



César Sequeira da Rocha Miranda

Estudo de escoamentos turbulentos através da técnica de Velocimetria Holográfica (*HoloPIV*)

Projeto de Graduação

Trabalho apresentado ao final do curso de Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica PUC – Rio como parte dos requisitos à conclusão do curso de Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Luis Fernando A. Azevedo
Co-orientadora: Dra. Juliana K. Abrantes

Rio de Janeiro, Dezembro de 2016.



César Sequeira da Rocha Miranda

**A study on turbulent flows through the Holographic
Particle Image Velocimetry technique**

Undergraduate Paper

Paper presented at the end of Mechanical Engineering undergraduate degree at PUC - Rio Mechanical Engineering Department as part of the requirements for completing the Mechanical Engineering degree

Tutor: Professor Luis Fernando A. Azevedo
Co-Tutor: Dr. Juliana K. Abrantes

Rio de Janeiro, December 2016.

Agradecimentos

Ao orientador, Luis Fernando A. Azevedo; co-orientadora Juliana K. Abrantes e toda a equipe do Laboratório de Engenharia de Fluidos da PUC-RIO, pelos ensinamentos, disponibilidade, ajuda, incentivo e orientação durante esse Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica.

Aos meus pais, Júlio e Lúcia, por me presentear com a oportunidade de estudar nessa faculdade, por terem me apoiado durante toda essa jornada, principalmente nos momentos mais difíceis.

Aos meus amigos não só do curso de Engenharia Mecânica, mas também de outros cursos e de fora da faculdade, sem vocês esses cinco anos da graduação não seriam os mesmos.

César Sequeira da Rocha Miranda

Resumo

O presente trabalho visa contribuir em algumas etapas do desenvolvimento e validação – em um escoamento turbulento de canal – uma técnica ótica avançada para medir campos de velocidade tridimensionais, a Velocimetria por Imagem de Partículas Holográfica Digital (*HoloPIV*), ainda pouco utilizada. Partículas são adicionadas ao escoamento apenas na proximidade do volume de medição, sendo iluminadas por um feixe de laser. O padrão de interferência gerado por difração da luz coerente é denominado um holograma, e pode ser reconstruído numericamente *a posteriori*, recuperando a informação volumétrica do conjunto de partículas e suas coordenadas tridimensionais. A partir de pares de volumes reconstruídos, é possível calcular campos 3D de velocidade, representativos das estruturas e mecanismos físicos presentes naquela região do escoamento. O estudo e desenvolvimento dessa técnica visa, como objetivo final do projeto como um todo, melhor compreender e possivelmente aperfeiçoar novos métodos de redução de arraste em escoamentos turbulentos, com grande aplicabilidade não só na área da pesquisa, mas também na indústria.

Grande parte do foco do trabalho apresentado a seguir é na otimização do processo de injeção local de partículas visualizadoras, de maneira a obter volumes reconstruídos – e, conseqüentemente, campos de velocidade – com a maior qualidade possível.

Palavras Chave: Holografia, Turbulência de parede, Velocimetria por Imagem de Partículas

Abstract

This paper aims at contributing to the development and validation – in a turbulent channel flow – of an advanced optical technique for measuring three-dimensional velocity fields, the Holographic Particle Image Velocimetry technique, also known as HoloPIV. Particles are added to the flow, in the vicinity of the measurement volume, being illuminated by a laser beam. The interference pattern generated by diffraction of coherent light is what is known as a hologram, and may be numerically reconstructed *a posteriori*, recovering the volumetric information through their three-dimensional coordinates. From the reconstructed volume pairs, the 3D velocity fields can be obtained, which will represent the structures and physical mechanisms present at the flow region under investigation. The study and development of this technique ultimately aims to create and test new methods of understanding and improving drag reduction in turbulent flows. Such type of results can be widely applied not only into the research field but also in the industry.

Key Words: Holography, Wall Turbulence, Particle Image Velocimetry.

Índice

1. Introdução.....	9
1.1 – O que é o PIV.....	11
1.2 – Tipos de PIV.....	12
1.2.1 – PIV 2D-2C.....	12
1.2.2 – PIV 3D-3C.....	15
<i>PIV Tomográfico</i>	15
<i>PIV Holográfico</i>	16
1.3 Escoamentos Turbulentos.....	22
1.3.1 – Perfis de Velocidade.....	23
1.3.2 – Tensão Cisalhante na Parede.....	26
2. Objetivos.....	29
3. Procedimento Experimental.....	31
3.1 – Bancada de Testes e Circuito de Escoamento.....	31
3.2 – Montagem ótica e Mecanismo de Injeção de Partículas.....	37
3.2.1 – Montagem ótica.....	37
3.3.2 – Injeção de Partículas.....	40
3.3 – Procedimento de Calibração.....	43
3.4 – Otimização do Processo de Injeção de Partículas.....	46
4. Resultados.....	50
5. Conclusão.....	58
6. Referências Bibliográficas.....	60

Índice de Figuras

Figura 1 – Ilustração da Montagem de um PIV 2D.....	13
Figura 2 - Ilustração da configuração de câmeras para emprego da técnica de Velocimetria Tomográfica de Partículas (Tomo PIV).....	16
Figura 3 - Ilustração do fenômeno de difração e interferência entre duas fendas, com o padrão de interferência gerado.....	18
Figura 4 - Ilustração de como se dá o processo de captura dos padrões de interferência de uma montagem holográfica In-line.....	19
Figura 5 - Ilustração da montagem utilizada para captura de hologramas utilizando a técnica holográfica digital In-line.....	20
Figura 6 - Exemplo de um holograma de partículas e os planos de reconstrução numérica.....	21
Figura 7 - Ilustra um fluxo de transição sobre uma placa plana estacionária.....	25
Figura 8 - Desenho esquemático do canal de seção retangular utilizado para realização dos testes.....	32
Figura 9 - Seção de testes montada sem a presença dos componentes óticos.....	33
Figura 10 - Bomba de água do tipo centrífuga.....	33
Figura 10 - Bomba de água do tipo centrífuga.....	34
Figura 11 - Inversor de Frequência Padrão.....	34
Figura 12 - Projeto do mixer utilizado para homogeneizar o fluxo antes da entrada no canal quadrado.....	35
Figura 13 - Sequência de montagem ótica da seção de testes.....	36
Figura 14 - Lente Biconvexa Convergente com índice de refração maior que o meio.....	38

Figura 15 - Projeto do sistema de injeção de partículas no escoamento principal.....	39
Figura 16 - Detalhes da peça de injeção, em particular o arranjo da microfuração e os furos para ajuste de posição.....	41
Figura 17 - Posicionamento da peça frente o módulo de testes e conexão com a mangueira de injeção.....	43
Figura 18 - Peça para inserção da régua calibradora dentro do canal. Uma haste e um batente garantem o correto posicionamento no volume de medição.....	43
Figura 19 - Holograma de Calibração e a sua Reconstrução.....	44
Figura 20 - Função de mapeamento na direção normal à parede.....	45
Figura 21 - Detalhe da seção e do processo de injeção local de partículas.....	46
Figura 22 - Imagens magnificadas com visão frontal da distribuição de partículas injetadas a montante. Alguma intermitência no processo de injeção pode ser observada.....	50
Figura 23 - Série temporal de visualização da mistura para a menor vazão de injeção testada, de 0.15 ml/hr.....	51
Figura 24 - Série temporal para vazão de injeção de 1.5 ml/hr.....	51
Figura 25 - Série Temporal para vazão de injeção de 3.0 mL/hr.....	52
Figura 26 - Série Temporal para vazão de injeção de 5.0 ml/hr.....	53
Figura 27 - Série Temporal para vazão de injeção de 10.0 ml/hr.....	54
Figura 28 - Visualização frontal com fluorescência: estudo de casos para otimização do processo de injeção, $Re = 35000$	55

1 - Introdução

A técnica de medição por velocimetria de partículas é relativamente recente, mas vem sendo cada vez mais amplamente utilizada para realizar medições instantâneas de campos de velocidade em regiões específicas de escoamentos diversos. Esse trabalho tem como principal objetivo desenvolver e validar uma técnica de velocimetria específica, o *PIV Holográfico In-Line* (ou “em linha”), aplicada a pequenos volumes (da ordem de 2mm x 2mm x 2mm) próximos a parede de um escoamento turbulento desenvolvido. Essa análise visa abrir precedentes para futuras aplicações da técnica em pesquisas, entre outras áreas, de novos métodos para redução de arraste em diversos tipos de escoamento. Vale ressaltar que esse projeto de pesquisa é um desenvolvimento de longo prazo, com várias etapas e desafios a serem resolvidos. Além da montagem da seção de testes e de toda a parte ótica, diversos testes e ajustes deverão ser feitos, para que a validação da técnica seja concluída. Por tais motivos, esse trabalho visa aperfeiçoar o processo experimental que envolve o método em si, para futura aplicação e desenvolvimento.

O Capítulo 1 trata de uma introdução aos principais conceitos envolvidos na técnica, necessários para um futuro entendimento do procedimento experimental. O capítulo expõe primeiro no que consiste a técnica de velocimetria de partículas, os tipos mais comuns e suas peculiaridades. Logo em seguida, uma introdução aos conceitos de holografia aplicados ao PIV holográfico será dada, em conjunto com um breve resumo do fenômeno físico que possibilita a reconstrução das imagens e o acompanhamento do movimento das partículas. Concluiremos o capítulo com uma breve análise sobre os conceitos que envolvem turbulência e arraste, assim como as razões pelas quais as medições foram feitas na região próxima a parede.

No capítulo 2 abordaremos os principais objetivos e o que se esperava alcançar com o trabalho. Discutiremos os objetivos primários do projeto, e as expectativas com os

resultados. Voltaremos a falar sobre uma posterior mudança de foco do trabalho, devido a questões de otimização do procedimento experimental.

O Capítulo 3 apresenta todas as etapas do procedimento experimental, inclusive o detalhamento dos diversos equipamentos utilizados assim como todos os processos de calibração. Serão informadas, também, todas as dificuldades encontradas durante os procedimentos, assim como as soluções desenvolvidas a fim de aperfeiçoar e melhorar o processo de aquisição de dados.

O Capítulo 4 contém uma apresentação dos resultados alcançados, especialmente de mosaicos contendo todas as imagens obtidas na fase de aquisição de dados. Concluiremos esse capítulo analisando os resultados obtidos e relacionando com o objetivo central do trabalho, abrindo precedentes para futura revisão da técnica para melhora da eficiência.

O Capítulo final trará todas as conclusões obtidas após a finalização do processo experimental do âmbito deste projeto de fim de curso. Uma revisão de todos os problemas encontrados e sugestões para futuros trabalhos é apresentada, além de exemplos de campos de velocidade 3D reconstruídos.

1.1 O que é o *PIV*

O *PIV* (da sigla em inglês, *Particle Image Velocimetry*), ou Velocimetria por Imagem de Partículas, é um método ótico utilizado para se obter medições instantâneas e estatísticas de campos de velocidade na região de interesse de escoamentos. O seu princípio básico consiste em iluminar uma seção do escoamento em dois instantes de tempo próximos (intervalo entre pulsos costuma ser da ordem poucos microssegundos) por meio de um feixe ou plano de luz laser pulsada, registrando a posição de partículas traçadoras previamente distribuídas no fluido, geralmente por meio de câmera digital (Raffel *et al* 2007).

O método *PIV* possibilita a medição de velocidade por meio da análise de deslocamento de partículas, podendo ser usado para medições instantâneas de velocidade e de outras propriedades relacionadas aos fluidos. Sendo assim, o fluido precisa conter partículas “traçadoras” que possam ser acompanhadas ao longo do tempo, uma vez que o cálculo dos vetores velocidade desejados se baseia na correlação espacial da posição de pequenos grupos de partículas no intervalo de tempo conhecido. Estas ditas partículas traçadoras podem ser adicionadas previamente ao escoamento, servindo de marcadores. Para o uso correto da técnica, é necessário que as partículas sigam fielmente a dinâmica do fluxo, para isso devem possuir densidade muito semelhante àquela do fluido de trabalho.

Dentre as principais vantagens da técnica *PIV*, ressaltamos o fato do mesmo ser um método não intrusivo, fornecer medições de velocidade e sentido do deslocamento após um curto período de processamento e possuir uma infinidade de aplicações na área de Mecânica dos Fluidos. Como limitações da técnica, vale ressaltar o fato de que o fluido necessariamente deve conter partículas bem definidas (naturais ou adicionadas) e de que o algoritmo de processamento das imagens possui uma exigência computacional relativamente alta, dependendo do experimento em questão. A principal diferença entre a técnica *PIV* e os demais métodos de medição de velocidade em escoamentos de fluidos (exemplos:

Velocimetria Laser Doppler e Anemometria de Fio Quente) é que a mesma produz campos vetoriais bidimensionais ou até tridimensionais, enquanto as outras resultam em medidas pontuais de velocidade.

A seguir, detalharemos as principais características de tipos distintos de *PIV*, o *PIV-2D-2C*, que resulta na reconstrução de campos de velocidades bi-dimensionais, e o *PIV-3D-3C*, que como o nome diz (*D* representa o número de dimensões e *C* o de componentes de velocidade medidas), possibilita a geração de campos de velocidade tridimensionais. O objeto central de estudo do trabalho será o método *PIV* Holográfico *In-line*, que é da categoria *3D-3C*.

1.2 Tipos de *PIV*

Nessa seção detalharemos o desenvolvimento teórico por trás das diferentes vertentes de utilização do *PIV*. A escolha de qual método utilizar depende de uma série de fatores, dentre os quais podemos destacar a região do escoamento que se deseja medir, a quantidade de informação que se deseja obter, e os recursos disponíveis para reprodução da técnica.

1.2.1 Velocimetria Por Imagem de Partículas (*PIV*) *2D-2C*

Esta utilização da técnica *PIV* é a mais antiga e comum, amplamente empregada para obtenção de campos bidimensionais de velocidade em diversos tipos de escoamento. Assim, esse modo específico é caracterizado por gerar campos de velocidade bidimensionais, ou seja, as imagens são capturadas em planos, e mais tarde reconstruídas, gerando vetores de velocidade com apenas duas componentes (as componentes deste plano – plano *x-y* com componentes de velocidade *U* e *V*).

Primeiramente, uma determinada região do escoamento é iluminada por um plano de luz laser, gerado por sua vez a partir de um feixe de laser pulsado. A luz espalhada pelas

partículas traçadoras presentes no escoamento é capturada por uma câmera, posicionada de forma perpendicular ao plano de luz. Dessa forma, ocorre o registro da posição das partículas no escoamento, nesse primeiro instante de tempo. Após um tempo Δt (intervalo de tempo previamente definido – importante parâmetro já mencionado anteriormente, da ordem de microssegundos), um segundo pulso de laser é emitido, iluminando a mesma região do escoamento. De forma sincronizada, a câmera registra a nova posição das partículas em uma segunda imagem.

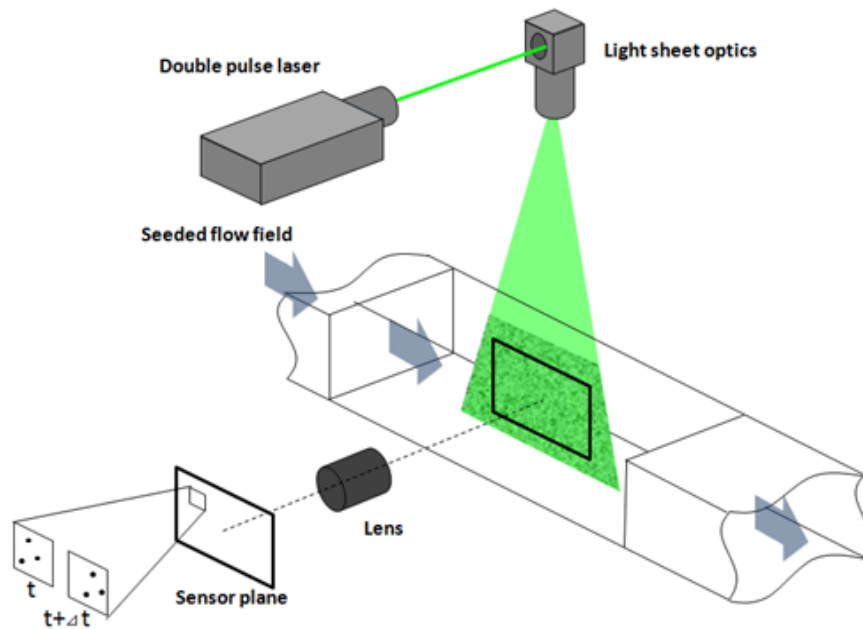


Figura 1 – Ilustração da Montagem de um PIV 2D (Raffel *et al*, 2007)

Uma vez capturadas as imagens, a análise de deslocamento das partículas pode ser obtida através de processamento digital, que consiste normalmente de uma análise de correlação cruzada de pequenos grupos de partículas (as imagens são divididas em “janelas de interrogação” contendo em torno de 10 partículas) entre os dois instantes para determinação dos vetores deslocamento e portanto vetores de velocidade.

As janelas devem ser pequenas o suficiente para garantir que a velocidade nesta região seja uniforme, no limite representando um ponto do escoamento estudado. Com o cálculo de correlação espacial cruzada entre janelas de interrogação da primeira imagem com janelas correspondentes na segunda imagem, resulta um mapa de correlação, o qual possui, idealmente, um pico de correlação bem distinto e outros picos secundários. O pico principal deve corresponder ao deslocamento das partículas entre os instantes de tempo t e $t + \Delta t$.

Assim, de forma relativamente trivial, o método da correlação cruzada permite determinar o módulo, a direção e o sentido de cada vetor medido ao comparar duas imagens obtidas sequencialmente nos instantes t e $t + \Delta t$. Com a informação do deslocamento em escala das imagens (i.e., há uma calibração anterior que relaciona deslocamento em pixels com o deslocamento real), em conjunto com o conhecimento de Δt , é possível determinar a velocidade daquele “ponto” naquele instante.

Os métodos de correlação cruzada ou auto correlação utilizam a posição do ponto de maior valor da função de correlação como indicação da localização do deslocamento das partículas (pico de correlação). Como as imagens de origem e sob análise são discretas, a localização das coordenadas dos picos de correlação é realizada com uma resolução da ordem de 1 pixel, o que limita a incerteza da técnica de medição. Para diminuir a incerteza da técnica utilizada, métodos baseados em ajustes de pico parabólicos ou Gaussianos são empregados. Dessa forma, é possível reduzir as incertezas na localização dos picos de correlação e, portanto, na velocidade medida para uma ordem de em torno de 1/20 de pixel.

1.2.2 Velocimetria Por Imagem de Partículas (*PIV*) 3D-3C

Nessa seção trataremos de técnicas de medição relativamente novas que vem sendo amplamente aplicadas principalmente na área da pesquisa, com o intuito de detalhar cada vez mais precisamente o comportamento intrínseco do fluido em diversos tipos de escoamento.

Existem duas principais técnicas de medição de campos de velocidade 3D que serão abordadas nesse trabalho, uma delas é o *PIV* Tomográfico (*TomoPIV*) e a outra o *PIV* holográfico (*HoloPIV*), desenvolvido e implementado no presente trabalho.

PIV Tomográfico

O *PIV* Tomográfico consiste em visualizações simultâneas de um volume de interesse do escoamento, repleto de partículas traçadoras, iluminado por um plano de laser. Múltiplas câmeras são utilizadas para registrar imagens a partir de diferentes perspectivas, em um mesmo instante, de forma a permitir que a distribuição espacial 3D das partículas possa ser reconstruída posteriormente com algoritmo apropriado de reconstrução. Uma vez reconstruído, o volume é então analisado através de algoritmos de correlação cruzada 3D, que estimam o deslocamento de grupos de partículas dentro do volume, entre dois instantes de tempo pré-determinados. Para esta análise do campo de velocidades no volume de interesse iluminado, em analogia ao caso 2D, ele é dividido em pequenos “volumes de correlação”. Assim, o procedimento de reconstrução é capaz de gerar três componentes do deslocamento para cada volume de correlação.

Existem diferentes algoritmos de reconstrução que podem ser aplicados para essa técnica, mas não serão abordados neste trabalho.

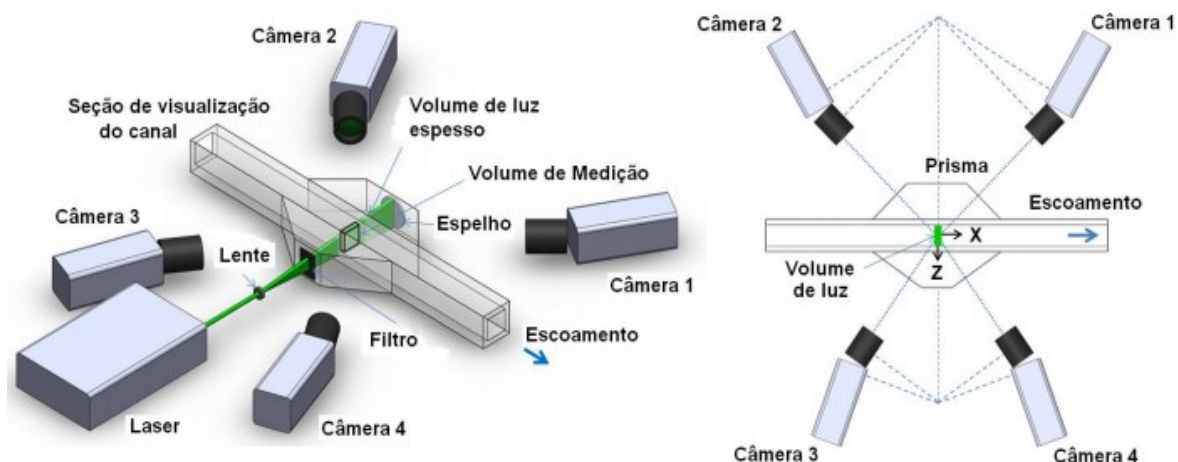


Figura 2 - Ilustração da configuração de câmeras para emprego da técnica de Velocimetria Tomográfica de Partículas (*Tomo PIV*)

A principal vantagem obtida com a utilização da técnica tomográfica é o fato de possibilitar a determinação do campo de velocidade em três dimensões de um volume relativamente maior (se comparado com a técnica holográfica, por exemplo). Com a utilização desse tipo de *PIV* é possível, por exemplo, estudar o escoamento em um volume similar a um plano de luz bem mais espesso que o *PIV* 2D (ver Figura 2), tridimensionalmente e com as três componentes de velocidade. No caso do exemplo da figura, e quase na totalidade de casos em que se utiliza *TomoPIV*, partículas são espalhadas por todo o escoamento, não sendo assim necessária a injeção de partículas de forma localizada, como veremos ser um dos desafios no caso do *PIV* holográfico apresentado a seguir.

PIV Holográfico

O *PIV* holográfico, ao contrário do *PIV* 2D e da mesma forma que o *TomoPIV*, é utilizado para medir campos de velocidade em três dimensões, 3D-3C, e a partir de agora será o ponto principal de análise deste trabalho. Ao contrário da técnica apresentada anteriormente (*TomoPIV*), o *HoloPIV* está normalmente restrito a volumes de medição menores. Assim, na maioria dos experimentos, por se tratar de uma técnica que envolve interferência de luz, o volume de medição é pequeno e, ademais, partículas devem ser adicionadas somente nessa

região do volume de interrogação, e não no escoamento inteiro (afim de não registrar muita interferência – ruído – na captura do holograma digital). Para um melhor entendimento sobre o funcionamento da técnica, uma análise mais detalhada a respeito dos fenômenos óticos envolvidos na captura dos chamados hologramas será dada em seguida.

Um holograma pode ser definido como uma figura ou imagem que possui informação a respeito da intensidade, fase e radiação refletida, transmitida ou difratada pelo objeto “fotografado”. Existem várias maneiras de se obter um holograma, mas durante esta análise focaremos em uma das técnicas mais simples, e ao mesmo tempo mais avançada de aquisição de dados, a holografia digital em linha.

Primeiramente, é importante definirmos conceitos físicos simples envolvidos no processo de aquisição de um holograma. O instrumento principal no qual consistem todas as informações necessárias para geração de um holograma é a fonte de luz. A aquisição dessas imagens só é possível devido ao comportamento de propagação da luz, que viaja em ondas de amplitude A , comprimento λ e fase ϕ características, conforme equações trigonométricas ou complexas descritas abaixo.

$$E(x, t) = A \cos(kx - \omega t + \phi) \quad \text{ou} \quad E(x, t) = A e^{-j(kx - \omega t + \phi)}$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

A forma como a luz se propaga possibilita que fenômenos óticos tais como a difração e a interferência ocorram, responsáveis tanto pela viabilização da técnica como pela a limitação e escolha dos instrumentos. A difração e a interferência são fenômenos óticos intrinsecamente relacionados. A difração pode ser definida como de maneira geral como o espalhamento ou propagação de uma onda ao atravessar pequenos orifícios ou fendas. Como as ondas ditas coerentes são caracterizadas por uma variação periódica de alguma propriedade (no caso dos lasers sempre é conhecido o comprimento de onda λ e este é bem determinado e não varia), podem interagir entre si quando duas ou mais ondas atravessam a mesma região do

espaço. Por exemplo, uma onda plana (com frentes de onda planares) incidente em uma fenda circular pequena gera uma onda esférica, como é ilustrado na Figura 3, e esta nova onda pode por sua vez passar por outras fendas e o resultado de tal interferência resulta em padrões de máximos e mínimos para um observador.

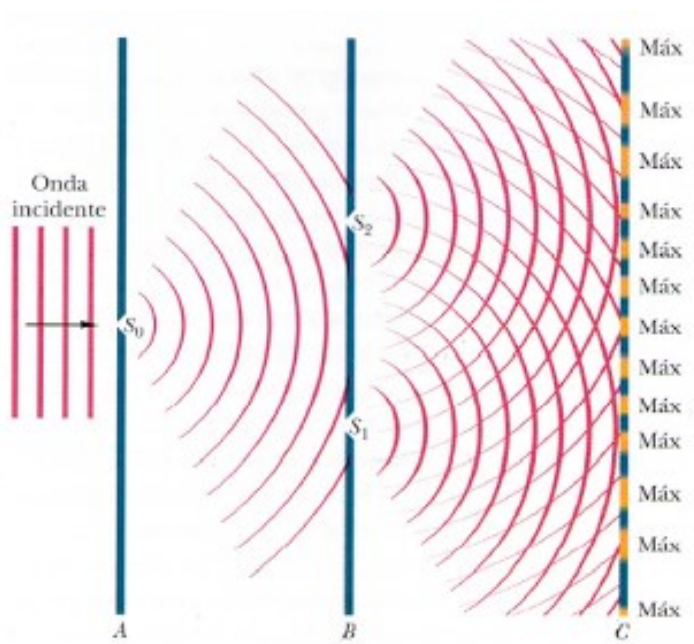


Figura 3 - Ilustração do fenômeno de difração e interferência entre duas fendas, com o padrão de interferência gerado

Assim, o processo de superposição de duas ou mais ondas em um mesmo ponto é chamado de interferência. De acordo com esse princípio, um ponto onde duas ou mais ondas se manifestam, o deslocamento resultante neste ponto é igual à soma dos deslocamentos de cada onda que ali se manifesta. Durante esse processo, ocorre uma recombinação dos máximos e mínimos de amplitude das ondas, o resultado disso varia entre dois extremos, em um caso, temos a combinação de um máximo com um mínimo (Interferência Destrutiva) e do outra a combinação de um mínimo com um mínimo ou um máximo com um máximo (Interferência Construtiva). Esse fenômeno pode ser claramente demonstrado pelo simples experimento de dupla fenda ilustrado na Figura 3.

Devido ao princípio de conservação de energia, a interferência destrutiva deve vir sempre acompanhada da construtiva, na prática, os máximos e mínimos gerados podem ser identificados através de padrões claros e escuros, chamados de franjas de interferência. As franjas de interferência capturadas a partir da interação entre o feixe de luz e o objeto desejado, representam a fonte de dados para a futura reconstrução espacial do objeto, e aí já se entra no campo do que se chama holografia.

Conforme mencionado acima, a técnica holográfica consiste na captura de informações a respeito da fase e amplitude da onda de referência após interação com o objeto que se deseja estudar. Para que isso ocorra, no caso da holografia digital, é estritamente necessário que informações a respeito da fase da onda sejam convertidas em variações de intensidade da mesma para efeito de captura das imagens por parte do CCD da câmera. Para isso, é utilizada a “onda de referência”; na prática, esse processo consiste na captura de um padrão de interferência entre a onda difratada pelo objeto que se deseja capturar, e uma onda de referência com amplitude, comprimento de onda e fase conhecidas, como ilustrado na Figura 4.

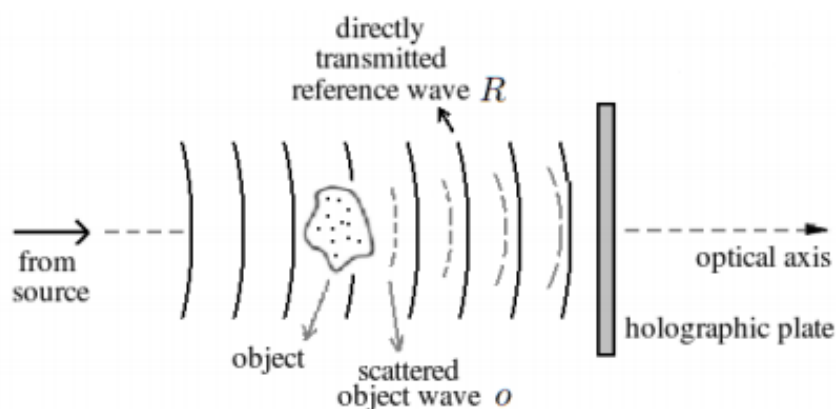


Figura 4 - Ilustração de como se dá o processo de captura dos padrões de interferência de uma montagem holográfica In-line

Vale ressaltar que o fenômeno da interferometria da holografia, descrito e ilustrado acima, pode ser replicado utilizando diversos tipos de montagem. No caso desse trabalho, onde o ponto focal é a técnica holográfica In-line, a onda de referência e aquela difratada pelo objeto provém da mesma fonte (isto pode ser observado na Figura 4, e é possível quando se trata de um objeto majoritariamente transparente, pois assim a onda de referência não é muito perturbada ou bloqueada). Esta seria uma das principais razões pelas quais essa técnica deve ser aplicada somente a pequenos volumes de medição. Ao aumentar o volume da amostragem, e conseqüentemente a quantidade de partículas, os padrões de franjas de interferência se tornam muito ruidosos e de difícil reconstrução, visto que o CCD da câmera responsável pela aquisição das imagens tem capacidade e resolução limitada, e a onda de referência também sofre perturbações em demasia.

Com alguns conceitos a respeito dos fenômenos óticos envolvidos no processo de aquisição de um holograma, é possível dar prosseguimento com detalhes a respeito da cronologia para aquisição das imagens, assim como uma visão geral do procedimento experimental.

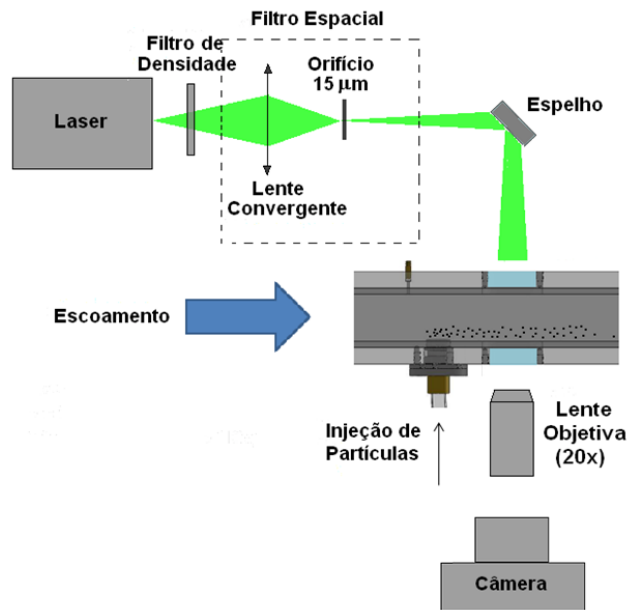


Figura 5 - Ilustração da montagem utilizada para captura de hologramas utilizando a técnica holográfica digital In-line

A Figura 5 mostra um esquema simplificado da montagem utilizada para a captura das imagens holográficas no experimento de canal quadrado do presente trabalho. Uma visão mais detalhada a respeito do processo experimental e dos componentes óticos e mecânicos utilizados durante a aplicação da técnica será dada posteriormente, no Capítulo 3.

Como mencionado anteriormente, a técnica de holografia In-line consiste na injeção de partículas de densidade bem próxima ao fluido de trabalho (no caso água), apenas no pequeno volume em que se deseja efetuar as medições, no caso deste experimento, logo na parede inferior do canal. Um feixe de laser ilumina o volume de medição por cima, enquanto uma câmera captura uma série de imagens desfocadas dos campos de partículas, denominadas hologramas. Tais hologramas são constituídos de padrões de franjas de interferência cujas modulações carregam informação sobre a posição em profundidade das partículas. Ou melhor, além das coordenadas de posição $x - y$ (coordenadas do plano do sensor e de planos paralelos a ele), os hologramas carregam informação também sobre a posição na direção ótica, ou “em profundidade”, a terceira dimensão z .

A presença de uma lente objetiva amplia os hologramas de forma a aumentar a resolução das franjas no sensor da câmera e nas imagens registradas (hologramas digitais salvos). Estes hologramas são então reconstruídos numericamente através de um *software* escrito em Laboratório, recuperando os campos de partículas originais (coordenadas 3D) nos diferentes instantes de tempo (conforme o princípio geral de todos os modos *PIV*, pares de imagens – neste caso a diferença é que são hologramas posteriormente reconstruídos em diversos planos para obter as coordenadas 3D das partículas presentes no volume de medição – são aquisitados, com intervalo de tempo Δt entre si. Uma calibração espacial com uma pequena régua transparente é feita previamente, da mesma forma como é necessária uma calibração adequada em qualquer outro modo *PIV* (*TomoPIV*, *2D-PIV*...).

Então, a partir de pares de volumes de partículas reconstruídos, algoritmos de correlação de imagens e/ou de acompanhamento de partículas (a concentração de partículas é um pouco mais baixa para o *HoloPIV* que para os outros métodos) são utilizados para calcular os campos 3D de velocidade.

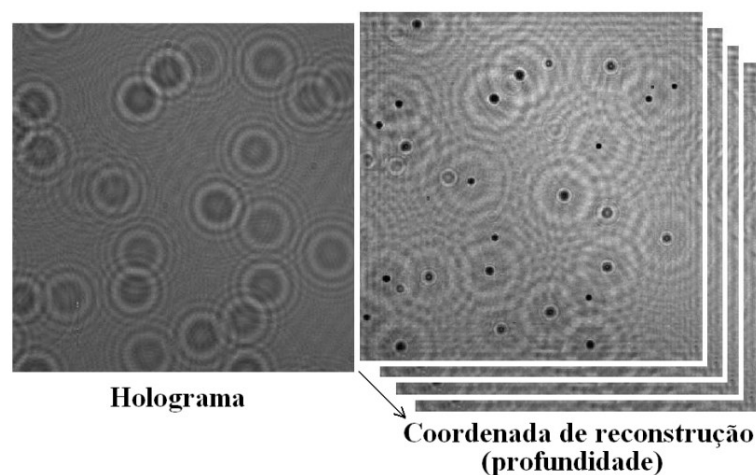


Figura 6 - Exemplo de um holograma de partículas e os planos de reconstrução numérica

A figura 6 demonstra um exemplo de um holograma de partículas (neste caso, para efeitos ilustrativos, de um spray de água – partículas maiores e em menor concentração que as utilizadas no experimento no canal) e sua reconstrução em diversos planos da direção z .

À medida em que os planos são reconstruídos, algumas partículas vão se afastando de “foco”, com bordas mais distintas, e outras vão se aproximando. Algoritmos de processamento podem então resgatar as coordenadas tridimensionais das partículas presentes no volume de medição para posterior cálculo dos vetores de velocidade (com as três componentes).

Na próxima seção, uma breve análise a respeito das características intrínsecas de escoamentos turbulentos será feita. Um breve entendimento dos efeitos da turbulência é essencial para futuro entendimento das aplicabilidades da técnica nesta área.

1.3 Escoamentos Turbulentos

O estudo de escoamentos internos representa um dos segmentos mais amplos e ao mesmo tempo desconhecidos dentro da engenharia. Os fenômenos físicos decorrentes de tais escoamentos são difíceis de serem determinados e medidos, principalmente quando há presença de turbulência, e este é o caso mais comum não só na área da pesquisa, como também no setor industrial.

Em mecânica dos fluídos, de maneira mais geral, um escoamento é dito turbulento quando as distribuições de pressão e velocidade apresentam uma componente aleatória de grande variabilidade (Moriconi, L., 1998).

Nesses tipos de escoamento, a energia contida nas regiões de contato do fluxo é concentrada em pequenas perturbações, sendo dissipada logo em seguida pela ação viscosa contínua do processo. Tais oscilações de momento e energia são capazes de gerar estruturas aleatórias, que são incrivelmente difíceis de medir, devido a limitações tecnológicas ainda presentes. Tais variáveis são essenciais para pleno entendimento da dinâmica dos escoamentos. Estudos vêm identificando, ao longo dos anos, que o efeito da turbulência se mostra muito mais severo nas regiões próximas a parede do escoamento. A tensão cisalhante

atuante entre a parede do escoamento e o filme de fluido produz um alto coeficiente de arrasto, e está diretamente relacionada à geração de alta vorticidade na região próxima a parede (Kravchenko, 1993).

Como mencionado anteriormente, as simulações numéricas para análise desse tipo de escoamento ainda são restritas em termos do número de Reynolds, assim como os métodos para medição dos mesmos. Dessa forma, o desenvolvimento de novos meios para análise e medição espacial das regiões próximas à parede são essenciais para a continuidade do progresso na pesquisa dos fenômenos inerentes a esse tipo de escoamento.

Em seguida, uma análise a respeito das grandezas físicas características desses escoamentos será feita. Lembrando que todo desenvolvimento teórico presente na próxima subseção foi feito para a condição de escoamento entre duas placas planas paralelas.

1.3.1 Perfis de Velocidade

Os perfis de velocidade de um escoamento são vitais para o entendimento da dinâmica de interação ao longo do percurso. É necessário um estudo isolado da seção transversal do fluxo, para se obter detalhes a respeito dos efeitos entre a camada próxima a parede e a parede em si. Ao se estudar o perfil de velocidade inerente ao escoamento turbulento entre duas placas planas paralelas, é primeiramente necessário entender o conceito da camada limite de um fluxo.

Em mecânica dos fluídos a camada limite pode ser definida como a camada de fluido delimitadora, no qual os efeitos difusivos da dissipação de energia mecânica ainda são sentidos (Schlichting, H., 1979). A teoria da camada limite dita o limite de transição entre um escoamento desenvolvido e não desenvolvido. Deve-se atentar para esse limite, visto que um escoamento não desenvolvido possui características bastante distintas, podendo afetar assim a aquisição de dados desejada. No caso de canal como em nosso experimento, o volume de

medição fica localizado em uma posição tal que o escoamento já se encontra desenvolvido – perfis e propriedades **médias** não mudam mais na direção do escoamento. A seguir, será dado prosseguimento as análises a respeito da dinâmica de transporte do escoamento estudado, lembrando que esse não é o foco primordial do trabalho, e sim os meios para medição de seus campos de velocidade.

Na nomenclatura usual de maior parte da literatura, o eixo y corresponde à direção normal à parede, enquanto no capítulo anterior, do ponto de vista ótico, corresponde ao eixo z . O perfil de velocidade média para escoamento laminar entre placas planas ou em canais quadrados / retangulares é parabólico, com velocidades nulas em suas extremidades (paredes) e velocidade máxima constante no centro. Esse perfil é válido somente para a condição de escoamento laminar. Para o caso de um escoamento turbulento, o perfil de velocidade apresenta um formato mais achatado, com uma derivada mais acentuada nas regiões próximas a parede, devido aos efeitos inerentes da intensidade de turbulência.

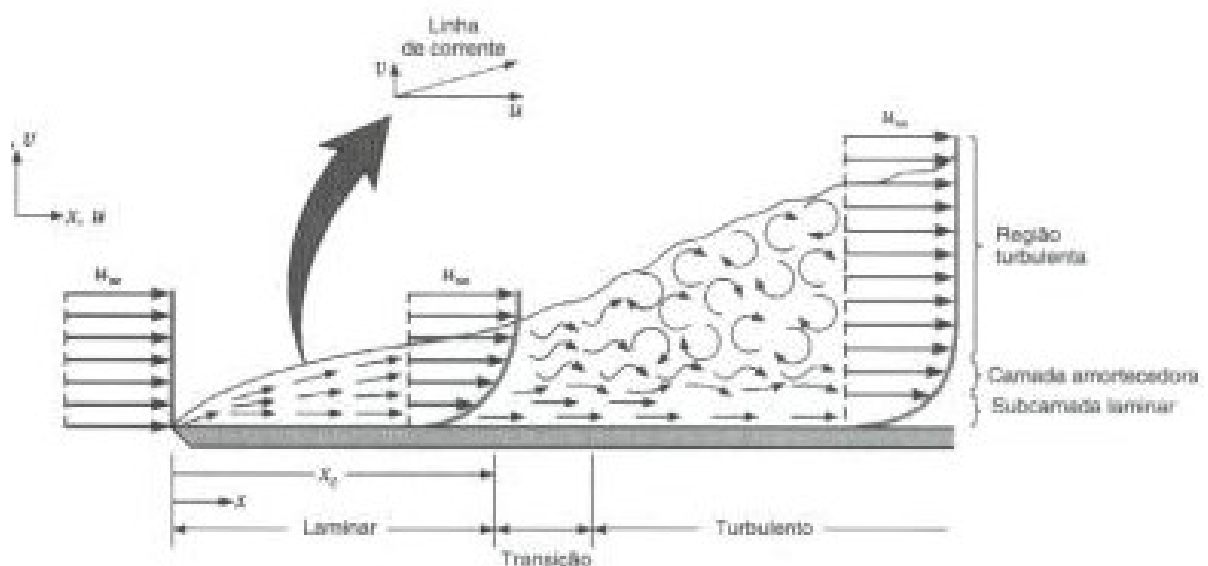


Figura 7 - Ilustra um fluxo de transição sobre uma placa plana estacionária

A figura 7 ilustra um escoamento em transição laminar / turbulento sobre uma placa plana. É possível observar o efeito de dissipação de energia próximo à área de interação com a parede, assim como a formação e regeneração de pequenos vórtices, fenômenos intimamente relacionados. A figura acima é meramente ilustrativa, representando um escoamento externo sobre uma placa plana, que não corresponde exatamente à seção de testes utilizada para este trabalho em condição de desenvolvimento hidrodinâmico; contudo, como se deseja atingir com esta técnica medições em região muito próxima da parede, se mostra válida para demonstração dos efeitos de dissipação.

1.3.2 Tensão Cisalhante Na Parede

A tensão de cisalhamento na parede do escoamento em canal desenvolvido pode ser determinada pela seguinte equação:

$$\tau_{parede} = \mu \left(\frac{\partial \bar{U}}{\partial y} \right)_{y=0},$$

onde μ é a viscosidade dinâmica, e o termo $\frac{\partial \bar{U}}{\partial y}$ representa o gradiente de velocidade do fluido de trabalho na direção vertical, ou seja, a taxa de variação da velocidade do fluido em relação a distância da área de contato (parede), quando y tende a zero, i.e., na iminente proximidade da parede.

No caso de um escoamento interno, é possível notar que a tensão de cisalhamento será máxima na região de contato entre o fluido e a parede. Na parede em si, $y = 0$, pela condição de contorno de não-deslizamento, a velocidade é nula, conforme mencionado anteriormente. Ou seja, levando em conta o perfil de velocidade observado na figura, o gradiente de velocidade entre o fluido e a parede é máximo, causando assim a ocorrência da máxima tensão cisalhante na região. Ao atingir a região central do canal, a tensão cisalhante é mínima ou nula. Como o foco principal da técnica desenvolvida no trabalho é o estudo do

comportamento do fluido em regiões muito próximas a parede, de alta dissipação / cisalhamento, detalhes a respeito da região central do canal não serão tratados aqui. Ressaltando mais uma vez que, em escoamentos turbulentos, a região próxima à parede na maioria das vezes apresenta um gradiente de velocidade bem mais agressivo, ou seja, o perfil de velocidade nessa região costuma apresentar uma inclinação mais acentuada do que aquela presente no caso laminar; a dissipação de energia via mecanismos viscosos do fluido se dá de maneira mais abrupta no caso turbulento.

Após essa breve introdução teórica descrita nas últimas duas seções, ficou comprovada a importância de se estudar as interações na região de parede de um escoamento turbulento e de, com tal fim, procurar desenvolver técnicas experimentais cada vez mais sofisticadas. E, naturalmente, um maior entendimento dos fenômenos inerentes a essa região pode ser diretamente relacionado à maior compreensão e ao desenvolvimento de métodos para redução de arraste (ou atrito, cujo coeficiente é diretamente proporcional à tensão cisalhante) nestes escoamentos.

No próximo capítulo, os objetivos primários e secundários deste trabalho serão listados e detalhados, assim como as dificuldades encontradas ao longo do procedimento experimental e a metodologia utilizada para superá-las.

2 - Objetivos

Conforme mencionado no capítulo anterior, o *PIV* holográfico, em sua versão digital, é uma técnica relativamente nova, e que depende de inúmeras variáveis para sua eventual replicação com sucesso em diferentes experimentos. Entre as variáveis mais importantes cabe destacar a concentração adequada de partículas a ser injetada no canal, a vazão de injeção das partículas um pouco a montante da região de medição, o correto alinhamento entre o feixe de laser e a janela de visualização, a distância entre o ponto de injeção das partículas e a janela de visualização (janela de vidro posicionada na região do volume de medição), e isto tudo em relação à vazão ou número de Reynolds do escoamento principal. Para uma replicação bem sucedida da técnica, é imprescindível que todas essas variáveis sejam bem testadas e ajustadas.

O objetivo central do presente trabalho é replicar e validar a técnica *HoloPIV*, em sua utilização no escoamento interno turbulento de seção quadrada e tendo água como fluido de trabalho, sendo contemplado, inclusive, ao fim do projeto global, o estudo também com adição de polímeros redutores de arraste ao fluido. No entanto, durante o procedimento experimental e o processo de aquisição de dados, ficou constatada a necessidade de aperfeiçoar alguns pontos específicos da aplicação da técnica, em especial, a otimização do processo de injeção de partículas. Em todo caso, ajustes e dificuldades são sempre esperados durante o desenvolvimento / aplicação de metodologias mais complexas.

Como mencionado no capítulo anterior, para a efetiva captura dos hologramas sem que as franjas de interferência se transformem em ruído, as partículas traçadoras injetadas no canal devem estar posicionadas na região bem próxima a parede do escoamento, para que só as partículas da região a ser estudada contribuam para as franjas dos hologramas. Isto também está relacionado à limitação na resolução dos equipamentos utilizados para captura do holograma (CCD da câmera). À medida que o volume de medição aumenta, ou seja, a

concentração de partículas ao longo da direção vertical aumenta, fica mais difícil à aquisição de hologramas de boa qualidade, visto que os padrões de interferência se mostram cada vez mais numerosos, até que começam a interferir entre si em diversas ordens, gerando o que seria semelhante a ruído puro e impossibilitando a reconstrução numérica do holograma – e consequentemente das coordenadas 3D das partículas do volume para posterior correlação. Além disso, a onda de referência passa a ser contaminada pelo excesso de partículas, dificultando assim a geração desses padrões, visto que a mesma já se mostra contaminada pelo excesso de ondas difratadas.

Ao realizar testes primários de aquisição de imagens, ficou constatada uma injeção ineficiente de partículas no canal, fator considerado primordial para uma replicação adequada da técnica. Ao inserir partículas no canal, as mesmas se mostraram descolar bastante da parede, correspondendo a uma região de medição diferente daquela que se deseja estudar – bem na parede. Além disso, as imagens capturadas possuíam uma concentração baixa de partículas, o que se mostrou nos primeiros hologramas capturados, com poucas franjas.

Tendo em vista tais dificuldades, o objetivo principal deste trabalho passou a ser a definição de novos parâmetros para aperfeiçoar o processo de injeção de partículas traçadoras na seção de testes. Principalmente aqueles relacionados à razão entre a vazão de injeção de partículas e a vazão do escoamento principal, e a distância entre o ponto de injeção de partículas e janela de visualização, onde as imagens são capturadas.

O capítulo seguinte tratará de todos os detalhes a respeito do procedimento experimental utilizado para tentativa de replicação da técnica *HoloPIV*, assim como os testes adicionais realizados na tentativa de aperfeiçoar a injeção de partículas traçadoras no canal -- testes estes que foram o cerne deste trabalho de fim de curso.

3 – Procedimento Experimental

Esta seção descreve em detalhes os diversos componentes utilizados na montagem da bancada na qual os testes foram realizados, assim como os equipamentos e medidores utilizados. Além disso, apresenta as metodologias e premissas utilizadas nos testes de otimização de injeção de partículas, objetivo principal do trabalho.

A primeira parte do capítulo trata das características do circuito de escoamento montado, seguida de detalhes a respeito da montagem ótica utilizada para captura dos hologramas. Em seguida será feita uma análise a respeito do procedimento de calibração de medição. Essa etapa é essencial para a futura reconstrução dos hologramas capturados, por dar conta de embutir nela informações que corrigem a magnificação e possíveis correções óticas, de forma a poder se determinar as coordenadas de partículas no espaço físico real de maneira acurada. Por último, mas não menos importante, os testes e métodos desenvolvidos para otimizar o procedimento de injeção das partículas no escoamento serão descritos, assim como os resultados esperados com as premissas utilizadas.

3.1 – Bancada de Teste e Circuito de Escoamento

O canal utilizado para a realização dos testes foi montado em cima de uma estrutura de suporte de alumínio. A seção foi construída em módulos de 40 centímetros de comprimento e o material escolhido foi acrílico, por apresentar uma boa visibilidade, alta resistência e baixo custo. Cada módulo possui seção transversal quadrada (40 mm x 40 mm), sendo formado por seis unidades distintas que se acoplam. As seções são unificadas através de juntas vedadas e aparafusadas, apoiadas sobre a estrutura de alumínio. Dessa forma,

quando os seis módulos são unificados, o canal de escoamento resultante possui um comprimento total em torno de 5,5 metros.

Os testes foram realizados no último módulo da seção, de forma que ao capturar as imagens, a premissa de escoamento desenvolvido pode ser utilizada. Esse módulo possui características únicas, visto que necessitava de adaptações para receber os demais componentes do experimento. Tais adaptações incluem uma janela de visualização superior e inferior fabricada em cristal, proporcionando assim, uma melhor qualidade na visibilidade tanto para incidência do feixe de laser (Janela Superior), tanto para a captura das imagens pela câmera (Janela inferior). Além da presença de duas janelas na parte superior e inferior do módulo, o mesmo foi fabricado com um furo, dedicado ao encaixe de uma pequena peça para injeção das partículas traçadoras. Maiores detalhes a respeito da peça de injeção serão abordados no subcapítulo seguinte.

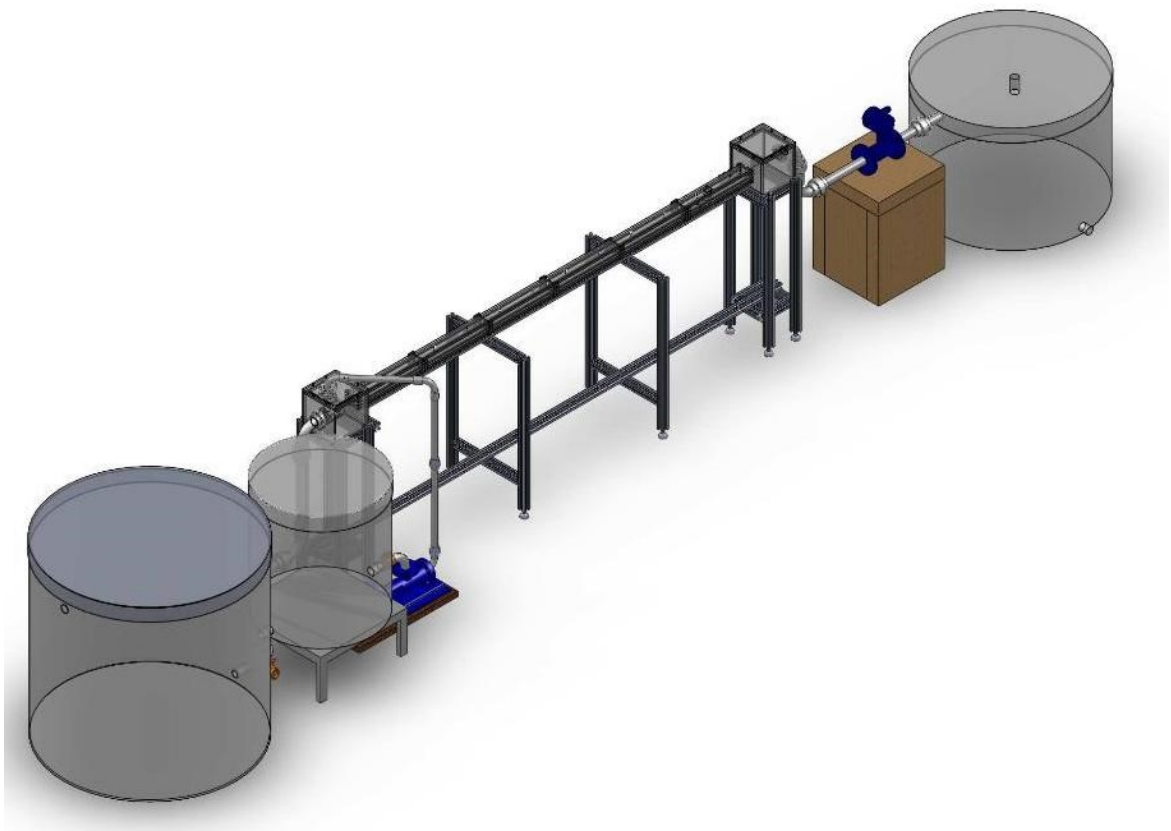


Figura 8 - Desenho esquemático do canal de seção retangular utilizado para realização dos testes

A figura 8 ilustra a seção de testes montada para a realização do experimento. É possível observar a presença de três tanques de armazenamento externo. O maior tanque fica localizado na entrada do circuito, com capacidade para 1000 litros, e é responsável por abastecer o sistema com o fluido de trabalho, ou seja, água. Um segundo tanque com capacidade para 500 litros, se localiza na ponta contrária do escoamento, ou seja, na saída do circuito. Esse tanque de saída é responsável pelo descarte da água contaminada com partículas, após a realização dos testes. O circuito pode ser operado em regime aberto ou fechado, através de uma manobra de válvulas manuais. Durante a aquisição das imagens, as válvulas devem ser posicionadas de forma a garantir o regime aberto, ou seja, a água que cruza o módulo de visualização e recebe uma solução concentrada com partículas deve ser descartada. Isso deve ser feito pois a água re-circulante contaminada com partículas causaria um acúmulo de partículas por todo o canal, gerando ruídos desnecessários, de partículas fora do volume de interesse, na captura de novos hologramas (este fator já foi abordado previamente).



Figura 9 - Seção de testes montada sem a presença dos componentes óticos.

O terceiro tanque na figura refere-se a uma futura aplicação da técnica holográfica. Esse tanque com capacidade desconhecida deverá ser abastecido com uma solução concentrada contendo polímeros. Estudos demonstram que o uso de estruturas poliméricas específicas pode contribuir para a redução de arraste no escoamento. Dessa forma, pretende-se utilizar a técnica de Velocimetria Holográfica, para estudo das estruturas provenientes da interação do fluido de trabalho e tais cadeias poliméricas em regiões de pequenos volumes próximas a parede. Como o objetivo central do presente trabalho era a otimização da técnica, em especial do processo de injeção de partículas no escoamento, o tanque permaneceu vazio e fora do circuito durante a realização dos testes.

O sistema de controle de vazão do escoamento é composto por três equipamentos principais. Uma bomba, responsável pelo bombeamento da água através do circuito, um

inversor de frequência para controle da potência da bomba e portanto da vazão gerada, e finalmente, um medidor de vazão, para medição da vazão efetiva do escoamento.



Figura 10 - Bomba de água do tipo centrífuga

A bomba utilizada para realização dos testes era do tipo centrífuga, com potência de 3/4 cavalos, rotação máxima de 1150 rpm e vazão de bombeamento de 11,04 L/min. O princípio de funcionamento deste tipo de bomba consiste na conversão de energia rotacional (Energia cinética) em energia potencial, ou seja, pressão no bocal de saída da bomba. A utilização desse tipo de bomba proporciona a capacidade de atingir números bastante elevados de Reynolds, que inclusive não eram suportados

pela seção de testes. Dessa forma, a potência da bomba foi limitada através do inversor de frequência, para preservar a integridade da seção quadrada em eventuais equívocos ou picos de pressão.



Figura 11 - Inversor de Frequência Padrão

O segundo elemento que compõe o sistema de controle de vazão é o inversor de frequência. Um inversor de frequência é um dispositivo eletrônico capaz de variar a velocidade de giro de um motor de indução trifásico, no caso, o motor elétrico da bomba. É um dispositivo que transforma corrente elétrica alternada fixa (corrente e tensão) em corrente elétrica CA variável controlando a potência consumida pela carga através da variação da frequência entregue pela rede. Esse

equipamento possibilita o controle minucioso da velocidade do escoamento. O modelo utilizado para os testes em questão possui faixa de operação entre 2,8 e 4A.

O terceiro e último componente do sistema é o medidor de vazão. O equipamento utilizado é do tipo magnético, e tem seu funcionamento baseado na medição da diferença de potencial elétrico entre dois pontos de fronteira em um escoamento. O medidor utilizado é da série VM04618 com faixa de operação entre 0,53 a 17,6 m³/h. Para garantir a coerência entre os valores mostrados pelo instrumento e a vazão real da seção, foram realizados diversos testes para calibração do equipamento. Esses testes consistiam na medição da altura da coluna de água presente no tanque de saída, com o circuito em regime aberto dentro de um intervalo de tempo cronometrado. Tendo o volume de água deslocada e o intervalo de tempo, era possível determinar a vazão real da bomba. Tais medições foram realizadas mais de uma vez e comparadas com os valores obtidos utilizando o instrumento, a fim de garantir que às leituras correspondessem às vazões reais.

Além do sistema de controle de vazão, o canal de escoamento foi montado com duas estruturas quadradas em suas extremidades, “caixas de entrada e saída”, para controle mecânico da pressão no interior da seção de testes. As duas estruturas podem ser observadas na Figura 8 e funcionam como unidades de entrada e saída de fluido. Ambas possuem um respirador em seu topo, que funcionam como válvulas de alívio de pressão interna. Os respiradores podem atuar tanto como ferramentas para equalização de pressão no interior do canal, como um mecanismo de emergência para alívio de pressão. Além dessas funções, vale ressaltar que as caixas acabam por reduzir a turbulência na entrada do canal (especialmente depois da adição de um bocal dentro da caixa), diminuindo assim, a região no qual o escoamento se encontra não-desenvolvido. Há também a opção de um *mixer* que será especialmente útil quando se começar a adicionar solução polimérica à água pura no futuro (ver Figura 12).

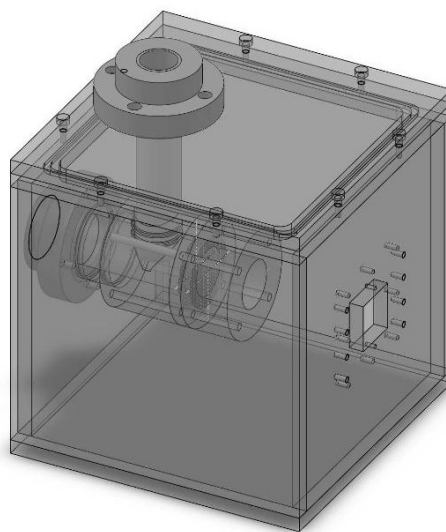


Figura 12 - Projeto do mixer utilizado para homogeneizar o fluxo antes da entrada no canal quadrado

3.2 – Montagem Ótica e Mecanismo de Injeção de Partículas

A montagem ótica adequada pode ser o elemento mais importante na tentativa de aplicação de qualquer técnica de velocimetria por imagem de partículas. Na técnica holográfica, não é diferente, pelo contrário, pode ser considerada ainda mais essencial. Para a melhor qualidade na captura dos hologramas, é imprescindível que o feixe de luz verde utilizado (laser de 532nm de comprimento de onda) atinja as partículas com o mínimo de interferência possível, para que possa interferir com as ondas difratadas pelas partículas apenas, gerando assim um padrão de interferência mais limpo, e de fácil reconstrução. Para isso, limpeza extremamente cuidadosa de cada componente ótico é crucial. A técnica é bastante “sensível” neste sentido.

Por sua vez, o mecanismo de injeção de partículas se mostra igualmente importante. Conforme mencionado anteriormente nas outras seções, é imprescindível que as partículas sejam introduzidas numa região bem próxima a parede, perturbando o mínimo possível a estrutura do escoamento, de forma representar fielmente as estruturas de turbulência na região.

3.2.1 – Montagem Ótica

Para efeitos de máxima precisão no posicionamento do laser, toda a montagem ótica foi fixada em cima de um trilho industrial, de forma a garantir que todos os componentes estivessem alinhados. O trilho por sua vez foi aparafusado em cima de uma bancada de teste especial, com furações igualmente espaçadas e alinhadas e sistema interno para diminuição de vibrações.

O feixe que sai do laser precisa “desviado” corretamente para o interior da seção de testes, iluminando corretamente e de forma alinhada o volume de medição. Isto é feito com a ajuda de diversos espelhos e suportes especializados para ajuste fino. Ao mesmo tempo, o feixe de luz deve ser tratado através da utilização de diversos aparatos óticos, de forma a atingir as partículas na forma mais “limpa” possível. Os instrumentos óticos utilizados para tratar e ancaminhar o feixe de laser foram um filtro de densidade, espelhos 45°, um orifício de passagem e uma lente convergente. Maiores detalhes a respeito da função de cada utensílio serão dados a seguir. A figura abaixo ilustra a sequência de montagem de cada aparato ótico.

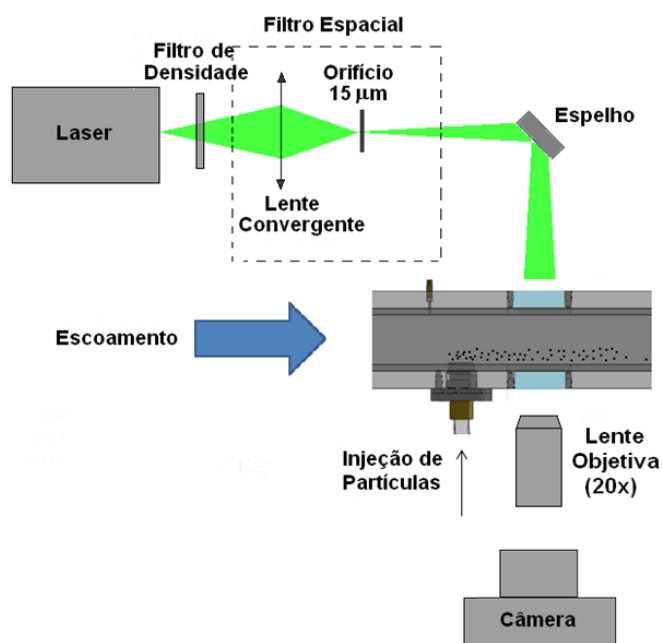


Figura 13 - Sequência de montagem ótica da seção de testes

O filtro de densidade ficava posicionado na saída do bocal do laser. O equipamento, como o próprio nome diz, diminui a energia do feixe por absorção (para registro de hologramas não são necessários níveis de energia tão altos quanto para as outras técnicas *PIV*, por se tratar de interferometria).

É importante notar que, quando o feixe de laser é gerado, o mesmo possui uma trajetória de onda levemente divergente, ou seja, à medida que o feixe se afasta da sua fonte, a tendência é de aumento da sua frente de onda. Essa é uma característica inerente à forma como a luz se propaga em ondas. Uma lente esférica convergente é posicionada logo em sequência aos filtros. Em uma lente esférica convergente, a luz que incide paralelamente é refratada, tomando direções que convergem a um único ponto. Como o material da lente possui índice de refração maior que o meio (ar), o uso de uma lente biconvexa foi adequado. A Figura 14 ilustra o princípio ótico por trás das propriedades de uma lente biconvexa convergente.

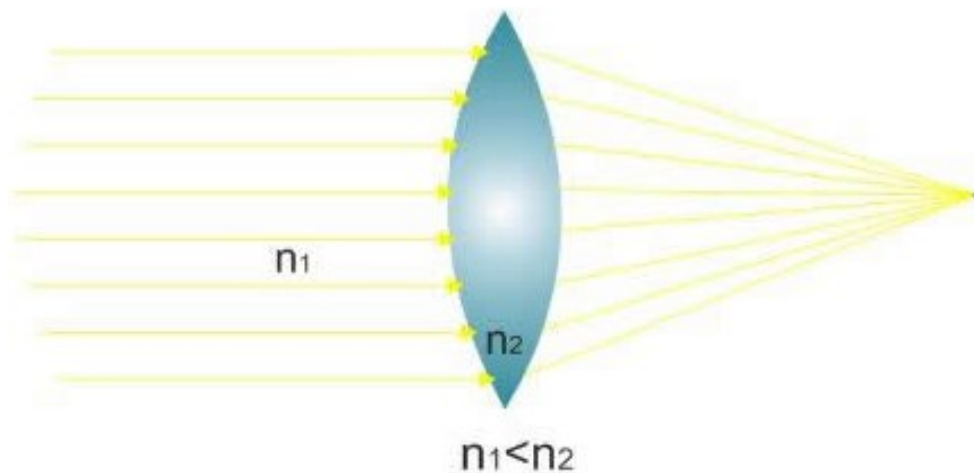


Figura 14 - Lente Biconvexa Convergente com índice de refração maior que o meio

O componente seguinte à lente convergente é um bocal com orifício de passagem de apenas 15 μm . O principal objetivo dessa passagem é tornar o feixe mais “limpo”, com a

forma Gaussiana sem flutuações espaciais de energia (ver “filtro espacial” em Abrantes, J. K., 2012, para explicação sobre o funcionamento destes chamados “filtros espaciais”, compostos de lente convergente + *pinhole*). Do orifício emerge um feixe mais limpo, também levemente divergente. Pode-se optar por manter o feixe divergente (e nesse caso o programa / algoritmo de reconstrução deve levar isso em conta como *input*), ou fazer sua colimação, usando um par de lentes que torne as ondas novamente planas, ou o feixe dito paralelo. Neste caso, ao menos para estes testes e ajustes, optou-se por não colimar o feixe e representa-lo numericamente com a mesma divergência no software de reconstrução. Qualquer pequeno erro nesta representação também pode ser corrigido por um procedimento de calibração adequado. Seguindo o bocal contendo o pequeno orifício de passagem, há a presença de mais um espelho 45°. A função desse espelho é única e especificamente de desvio através da reflexão do feixe de laser. O espelho é capaz de refletir o feixe em uma direção perpendicular aquela de incidência. Dessa forma, espelhos assim foram utilizados em três lugares, na saída do laser, ao final do trilho de fixação, e finalmente, fixado a um suporte, posicionado acima do módulo de visualização, para que o feixe incidisse na janela superior da seção (nota: a Figura 13 é simplificada para facilitar a compreensão geral, não mostrando todos os espelhos, por exemplo).

O último componente da montagem ótica é a lente objetiva. Essa lente é utilizada em conjunto com o corpo da câmera e um computador, utilizado como mídia, capaz de armazenar a imagem eletronicamente. O uso desse tipo de lente permite o controle da passagem de luz e a distância focal da lente, o que por sua vez, permite o controle da amplificação da imagem capturada. A objetiva utilizada para a aquisição de imagens neste trabalho possuía uma amplificação ajustada para 20x. É importante lembrar que esta objetiva não é utilizada para focar em algum plano específico de partículas, mas unicamente para **magnificar** o holograma – que por definição é uma “imagem fora de foco” das partículas – depois de já formado.

A fim de garantir a máxima eficiência da montagem ótica durante a aquisição dos hologramas, é necessário alinhar todos os componentes previamente, em procedimentos longos e cuidadosos não detalhados aqui. Dessa forma, podemos também garantir que o ponto de incidência do feixe de laser esteja centralizado com o centro da câmera, posicionada abaixo da janela de visualização. Para ajuda com o alinhamento, além de u diafragma que podia correr ao longo do trilho, foi utilizado um pedaço de barbante com peso morto, fixado ao centro da janela inferior, que por sua vez era iluminado com o feixe, emitido na direção paralela ao trilho de fixação. Os demais componentes não fixos, ou seja, os espelhos 45° eram então ajustados manualmente em seus suportes de ajuste fino (tudo marca *Newport Inc.*).

3.2.2 – Injeção de Partículas

Como mencionado diversas vezes, o processo de injeção de partículas é essencial para obtenção das imagens. No cenário ideal, é esperado que as partículas sejam injetadas no canal a uma vazão baixa e constante, de forma a não interferir na dinâmica do escoamento principal. Ao mesmo tempo, o fluxo de partículas deve possuir concentração adequada, visto que uma alta concentração produz um padrão de interferência muito ruidoso, e uma concentração baixa reduz o campo a resolução espacial do campo de velocidades final.

As partículas utilizadas para esse teste possuem um diâmetro que varia entre 1 e 3 μm . Como mencionado no Capítulo 1, essas partículas tem propriedades físicas semelhantes às da água, para que no momento em que forem introduzidas no escoamento, possam reproduzir fielmente a dinâmica de fluxo do fluido de trabalho. Para facilitar a sua introdução na seção, as partículas são enviadas pelo fabricante em pequenas garrafas, contendo uma concentração previamente determinada de estruturas diluídas em água. Dessa forma, podemos introduzi-las no meio desejado através do auxílio de um sistema, formado por uma seringa, uma bomba de injeção e uma mangueira.

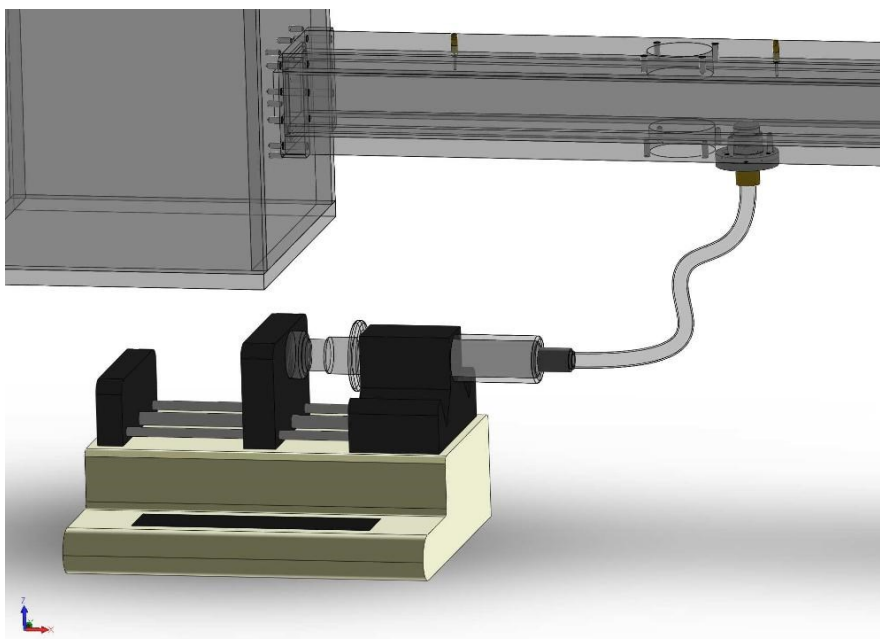


Figura 15 - Projeto do sistema de injeção de partículas no escoamento principal

A bomba de injeção, responsável pelo controle de vazão da seringa, utilizada para os testes em questão é do fabricante *Cole-Parmer*. Esse equipamento possui uma faixa de vazão que varia entre 0,2mL/h até 500 mL/h. A bomba é capaz de operar com diversos tipos de seringa, tendo um sistema computadorizado embutido que permite a definição de parâmetros tais como diâmetro e comprimento. Dessa forma, é possível ajustar a vazão desejada para qualquer tipo de seringa dentro da faixa de operação tolerada pelo equipamento. A bomba de injeção tem seu princípio de funcionamento baseado na rotação de uma barra roscada, que ao girar, impulsiona o tambor da seringa no sentido de compressão do fluido em seu interior. Dessa forma, a solução concentrada em partículas é empurrada no sentido do escoamento principal, através de uma mangueira.

A peça responsável por interligar a seção de testes com a mangueira, e consequentemente a bomba de injeção, é elemento fundamental do projeto. A estrutura foi desenhada separadamente da estrutura do canal, para que em caso de corrosão ou obstrução,

possa ser removida do módulo de medição e desobstruída. Ao longo do processo experimental, ficou constatado que ao realizar um teste de injeção, a peça deve ser removida e limpa para o próximo, visto que as partículas contidas na solução tendem a se concentrar ao fundo da peça, devido a pequenas diferenças entre a densidade das partículas e a da água. Outro aspecto importante da peça é a face que entra em contato com o escoamento propriamente dito. A mesma deve ser ajustada, para que cause o mínimo de perturbação na região de injeção, reproduzindo fielmente a parede de acrílico ali presente. O ajuste de posição tanto horizontal como vertical, é feito através do aperto de parafusos, localizados nas extremidades da estrutura circular da peça.

Não menos importante, a peça possui, em sua face de contato, cinco furos com diâmetro de 50 μm cada. Esses furos estão alinhados longitudinalmente, e a peça deve ser ajustada de forma a garantir que a linha dos furos esteja na direção perpendicular ao escoamento. Dessa forma, é esperado que o fluxo de partículas seja introduzido no canal de forma homogênea, em vazão baixa, e com pouca perturbação do escoamento principal.

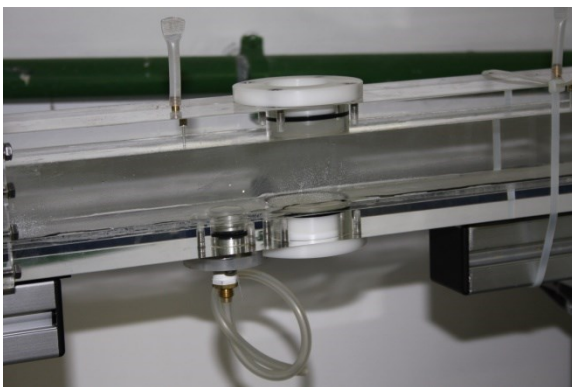


Figura 17 - Posicionamento da peça frente o módulo de testes e conexão com a mangueira de injeção

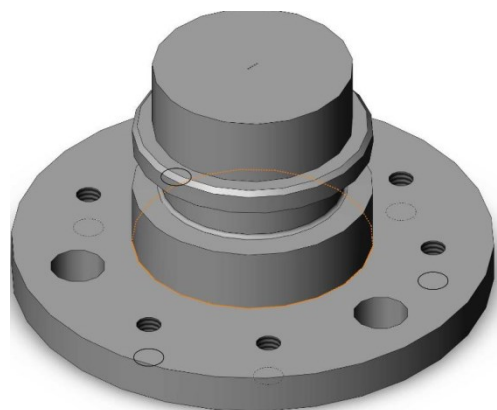


Figura 16 - Detalhes da peça de injeção, em particular o arranjo da microfuração e os furos para ajuste de posição

As figuras acima ilustram tanto o posicionamento como os detalhes de projeto da peça em questão. É possível notar o arranjo longitudinal dos furos, e o posicionamento

perpendicular em relação ao escoamento, garantindo um fluxo constante de solução diluída em partículas, de baixa vazão, com um comportamento do tipo esteira.

3.3 – Procedimentos de Calibração

Em todo experimento deste tipo, que faz uso de técnica ótica de medição, se faz necessário um procedimento de calibração que proporcione o correto **mapeamento** entre coordenadas da imagem (seja 2D ou volumétrica) e plano ou volume real. Para isso, antes de qualquer medição ser feita, uma reprodução do procedimental experimental a ser realizado deve ser feito, utilizando uma escala ou parâmetro conhecido. Neste caso, especialmente porque uma lente objetiva é introduzida para magnificação dos hologramas, é desejável que se utilize um objeto de calibração dentro do canal, em duas mais alturas em relação à parede, e se registre hologramas deste objeto nas mesmas condições em que os hologramas de partículas serão posteriormente registrados. No presente experimento foi utilizada uma pequena régua, com 100 marcações dispostas no espaço de apenas 1mm.

Foi criado um procedimento de inserção mais controlada da pequena régua dentro do canal cheio de água, para que as condições óticas e de índice de refração fossem idênticas às do caso de aquisição definitiva. A figura 18 mostra a peça utilizada para posicionar a régua exatamente na região de medição, centralizada no eixo ótico do sistema. Essa peça foi especialmente projetada com essa finalidade, e era composta inteiramente de poliuretano. A régua era inserida no compartimento inferior da peça, que por sua vez, era introduzida no canal pelo bocal de saída da seção de testes. Uma vez posicionada, as imagens para calibração eram capturadas, e a peça era então removida do canal pelo mesmo bocal de saída. O procedimento de inserção e remoção da peça foi realizado com extremo cuidado, afim de não danificar a janela de visualização do módulo de testes.

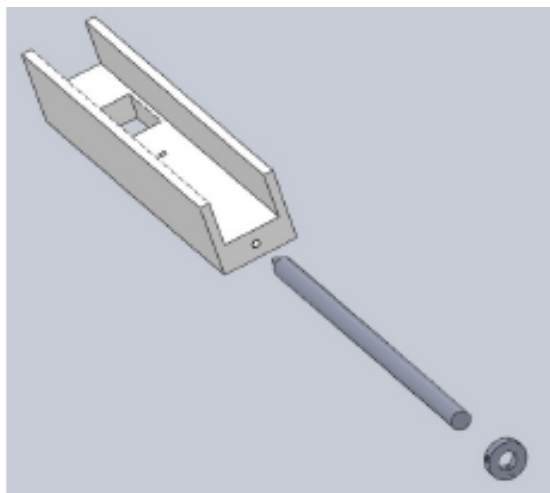


Figura 18 - Peça para inserção da régua calibradora dentro do canal. Uma haste e um batente garantem o correto posicionamento no volume de medição

As marcações da régua são inicialmente colocadas para baixo, faceando a parede do canal, correspondendo a $y = 0$ (sendo y a coordenada normal à parede do canal) para aquisição de um holograma. Em seguida, o conjunto objetiva/câmera era movido para baixo em passos de 0,1mm controlados com uma alavanca de precisão, de maneira a registrar hologramas correspondentes aos casos de distâncias maiores da régua à parede ($y = 0.1\text{mm}$ até $y = 2\text{mm}$), escaneando assim o volume de medição para fazer o mapeamento a partir das reconstruções numéricas e do conhecimento das posições reais.

A figura 19 mostra o holograma de calibração em $y = 0$ e a reconstrução numérica na posição de foco. Ao recuperar o foco da régua que sabemos estar em $y = 0$ e $y = 1$, pode-se calibrar o algoritmo de reconstrução e corrigir qualquer distorção ótica que eventualmente possa estar presente no processo de aquisição de hologramas com a câmera, garantindo assim que as coordenadas de partículas posteriormente estarão corretas, dentro de uma incerteza bastante baixa e aceitável.

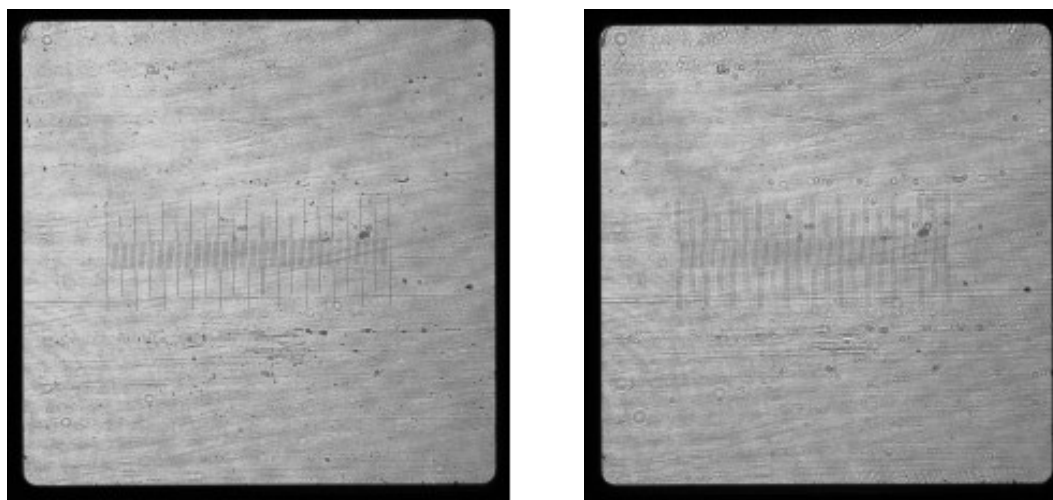


Figura 19 - Holograma de Calibração e a sua Reconstrução

A figura 20 apresenta a função de mapeamento de profundidade (ao longo do eixo ótico e correspondente à direção normal à parede do canal), que é aproximadamente linear. Para as coordenadas transversais, o mapeamento consiste apenas de um alargamento de fator constante M_t^2 devido à presença da magnificação do holograma pela lente objetiva.

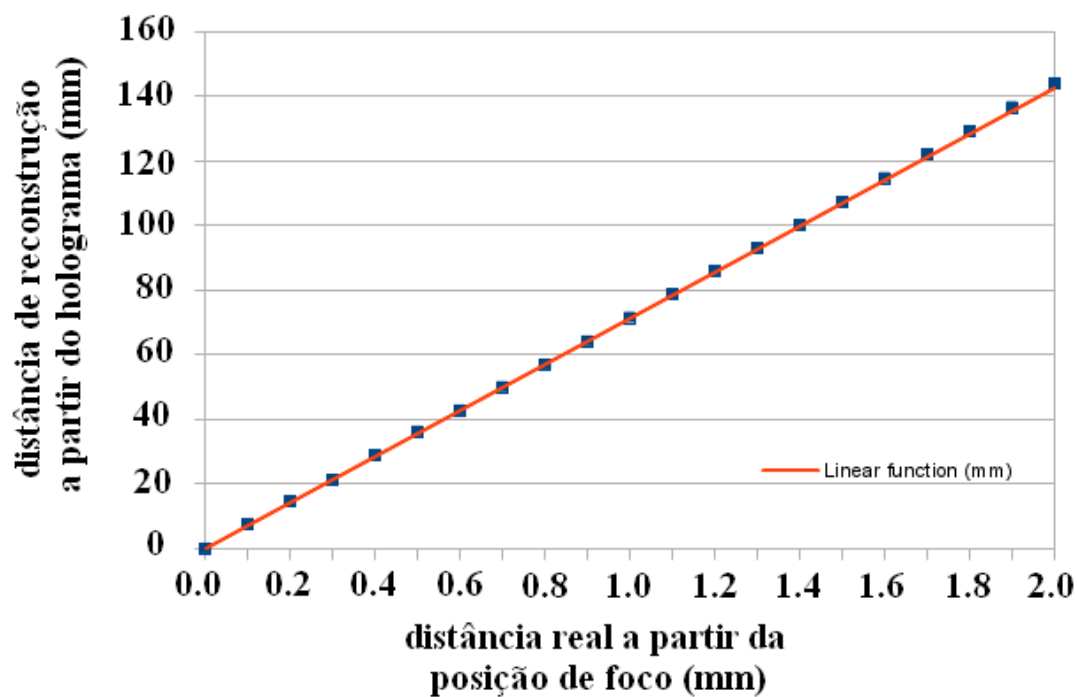


Figura 20 - Função de mapeamento na direção normal à parede

3.4 – Otimização do Processo de Injeção de Partículas

Como mencionado no Capítulo 2, o objetivo central do trabalho é a otimização do processo de injeção de partículas na seção. Em testes primários utilizando a montagem descrita na seção anterior, para tentativa de captura de hologramas utilizando partículas, verificou-se que o procedimento de injeção deveria ser revisto. O motivo de tal conclusão foi a baixa concentração de partículas liberadas no escoamento, de forma não uniforme, e com padrão de fluxo pulsante, e não constante como era de se esperar. A partir daí diversas alterações na montagem do experimento tiveram que ser feitas, a fim de redefinir parâmetros que melhorassem o processo de injeção.

O processo de injeção das partículas traçadoras no escoamento deve ser feito de maneira local (somente na região de medição e não misturadas ao escoamento como um todo). O motivo disto é que o holograma (o registro em imagem das franjas de interferência correspondentes às diversas partículas) tem uma capacidade de informação grande, mas limitada. Se a água de todo o canal estivesse com partículas, haveria franjas demais, e a interferência conjunta levaria à formação de ruído. Assim, a inserção de uma solução concentrada de partículas somente na região do volume de medição é fundamental para a qualidade dos resultados. Esta tarefa não é trivial, visto que a injeção não pode se tornar um escoamento secundário (não pode perturbar o escoamento principal), e ao mesmo tempo não pode ficar tão longe do volume de medição a ponto de permitir que a mistura se espalhe muito além da região próxima à parede.

Deseja-se uma distribuição de partículas adequada e razoavelmente homogênea na região de parede (até uma distância de 2 - 3 mm da parede inferior do canal, que tem 40 x 40mm). A necessidade de ajuste de todas as variáveis mencionadas acima torna a otimização desta parte do experimento bastante desafiadora. Como os hologramas de partículas previamente adquiridos não apresentaram boa concentração depois de diversas tentativas,

resolveu-se realizar testes a parte para o estudo da injeção, antes de voltar para a aquisição dos hologramas do escoamento de partículas.

Montou-se então uma nova configuração ótica (não-holográfica) para analisar exclusivamente o processo de injeção em diferentes condições e nas diversas vazões de trabalho. Esta montagem, mostrada na figura 21, proporcionou uma visualização frontal (com imagens em foco das partículas injetadas, diferente da holografia). Ao invés de partículas normais, foram utilizadas partículas fluorescentes de rodamina, que iluminadas por luz verde (comprimento de onda do laser de 532 nm) emitem luz em comprimento de onda maior (vermelho, ~550nm). Dessa forma, ao iluminar as partículas com o laser, as mesmas traçavam o comportamento do fluido, permitindo assim uma nova captura de imagens com menos reflexões. Colocando um filtro apropriado na frente da câmera, as reflexões na parede são eliminadas gerando imagens de melhor qualidade.

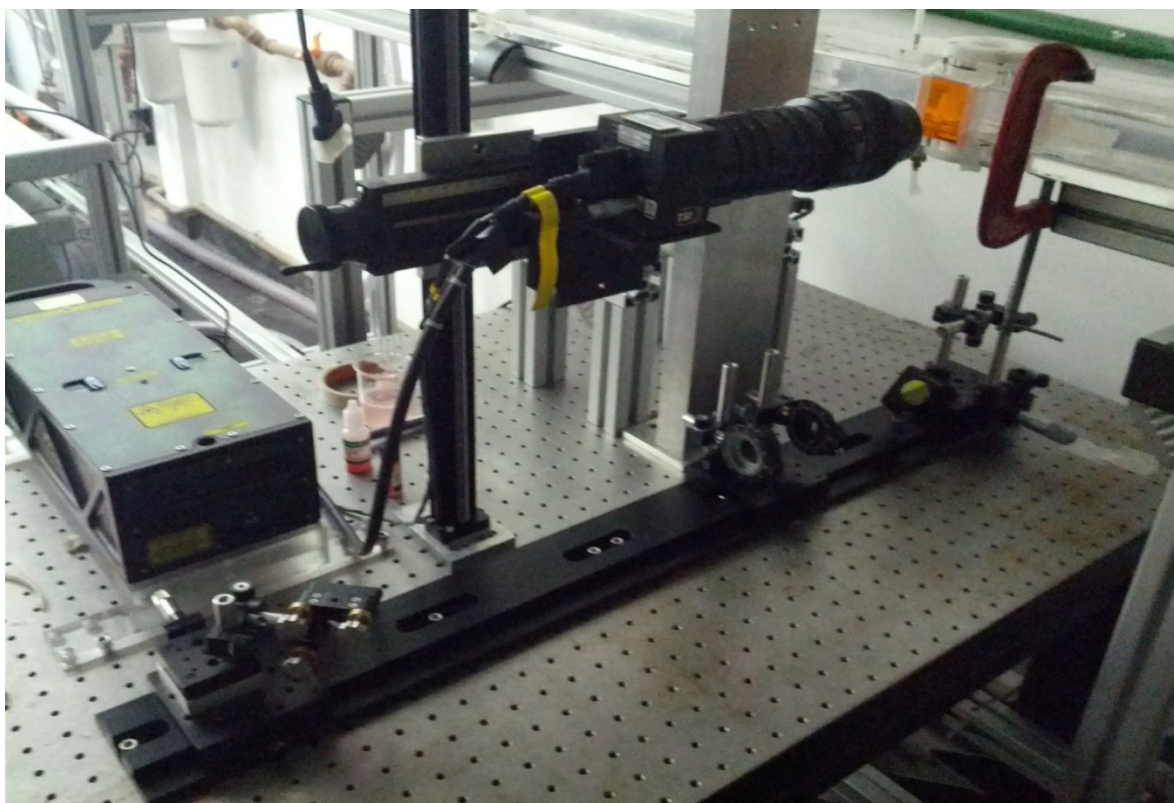


Figura 21 - Detalhe da seção e do processo de injeção local de partículas

Ao realizar os primeiros testes utilizando partículas fluorescentes, ficou constatado que o espalhamento de luz por parte destas partículas não era tão eficiente para o resultado desejado. Dessa forma, optou-se por alterar o fluido de injeção para uma solução de rodamina líquida, ao invés de rodamina em partículas, para uma melhor visualização da entrada do composto no escoamento principal. Com isso podia-se analisar questões como descolamento da solução injetada em relação à parede e espessura de mistura da solução na direção normal à parede.

A partir daí foram realizados diversos testes, variando a vazão de injeção da bomba conforme tabela abaixo e fixando a vazão do escoamento principal em 15 L/min. Com os testes, foi possível detectar a perda de eficiência (na verdade, esta apresentava um comportamento pulsante) adquirida com a bomba de seringa utilizada, e os parâmetros que precisam ser ajustados para otimizar o processo como um todo.

Vazão de Injeção da Bomba (mL/hr)	0,15	1,5	3,0	5,0	10,0
Vazão Principal (L/min)	15,0				

A partir daí, foram realizados testes para verificar a distância ótima entre o ponto de injeção de partículas e a janela de visualização, previamente ajustada em 5 cm. A posição da câmera foi ajustada na direção horizontal, nas distâncias de 5, 10 e 14 centímetros do ponto de injeção, a fim de capturar imagens do composto nesses pontos. Para realização de todos os testes, a vazão principal do escoamento foi fixada em 15 l/min, o que corresponde a um número de Reynolds de 35000 (escoamento turbulento). Uma apresentação e análise dos resultados obtidos será dada no capítulo seguinte, assim como os parâmetros que devem ser corrigidos para garantir a máxima eficiência durante a injeção.

4 – Resultados

O presente capítulo visa demonstrar e analisar os resultados obtidos a partir dos procedimentos estabelecidos no capítulo anterior. A primeira bateria de testes foi realizada utilizando uma vazão de injeção de 10 mL/hr, mantendo a vazão principal em 15 L/min. Uma série temporal (apenas 120 mseg entre quadros) de imagens é apresentada na figura 22, mostrando a intermitência indesejada no processo de injeção pela seringa motorizada. Estes testes levaram à principal conclusão de que é necessário evitar a intermitência do motor de seringa, provavelmente com a utilização de uma seringa de menor volume ou com um sistema de passo ainda mais apropriado a vazões bastante baixas.

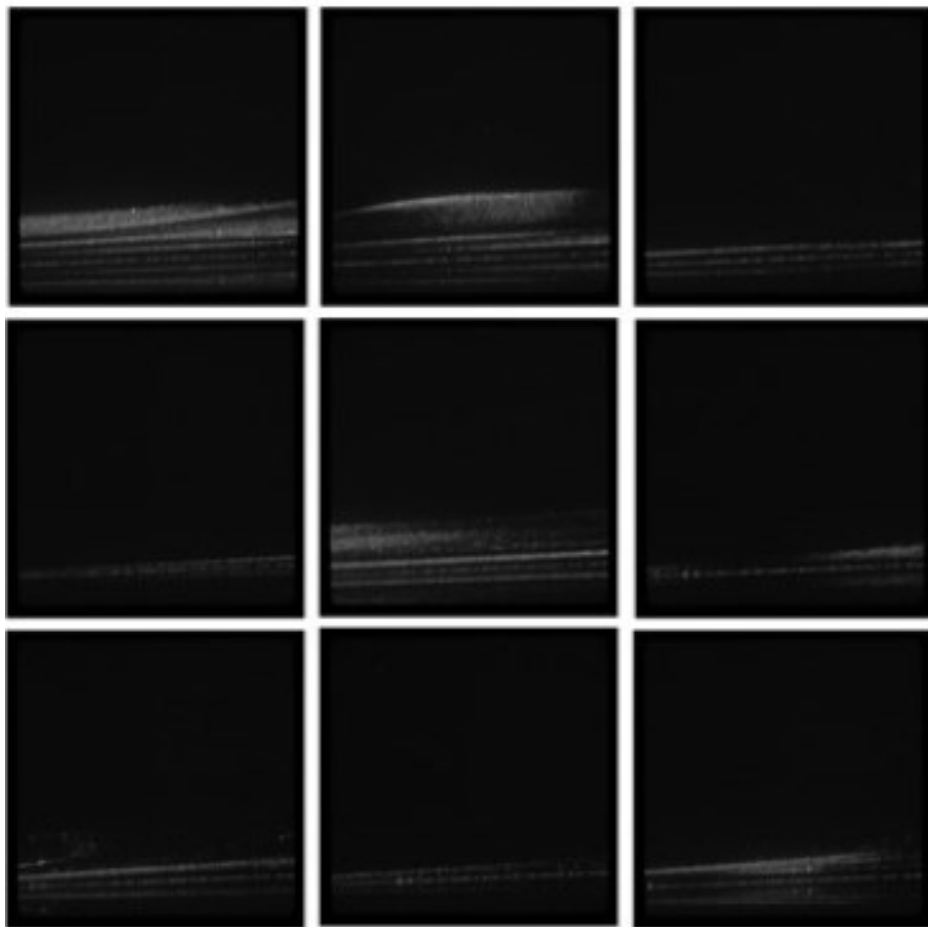


Figura 22 - Imagens magnificadas com visão frontal da distribuição de partículas injetadas a montante. Alguma intermitência no processo de injeção pode ser observada.

Também se observou a partir destas imagens, e de outras séries deste tipo com vazões de injeção diferentes, que o espalhamento de luz por parte destas partículas não era tão eficiente para este teste, e que o processo de mistura da solução injetada ao escoamento principal poderia ser ainda melhor visualizado com uma solução de rodamina líquida ao invés de rodamina em partículas. A figura 23 abaixo indica a captura das imagens para o teste utilizando rodamina líquida para uma vazão principal de 15 l/min e vazão de injeção de 0.15 ml/hr.

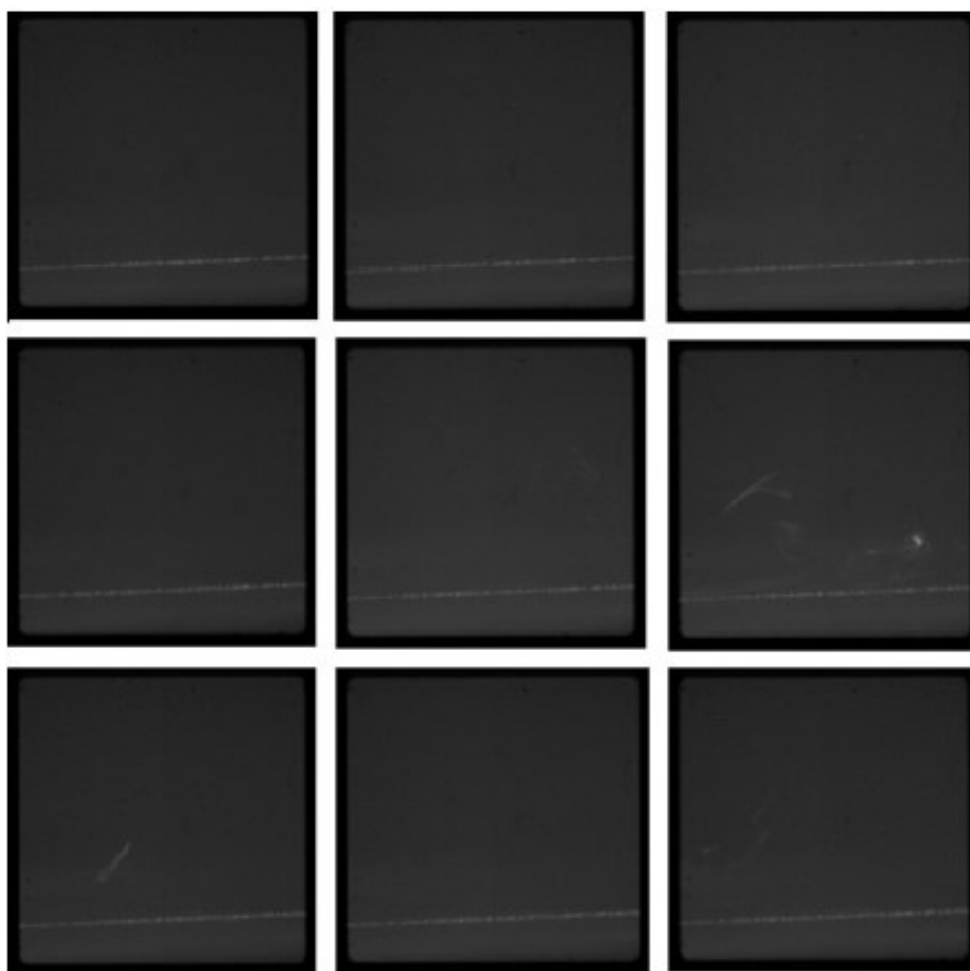


Figura 23 - Série temporal de visualização da mistura para a menor vazão de injeção testada, de 0.15 ml/hr

Mesmo com a utilização de uma solução de rodamina líquida ao invés de rodamina em partículas para a imagem acima, verificou-se que a concentração da solução utilizada ainda se mostra aquém daquela esperada.

Abaixo na figura 24, seguem as imagens capturadas para uma vazão de injeção de 1.5 ml/hr, mantendo a vazão principal em 15 l/min. Verifica-se que o composto de rodamina líquida que traça o escoamento apresenta concentração moderada, o que representaria uma boa concentração de partículas para o caso da holografia. Os fluxos apresentam também uma distância satisfatória da parede, o que significa que a vazão utilizada é ideal para representar as estruturas geradas em regiões próximas à parede de contato do escoamento, sem interferir com o escoamento principal.

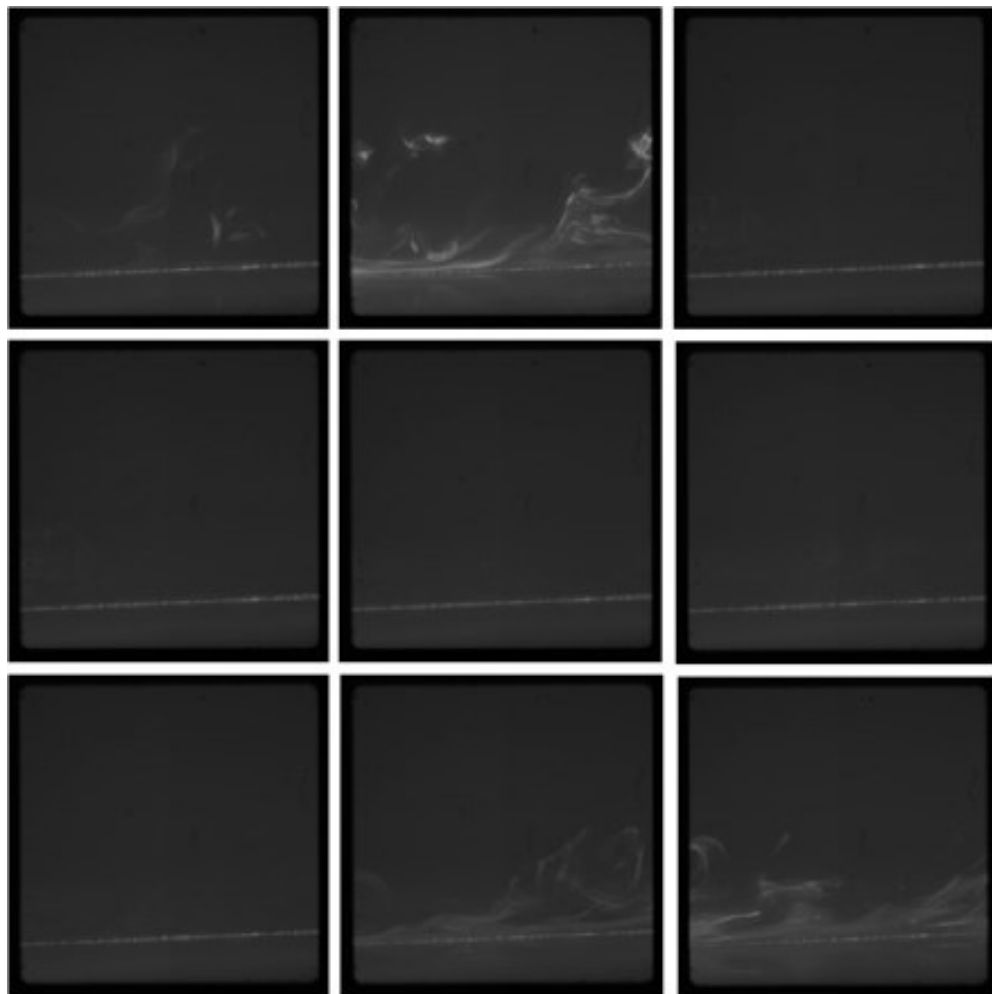


Figura 24 - Série temporal para vazão de injeção de 1.5 ml/hr

Na figura 25, seguem as imagens capturadas para uma vazão de injeção de 3.0 ml/hr, mantendo mais uma vez a vazão principal fixa em 15 l/min. Assim como no teste anterior, a concentração do composto de rodamina líquida se mostrou bastante satisfatória, o que no caso da holografia, representaria a concentração ótima de partículas. No entanto, é possível observar através das imagens abaixo, que na presença de picos de concentração de rodamina líquida, as estruturas demonstradas apresentam um nível elevado de descolamento da parede, o que não é ideal para o que se deseja alcançar. Dessa forma, verifica-se que a vazão ideal de injeção deve se manter em um patamar inferior aos 3.0 ml/hr.

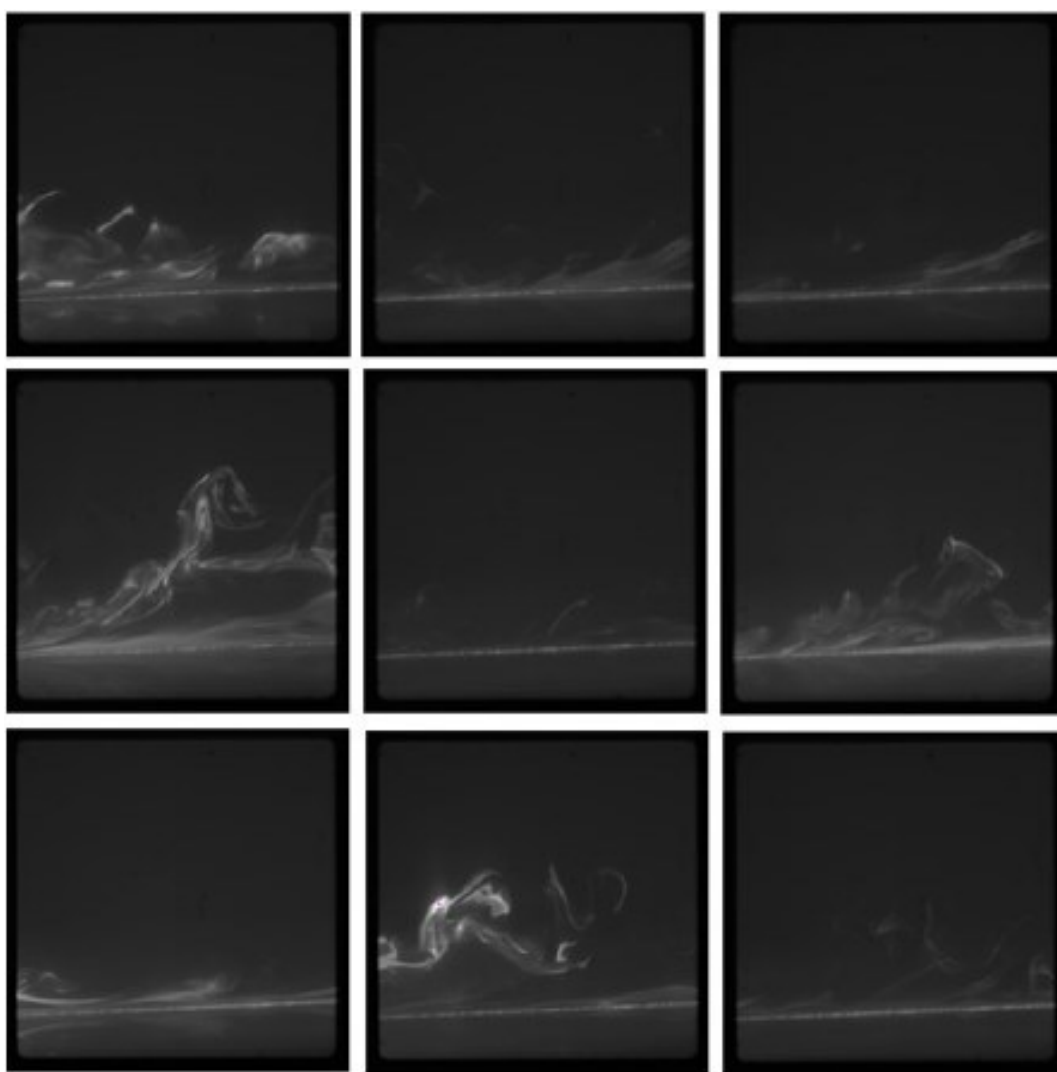


Figura 25 - Série Temporal para vazão de injeção de 3.0 mL/hr

Na figura 26, seguem as imagens capturadas para uma vazão de injeção de 5.0 ml/hr, mantendo mais uma vez a vazão principal fixa em 15 l/min. Nesse teste, assim como nos anteriores, a concentração do composto de rodamina líquida se mostra em um nível moderada para exagerada. É possível observar através das imagens, como o composto se decola da parede ao passar pela região de visualização. Isso demonstra que essa vazão de injeção já não é mais ideal considerando as condições iniciais pretendidas com os testes.

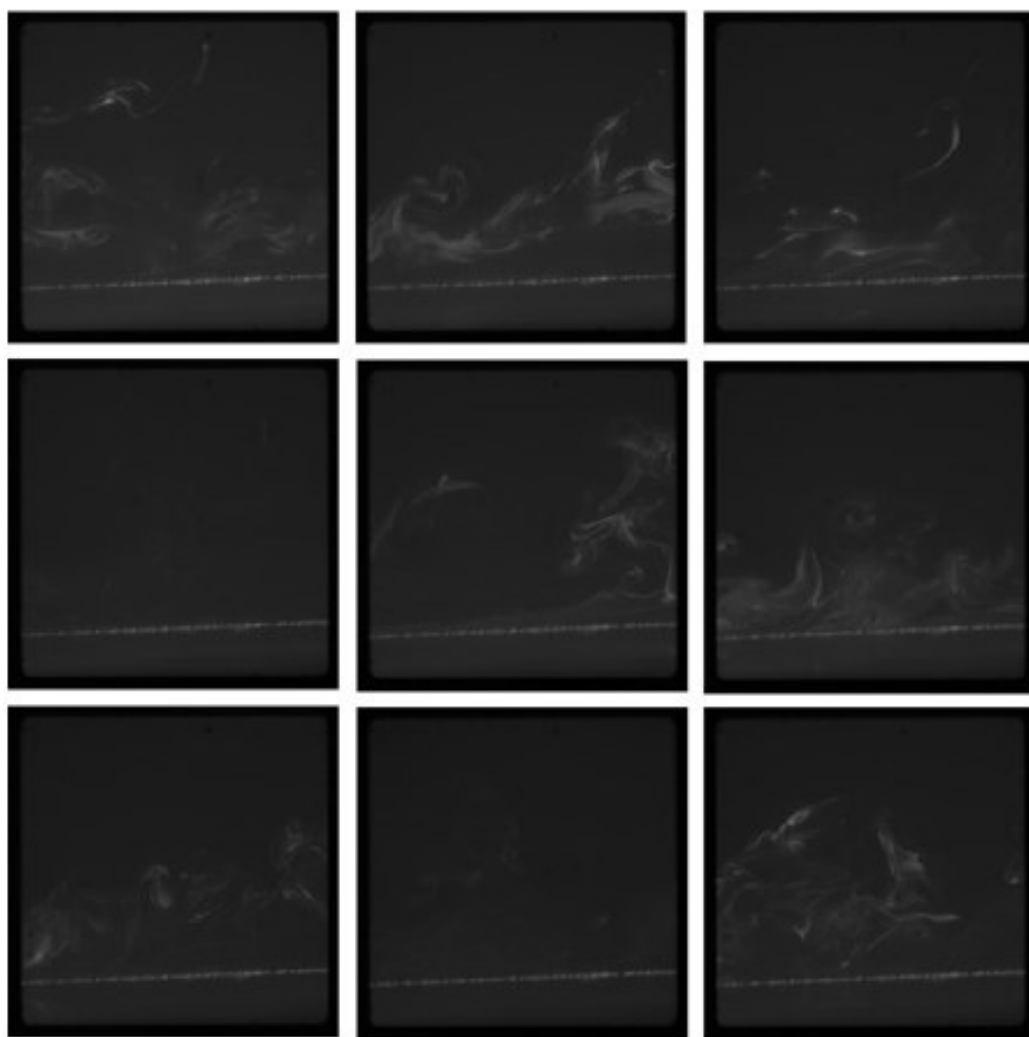


Figura 26 - Série Temporal para vazão de injeção de 5.0 ml/hr

Assim como no caso anterior, o teste representado pela figura 27, referente a uma vazão de injeção de 10 ml/hr apresenta uma boa concentração de composto de rodamina. Isso

representaria uma ótima concentração de partículas para a holografia. Como nos testes realizados para uma vazão de 5.0 ml/hr, ao aumentar a vazão de injeção, observa-se que o composto de rodamina líquida se afasta muito da parede, perturbando assim o comportamento do escoamento principal. O uso dessa vazão se mostra então inviável para os testes utilizando partículas.

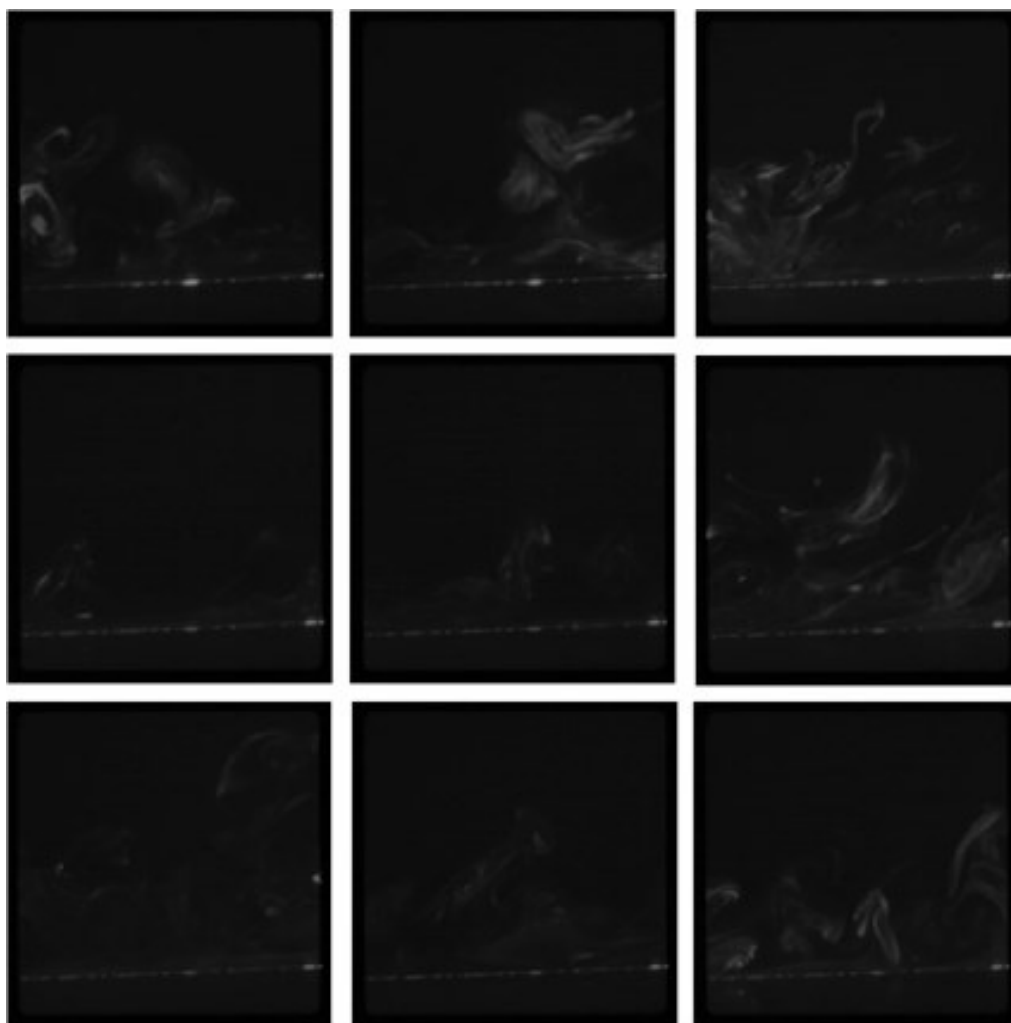


Figura 27 - Série Temporal para vazão de injeção de 10.0 ml/hr

A partir daí foram realizados testes com o intuito de verificar qual seria a distância ótima para injeção de partículas. Conforme mencionado no início do capítulo, é desejado que a solução seja injetada a uma distância que garanta que as partículas possam representar as estruturas turbulentas características do volume próximo a parede. Ao mesmo tempo, à

medida que o ponto de injeção se afasta do ponto de visualização, as partículas tendem a se afastar mais e mais da parede, o que não é adequado para uma futura reprodução da técnica holográfica. A partir daí, diversos testes foram realizados, variando a região na qual as imagens eram capturadas ao mover horizontalmente a posição da câmera através de um vernier horizontal. Foram capturadas imagens variando a posição em 5 , 10 e 14 centímetros de distância do ponto de injeção de partículas e para diversas vazões de injeção. A vazão principal do escoamento foi mantida constante em 15 l/min, o que resulta em um número de Reynolds equivalente a 35000. Seguem na figura 28, os resultados do teste descrito, lembrando que para essas imagens, uma solução mais concentrada de rodamina líquida foi utilizada, razão pela qual as imagens se mostram mais nítidas e claras.

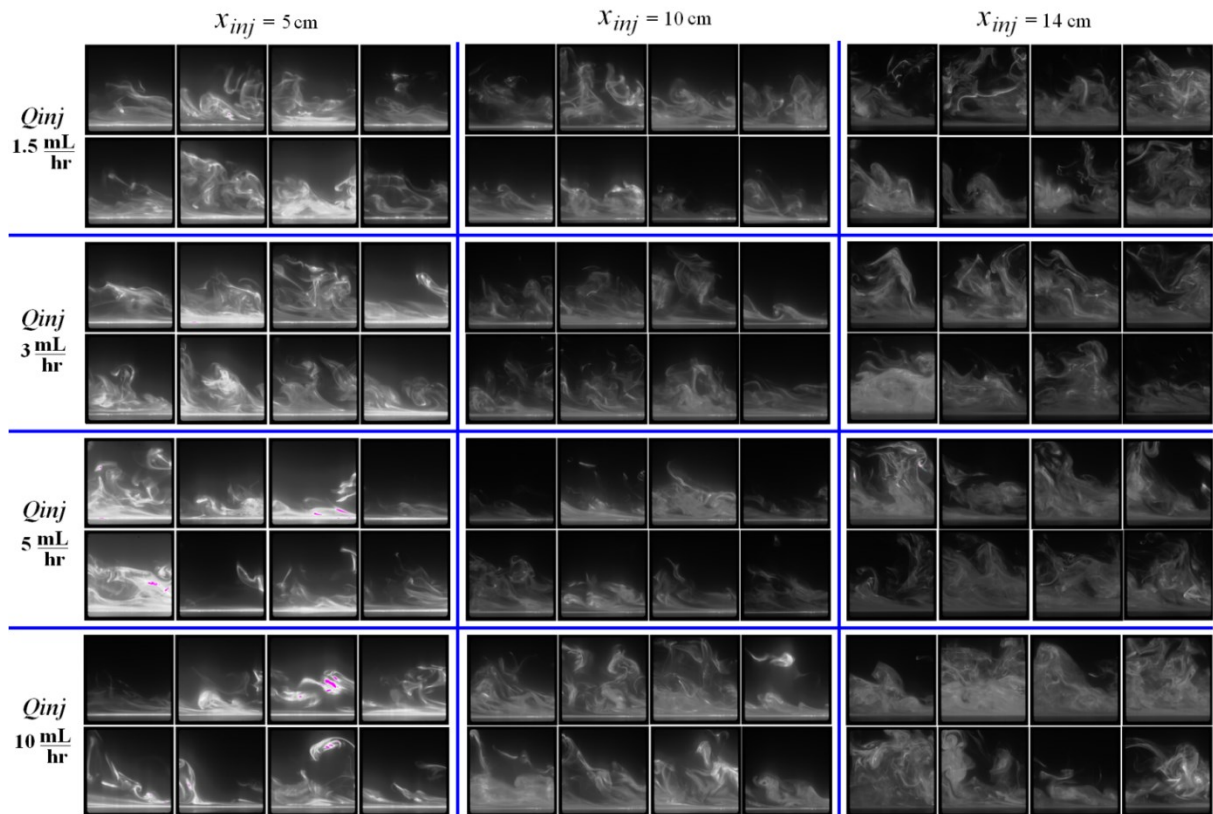


Figura 28 - Visualização frontal com fluorescência: estudo de casos para otimização do processo de injeção, $Re = 35000$

Após estes testes ainda ficou em aberto a verificação sobre a distância ótima da peça de injeção ao volume de medição. É possível que o processo de mistura inerente à própria turbulência do escoamento principal seja capaz de gerar condições mais homogêneas um pouco mais a jusante, desde que por outro lado não haja descolamento da parede ou espalhamento acima da região desejada. O autor sugere que novos testes sejam feitos com a câmera mais distante (a jusante) da peça de injeção. Se as imagens mostrarem maior homogeneidade de mistura, pode ser necessário construir um novo módulo de visualização para o canal, com as aberturas para injeção e para a janela de visualização (volume de medição) mais distante entre si.

Para todas as vazões de injeção observou-se uma intermitência no fluxo de injeção de partículas/solução. Essa intermitência, provavelmente se deve ao fato de que a bomba de seringa, por possuir um sistema de funcionamento baseado em uma haste roscada, ao operar a vazões baixas, acaba por empurrar o tambor da seringa com movimentos pulsantes. Dessa forma, o fluxo de partículas injetadas apresenta um padrão pulsante, e não constante como era de se esperar. Essa questão poderá ser resolvida com a aquisição de um equipamento melhor, capaz de operar a vazões mais baixas.

No capítulo seguinte, uma conclusão a respeito dos resultados obtidos com o trabalho será dada, assim como uma visão geral a respeito do campo de aplicações que a técnica holográfica proporciona.

5 – Conclusão

A aplicação da técnica de Velocimetria Holográfica de partículas, ou *PIV* Holográfico a escoamento em canal quadrado, se trata de um projeto de longo prazo, que consiste primeiramente no próprio aprimoramento / otimização da técnica, assim como na adaptação ao escoamento a ser estudado. Uma vez tendo a certeza de que a técnica está perfeitamente dominada e otimizada, pode-se partir então, em breve, para aquisições finais, com e sem polímeros redutores de arraste, e para análise física dos resultados. Entretanto, a fase na qual esse trabalho teve seu foco principal foi a otimização do procedimento de injeção de partículas no escoamento principal. Os resultados obtidos com os testes aqui realizados são de extrema importância para que a técnica possa ser aplicada com sucesso em um futuro próximo.

O processo de calibração com a utilização de uma pequena régua e uma peça posicionadora também foi elaborado, testado, e se mostrou adequado. Foi gerado um gráfico final de mapeamento que permitirá a correta determinação das posições (coordenadas 3D) das partículas nos hologramas a serem reconstruídos. Utilizando a curva de calibração, será possível reconstruir hologramas de partículas e transformar esta reconstrução em uma lista das coordenadas tridimensionais de cada uma das partículas que estava presente no volume de medição em dado instante. Conhecendo-se o intervalo de tempo Δt entre pulsos – ou hologramas – é possível então calcular o campo 3D-3C de velocidades com algoritmos apropriados (e implementados no próprio laboratório) de correlação e/ou acompanhamento individual de partículas.

O processo de injeção de partículas foi estudado em detalhes através de testes com rodamina para visualização frontal da mistura ao escoamento principal, a fim de otimizar a homogeneidade e distribuição geométrica da solução injetada (em termos de não-deslocamento da parede e espessura da mistura). Encontrou-se a vazão de injeção que

proporciona melhores resultados (entre 1,5 e 3,0 mL/hr). os testes também foram úteis para a definição da distância ótima para injeção, apesar de ainda não termos decidido exatamente a nova distância (é bom analisar melhor as inúmeras imagens adquiridas nestes testes).

A técnica holográfica se mostra bastante apropriada e eficiente para o estudo de escoamentos turbulentos e suas menores estruturas, em pequenos volumes. É possível, após a reconstrução dos hologramas, gerar campos de velocidade tridimensionais, possibilitando analisar com detalhes a dinâmica do fluido em regiões específicas, podendo-se também fazer campos médios e outras estatísticas, desde que se adquira séries temporais, i.e., uma sequência, de pares de hologramas para cada caso estudado. Assim, conclui-se também que será de extrema utilidade no estudo da interação das moléculas poliméricas com os pequenos vórtices e estruturas turbulentas, podendo proporcionar uma melhor compreensão do fenômeno de redução de arraste. Tais estudos são de suma importância não só para o campo da pesquisa, mas também para o campo industrial, gerando uma economia energética considerável, e uma consequente redução nos custos de produção.

Referências Bibliográficas

- 1) Sheng *et al.*, **Digital holographic microscope for measuring threedimensional particle distributions and motions**, *Applied Optics*, vol. 45, no. 16, 2006.
- 2) Robinson, S., **Coherent motions in the turbulent boundary layer**, *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 23, 1991.
- 3) Abrantes, J. K., **Holographic Particle Image Velocimetry for Wall Turbulence Measurements**, *PhD Thesis*, ECL/PUC-Rio, 2012.
- 4) Miranda, C. **Estudo de Escoamento Turbulento e Redução de Arraste por Adição de Polímeros através da Técnica de Velocimetria por Imagem de Partículas Holográfica (PIV Holográfico)**. *Relatório Anual*, 2014.
- 5) Elsinga, G.E., Scarano, F., Wieneke, B., **Tomographic Particle Image Velocimetry**. *Experiments in Fluids*, vol. 41, pp. 933-947, 2006.
- 6) Vasconcellos, I. **Velocimetria por imagem de partículas holográfica para estudo da redução de arraste com polímeros**. *Relatório Anual*, 2014.
- 7) A.G kravchenko, H.Choi, P. Moin. **On the relation of near-wall streamwise vortices to wall skin friction in turbulent boundary layers**. *Physics of Fluids A*, 5:3307-3309,1993. I-1.
- 8) T. Kreis, M. Adams, W. Juptner. **Methods of digital holography: A comparison**. *Proc. SPIE*, 3098:224-233, 1997. II.4
- 9) H. Meng, W. Anderson, F. Hussain, D. Liu. **Intrinsic speckle noise in in-line particle holography**. *Journal of the Optical Society of America*, 10(9):2046-2058, 1993. II.6

- 10) H. Meng, G. Pan, Y. Pu and S. Woodward. **Holographic particle image velocimetry: from film to digital recording.** *Measurement Science and Technology*, 15:673-685, 2004.
- 11) Pope, S. **Turbulent Flows.** *Cornell Universit.* 200-300, 1997.
- 12) Raffel, M. et al. **Particle Image Velocimetry – A Practical Guide.** Second Edition, ed Springer, ISBN 978-3-540-72307-0, 2007.
- 13) Schlichting, H. **Boundary-Layer Theory (7 ed.).** New York (USA). McGraw-Hill, 1979.
- 14) Moriconi, L. **Desafios da Turbulência.** *Ciência Hoje* 43 (253):38. 1998.