtidas com melhor qualidade são devido ao facto de o calor dissipado pelo eléctrodo exposto ser integrado no escoamento induzido,

tornando-o mais perceptível para as técnicas schlieren, uma vez que as diferenças de densidade causadas no ar ambiente devido ao calor, são muito superiores às diferenças de densidade causadas no ar devido à presença do escoamento induzido.

Conclui-se então que o alinhamento schlieren de espelho simples fora de eixo, constitui uma ferramenta útil de visualização e análise de escoamento e que pode ser correctamente calibrado por forma a estudar os fenómenos associados à formação do escoamento induzido de um atuador a plasma do tipo DBD, tal como ao estudo do comportamento do mesmo durante o seu funcionamento e permite ainda a obtenção de dados empíricos críticos à boa compreensão dos mecanismos inerentes ao bom funcionamento do atuador a plasma do tipo DBD.

Relativamente à técnica de Schlieren orientado para o fundo, podemos também concluir que é uma técnica, que se apresenta como válida para o estudo de vários tipos de fenómenos, que envolvam direta ou indirectamente, gradiente de índices de refração. Em específico, esta técnica mostra-se como indicada para o estudo de atuador a plasma do tipo DBD, permitindo obter informações sobre o escoamento induzido, ainda mais detalhas do que a técnica de schlieren de espelho simples fora de eixo. Permitindo uma análise quantitativa que a anterior técnica não permitia. Produzindo resultados de elevada qualidade e tendo um custo extremamente reduzido, esta técnica apresenta-se então como uma ferramenta, muito atractiva.

Nos ensaios realizados com recurso à técnica de schlieren orientado para o fundo, aos atuadores a plasma, pudémos verificar, que para uma mesma tensão aplicada, existe um aumento da temperatura do escoamento induzido, com a diminuição da espessura da camada dielétrica, pudémos observar que para uma diferença de cerca de 0.9 mm de espessura na camada dielétrica existe uma diferença de cerca de 0.9 graus na temperatura do escoamento induzido. Foi ainda possível observar que para esta mesma tensão o atuador com uma camada dielétrica com uma espessura de 0.6 se mostrou o mais eficiente na dissipação de calor do eléctrodo exposto, uma vez que nos ensaios realizados foi aquele que dissipou mais calor até uma distância superior, dos quatro atuadores a plasma testados.

Pudemos ainda concluir que ambas as técnicas schlieren são ferramentas apropriadas para o estudo dos actuadores a plasma do tipo DBD, mas de entre as duas a aquela que se apresenta como mais indicada para o estudo destes dispositivos é a técnica BOS. Pois este é capaz de produzir resultados quantitativos também de alta qualidade e contendo mais informação do que os resultados obtidos através da técnica schlieren de espelho simples, além disso o seu alinhamento é muito mais simples e requer muito menos detalhe do que a técnica schlieren de espelho simples. Apesar de tudo devemos também concluir que infelizmente o tratamento proposto na técnica BOS por forma a reconstituir os campos de densidades e de temperaturas, causa uma elevada perda de resolução dos objectos de fase. Pelo que a mesma necessita de um refinamento, no processo de resolução da equação de Poisson, por forma a ser capaz de produzir resultados menos grosseiros.

6.1.1 Propostas de trabalhos futuros

Por forma a dar continuidade ao estudo das técnicas schlieren como ferramenta de investigação em mecânica de fluidos, propõe-se primeiramente como trabalho futuro, o desenvolvimento de ensaios no sentido de se estabelecer uma validação mais robusta para a técnica BOS. Proponho também a criação e implementação de um *solver* da equação de Poisson com um esquema com um número maior de pontos. Por forma a prosseguir o caminho quantitativo das técnicas schlieren proponho também como trabalho futuro o projeto e montagem de um sistema de Schlieren PIV, que é um sistema capaz de medir velocidades de turbulências localizadas

Uma abordagem experimental ao vento iónico gerado por um atuador a plasma

dentro de um objeto de fase.

Sugere-se realização e um estudo no sentido de estabelecer para uma determinada potência aplicada ao DBD, qual a percentagem da mesma que é dissipada em trabalho, ou seja na formação do plasma e quanta é dissipada em calor, dessa percentagem quanta dela é dissipada por convecção natural e quanta é dissipada por convecção forçada.

Seria ainda interessante o projecto e desenvolvimento de um sistema schlieren portátil, capaz de efetuar medições em qualquer lado.

Bibliografia

- [1] F. Rodrigues, J. Pascoa, and M. Trancossi, “Heat generation mechanisms of dbd plasma actuators,” *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 90, pp. 55-65, 2018. xiii, 6, 12
- [2] F. Rodrigues, J. Páscoa, and F. Dias, “Power consumption characterization of dbd plasma actuators for boundary layer control,” 2015. xiii, 17, 33
- [3] G.-M. Guo and H. Liu, “Density and temperature reconstruction of a flame-induced distorted flow field based on background-oriented schlieren (bos) technique,” *Chinese Physics B*, vol. 26, no. 6, p. 064701, 2017. [Online]. Available: <http://stacks.iop.org/1674-1056/26/i=6/a=064701> xiii, xvi, 29, 30, 41, 51, 66, 67
- [4] M. J. Hargather and G. S. Settles, “Natural-background-oriented schlieren imaging,” *Experiments in fluids*, vol. 48, no. 1, pp. 59-68, 2010. xiii, 29
- [5] A. H. Meier and T. Roesgen, “Improved background oriented schlieren imaging using laser speckle illumination,” *Experiments in fluids*, vol. 54, no. 6, p. 1549, 2013. xiii, 29
- [6] R. Tirumala, N. Benard, E. Moreau, M. Fenot, G. Lalizel, and E. Dornignac, “Temperature characterization of dielectric barrier discharge actuators: influence of electrical and geometric parameters,” *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 47, no. 25, p. 255203, 2014. xvi, 74, 75
- [7] W. Merzkirch, *Flow visualization*. Elsevier, 2012. 2, 3, 19, 20
- [8] G. Settles, “Shadowgraph techniques,” in *Schlieren and Shadowgraph Techniques*. Springer, 2001, pp. 143-163. 4, 22
- [9] E. L. Dereniak and T. D. Dereniak, *Geometrical and trigonometric optics*. Cambridge University Press, 2008. 4, 18
- [10] D. W. Holder, *Optical methods for examining the flow in high-speed wind tunnels*. publisher not identified, 1957. 4
- [11] H. Richard and M. Raffel, “Principle and applications of the background oriented schlieren (bos) method,” *Measurement Science and Technology*, vol. 12, no. 9, p. 1576, 2001. 5, 27
- [12] J. T. Heineck, D. Banks, E. T. Schairer, E. A. Haering, and P. Bean, “Background oriented schlieren (bos) of a supersonic aircraft in flight,” in *AIAA Flight Testing Conference*, 2016, p. 3356. 5
- [13] M. A. Hill and E. A. Haering, “Ground-to-air flow visualization using solar calcium-k line background-oriented schlieren,” *Experiments in Fluids*, vol. 58, no. 1, p. 4, 2017. 5
- [14] M. Raffel, “Background-oriented schlieren (bos) techniques,” *Experiments in Fluids*, vol. 56, no. 3, p. 60, 2015. 5, 28, 29
- [15] L. Venkatakrisnan and G. Meier, “Density measurements using the background oriented schlieren technique,” *Experiments in Fluids*, vol. 37, no. 2, pp. 237-247, 2004. 5, 30
- [16] J. Ferry and J. Rovey, “Thrust measurement of dielectric barrier discharge plasma actuators and power requirements for aerodynamic control,” in *5th Flow Control Conference*, 2010, p. 4982. 5, 6, 15

- [17] B. Jayaraman, Y.-C. Cho, and W. Shyy, "Modeling of dielectric barrier discharge plasma actuator," *Journal of Applied physics*, vol. 103, no. 5, p. 053304, 2008. 6
- [18] Y. Lagmich, T. Callegari, L. Pitchford, and J. Boeuf, "Model description of surface dielectric barrier discharges for flow control," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 41, no. 9, p. 095205, 2008. 6
- [19] N. Houser, L. Gimeno, R. Hanson, T. Goldhawk, T. Simpson, and P. Lavoie, "Microfabrication of dielectric barrier discharge plasma actuators for flow control," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 201, pp. 101-104, 2013. 6
- [20] F. Rodrigues, J. Páscoa, and M. Trancossi, "Experimental analysis of DBD plasma actuators thermal characteristics under external flow influence," *Journal of Heat Transfer*, vol. 140, pp. 102801:1-10, 10 2018. 6
- [21] J. Rienitz, "Schlieren experiment 300 years ago," *Nature*, vol. 254, p. 293, Mar. 1975. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1038/254293a0> 9
- [22] A. Toepler, "Optische studien nach der methode der schlierenbeobachtung," *Annalen der Physik*, vol. 207, no. 6, pp. 180-215, 1867. 9
- [23] E. Mach and P. Salcher, "Optische untersuchung der luftstrahlen," *Annalen der Physik*, vol. 277, no. 9, pp. 144-150, 1890. 9
- [24] E. Mach and L. Mach, "Weitere ballistisch-photographische versuche," *Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften, Wien*, vol. 98, pp. 1310-1326, 1889. 9
- [25] H. Schardin, *Das Toeplersche Schlierenverfahren: Grundlagen für seine Anwendung und quantitative Auswertung: mit 5 Zahlentafeln*. VDI-Verlag, 1934. 9
- [26] —, "Schlieren methods and their applications," NASA TT F-12,731, Tech. Rep., 1970. 9
- [27] R. North, *Schlieren systems using graded filters*. Aeronautical Research Council, Fluid Motion Sub-Committee, 1952. 10
- [28] —, *A colour Schlieren system using multicolour filters of simple construction*. National Physical Laboratory Aerodynamics Division, 1954. 10
- [29] D. W. Holder and R. North, *Schlieren methods*. HM Stationery Office, 1963, vol. 31. 10
- [30] L. M. Weinstein, "Large-field high-brightness focusing schlieren system," *AIAA journal*, vol. 31, no. 7, pp. 1250-1255, 1993. 10
- [31] C. Alvarez-Herrera, D. Moreno-Hernández, B. Barrientos-García, and J. Guerrero-Viramontes, "Temperature measurement of air convection using a schlieren system," *Optics & Laser Technology*, vol. 41, no. 3, pp. 233 - 240, 2009. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030399208001357> 10
- [32] J. Wu and T. New, "An investigation on supersonic bevelled nozzle jets," *Aerospace Science and Technology*, vol. 63, pp. 278-293, 2017, cited By 0. [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85010222351&doi=10.1016%2Fj.ast.2017.01.003&partnerID=40&md5=150475f72b5cbb88f3297221e2b0d5e7> 10

- [33] J. S. Harvey, H. E. Smithson, and C. R. Siviour, "Visualization of acoustic waves in air and subsequent audio recovery with a high-speed schlieren imaging system: Experimental and computational development of a schlieren microphone," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 107, pp. 182 - 193, 2018. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143816617312162> 11
- [34] S. Dalziel, G. O. Hughes, and B. R. Sutherland, "Whole-field density measurements by 'synthetic schlieren'," *Experiments in fluids*, vol. 28, no. 4, pp. 322-335, 2000. 11
- [35] G. Settles and M. J Hargather, "A review of recent developments in schlieren and shadowgraph techniques," *Measurement Science and Technology*, vol. 28, 01 2017. 11, 22, 24, 30
- [36] J. N. Braukmann, A. Bauknecht, C. C. Wolf, and M. Raffel, "Towards density reconstruction of helicopter blade tip vortices from high-speed background-oriented schlieren data," in *New Results in Numerical and Experimental Fluid Mechanics XI*. Springer, 2018, pp. 375-385. 11
- [37] A. Bauknecht, C. B. Merz, M. Raffel, A. Landolt, and A. H. Meier, "Blade-tip vortex detection in maneuvering flight using the background-oriented schlieren technique," *Journal of Aircraft*, vol. 51, no. 6, pp. 2005-2014, 2014. 11
- [38] M. Kotsonis, S. Ghaemi, L. Veldhuis, and F. Scarano, "Measurement of the body force field of plasma actuators," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 44, no. 4, p. 045204, 2011. 12, 13
- [39] T. C. Corke, M. L. Post, and D. M. Orlov, "Single dielectric barrier discharge plasma enhanced aerodynamics: physics, modeling and applications," *Experiments in Fluids*, vol. 46, no. 1, pp. 1-26, 2009. 12
- [40] E. Pescini, F. Marra, M. De Giorgi, L. Francioso, and A. Ficarella, "Investigation of the boundary layer characteristics for assessing the dbd plasma actuator control of the separated flow at low reynolds numbers," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 81, pp. 482-498, 2017. 12
- [41] F. O. Thomas, A. Kozlov, and T. C. Corke, "Plasma actuators for cylinder flow control and noise reduction," *AIAA journal*, vol. 46, no. 8, pp. 1921-1931, 2008. 12
- [42] J.-L. Yu, L.-m. He, Y.-f. Zhu, W. Ding, and Y.-q. Wang, "Numerical simulation of the effect of plasma aerodynamic actuation on improving film hole cooling performance," *Heat and Mass Transfer*, vol. 49, no. 6, pp. 897-906, Jun 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s00231-013-1157-4> 12
- [43] A. Cristofolini, G. Neretti, F. Roveda, and C. Borghi, "Schlieren imaging in a dielectric barrier discharge actuator for airflow control," *Journal of Applied Physics*, vol. 111, no. 3, p. 033302, 2012. 12
- [44] B. K. Mishra and P. Panigrahi, "Formation and characterization of the vortices generated by a dbd plasma actuator in burst mode," *Physics of Fluids*, vol. 29, no. 2, p. 024104, 2017. 13
- [45] T. Corke and M. Post, "Overview of plasma flow control: concepts, optimization, and applications," in *43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 2005, p. 563. 15, 16

- [46] F. Thomas, A. Kozlov, and T. Corke, "Plasma actuators for bluff body flow control," in *3rd AIAA Flow Control Conference*, 2006, p. 2845. 15
- [47] L. N. Cattafesta III and M. Sheplak, "Actuators for active flow control," *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 43, pp. 247-272, 2011. 16
- [48] C. L. Enloe, T. McLaughlin, G. I. Font, and J. W. Baughn, "Parameterization of temporal structure in the single-dielectric-barrier aerodynamic plasma actuator," *AIAA journal*, vol. 44, no. 6, pp. 1127-1136, 2006. 17
- [49] B. Dong, J.-M. Bauchire, J. M. Povesle, P. Magnier, and D. Hong, "Experimental study of a dbd surface discharge for the active control of subsonic airflow," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 41, no. 15, p. 155201, 2008. 17
- [50] P. K. Panigrahi and K. Muralidhar, *Schlieren and shadowgraph methods in heat and mass transfer*. Springer, 2012, vol. 2. 18, 24
- [51] P. Kumar Panigrahi and K. Muralidhar, *Schlieren and Shadowgraph Methods in Heat and Mass Transfer*. Springer Science & Business Media, 2012, 01 2012. 18
- [52] G. S. Settles, *Schlieren and shadowgraph techniques: visualizing phenomena in transparent media*. Springer Science & Business Media, 2012. 19, 20, 21, 23, 24, 25
- [53] F. J. Weyl, *Analytical methods in optical examination of supersonic flow*. Navy Department Bureau of Ordnance, 1945. 19
- [54] A. K. Agrawal, N. K. Butuk, S. R. Gollahalli, and D. Griffin, "Three-dimensional rainbow schlieren tomography of a temperature field in gas flows," *Applied Optics*, vol. 37, no. 3, pp. 479-485, 1998. 20
- [55] P. Brequigny, C. Endouard, C. Mounaïm-Rousselle, and F. Foucher, "An experimental study on turbulent premixed expanding flames using simultaneously schlieren and tomography techniques," *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2017. 20
- [56] J. E. Greivenkamp, *Field guide to geometrical optics*. SPIE Press Bellingham, WA, 2004, vol. 1. 20
- [57] D. A. Miller, "Huygens's wave propagation principle corrected," *Optics letters*, vol. 16, no. 18, pp. 1370-1372, 1991. 21
- [58] W. Keagy, H. Ellis, and W. Reid, "Schlieren techniques for the quantitative study of gas mixing," *Project Rand*, 1949. 22, 23
- [59] F. Yam and Z. Hassan, "Innovative advances in led technology," *Microelectronics Journal*, vol. 36, no. 2, pp. 129-137, 2005. 22
- [60] D. A. Bui and P. C. Hauser, "Analytical devices based on light-emitting diodes-a review of the state-of-the-art," *Analytica chimica acta*, vol. 853, pp. 46-58, 2015. 22
- [61] S. Wilson, G. Gustafson, D. Lincoln, K. Murari, and C. Johansen, "Performance evaluation of an overdriven led for high-speed schlieren imaging," *Journal of Visualization*, vol. 18, no. 1, pp. 35-45, 2015. 22
- [62] F. J. Weinberg, *Optics of flames: including methods for the study of refractive index fields in combustion and aerodynamics*. Butterworths, 1963. 23

- [63] D. Dabiri, "Digital particle image thermometry/velocimetry: a review," *Experiments in Fluids*, vol. 46, no. 2, pp. 191-241, 2009. 24
- [64] M. Raffel, C. E. Willert, F. Scarano, C. J. Kähler, S. T. Wereley, and J. Kompenhans, *Particle image velocimetry: a practical guide*. Springer, 2018. 24
- [65] A. Martínez-González, D. Moreno-Hernández, D. Monzón-Hernández, and M. León-Rodríguez, "Wide range instantaneous temperature measurements of convective fluid flows by using a schlieren system based in color images," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 93, pp. 66 - 75, 2017. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143816617300623> 24
- [66] O. Askari, A. Moghaddas, A. Alholm, K. Vien, B. Alhazmi, and H. Metghalchi, "Laminar burning speed measurement and flame instability study of h₂/co/air mixtures at high temperatures and pressures using a novel multi-shell model," *Combustion and Flame*, vol. 168, pp. 20-31, 2016, cited By 21. [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84964833506&doi=10.1016%2fj.combustflame.2016.03.018&partnerID=40&md5=6e2eda0752ba95fa077efb4c18c4383e> 24
- [67] C. Su, S. Wang, C. Shih, and Y. Yang, "Visualization of hot flows of tall space fires in model experiments with schlieren photography technique," *SpringerPlus*, vol. 5, no. 1, p. 1744, 2016. 25, 34
- [68] G. Meier, "Computerized background-oriented schlieren," *Experiments in fluids*, vol. 33, no. 1, pp. 181-187, 2002. 26, 27
- [69] N. Vinnichenko, A. Uvarov, and Y. Y. Plaksina, "Accuracy of background oriented schlieren for different background patterns and means of refraction index reconstruction," in *15th International Symposium on Flow Visualization*, 2012, p. 34. 28
- [70] B. F. Bathel, S. E. Borg, E. Walker, and T. Mizukaki, "Development of background-oriented schlieren for nasa langley research center ground test facilities," in *53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting*, 2015, p. 1691. 29
- [71] B. Rinkevichyus, N. Skornyakova, E. Mikhaleva, A. Mikhalev, A. Y. Poroykov, and A. Udalov, "Investigation of background pattern for the outdoor application of the bos method," in *Advanced In-Flight Measurement Techniques*. Springer, 2013, pp. 305-320. 29
- [72] P. Bühlmann, A. H. Meier, M. Ehrensperger, and T. Rösgen, "Laser speckle based background oriented schlieren measurements in a fire backlayering front," in *17th international symposium on applications of laser techniques to fluid mechanic, Lisbon*, 2014. 29
- [73] G. M. Oca and P. Almoró, "Optimum contrast in single mirror off-axis schlieren system," *Proceedings of the Samahang Pisika ng Pilipinas*, 2018. 34
- [74] R. Payri, F. Salvador, G. Bracho, and A. Viera, "Differences between single and double-pass schlieren imaging on diesel vapor spray characteristics," *Applied Thermal Engineering*, vol. 125, pp. 220-231, 2017. 34
- [75] J. Kiefer, L. Burg, and A. P. Williamson, "Absorption, emission, and schlieren imaging of liquid and gas flows using an led and a webcam," *tm-Technisches Messen*, vol. 85, no. 5, pp. 292-301, 2018. 34
- [76] *Hamamatsu: "Digital CCD Camera C106000-10B Instruction Manual"*, 2013a. 35

Apêndice A

Anexos

A.1 Script desenvolvido em Matlab por forma a obter campos de índices refrativos, densidades e temperaturas.

18-06-2018 4:02 F:\Mestrado\QUANTITATIVE B...\QuantBOS.m 3 of 3

```
axis([-0.5 2.5 -0.5 2.5 -100 100])
title({'2-D Poisson equation (Density Field)'; ['\itNumber of iterations} = ', num2str(it)]})
xlabel('Spatial co-ordinate (x) \rightarrow')
ylabel('\leftarrow Spatial co-ordinate (y)')
zlabel('Solution profile (P) \rightarrow')
%%
%%Plotting the solution (Temperature in Kelvin)
%h=surf(x,y,Ktemperature,'EdgeColor','none');
%shading interp
%axis([-0.5 2.5 -0.5 2.5 -100 100])
%title({'Temperature in Kelvin'; ['\itNumber of iterations} = ', num2str(it)]})
%xlabel('Spatial co-ordinate (x) \rightarrow')
%ylabel('\leftarrow Spatial co-ordinate (y)')
%zlabel('Solution profile (P) \rightarrow')
%%
%%Plotting the solution (Temperature in Celsius)
%h=surf(x,y,Ctemperature,'EdgeColor','none');
%shading interp
%axis([-0.5 2.5 -0.5 2.5 -100 100])
%title({'Temperature in Celsius'; ['\itNumber of iterations} = ', num2str(it)]})
%xlabel('Spatial co-ordinate (x) \rightarrow')
%ylabel('\leftarrow Spatial co-ordinate (y)')
%zlabel('Solution profile (P) \rightarrow')
```

```

%b=zeros(nx,ny); %Preallocating b
c=0.0438
r=c*((ddx_dx*0.0015)+(ddy_dy*0.0015)) %lado direito da eq de poisson
b=r
pn=ones(nx,ny); %Preallocating pn

%%
% Initial Conditions
p=ones(nx,ny); %Preallocating p

%%
%Boundary conditions
p(:,1)=1.00027717;
p(:,ny)=1.00027717;
p(1,:)=1.00027717;
p(nx,:)=1.00027717;

%%
%Source term
%b(round(ny/4),round(nx/4))=3000;
%b(round(ny*3/4),round(nx*3/4))=-3000;

%%
i=2:nx-1;
j=2:ny-1;
%Explicit iterative scheme with C.D in space (5-point difference)
for it=1:niter
    pn=p;
    p(i,j)=((dy^2*(pn(i+1,j)+pn(i-1,j)))+(dx^2*(pn(i,j+1)+pn(i,j-1)))-(b(i,j)
*dx^2*dy^2))/(2*(dx^2+dy^2));
    %Boundary conditions
    p(:,1)=1.00027717;
    p(:,ny)=1.00027717;
    p(1,:)=1.00027717;
    p(nx,:)=1.00027717;
end

dlmwrite('Refractive index distribution.txt',p);
density=(p-1)/0.000227
dlmwrite('Density distribution.txt',p);
%Ktemperature=(1.204*294.15)/density
%Ctemperature=Ktemperature-274.15
%%
%Plotting the solution (refractive index fields)
%h=surf(x,y,p,'EdgeColor','none');
%shading interp
%axis([-0.5 2.5 -0.5 2.5 -100 100])
%title({'2-D Poisson equation';['\itNumber of iterations' = ',num2str(it)]})
%xlabel('Spatial co-ordinate (x) \rightarrow')
%ylabel('{\leftarrow} Spatial co-ordinate (y)')
%zlabel('Solution profile (P) \rightarrow')
%%
%%Plotting the solution (Density distribution)
h=surf(x,y,density,'EdgeColor','none');
shading interp

```

```

clc

u=cell2mat(u_filtered)
v=cell2mat(v_filtered)
%%%ddx/dx%%%
h = 0.001;          % step size
X = -1:h:1;        % domain
r = (u)*0.0015;    % range
%po= diff(r)/h
%ddx_dx = po.'
ddx_dx = diff(r,1,2)/h; % first derivative

rowToDelete = 80; % or whatever...
ddx_dx(rowToDelete,:) = [];

%Z = diff(Y)/h; % second derivative
%plot(X(:,1:length(Y)),Y,'r',X,f,'b', X(:,1:length(Z)),Z,'k')
disp('matriz deslocamento segundo o eixo do xx')
v(1:16,8:18)
disp('DERIVADA segundo xx, da matriz deslocamento segundo o eixo do xx')
ddx_dx(1:16,8:18)

%%%ddy/dy%%%
hh = 0.0013;       % step size
XX = -1:hh:1;      % domain
rr = v *0.0015;    % range
YY = diff(rr,1,1)/h; % first derivative
%ddy_dy = transpose(YY) ;
ddy_dy = YY ;

rowToDelete = 80; % or whatever...
ddy_dy(:,rowToDelete) = [];

disp('matriz deslocamento segundo o eixo do yy')
u(1:16,8:18)
disp('DERIVADA segundo yy, da matriz deslocamento segundo o eixo do yy')
ddy_dy(1:16,1:18)

% Solving the 2-D Poisson equation by the Finite Difference
...Method
% Numerical scheme used is a second order central difference in space
...(5-point difference)

%%
%Specifying parameters
nx=100;                %Number of steps in space(x)
ny=100;                %Number of steps in space(y)
niter=30000;           %Number of iterations
dx=2/(nx-1);           %Width of space step(x)
dy=2/(ny-1);           %Width of space step(y)
x=-1:dx:1;             %Range of x(0,2) and specifying the grid points
y=-1:dy:1;             %Range of y(0,2) and specifying the grid points

```

A.2 Artigo desenvolvido durante a dissertação

Tomé, Guilherme; Rodrigues, Frederico; Páscoa, José; ”*Optical methods for flow visualization, preliminary design set-up and test of a schlieren system for DBD plasma actuator induced flow analysis.*”, *International Conference on Engineering*, 5-7 Dezembro, Covilhã, Universidade da Beira Interior, Paper ICEUBI2017-30.01