

4

Medição de campo de velocidade no escoamento bifásico através de um micro-capilar com garganta

4.1.

Introdução

O objetivo desta segunda abordagem experimental é a análise do escoamento bifásico através de um micro-capilar com garganta para determinar o campo de velocidade da fase contínua e a velocidade da gota da fase dispersa em função da vazão do escoamento e do diâmetro da gota. Esta análise foi desenvolvida utilizando o sistema de micro-velocimetria por imagem de partículas (micro-PIV ou μ -PIV).

A técnica do micro-PIV é considerada como uma adaptação do sistema PIV clássico que utiliza um microscópio óptico em vez de lentes fotográficas para focalizar as partículas no escoamento, conseguindo visualização na escala de microns.

As diversas áreas de aplicação na indústria e engenharia fazem com que o desenvolvimento tecnológico desta técnica represente mais do que uma simples adaptação da técnica de PIV convencional, sendo três as diferenças mais significativas que corroboram este fato. A primeira diferença são as dimensões das partículas traçadoras. No μ -PIV, as partículas são de menor tamanho que o comprimento de onda da fonte de iluminação requerendo a utilização de partículas com fluorescência. Como consequência, a segunda diferença, é a fonte de iluminação onde o plano de luz de macro PIV não é viável na micro-escala, sendo necessário iluminar a totalidade do volume do escoamento no sistema μ -PIV. Finalmente, na escala microscópica são considerados os efeitos do movimento browniano a fim de evitar erros aleatórios no deslocamento das partículas, especialmente em escoamentos lentos [36].

No decorrer da última década, o desenvolvimento de novas tecnologias e o incremento das suas aplicações consolidaram o micro-PIV como uma ferramenta útil na medição de campos de velocidade em escoamentos microscópicos.

Santiago, em 1998 [37], desenvolveu um sistema de velocimetria por imagem de partículas com resolução espacial o suficientemente pequeno para realizar medidas em dispositivos microscópicos. A aplicação deste primeiro sistema μ -PIV foi demonstrada na medição dos perfis de velocidade do escoamento em uma célula Hele-Shaw, em torno de um obstáculo de 30 μ m de diâmetro. O sistema foi composto de uma lâmpada de mercúrio que forneceu iluminação contínua em um microscópio epi-fluorescente com lentes objetivas de elevada abertura numérica e uma câmera CCD intensificada. A resolução espacial foi de 6.9 x 6.9 x 1.5 μ m³ e a velocidade obtida foi aproximadamente 50 μ m/s.

Meinhart (1999) [38] estudou o escoamento de água deionizada através de um micro-canal de seção reta de 30 μ m x 300 μ m x 25 mm, conseguindo medir campos de velocidade com uma resolução espacial na ordem de 1 μ m. O sistema de iluminação desenvolvido neste estudo foi composto de um microscópio de luz refletida com laser duplo pulso de alta potência, melhorando desta forma o sistema de iluminação contínua com lâmpada de mercúrio.

No mesmo ano, Koutsiaris [39] avaliou o escoamento de uma mistura de 78% em volume de glicerol e 22% em volume de água destilada através de um capilar circular de vidro de 236 μ m de diâmetro. O fluido avaliado foi semeado de partículas traçadoras de vidro borossilicato de 10 μ m de diâmetro. O sistema desenvolvido nesta análise utilizou uma lâmpada halógena de 20 W e uma câmera digital CCD adaptada diretamente com um microscópio invertido obtendo uma resolução espacial de 26,2 μ m.

Meinhart e Zhang (2000) [40] analisaram a evolução do menisco na cabeça de impressão a jato de tinta. A técnica desenvolvida utilizou partículas traçadoras fluorescentes de 700 nm de diâmetro, um laser Nd: YAG do tipo pulsado, um microscópio epi-fluorescente e uma câmera CCD obtendo resoluções espaciais de 5 – 10 μ m. Esta análise permitiu medir campos de velocidade do escoamento não permanente no bocal da cabeça de impressão com velocidades máximas de até 8 m/s e $Re=500$.

Wereley, em 2002 [36], através do estudo do escoamento em um micro-bocal com garganta de 28 μ m, demonstrou a vantagem e utilidade de associar técnicas avançadas de registro e processo de imagens para obter resoluções espaciais na ordem de poucos microns. Desta forma, uma resolução espacial de 10,9 μ m x 5,4 μ m foi obtida para uma vazão imposta de 4ml/h. O diâmetro das

partículas traçadoras que acompanharam o escoamento de água deionizada através do micro-bocal foi de 700nm.

Brown, em 2005 [41], apresentou uma metodologia para predizer campos de velocidade obtidos com o sistema micro-PIV, através da simulação do escoamento utilizando métodos de dinâmica dos fluidos computacional (CFD). A análise aplicou as relações desenvolvidas na determinação do volume de medição e as propriedades ópticas de sistemas de lentes corrigidos no infinito para conseguir as médias ponderadas entre os volumes de interrogação nas soluções do método CFD. Duas abordagens experimentais foram desenvolvidas: a primeira avaliou o escoamento bidimensional através de um micro-canal reto e a segunda estudou o escoamento periódico tridimensional através de um micro-canal nervurado.

Van Steijn (2007) [42] utilizou o sistema de micro-velocimetria por imagem de partículas para realizar medições de campos de velocidade no escoamento transiente da fase aquosa durante a formação de bolhas de gás em um micro-capilar de junção T com seção quadrada de $800 \mu\text{m}^2$. O sistema, composto de um laser Nd:YAG de dupla cavidade e uma câmera CCD de duplo quadro montada em um microscópio invertido, conseguiu sincronizar a frequência da aquisição das imagens com a frequência de formação das bolhas na junção. A fase contínua foi semeada com partículas traçadoras fluorescentes de $2 \mu\text{m}$ de diâmetro desenvolvendo uma resolução espacial de $20 \times 20 \times 100 \mu\text{m}^3$. Adicionalmente, utilizou-se uma câmera de alta velocidade para medir os tamanhos tanto das bolhas e das frações de fase contínua, quanto a forma e deslocamento da interface gás - líquido.

Na presente análise, a exatidão da técnica do μ -PIV foi demonstrada medindo o campo de velocidade do escoamento através da seção reta de um micro-capilar de $200 \mu\text{m}$ de diâmetro. O sistema também foi utilizado para estudar o escoamento através da garganta do micro-capilar. Os resultados obtidos através desta técnica de medição foram comparados com a solução analítica para o escoamento laminar completamente desenvolvido de um fluido através de uma seção circular. Finalmente, o sistema μ -PIV foi empregado para determinar o campo de velocidade da fase contínua e a velocidade de uma gota de fase dispersa no escoamento bifásico através da seção reta do micro-capilar.

4.2.

Abordagem experimental

Esta segunda abordagem experimental também foi desenvolvida no Laboratório de Microhidrodinâmica e Escoamento em meios Porosos (LMMP) do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC – Rio e consistiu em três processos principais: (i) escolha dos fluidos de trabalho, (ii) montagem da bancada experimental e, (iii) procedimento experimental envolvendo a injeção, a visualização do escoamento e medição do campo de velocidade. Os procedimentos preparatórios e testes foram efetuados sob as mesmas condições de medição, para garantir a sua repetitividade. A temperatura do laboratório foi controlada a 23°C, mediante o uso adequado do sistema de ar condicionado. Na parte final desta seção são discutidas as dificuldades encontradas durante esta abordagem experimental.

4.2.1.

Escolha dos fluidos de trabalho

A fase aquosa escolhida para efetuar as medições dos campos de velocidade do escoamento através do micro-capilar foi formulada como 85% em volume de glicerina e 15% em volume de água destilada. A água destilada usada para preparar a fase aquosa foi filtrada através de uma membrana de 0.20µm de malha (NALGENE® Mod. 596-4520). Os volumes de glicerina e água necessários na formulação foram medidos através do dispensador de ajuste analógico DISPENSETTE® ORGANIC da BRAND e através de pipetas automáticas de volume ajustável fabricadas pela KACIL®. O agitador magnético FISATOM 754A foi utilizado para misturar ambos os líquidos. A solução homogênea obtida foi filtrada a vácuo através de uma membrana de 0.45µm de malha (NALGENE® - Mod. 130-4045) para evitar a presença de qualquer possível impureza no escoamento através do micro-capilar.

A fase dispersa selecionada foi o óleo SHELL Tivela S460, com densidade próxima a da água. Na mesma forma, o óleo também foi filtrado a vácuo através de uma membrana de 0.45µm de malha fabricada pela NALGENE® - Modelo 130-4045.

A caracterização de ambas as fases foi realizada no Laboratório de Caracterização de Fluidos (LCF) da PUC – Rio, a 23°C. Os valores das propriedades das fases empregadas na medição dos campos de velocidades foram apresentados no capítulo 3, na tabela 3.1.

4.2.2. Bancada experimental

A bancada experimental desenvolvida para obter os resultados apresentados no presente capítulo é composta de dois sistemas: (i) o sistema de injeção de líquidos e, (ii) o sistema de micro-velocimetria por imagem de partículas (μ -PIV), que engloba os equipamentos de iluminação, visualização e aquisição das imagens e as partículas traçadoras. A figura (4.1) apresenta um esquema da bancada experimental desenvolvida nesta abordagem.

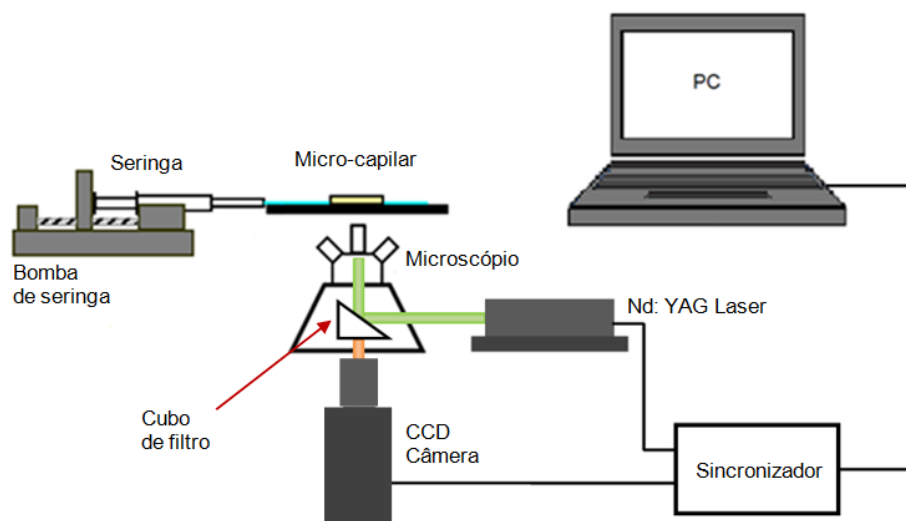


Figura 4.1: Esquema da bancada experimental do sistema μ -PIV.

4.2.2.1. Sistema de injeção

Nesta segunda abordagem experimental foi utilizado basicamente o mesmo sistema de injeção descrito no capítulo 3. A bomba de seringa, a seringa, o micro-

capilar e os acessórios utilizados para a montagem do circuito fazem parte deste sistema.

A fase aquosa foi injetada usando a bomba de seringa COLE-PALMER® 78-0100C e a seringa BD MULTIFIT™ de vidro de 3 ml e ponta com conexão tipo “*luer lock*”.

A injeção da fase dispersa foi efetuada manualmente utilizando a micro seringa HAMILTON® - Mod. 81027, tipo gastight com conexão “*luer lock*” de 100 μ l. A pouca capacidade desta seringa garantiu a injeção de volumes muito pequenos (gotas) com tamanho próximo ao diâmetro do micro-capilar. A figura (4.2) apresenta a seringa utilizada na injeção do óleo.

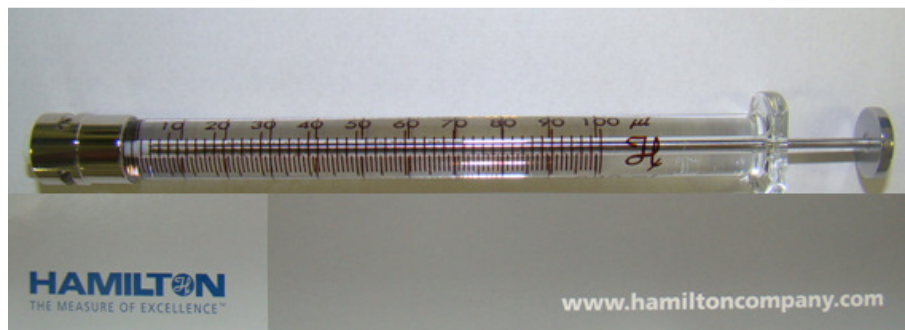


Figura 4.2: Seringa de vidro de 100 μ l utilizada na injeção da fase dispersa.

A torneira três vias EMBRAMED® de plástico, com conexão “*luer lock*” em duas das suas vias, permitiu conectar as duas seringas e o capilar utilizando o menor número de acessórios possíveis.

Para medir os campos de velocidade, foi utilizado um micro-capilar com garganta fabricado pela HILGENBERG®. O diâmetro da seção reta do micro-capilar foi de 200 μ m e o diâmetro da sua garganta de 50 μ m. O diâmetro externo e o comprimento do micro-capilar avaliados foram de 1.0 mm e 80 mm respectivamente. A configuração da geometria deste capilar foi apresentada no capítulo 3, na figura (3.15b).

4.2.2.2.

Sistema de micro-velocimetria por imagem de partículas

O sistema de micro-velocimetria por imagem de partícula utilizado para obter os resultados experimentais nesta abordagem foi fabricado pela TSI® e é composto pelo microscópio de fluorescência, a câmera CCD, o laser de Nd:YAG, as partículas traçadoras e o software empregado para o tratamento das imagens adquiridas.

Os equipamentos utilizados na visualização do escoamento, calibração e captura das imagens operaram conjuntamente através de um microscópio de fluorescência refletido de acionamento, tanto manual quanto motorizado. Dentre os principais componentes deste microscópio fabricado pela OLYMPUS®-Mod. IX71S1F-3, estão a objetiva OLYMPUS® UPlanFLN 10 x 0.30 e o cubo de filtro composto pelo espelho dicróico, o filtro de barreira e o filtro de excitação. O microscópio é apresentado na figura (4.3) e a objetiva e o cubo de filtro na figura (4.4).



Figura 4.3: Microscópio de fluorescência refletido Olympus®.



Figura 4.4: Objetiva Olympus 10x0.30 (esquerda) e cubo de filtro (direita).

A fase aquosa foi semeada com micro-esferas de poliestireno FluoSpheres[®] de 1 μm de diâmetro, fornecidas pela INVITROGEN[®] como suspensão aquosa com 2% de concentração de sólidos com densidade de 1.05g/ml e 1×10^{10} micro-esfera por ml. Estas micro-partículas traçadoras, de cor laranja com picos de fluorescência de absorção e emissão de 534nm e 554nm respectivamente, conseguem seguir de maneira fiel o escoamento sem perturbar os campos de velocidade e sem alterar as propriedades do fluido [43]. A figura (4.5) mostra as micro-esferas de poliestireno.



Figura 4.5: Micro-esferas de poliestireno FluoSpheres[®].

O escoamento foi iluminado com o laser de Nd:YAG (Neodímio: Ítrio – Alumínio - Gálio) SOLO PIV – Mod. SOLO III-15Hz de luz verde, fabricado pela

NEW WAVE™, com comprimento de onda de 532nm e 50mJ de energia por pulso [44]. Este modelo, quando operado na sua frequência máxima (15 Hz), permite alcançar um intervalo de tempo da ordem de micro-segundos entre os disparos do laser. A sua fonte de energia é composta por três sistemas distribuídos em diferentes níveis: o sistema de controle lógico eletrônico localiza-se no nível superior, o sistema elétrico de alta voltagem no nível intermediário e no nível inferior encontra-se o sistema de resfriamento. A figura (4.6) apresenta os componentes do laser Nd:Yag SOLO III (cabeça e fonte de energia do laser).



Figura 4.6: Fonte de energia e cabeça do laser Nd:YAG SOLO III [44].

As imagens das micro-partículas traçadoras foram capturadas com a câmera de sensor CCD POWERVIEW™ de 1.4MP Mod. Sensicam-630066, fabricada pela TSI®, acoplada no microscópio de fluorescência refletido. A resolução desta câmera digital é de 1376 pixel x 1040 pixel com tamanho de pixel de 6.45 x 6.45 μm e 12 bits de intensidade de cinza [45]. A câmera é apresentada na figura (4.7)



Figura 4.7: Câmera CCD POWERVIEW™ de 1.4MP Mod. Sensicam-630066 [45].

No sistema micro-PIV, para efetuar a aquisição de uma imagem é necessário que o laser, a câmera CCD, o microscópio e o computador operem de forma integrada e sincronizada. O sincronizador LASERPULSE – Mod. 610034 fabricado pela TSI® foi utilizado para executar o sincronismo e a sequência dos disparos do pulso de laser e da câmera. A figura (4.8) mostra o sincronizador utilizado neste sistema.

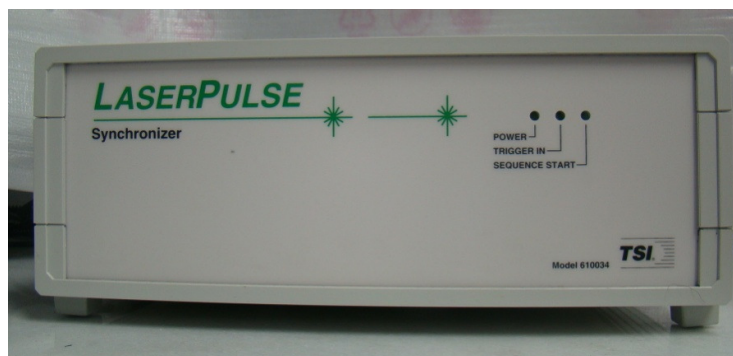


Figura 4.8: Sincronizador LaserPulse – Mod. 610034.

O comando e controle dos equipamentos que compõem o sistema μ -PIV foram realizados mediante computador através do software INSIGHT 3G™, desenvolvido pela TSI®. Este software, além da aquisição das imagens, permitiu ajustar e calibrar o sistema e processar as imagens para calcular os campos de velocidades do escoamento.

4.2.3. Procedimento experimental

A presente abordagem experimental foi elaborada para realizar a medição de campos de velocidade do escoamento bifásico através de um micro-capilar com garganta. O sistema de μ -PIV foi utilizado para desenvolver esta análise através de dois processos. O primeiro consistiu na medição do campo de velocidade do escoamento de fase aquosa através tanto da seção reta quanto da seção convergente da garganta do micro-capilar. No segundo processo, mediu-se o campo de velocidade da fase contínua e a velocidade de uma gota de fase dispersa.

Na visualização do escoamento, através das duas seções do capilar, foi necessário determinar duas concentrações de partículas traçadoras para semear a fase aquosa. Nas análises do escoamento através da seção reta os volumes de fase aquosa e partículas fluorescentes foram misturados na relação de 10:2, segundo o critério recomendado pela TSI [45]. Já no escoamento através da seção convergente da garganta do micro-capilar a relação usada foi de 10:3.

Como descrito no capítulo anterior, a fase aquosa foi vertida lentamente na seringa de vidro BD MULTIFITTM de 3 ml conectada à torneira, sendo necessário expulsar o ar contido no sistema antes de conectar o micro-capilar. A seringa HAMILTON[®] de 100 μ l foi acoplada na conexão “*luer lock*” livre da torneira três vias para injetar a fase dispersa. No momento da injeção manual da fase dispersa, foi necessário desligar a bomba de seringa para deter a injeção da fase aquosa. O tempo aproximado de estabilização do escoamento foi de 20 minutos após ligar novamente a bomba de seringa.

A injeção direta do óleo, como fase dispersa no escoamento, não garantiu a geração de gotas com tamanho menor ao diâmetro na seção reta do capilar. É por isso que a fase dispersa foi injetada em forma de emulsão de 50% em volume de óleo e 50% em volume da fase aquosa. A emulsificação foi realizada manualmente agitando ambas as fases em um tubo de ensaio por 10 segundos. A emulsão resultante foi semeada na mesma proporção que a fase aquosa a ser injetada pelo sistema bomba-seringa-capilar. Esta alternativa de injeção da fase dispersa permitiu que o escoamento da fase aquosa carregasse as gotas de óleo através do micro-capilar sem alterar a concentração de partículas traçadoras no

escoamento. A montagem das seringas e micro-capilar é apresentado na figura (4.9).

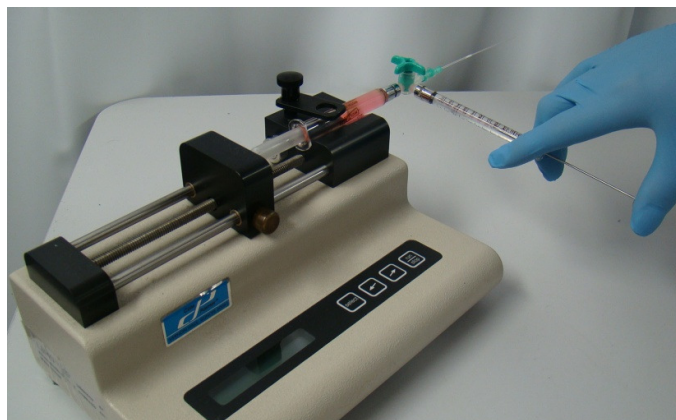


Figura 4.9: Montagem do sistema de injeção.

A bomba de seringa operou em modo de injeção contínua. A montagem do sistema seringa-capilar nesta bomba e a sua nivelção com a mesa de trabalho do microscópio foram feitas seguindo o mesmo procedimento descrito no capítulo 3, a fim de evitar deslocamentos da seringa na bomba ou deslocamentos do capilar no microscópio. A saída do escoamento bifásico pelo capilar também foi controlada submergindo o extremo livre do capilar em uma piscina de fase aquosa. Esta montagem é apresentada na figura (4.10).

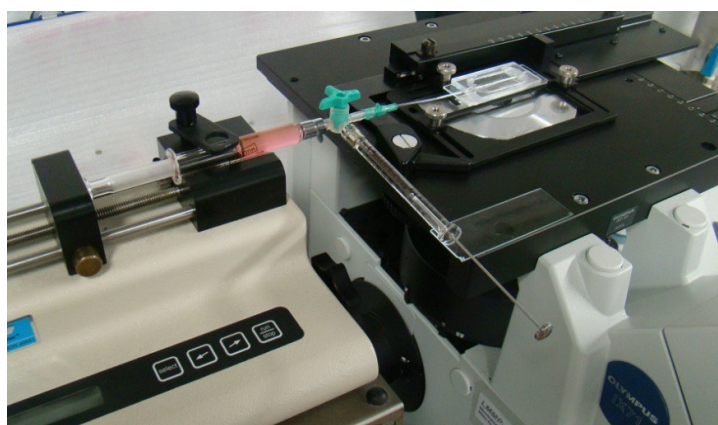


Figura 4.10: Montagem do sistema de injeção no microscópio.

Para realizar os ajustes de foco e calibração do sistema, o micro-capilar foi submerso em uma piscina com fase aquosa (85% glicerina e 15% água), evitando os efeitos ópticos de refração melhorando a visualização.

O procedimento de calibração foi efetuado empregando a geometria do micro-capilar especificada pela HILGENBERG®. Mesmo assim, as dimensões do capilar foram conferidas utilizando o microscópio óptico invertido Carl Zeiss Axiovert 40MAT. Com as suas dimensões confirmadas o micro-capilar foi visualizado no sistema μ -PIV no modo livre de aquisição de imagem. Desta forma, congelando a imagem, foi possível marcar o número de pixels que corresponde a cada um dos diâmetros conhecidos do micro-capilar: 200 μm e 50 μm . Finalmente, foi obtido o valor em micrometros para cada pixel, resultando uma calibração de 0,376 $\mu\text{m}/\text{pixel}$.

As dimensões da área selecionada para medir o campo de velocidade do escoamento através da seção reta do micro-capilar foram de 1376 pixel x 532 pixel, ou seja, 517 μm de comprimento e 200 μm de altura. Para este escoamento as imagens foram obtidas a uma distância de 15 mm à montante do início do micro-capilar. Segundo Langhaar (1942), para um escoamento laminar em um tubo de diâmetro D , o comprimento de desenvolvimento do escoamento é $L_e = 0.0575DRe$, onde Re é o número de Reynolds [39]. Na presente análise, o escoamento avaliado é da ordem de centésimos de mililitros por hora o que resulta em um $Re \approx 1 \times 10^{-11}$. Desta forma, a distância escolhida para efetuar a captura das imagens é bem maior que o L_e calculado garantindo a visualização de um escoamento completamente desenvolvido.

O campo de velocidade do escoamento através da seção convergente da garganta do micro-capilar foi medido utilizando uma área de 1376 pixel de comprimento, 218 pixel de lado maior e 170 pixel de lado menor da seção convergente, o que equivale a 517 μm , 82 μm e 64 μm , respectivamente.

4.2.4.

Dificuldades encontradas no processo experimental

No sistema micro-PIV a quantidade de micro-partículas nas imagens adquiridas não é elevada, sendo até insuficiente na maioria dos casos [46]. Esta desvantagem faz com que a determinação da concentração de micro-partículas

traçadoras no fluido e a aplicação de algoritmos avançados de correlação de imagens, sejam fatores muito importantes a serem considerados no desenvolvimento dos estudos que empregam esta técnica.

A determinação da concentração de partículas adequada para medição do campo de velocidade do escoamento através do micro-capilar representou um processo anterior a realização dos experimentos. Desta forma, na primeira tentativa considerou-se o critério recomendado pela TSI[®] diluindo a concentração de 2% de sólidos das micro-esferas de poliestireno FluoSpheres[®] utilizando uma relação em volume de 10:1 [45]. As imagens adquiridas injetando a mistura de fase aquosa e de partículas fluorescentes nestas proporções não forneceram os resultados esperados. Finalmente, após varias tentativas foram obtidas as concentrações apropriadas para a análise do escoamento através da seção reta e da garganta do micro-capilar.

No processo de medição da velocidade no escoamento bifásico apresentou-se a necessidade de controlar o tamanho de gota injetada no escoamento. Embora a alternativa de injetar um volume pequeno de emulsão 50% fase aquosa e 50% fase dispersa corresponda à expectativa desta análise, este método não fornece um controle sobre o tamanho de gota, mesmo para emulsões monodispersas.

4.3. Resultados

Nesta seção são apresentados os resultados experimentais obtidos a partir do processamento das imagens capturadas sob as condições descritas na seção anterior. A análise destes resultados é apresentada segundo os dois processos desenvolvidos na abordagem experimental. A primeira análise permitirá determinar os campos de velocidade do escoamento da fase aquosa através da seção reta e da seção convergente do micro-capilar. Já o objetivo da segunda análise, será determinar a velocidade de uma gota de fase dispersa e o campo de velocidade da fase contínua no escoamento através da seção reta do micro-capilar.

Em ambas as análises, os campos de velocidade foram obtidos para uma vazão de injeção da fase aquosa de 0.02 ml/h a partir do processamento das imagens no software INSIGHT 3GTM desenvolvido pela TSI[®].

4.3.1.

Campo de velocidade no escoamento da fase aquosa através de um micro-capilar com garganta.

Nesta análise, o método de processamento de imagens “*ensemble average*”, que calcula o campo de velocidade a partir da média amostral de vários campos instantâneos, foi utilizado para medir os campos de velocidade do escoamento monofásico através do micro-capilar com garganta. Este método de processamento de imagem é amplamente empregado nos estudos que utilizam o sistema μ -PIV, a fim de obter correlações satisfatórias a partir de imagens com número insuficiente de partículas fluorescentes e para reduzir a porcentagem de erro devido ao movimento Browniano destas partículas [46].

Desta forma, 50 pares de registros consecutivos de imagens foram processados, para obter os campos de velocidade na análise do escoamento através tanto da seção reta quanto da seção convergente do micro-capilar.

4.3.1.1.

Escoamento da fase aquosa através da seção reta do micro-capilar com garganta.

No caso da análise na seção reta do capilar, a aquisição de cada par de registros consecutivos de imagens foi executada estabelecendo um intervalo de tempo de 4400 μ s para um tempo de exposição do sensor CCD de 2400 μ s. A correlação das imagens foi elaborada dividindo cada imagem em janelas de interrogação de 64 pixel x 48 pixel ou 24 μ m x 18 μ m. Na figura (4.11) é apresentado o campo de vetores velocidade obtido do processamento dos 50 pares de imagens no software INSIGHT 3GTM.

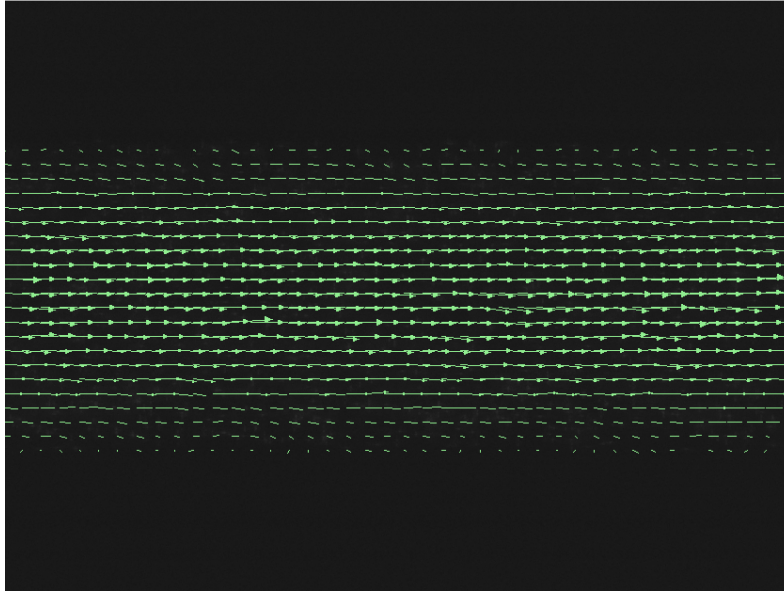


Figura 4.11: Campo de vetores velocidade do escoamento através da seção reta obtido do processamento das imagens no software INSIGHT 3GTM.

Para efetuar o cálculo das grandezas desejadas utilizou-se uma aplicação do software TECPLOT[®] desenvolvida especialmente para esta análise. A figura (4.12) apresenta o campo de velocidade com os seus valores em m/s. O número de perfis de velocidade obtidos foi de 42 e o número de vetores velocidade por perfil foi de 22.

A solução analítica, para o escoamento avaliado nesta análise, é o perfil de velocidade parabólico correspondente ao escoamento laminar completamente desenvolvido de um fluido através de uma seção circular. Mostrando só 50% dos perfis de velocidade obtidos, como feito na figura (4.13), é possível observar que cada um deles tem a forma parabólica esperada.

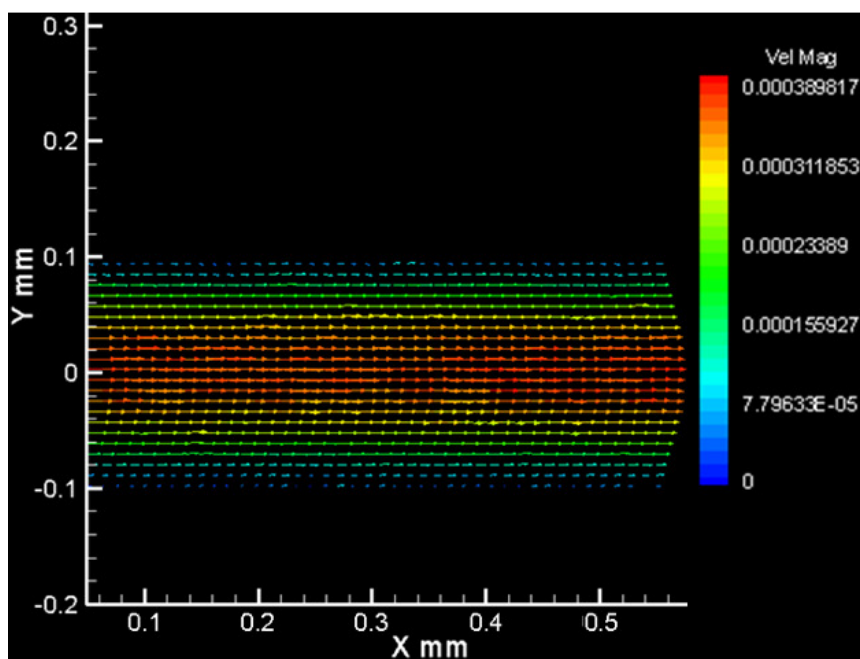


Figura 4.12: Campo de velocidade do escoamento da fase aquosa através da seção reta do micro-capilar.

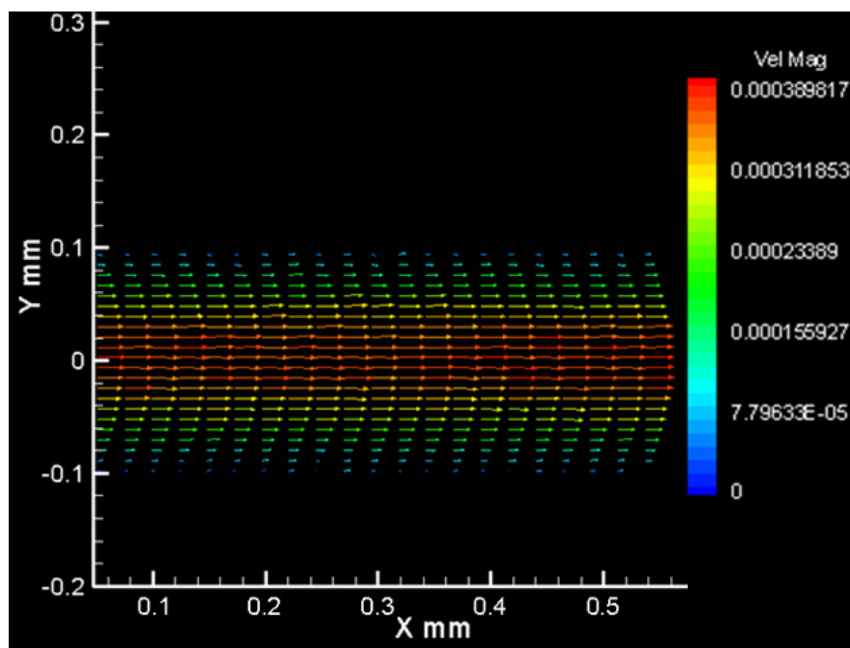


Figura 4.13: Campo de velocidade do escoamento através da seção reta do micro-capilar apresentando 50% dos perfis de velocidade.

A precisão das medidas do campo médio de velocidade usando a técnica do micro-PIV foi conferida através de dois critérios.

De acordo com o primeiro critério, a vazão de injeção experimental média foi calculada mediante integração dos perfis de velocidade obtidos da análise de imagens. O valor da vazão experimental média foi de $Q_{exp} = 0.02041$ ml/h, que comparado com o valor da vazão real injetada, $Q = 0.02$ ml/h, significa que o uso do sistema μ -PIV implicou um erro de 2% na medição.

O segundo critério consistiu em comparar os valores de velocidade obtidos através do processamento das imagens com os valores teóricos calculados através da solução analítica do perfil parabólico. Desta maneira, foram determinados os valores de velocidade médios para cada posição, na direção vertical, ao longo dos 42 perfis no campo de velocidade. A comparação é apresentada na figura (4.14), e confirma a forma parabólica do perfil de velocidade experimental com valores de velocidade próximos aos valores calculados analiticamente, demonstrando também a precisão da medida realizada com o sistema μ -PIV.

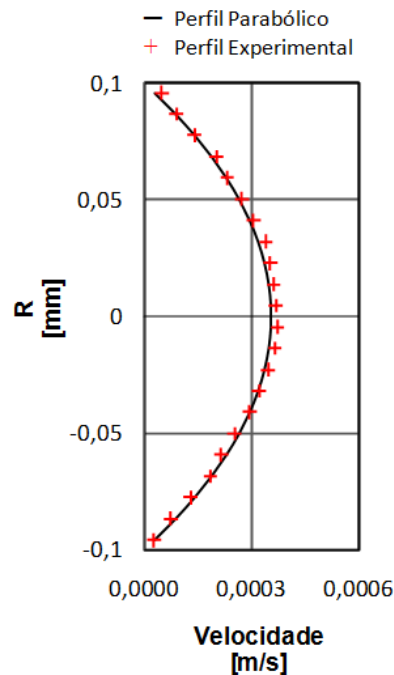


Figura 4.14: Comparação dos perfis parabólico e experimental.

4.3.1.2.

Escoamento da fase aquosa através da seção convergente da garganta do micro-capilar.

Para este segundo estudo, o intervalo de tempo estabelecido para adquirir cada par de registros consecutivos de imagens foi de 1500 μs para um tempo de exposição do sensor CCD de 950 μs .

Pelo fato da área de avaliação nesta seção do micro-capilar ser menor do que a área avaliada na seção reta, foi necessário realizar a correlação das imagens utilizando janelas de interrogação de 48 pixels x 32 pixels ou 18 μm x 12 μm . A figura (4.15) apresenta o campo de vetores velocidade obtido do processamento dos 50 pares de imagens no software INSIGHT 3GTM.

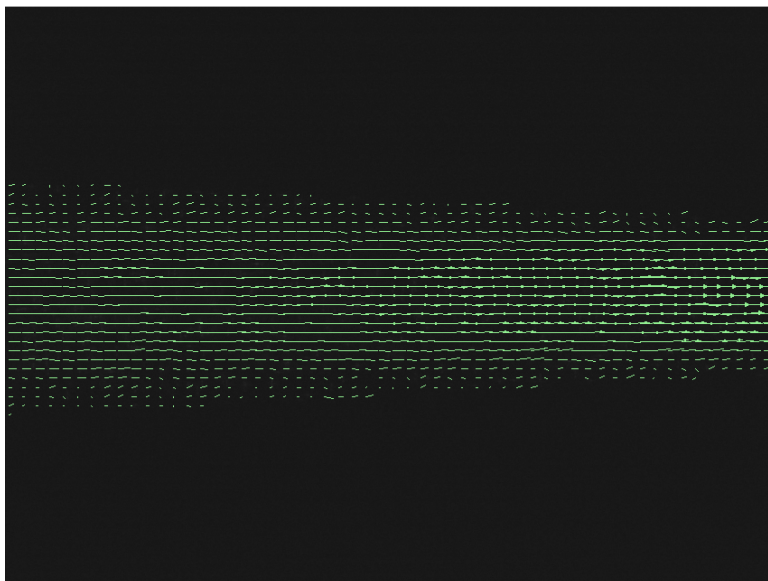


Figura 4.15: Campo de vetores velocidade do escoamento através da seção convergente obtido do processamento das imagens no software INSIGHT 3GTM.

O cálculo das grandezas deste campo de velocidades foi efetuado usando a mesma aplicação do software TECPLOT[®] mencionada no caso de seção reta constante. O campo de velocidade resultante é composto por 56 perfis de velocidade. O número de vetores velocidade por perfil decresce ao longo do comprimento, de 26 vetores na seção maior até 17 na menor, devido à geometria convergente da garganta do micro-capilar. O campo de velocidade na seção convergente é mostrado na figura (4.16).

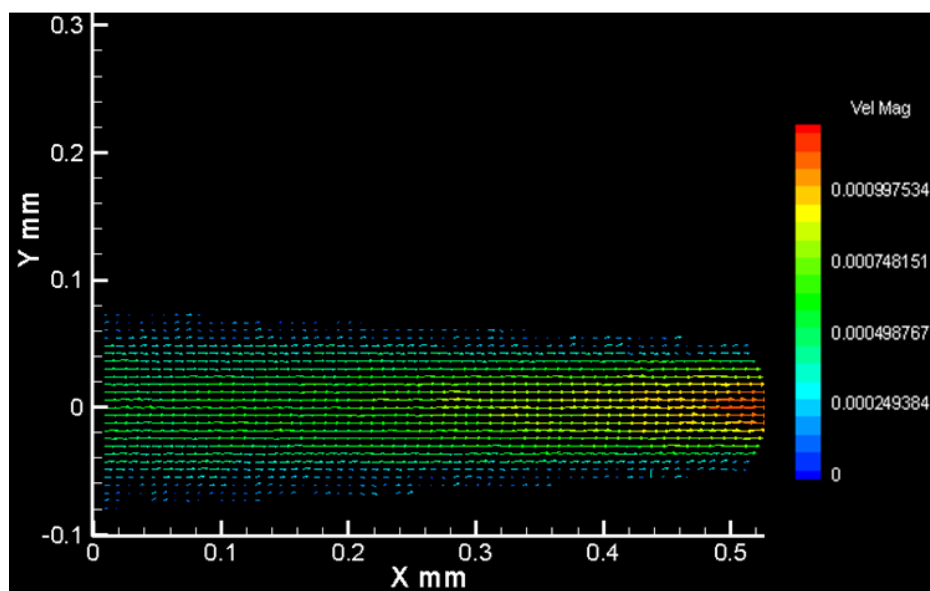


Figura 4.16: Campo de velocidade do escoamento da fase aquosa através da seção convergente do micro-capilar.

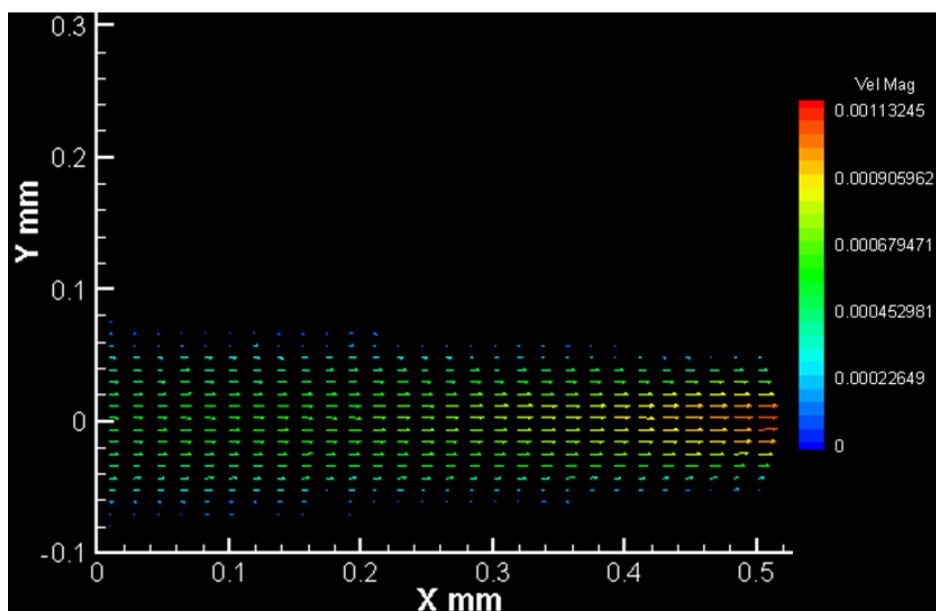


Figura 4.17: Campo de velocidade do escoamento através da seção convergente do micro-capilar apresentando 50% dos perfis de velocidade.

Na figura (4.17) é apresentada apenas a metade dos perfis de velocidade a fim de facilitar a visualização dos mesmos. Os perfis de velocidade obtidos apresentam forma quase parabólica coincidindo com os perfis apresentados por

Wereley, em 2002 [36], no estudo do escoamento através de um micro-bocal. Estes perfis são apresentados na figura (4.18).

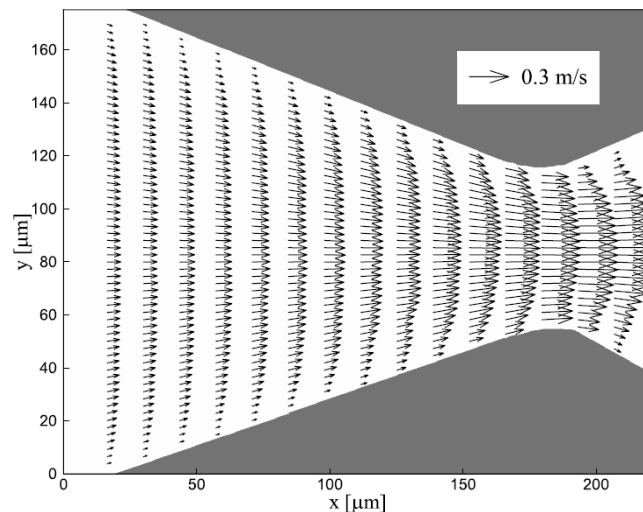


Figura 4.18: Campo de velocidades obtido no estudo do escoamento através de um micro-bocal, desenvolvido por Wereley [36].

No estudo do escoamento da fase aquosa através da seção convergente do micro-capilar não foi encontrado, na bibliografia, solução analítica que possa ser utilizada para estimar a exatidão das medições efetuadas empregando o sistema μ -PIV. Desta forma, a solução analítica do perfil de velocidade parabólico foi empregada como solução aproximada na análise das medições efetuadas utilizando o sistema μ -PIV, já que o número de Reynolds do escoamento é extremamente baixo.

A vazão de injeção experimental foi calculada, mediante integração, nas seções de diâmetro maior e menor (entrada e saída) do tubo capilar convergente para garantir que os parâmetros estabelecidos no processo de aquisição de imagens consigam medir satisfatoriamente o escoamento ao longo de todo o comprimento da seção avaliada. As vazões calculadas na entrada e na saída foram de $Q_{1exp} = 0.01938$ ml/h e $Q_{2exp} = 0.01912$ ml/h, implicando erros de 3.1% e 4.4% respectivamente.

A comparação do perfil de velocidade teórico e experimental, efetuada para os perfis na entrada e perto da saída da seção convergente, é apresentada na figura (4.19).

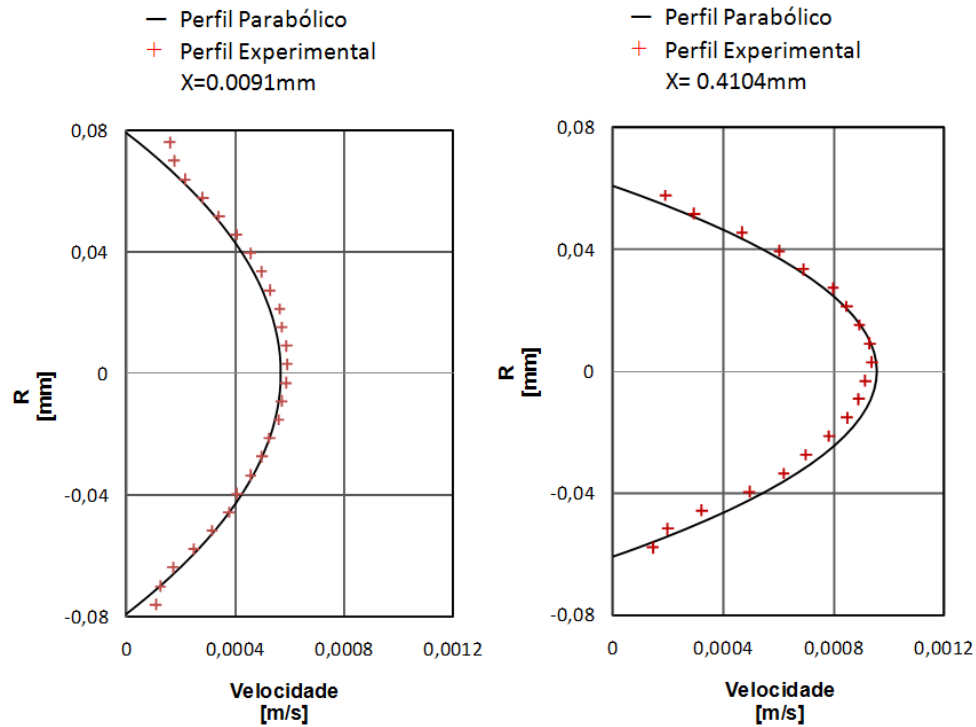


Figura 4.19: Comparação dos perfis parabólicos e experimentais na entrada e saída da seção convergente do micro-capilar.

No escoamento através de um micro-capilar convergente de seção circular, a velocidade média incrementa à medida que o diâmetro decresce ao longo do comprimento do micro-capilar. Este fato é confirmado no campo de velocidade obtido, onde os maiores valores de velocidade se encontram nas zonas de menor diâmetro no micro-capilar.

O incremento da velocidade é maior no caso da velocidade máxima, ao longo do eixo do micro-capilar, o que faz com que a curvatura do perfil parabólico seja mais acentuada nas seções de menor diâmetro do micro-capilar. A figura (4.20) apresenta a variação da velocidade máxima do escoamento ao longo do comprimento estudado.

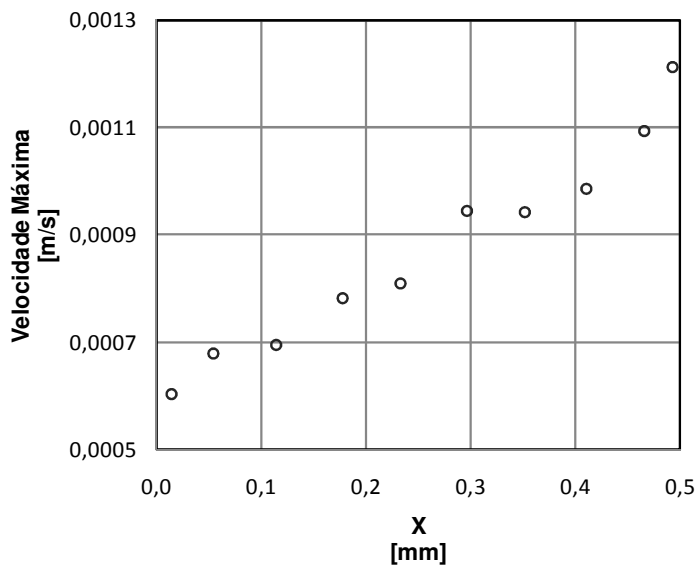


Figura 4.20: Variação da velocidade máxima do escoamento da fase aquosa na seção convergente do micro-capilar.

4.3.2.

Campo de velocidade no escoamento bifásico através de um micro-capilar.

Esta análise foi desenvolvida empregando basicamente os mesmos parâmetros estabelecidos na medição do campo de velocidade do escoamento da fase aquosa através da seção reta do micro-capilar com garganta.

O método de processamento de imagens empregado foi o “*classic PIV*”, sendo processado só um par de registros consecutivos de imagem através deste método. Adicionalmente foram utilizadas as técnicas de pós-processamento: “*local validation processor*” e “*vector conditioning processor*”, disponíveis no software INSIGHT 3GTM. O intervalo de tempo usado na aquisição do par de registros consecutivos de imagem foi de 4400 μ s para um tempo de exposição do sensor CCD de 2400 μ s. A correlação foi elaborada dividindo a imagem em janelas de interrogação de 32 pixel x 32 pixel ou 12 μ m x 12 μ m. As janelas de interrogação neste estudo foram menores a fim de descrever, com a maior precisão possível, a geometria da gota de fase dispersa. Vale chamar atenção que as partículas traçadoras estavam suspensas apenas na fase contínua. Desta forma, uma gota da fase dispersa é vista como uma região escura nas imagens.

As grandezas do campo de velocidades da fase contínua foram calculadas utilizando a aplicação do software TECPLOT[®] mencionada nos casos anteriores, a partir dos vetores velocidade obtidos do processamento no software INSIGHT 3G[™]. A figura (4.22) mostra os valores do campo de velocidade da fase contínua.

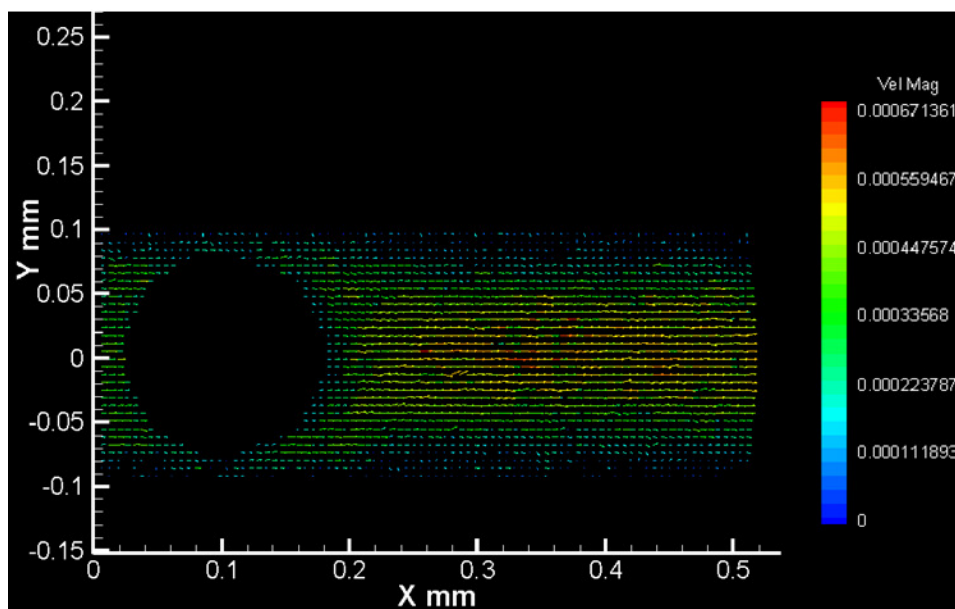


Figura 4.21: Campo de velocidade do escoamento bifásico através da seção reta do micro-capilar.

O campo de velocidade instantâneo gerado é composto por 84 perfis de velocidade e cada perfil por 32 vetores. Considerando que só a fase aquosa foi semeada com as partículas traçadoras, o espaço circular sem presença de vetores no campo de velocidade, representa a gota de fase dispersa avaliada. O diâmetro aproximado da gota é de 160 μm .

O efeito da presença da gota no escoamento pode ser claramente observado no campo de velocidade da fase contínua. Como a gota possui viscosidade bem maior do que a fase contínua, o perfil de velocidade (não medido) na fase dispersa é quase uniforme.

Como a gota move-se com velocidade aproximada de um corpo rígido, pode-se observar que o perfil de velocidade da fase contínua à montante da gota não é parabólico, apresentando uma região de velocidade quase constante, mesmo a uma certa distancia da gota.

A velocidade de movimento da gota pode ser estimada pelo campo de velocidade da fase contínua ao redor da mesma. Considerou-se a velocidade da gota sendo igual à média da velocidade na interface óleo-água à montante da gota. Para as condições deste experimento, a velocidade da gota foi de $V_g = 0.000158$ m/s. Com a vazão de injeção utilizada, a velocidade média da fase contínua é de $\bar{V} = 0.000177$ m/s. Pode se observar que a gota move-se mais lentamente do que o escoamento médio da fase contínua.

4.4. Comentários

O estudo do escoamento bifásico através de micro-capilares com garganta foi desenvolvido mediante a análise do escoamento da fase contínua na seção reta do capilar e na parte convergente da garganta e do escoamento com uma gota suspensa em um capilar reto. As medições do campo de velocidade foram efetuadas utilizando o sistema de micro-velocimetria por imagem de partículas (μ -PIV).

O uso do sistema μ -PIV permitiu realizar medições do campo de velocidade no micro-capilar com garganta empregando uma resolução espacial de até 12 μ m. O processamento das imagens através do método “*ensemble average*”, calculando a média amostral de 50 campos instantâneos de velocidade, tornou possível superar a desvantagem da baixa quantidade de partículas traçadoras no processo de aquisição de imagens.

A precisão dos resultados foi avaliada através da comparação dos resultados obtidos com a solução analítica do perfil de velocidade parabólico para o escoamento laminar completamente desenvolvido de um fluido Newtoniano através de uma seção circular.

Na análise do escoamento através da seção reta, os valores da velocidade dos perfis obtidos do campo de velocidade ajustaram-se ao perfil parabólico da solução analítica. O cálculo da vazão experimental a partir do perfil médio do campo de velocidade produziu um erro de 2%.

Na análise do escoamento através da seção convergente da garganta do micro-capilar, o cálculo da vazão experimental foi realizado a partir dos perfis de

velocidade nas seções de diâmetro máximo e mínimo produzindo erros de 3.1% e 4.4%, respectivamente.

Na análise do escoamento de uma gota de óleo através da seção reta do micro-capilar foi possível determinar a velocidade da gota a partir dos valores de velocidade da interface óleo-fase aquosa. O resultado confirmou que a gota move-se a uma velocidade menor que a velocidade média do escoamento da fase contínua.

Esta análise representa uma primeira tentativa no desenvolvimento de pesquisas que consigam medir, além da velocidade de uma gota de óleo no escoamento bifásico, o campo de velocidade da fase contínua na camada entre a gota e a parede do micro-capilar, tanto na seção reta quanto ao longo da convergência da garganta, a fim de obter um melhor entendimento do processo de bloqueio no escoamento de emulsões em micro-capilares.