



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIAS MECÂNICAS

Anderson Rohweder

**Velocimetria Por Imagem De Partículas Aplicada a Escoamentos Em Escala  
Micrométrica**

Joinville  
2020

Anderson Rohweder

**Velocimetria Por Imagem De Partículas Aplicada a Escoamentos Em Escala  
Micrométrica**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciências Mecânicas.

Orientador: Prof. Fabiano Gilberto Wolf, Dr.

Joinville

2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Rohweder, Anderson

Velocimetria Por Imagem De Partículas Aplicada a  
Escoamentos Em Escala Micrométrica / Anderson Rohweder ;  
orientador, Fabiano Gilberto Wolf, 2020.

110 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Campus Joinville, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia e Ciências Mecânicas, Joinville, 2020.

Inclui referências.

1. Engenharia e Ciências Mecânicas. 2.  $\mu$ PIV. 3. Meio  
poroso. 4. Microcanais. 5. Poro de duplo canal. I.  
Gilberto Wolf, Fabiano. II. Universidade Federal de Santa  
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências  
Mecânicas. III. Título.

Anderson Rohweder

**Velocimetria Por Imagem De Partículas Aplicada A Escoamentos Em Escala  
Micrométrica**

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Diogo Nardelli Siebert, Dr.

UFSC

Prof. Luís Orlando Emerich Dos Santos, Dr.

UFSC

Prof. Ernane Silva, Dr.

UFSC

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia e Ciências Mecânicas.

---

Prof. Régis Kovacs Scalice, Dr.

Coordenador do Programa

---

Prof. Fabiano Gilberto Wolf, Dr.

Orientador

Joinville, 2020.

À minha encantadora esposa

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, e acima de tudo, agradeço a Deus por me dar uma vida maravilhosa, me guiar a cada dia para a conquista dos meus objetivos e me dar a oportunidade de conhecer pessoas incríveis com quem aprendo e passo momentos agradáveis.

Ao Professor Fabiano Gilberto Wolf por me orientar durante o mestrado e me ajudar a crescer como pessoa sendo um exemplo de caráter e integridade.

Aos amigos do laboratório de microfluídica, em especial ao George Luiz Rincaweski Vegini que me ajudou a realizar os primeiros experimentos e compartilhou do seu conhecimento, tanto em assuntos do laboratório quanto em outros como astrofísica e viagem no tempo, os quais tenho fascínio. Também ao Felipe José Greboge que se prontificou a criar os códigos do Matlab para realizar diversos cálculos e gerar os gráficos apresentados no trabalho.

À minha estimada e doce esposa, Pamela, assim como a meus sogros Marcos e Maria Gonçalves e meus pais Alvino Rohweder e Elisa Helena Rita Engelmann que me apoiaram e motivaram durante todo o tempo exigido para o desenvolvimento desta dissertação de mestrado.

E ao apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e Petrobras que permitiram a minha dedicação total a esta pesquisa.

### ***Sucesso***

*Rir muito e com frequência, ganhar o respeito de pessoas inteligentes e o afeto das crianças, merecer a consideração de críticos honestos e suportar a traição de falsos amigos, apreciar a beleza, encontrar o melhor nos outros, deixar o mundo um pouco melhor, seja por uma saudável criança, um canteiro de jardim ou uma redimida condição social, saber que ao menos uma vida respirou mais fácil porque você viveu.*

*Isso é ter tido sucesso.*

***Ralph Waldo Emerson***

## RESUMO

Com o intuito de avançar no conhecimento dos escoamentos bifásicos em meios porosos é utilizada uma técnica experimental que vem ganhando espaço considerável em diversas áreas de pesquisa devido a sua grande versatilidade em termos dos dados gerados. A técnica denominada Velocimetria por Imagem de Partículas (PIV) se mostra adequada para o estudo de geometrias que apresentam incertezas quanto ao comportamento dos fluidos durante seu escoamento, como é o caso do poro de duplo canal. Isso se deve ao fato de ser uma técnica óptica menos intrusiva que permite monitorar simultaneamente todo o campo de velocidade da região de interesse. Neste trabalho, foram realizadas gravações  $\mu$ PIV em escoamentos monofásicos e bifásicos. Experimentos monofásicos em um microcanal de seção retangular de apenas 100  $\mu\text{m}$  de largura por 32  $\mu\text{m}$  de profundidade foram feitos para comparação dos dados gerados pela técnica  $\mu$ PIV àqueles obtidos com a solução analítica de Hagen-Poiseuille. Para validar o uso da técnica e do procedimento experimental, também foram realizados ensaios com o poro de duplo canal a fim de obter o campo de velocidade para um escoamento monofásico e comparar os mesmos a uma simulação numérica. Posteriormente, foram feitas análises para o escoamento bifásico em um poro de duplo canal, onde foram avaliados o campo de velocidade da fase injetada em um processo de drenagem, e da fase aprisionada em um processo de embebição. A avaliação do campo de velocidade da fase injetada trouxe maior clareza sobre o comportamento do fluido não-molhante e o motivo pelo qual ocorre o aprisionamento do fluido molhante no menor canal da geometria. Os resultados mostraram também que para um escoamento bifásico em que o fluido molhante é mais viscoso do que o fluido não-molhante, não é possível remover o fluido aprisionado no canal menor apenas elevando o número capilar. Os ensaios em que foram obtidos campos de velocidade da fase aprisionada contribuíram para o entendimento dos fenômenos que ocorrem na interface dos fluidos sob as condições avaliadas e enfatizaram a importância da molhabilidade e da viscosidade no comportamento dos fluidos, uma vez que foram obtidos resultados inéditos para a condição de molhabilidade intermediária.

**Palavras-chave:**  $\mu$ PIV. Meio poroso. Microcanais. Poro de duplo canal.



## ABSTRACT

In order to advance the knowledge of two-phasic flows in porous media, an experimental technique is used that has been gaining considerable space in several research areas due to its great versatility in terms of the data generated. The technique called Particle Image Velocimetry (PIV) is suitable for the study of geometries that have uncertainties regarding the behavior of fluids during their flow, as is the case of the pore doublet model. This is due to the fact that it is a less intrusive optical technique that allows to simultaneously monitor the entire speed field of the region of interest. In this work,  $\mu$ PIV recordings were made in monophasic and two-phasic flows. Single-phase experiments in a microchannel with a rectangular section of only 100  $\mu\text{m}$  in width and 32  $\mu\text{m}$  in depth were performed to compare the data generated by the  $\mu$ PIV technique to those obtained with the analytical solution of Hagen-Poiseuille. To validate the use of the technique and the experimental procedure, tests were also carried out with the pore doublet model in order to obtain the velocity field for a single-phase flow and compare them to a numerical simulation. Subsequently, analyzes were made for two-phasic flow in a pore doublet model, where the velocity field of the injected phase in a drainage process and of the trapped phase in an imbibition process were evaluated. The evaluation of the velocity field of the injected phase brought greater clarity about the behavior of the non-wetting fluid and the reason why the wetting fluid is trapped in the smallest geometry channel. The results also showed that for a two-phase flow in which the wetting fluid is more viscous than the non-wetting fluid, it is not possible to remove the fluid trapped in the smaller channel just by increasing the capillary number. The tests in which trapped phase velocity fields were obtained contributed to the understanding of the phenomena that occur at the fluid interface under the conditions evaluated and emphasized the importance of wettability and viscosity in the behavior of fluids, since unprecedented results were obtained for the condition of intermediate wettability.

**Palavras-chave:**  $\mu$ PIV. Porous media. Microchannels. Pore doublet.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Poro de duplo canal.....	22
Figura 2: Esquematização de forças intermoleculares em um sistema trifásico contendo água, ar e um sólido. ....	26
Figura 3: Ângulo de contato ente óleo e água para diferentes sólidos. ....	28
Figura 4: Meios porosos contendo água e óleo onde a rocha é molhável a água em (a) e ao óleo em (b).....	30
Figura 5: Comportamento dos fluidos em um tubo capilar.....	31
Figura 6: Micromodelo com diversos microcanais utilizados para reproduzir no laboratório fenômenos que ocorrem no processo de recuperação de petróleo.....	33
Figura 7: Ilustração dos processos de drenagem e embebição. ....	34
Figura 8: Representação do meio poroso em um modelo simplificado de poros e gargantas..	35
Figura 9: Deslocamento do N-decano pelo modelo de duplo canal saturado com água. ....	36
Figura 10: Processo de embebição espontânea em que a água usada como fluido molhante está deslocando o N-decano.....	37
Figura 11: Exemplo de par de imagem dividido em janelas de interrogação.....	38
Figura 12: Configuração dos componentes de uma bancada experimental para coleta de imagens $\mu$ PIV. ....	39
Figura 13: Exemplos de densidade de imagem. ....	42
Figura 14: Configuração de um sistema de iluminação utilizando dois lasers para reduzir o tempo entre as imagens a serem capturadas. ....	44
Figura 15: Esquema de iluminação utilizando um sistema de fluorescência induzida. ....	45
Figura 16: Diferença entre o comprimento de onda emitido pelo laser e pelas partículas.....	46
Figura 17: Posição da partícula definida a partir da intensidade luminosa. ....	47
Figura 18: Campo de velocidade entre os escoamentos de dois fluidos imiscíveis. ....	47
Figura 19: Bancada experimental utilizada no trabalho para a execução da técnica $\mu$ PIV.....	50
Figura 20: Esquematização do processo de fabricação do micromodelo.....	57
Figura 21: Bomba de seringa usada para a injeção de fluidos nos microcanais.....	58
Figura 22: Seringas de precisão usadas nos experimentos.....	59
Figura 23: Configuração de tubos e conexões usada nos experimentos.....	59
Figura 24: Balança de precisão e agitador magnético. ....	61
Figura 25: Imagens das partículas para diferentes vazões, em (A) impondo uma vazão de $1,11 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{s}$ as imagens das partículas ficaram com diversas formas e tamanhos, além de	

conter pontos que são considerados como ruído, em (B) com a vazão de $6,11 \times 10^{-12} \text{ m}^3/\text{s}$ são visualizadas partículas mais nítidas apresentando um padrão circular, com pouca diferença de tamanho e quase não há ruído. ....	66
Figura 26: Disposição dos vetores com base nas velocidades em u e v para eliminação de outliers. Em (A) são apresentadas as grandezas dos vetores resultantes para o experimento em que foi imposta a vazão de $1,11 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{s}$ e em (B) para a vazão de $6,11 \times 10^{-12} \text{ m}^3/\text{s}$ .....	67
Figura 27: Vetores velocidade para um canal de seção retangular com cinco linhas transversais usadas para definir o perfil de velocidades do escoamento.....	73
Figura 28: Comparação entre o perfil de velocidade analítico e experimental para um canal com $(246,85 \pm 5,42) \mu\text{m}$ de largura por $(32,06 \pm 2,30) \mu\text{m}$ de profundidade e uma vazão de $(6,11 \pm 0,17) \times 10^{-12} \text{ m}^3/\text{s}$ . ....	74
Figura 29: Campo de velocidade utilizando a lente de 20X em um canal de $(96,60 \pm 2,20) \mu\text{m}$ de largura por $(32,20 \pm 3,01) \mu\text{m}$ de profundidade e vazão de $(3,95 \pm 0,11) \times 10^{-13} \text{ m}^3/\text{s}$ .....	76
Figura 30: Perfil de velocidades usando a lente de 20X.....	77
Figura 31: Perfil de velocidades para um micromodelo com menores incertezas. ....	78
Figura 32: Perfil médio de velocidades calculado com base em 12 seções ao longo do microcanal. ....	79
Figura 33: Geometria do poro de duplo canal. ....	80
Figura 34: Linhas de corrente para o escoamento de água no poro de duplo canal. ....	80
Figura 35: Comparação entre os campos de velocidades obtidos para as análises numérica e experimental. ....	81
Figura 36: Comparação entre o perfil de velocidades numérico e experimental. ....	82
Figura 37: Linhas de corrente da fase não-molhante escoando pelo poro de duplo canal com o fluido molhante aprisionado no canal mais estreito da geometria.....	83
Figura 38: Vetores velocidade da fase não-molhante para o escoamento no poro de duplo canal com a fase molhante aprisionada.....	84
Figura 39: Perfis de velocidades para as linhas A e B da Figura 38. ....	85
Figura 40: Dimensões do poro de duplo canal com canais longos, unidades em milímetros. .	87
Figura 41: Campo de velocidade da fase aprisionada no poro de duplo canal com canais longos. ....	87
Figura 42: Velocidade máxima do fluido aprisionado pelo número capilar do escoamento. ..	89
Figura 43: Dimensões do micromodelo com canais curtos, unidades em milímetros. ....	90
Figura 44: Campo de velocidade no poro de duplo canal com canais curtos.....	90

Figura 45: Movimento do fluido aprisionado no poro de duplo canal com canais curtos para diferentes velocidades da fase injetada.....	92
Figura 46: Maior velocidade da linha A em razão do número capilar para o experimento com canais curtos. ....	93
Figura 47: Campo de velocidade para imagens sintéticas. ....	95
Figura 48: Perfil de velocidades para imagens sintéticas. ....	95
Figura 49: Escoamento de água com micropartículas em um canal de seção retangular saturado com óleo de girassol. ....	108
Figura 50: Deslocamento da interface durante o processo de embebição em que óleo de girassol desloca a água inicialmente contida na geometria.....	109
Figura 51: Poro de duplo canal usado nos experimentos. ....	112
Figura 52: Solução de 90% glicerina e 10% de água aprisionada no poro de duplo canal. ...	113
Figura 53: Solução de 80% glicerina e 20% de água aprisionada no poro de duplo canal. ...	114
Figura 54: Solução de 70% glicerina e 30% de água aprisionada no poro de duplo canal. ...	114

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados dos experimentos realizados com o poro de duplo canal com canais longos .....	88
Tabela 2 – Resultados do experimento com canais curtos .....	91
Tabela 3 – Viscosidade de soluções de glicerina e água a 20°C .....	111

## **LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS**

CCD – Charged Coupled Device

PIV – Particle Image Velocimetry

LSV – Laser Speckle Velocimetry

USB – Universal Serial Bus

DCC – Direct Cross Correlation

DFT – Discret Fourier Transform

PDMS – Polidimetilsiloxano

USP – Universidade de São Paulo

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

TIFF – Tagged Image File Format

CLAHE – Contrast-Limited Adaptive Histogram Equalization

UDESC – Universidade do Estado de Santa Catarina

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\text{CO}_2$	gás carbônico (dióxido de carbono)
$\mu\text{PIV}$	velocimetria por imagens de partículas aplicada a escoamentos em microescala
$\mu\text{m}$	micrometro, unidade de distância que corresponde a $10^{-6}$ metros
$\Delta E$	diferença de energia das moléculas que estão no interior do fluido para aquelas presentes na interface
$E_{XX}$	energia de interação entre as próprias moléculas do fluido X
$E_{XY}$	energia de interação entre as moléculas do fluido X e do fluido Y
$E_{YY}$	energia de interação entre as moléculas do fluido Y
$\sigma$	tensão interfacial
$A_I$	área da interface entre os fluidos
$\theta_e$	ângulo de contato estático
$\sigma_{oa}$	tensão interfacial entre óleo e água
$\sigma_{os}$	tensão interfacial entre óleo e o sólido
$\sigma_{as}$	tensão interfacial entre água e o sólido
$\sigma_{ads}$	tensão de adesão
$\theta$	ângulo de contato entre as fases líquidas
$h_e$	diferença e altura entre as superfícies do fluido para dentro e fora do capilar
$F_c$	força capilar
$F_g$	força gravitacional
$\pi$	número pi
$r$	raio do tubo
$\Delta\rho$	diferença de massa específica dos fluidos
$\sigma_{LV}$	tensão interfacial entre as fases líquido e vapor
$Ca$	número capilar
$V$	velocidade média do escoamento
$\mu_i$	viscosidade dinâmica do fluido injetado
$M$	razão entre viscosidades
$\mu_d$	viscosidade dinâmica do fluido deslocado
%	medida de razão com base em cem
$\varepsilon$	erro devido ao movimento Browniano

$\Delta t$	tempo entre as imagens
$k_B$	constante de Boltzmann
$T$	temperatura
$d_p$	diâmetro da partícula
$\tau$	tempo de resposta
$\rho_p$	densidade da partícula
$\rho_f$	densidade do fluido
$d_{poro}$	diâmetro do poro
$\nu'$	viscosidade cinemática do fluido
$Stk$	número de Stokes
$u_0$	velocidade longe do obstáculo
$l_0$	dimensão característica do obstáculo
$t_1$	tempo em que a primeira imagem do par de imagens foi capturada
$t_2$	tempo em que a segunda imagem do par de imagens foi capturada
lx	lux - unidade de iluminamento do Sistema Internacional, equivalente à produção de um fluxo luminoso uniformemente distribuído sobre uma superfície na proporção de 1 lúmen por m <sup>2</sup>
$\mu s$	microsegundo, corresponde a 10 <sup>-6</sup> segundos
W	Watt – unidade de potência do Sistema Internacional
nm	nanometro – equivale a 10 <sup>-9</sup> metros
X	refere-se ao número de vezes que uma imagem é ampliada
Mpx	megapíxel – corresponde a 10 <sup>6</sup> pixels
kg/m <sup>3</sup>	quilograma por metro cúbico
2D	duas dimensões
m/s	metro por segundo
s	unidade do Sistema Internacional para o tempo, segundo
mm	milímetro, corresponde a 10 <sup>-3</sup> metros
°C	unidade de temperatura da escala Celsius
m <sup>3</sup> /s	metro cúbico por segundo
$\mu l$	microlitro, corresponde a 10 <sup>-6</sup> litros
ml	mililitros
Cm	centímetro, corresponde a 10 <sup>-2</sup> metros
M $\Omega$ cm	megaohm vezes centímetro, unidade usada para medir a resistividade



ml/h	mililitros por hora
px	pixel
fps	fotos por segundo
Pa	unidade para pressão, Pascal
Pa.s	unidade para viscosidade, Pascal vezes segundo
m/s	unidade para a velocidade, metro por segundo
M <sup>2</sup>	unidade para área, metro quadrado
V(x, y)	velocidade para um ponto específico das coordenadas x e y
Q	símbolo para definir a vazão volumétrica
$\alpha$	fator de correção geométrica
$\omega$	largura do canal
h	profundidade do canal
$\gamma$	relação entre a largura e profundidade
A	área da seção transversal do microcanal
N/m	unidade para a tensão interfacial, Newton por metro
mm/s	milímetro por segundo
$\mu\text{m/s}$	micrometro por segundo
$u(I)$	incerteza padrão
$I_k$	k-ésima indicação, ou seja o valor individual de cada medição
$\bar{I}$	a média das “n” indicações
n	número de repetições efetuadas
R	resolução do sistema de medição
U	incerteza expandida
t	coeficiente de Student
$u_c$	incerteza combinada
$U_A$	incerteza expandida da área
$U_L$	incerteza expandida da largura
$U_h$	incerteza expandida da profundidade
$U_V$	incerteza expandida para a velocidade
$U_Q$	incerteza expandida para a vazão volumétrica

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>19</b>
1.1	PROBLEMA E SUA IMPORTÂNCIA .....	19
1.1.1	<b>Técnica experimental .....</b>	<b>21</b>
1.2	OBJETIVOS.....	23
1.2.1	<b>Objetivo geral .....</b>	<b>23</b>
1.2.2	<b>Objetivos Específicos.....</b>	<b>23</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>25</b>
2.1	ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS .....	25
2.1.1	<b>Tensão interfacial .....</b>	<b>26</b>
2.1.2	<b>Ângulo de contato e molhabilidade.....</b>	<b>28</b>
2.1.3	<b>Forças capilares e viscosas.....</b>	<b>30</b>
2.1.4	<b>Micromodelo .....</b>	<b>32</b>
2.1.5	<b>Poros de duplo canal.....</b>	<b>34</b>
2.2	VELOCIMETRIA POR IMAGEM DE PARTÍCULAS .....	38
2.2.1	<b>Configuração experimental .....</b>	<b>39</b>
2.2.2	<b>Região do escoamento .....</b>	<b>40</b>
2.2.3	<b>Partículas Traçadoras .....</b>	<b>40</b>
2.2.4	<b>Iluminação.....</b>	<b>43</b>
2.2.5	<b>Óptica .....</b>	<b>46</b>
2.2.6	<b>Avanços da técnica <math>\mu</math>PIV .....</b>	<b>48</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>50</b>
3.1	BANCADA EXPERIMENTAL .....	50
3.1.1	<b>Microscópio.....</b>	<b>51</b>
3.1.2	<b>Partículas Traçadoras .....</b>	<b>52</b>
3.1.3	<b>Software para processamento de dados .....</b>	<b>54</b>
3.1.4	<b>Equipamentos e dispositivos usados nos experimentos .....</b>	<b>56</b>

3.1.4.1	Micromodelo .....	56
3.1.4.2	Bomba de injeção .....	58
3.1.4.3	Seringa.....	58
3.1.4.4	Microtubos e conexões.....	59
3.1.4.5	Equipamento de água ultrapura.....	60
3.1.4.6	Balança de precisão e agitador magnético .....	60
3.2	EXPERIMENTOS MONOFÁSICOS.....	61
<b>3.2.1</b>	<b>Limites da bancada e definição de parâmetros .....</b>	<b>64</b>
3.3	EXPERIMENTOS BIFÁSICOS.....	68
<b>3.3.1</b>	<b>Escolha dos fluidos .....</b>	<b>68</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Procedimento experimental.....</b>	<b>69</b>
4	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>72</b>
4.1	VALIDAÇÃO DA BANCADA E DO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	72
<b>4.1.1</b>	<b>Comparação do perfil de velocidade com o resultado analítico.....</b>	<b>72</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Comparação com uma simulação numérica .....</b>	<b>79</b>
4.2	CAMPO DE VELOCIDADE DA FASE INJETADA.....	83
4.3	CAMPO DE VELOCIDADE DA FASE APRISIONADA .....	86
<b>4.3.1</b>	<b>Poros de duplo canal com canais longos .....</b>	<b>86</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Poros de duplo canal com canais curtos .....</b>	<b>89</b>
4.4	ANÁLISE DE INCERTEZA DOS RESULTADOS .....	93
<b>4.4.1</b>	<b>Análise de incerteza do processamento de dados .....</b>	<b>93</b>
<b>4.4.2</b>	<b>Análise de incerteza das medições .....</b>	<b>96</b>
5	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>99</b>
6	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>102</b>
7	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>103</b>
<b>APÊNDICE A – EXPERIMENTOS REALIZADOS PARA A DEFINIÇÃO DOS FLUIDOS UTILIZADOS NA SEÇÃO 4.3.....</b>		<b>108</b>

<b>8</b>	<b>APÊNDICE B – ALGORITMO USADO PARA GERAR A MÁSCARA USADA NO SOFTWARE PIVLAB .....</b>	<b>115</b>
----------	---	------------

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 PROBLEMA E SUA IMPORTÂNCIA

O comportamento de fluidos em geometrias micrométricas tem sido amplamente estudado em diversas áreas como hidrogeologia, recuperação de petróleo e sequestro de CO<sub>2</sub> (ROMAN *et al.*, 2016; MUGGERIDGE *et al.*, 2014; SUN *et al.*, 2016). Sem dúvida, o fator econômico é o maior responsável pelo grande número de pesquisas nesta área. Porém, áreas ligadas à preservação do meio ambiente também se beneficiam com o melhor entendimento dos fenômenos que ocorrem na microescala.

No caso da indústria de petróleo e gás, por exemplo, para otimizar a recuperação dos recursos, é necessário que seja conhecida a física por trás do escoamento de fluidos imiscíveis em meios porosos, pois os reservatórios de petróleo e gás são formados por um complexo rochoso que possui redes porosas pelas quais os fluidos precisam escoar para serem recuperados (WOLF, 2006).

No que toca as áreas ligadas à preservação do meio ambiente, também são encontrados desafios relacionados a escoamentos em escala micrométrica, pois, quando o solo é contaminado de alguma forma, estes contaminantes podem alcançar os lençóis freáticos, que também são reservatórios subterrâneos formados por meios porosos. A compreensão dos fenômenos que ocorrem na escala de poro contribuirá no desenvolvimento de métodos de limpeza capazes de livrar os lençóis freáticos destes contaminantes (LIFTON, 2016).

O avanço tecnológico, principalmente na área de computação, trouxe bastante progresso nestas áreas de pesquisa. A modelagem numérica possibilitou mapear o comportamento físico dos mais complexos escoamentos que ocorrem em escala macrométrica, facilitando assim a compreensão dos fenômenos envolvidos neste tipo de escoamento e trazendo avanços significativos em áreas afins. Porém, conforme afirmam Roman *et al.* (2016), o escoamento em meios porosos tem algumas especificidades, tornando os algoritmos convencionais para simular escoamentos em macroescala inapropriados. Isto ocorre porque nos escoamentos em microescala a capilaridade, molhabilidade, tensão interfacial e solubilidade dos fluidos, e o tamanho do poro, permeabilidade e distribuição da superfície sólida pela qual o fluido escoar, tem um grande impacto no comportamento do escoamento.

As pesquisas que investigam o comportamento de fluidos imiscíveis escoando por microcanais se dividem principalmente em trabalhos numéricos e experimentais. As simulações numéricas podem ser usadas para estimar o modo com que uma propriedade afeta o comportamento dos fluidos escoando por canais micrométricos, ou ainda, criar condições de escoamentos que gerem fenômenos não observados. Santiago *et al.* (2015) fizeram simulações numéricas em padrões de meios porosos bidimensionais buscando entender as variações drásticas de velocidade e pressão que ocorrem durante os saltos de Haines nos processos de drenagem. Verri *et al.* (2017) investigaram a porosidade de um meio poroso ao criarem uma rocha digital com base em um procedimento numérico. Já Isfahani e Afrand (2017) fizeram simulações para entender o comportamento de nanofluidos escoando em microcanais.

Dentre os trabalhos experimentais existem diversos campos, desde pesquisas que investigaram a importância de uma propriedade específica em diversas condições do escoamento, como as de Jamaloei *et al.* (2010), que fizeram experimentos buscando avaliar a configuração do padrão do escoamento e da interface entre os fluidos com diferentes tensões interfaciais. Trabalhos experimentais bastante complexos, como fizeram Singh *et al.* (2017), que conseguiram visualizar a dinâmica tridimensional do preenchimento de poros durante o processo de embebição com equipamentos utilizando raios X. E até mesmo trabalhos envolvendo microrganismos vivos sendo escoados em um micromodelo que simula um meio poroso foram feitos por Wan, Wilson e Kieft (1994) que estimaram a taxa de aprisionamento de gás em um determinado meio poroso pela respectiva retenção de bactérias, visto que existe sorção preferencial de bactérias na interface gás-água sobre a interface água-sólido.

A realização de trabalhos experimentais que apresentam resultados devidamente validados sempre contribui para a compreensão dos fenômenos investigados, pois quanto mais específicos são os trabalhos, um maior número de detalhes é observado. Nesse contexto, um passo a mais pode ser dado, pois a maioria dos trabalhos experimentais sobre escoamentos bifásicos em microcanais gera dados qualitativos, visto que existe um alto nível de complexidade na obtenção de dados quantitativos, como o perfil de velocidades em uma seção transversal de um microcanal com geometria específica ou o campo de velocidade de uma região de aprisionamento de fluido.

Assim, é de grande importância que sejam realizados trabalhos que obtenham dados quantitativos confiáveis do comportamento dos fluidos nestas condições. Miranda (2004) afirma que sob esta análise, a técnica de velocimetria por imagem de partículas PIV (*Particle Image Velocimetry*) é uma das mais apropriadas, já que possibilita a obtenção do campo de

velocidade com alta resolução espacial, mesmo em regiões de difícil acesso, como o escoamento próximo às paredes e atrás de obstáculos, onde ocorrem vórtices. Sendo aplicada a escoamentos em microescala a técnica recebe o nome de  $\mu$ PIV.

### 1.1.1 Técnica experimental

A velocimetria por imagem de partículas é uma técnica experimental, aliada a um processamento de dados que busca encontrar o campo de velocidade de um determinado escoamento dentro de uma região previamente definida. O experimento se resume em capturar imagens do escoamento, ao qual foram previamente acrescentadas partículas traçadoras. Com o processamento de dados define-se a posição das partículas para a sequência de imagens e calculam-se os vetores velocidade do escoamento, assumindo que o movimento das partículas se comporta como o do fluido (RAFFEL *et al.*, 2007).

A técnica  $\mu$ PIV apresenta duas características que a tornam apropriada para experimentos em escala micrométrica. O primeiro ponto a destacar é que se trata de uma técnica óptica menos intrusiva, permitindo assim a aplicação de  $\mu$ PIV mesmo em geometrias complexas e muito pequenas, as quais dificilmente poderiam ser acessadas por sondas ou outros equipamentos capazes de medir a velocidade do fluido. Além disso, pelo fato de ser uma técnica menos intrusiva, os campos de velocidades do fluido são avaliados em suas condições naturais. A segunda característica interessante da técnica é a capacidade de se avaliar todo o campo de velocidade em um plano que corta a região de interesse, pois, como se trata de uma técnica de campo inteiro, toda a extensão do campo de velocidade pode ser obtida simultaneamente durante a realização do experimento (RAFFEL *et al.*, 2007).

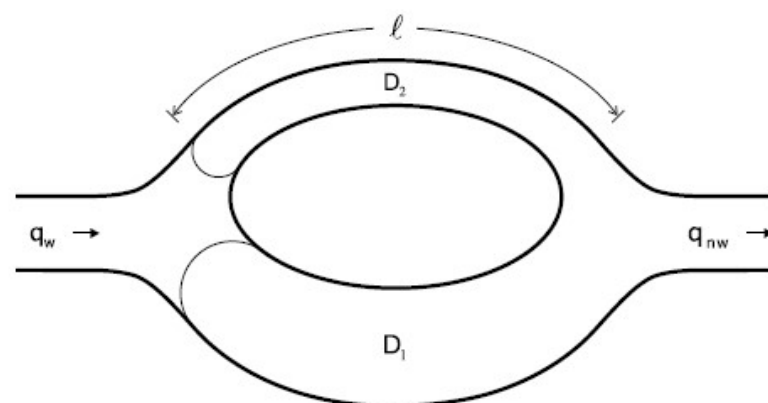
Devido a estas características, a técnica  $\mu$ PIV se mostra muito interessante para avaliar o comportamento do escoamento de fluidos na microescala. Experimentos nesta escala apresentam diversos fatores difíceis de serem avaliados, visto que a competição entre as forças capilar, gravitacional e viscosa, pode levar a um escoamento altamente instável. Conforme Roman *et al.* (2016) aponta, essas instabilidades são os fenômenos menos compreendidos e menos previsíveis na física do meio poroso.

Tendo estes pontos destacados, é presumível que trabalhos utilizando a técnica  $\mu$ PIV fossem realizados. Meinhart, Wereley e Santiago (1999) desenvolveram um procedimento

experimental para medir o campo de velocidade com resolução espacial em uma ordem de grandeza de apenas  $1\ \mu\text{m}$  usando um micromodelo de vidro de  $300\ \mu\text{m}$  de largura por  $30\ \mu\text{m}$  de profundidade e água deionizada como fluido de trabalho. Também foram realizados trabalhos com escoamentos bifásicos como os de Kazemifar *et al.* (2016) que conseguiram mensurar a velocidade da água durante um processo de drenagem onde  $\text{CO}_2$  é injetado em um micromodelo que simula uma matriz porosa saturada com água, e Bălan, Mărculescu e Iliescu (2012) que mensuraram o campo de velocidade da água próxima a interface do escoamento de ar que estava sendo injetado no micromodelo. Ainda, apesar da simplicidade, Roman *et al.* (2016) conseguiram montar uma bancada experimental para utilizar a técnica  $\mu\text{PIV}$  e obter o campo de velocidade do escoamento de dois líquidos imiscíveis.

Desta forma, buscando complementar teorias que foram desenvolvidas com base em resultados qualitativos e auxiliar a discussão de pontos ainda não bem entendidos, como a influência das propriedades dos fluidos nos escoamentos bifásicos, adicionalmente a montagem e validação de uma bancada experimental, este trabalho se propôs a realizar experimentos utilizando a técnica  $\mu\text{PIV}$  em um micromodelo que possui a geometria do poro de duplo canal, apresentado na Figura 1, amplamente estudado e tido como referência em alguns trabalhos para entender o aprisionamento de uma fase por outra em escoamentos bifásicos (CHATZIS; DULLIEN, 1983).

Figura 1: Poro de duplo canal.



Fonte: Adaptado de Wolf (2006)

O poro de duplo canal foi usado como modelo em vários trabalhos, visto que já foi bastante estudado e apresenta resultados qualitativos para diversos fenômenos que ocorrem na escala do poro. O trabalho realizado por Chatzis e Dullien (1983) investiga o aprisionamento de óleo, que se comportava como fluido não-molhante, para várias condições experimentais



durante os processos de drenagem e embebição. Com os experimentos realizados eles conseguiram estabelecer algumas leis que governam o deslocamento de uma fase por outra em escoamentos bifásicos no poro de duplo canal. Entretanto, o trabalho todo foi realizado buscando entender os resultados qualitativos gerados pelos experimentos realizados, o que difere deste trabalho, uma vez que com a obtenção de dados quantitativos será possível criar hipóteses para os motivos que levam aos resultados.

Além disso, com as infinitas possibilidades de experimentos que podem ser realizados utilizando a técnica  $\mu$ PIV, permitindo que dados quantitativos para diferentes experimentos sejam gerados e comparados, é esperado que tais resultados contribuam para que escoamentos bifásicos em poros de duplo canal possam ser modelados. Neste trabalho foram realizados experimentos sobre dois modelos do poro de duplo canal com diferentes dimensões, buscando também entender a influência da geometria no campo de velocidade do fluido aprisionado.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

O principal objetivo desta dissertação de mestrado é montar uma bancada experimental que permite a determinação de campos de velocidade de escoamentos monofásicos e bifásicos em escala micrométrica a fim de investigar os motivos que acarretam no aprisionamento de uma fase por outro em escoamentos bifásicos que ocorrem no poro de duplo canal.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Para realizar o objetivo desta dissertação várias etapas precisam ser cumpridas, pois se trata de uma área de pesquisa relativamente nova, sendo que não existe uma base na literatura que possa dar de forma precisa todas as orientações, e por se tratar de um trabalho experimental, diversos desafios precisam ser superados.

- a. Montar uma bancada experimental que possibilite a aplicação da técnica  $\mu$ PIV a escoamentos em microescala com a maior simplicidade e custo possíveis;

- b. Definir os procedimentos e parâmetros para a realização dos experimentos;
- c. Realizar experimentos monofásicos para validar a bancada e o procedimento experimental;
- d. Realizar experimentos bifásicos em poros de duplo canal;
- e. Mapear os campos de velocidade do fluido não-molhante escoando pelo poro de duplo canal durante o processo de drenagem;
- f. Mapear os campos de velocidade do fluido em regiões de aprisionamento;
- g. Discutir os resultados experimentais e comparar com os da literatura;

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS

Muggeridge *et al.* (2014) explicam que enquanto a maioria dos recursos obtidos do solo, como o minério de ferro e carvão mineral, existem como rochas sólidas e são extraídos através de processos de escavação das jazidas, o petróleo e o gás natural são fluidos que ocupam os espaços porosos de rochas no subsolo. Estes grandes depósitos subterrâneos onde o petróleo e gás natural são encontrados recebem o nome de reservatórios, e estão em bacias sedimentares distribuídas ao redor do mundo, sendo a maioria dos reservatórios formados por arenitos e carbonatos.

Muggeridge *et al.* (2014) esclarecem que como o meio poroso onde o petróleo e gás são encontrados se trata de uma rede interconectada de canais e poros ao longo do reservatório, os recursos podem ser extraídos por poços de produção, uma vez que exista um gradiente entre as pressões interna e externa do reservatório. Devido à conexão entre os canais que formam o meio poroso e o gradiente de pressão existente, os fluidos tenderão a escoar pelos poros até alcançarem os poços de produção, onde serão extraídos para a superfície.

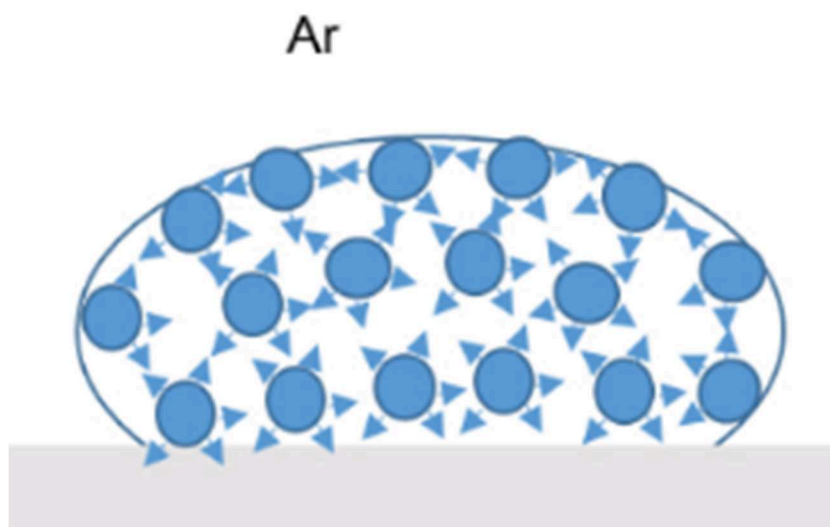
Em campos de recuperação de gás natural, a extração ocorre simplesmente reduzindo a pressão no poço de produção, pois conforme o gás se expande com a queda da pressão interna do reservatório, o mesmo escoar pelo meio poroso até o poço, onde é extraído. No caso do petróleo, o processo de recuperação primário ocorre quando o petróleo escoar pelo poço de recuperação devido à pressão interna do reservatório. No processo de recuperação secundário, para elevar a pressão interna do reservatório outro fluido é injetado através de poços de injeção, sendo os fluidos comumente utilizados água e gás (MUGGERIDGE *et al.*, 2014).

Soares (2016) explica que no meio poroso que forma os reservatórios de petróleo, é comum a presença de outros dois fluidos além do óleo, sendo estes água e gás. Isso deixa claro que sempre haverá escoamentos bifásicos, ou multifásicos, no meio poroso durante o processo de recuperação de petróleo. Deste modo, é preciso conhecer as propriedades que mais afetam este tipo de escoamento, para assim compreender a natureza do comportamento do mesmo. Dentre os principais fatores que podem afetar o escoamento bifásico em meios porosos estão a tensão interfacial, a molhabilidade e as forças capilares e viscosas.

### 2.1.1 Tensão interfacial

Conforme Paiva (2011) explica, as moléculas de um fluido em seu estado líquido possuem atração entre si, de modo que existirá um equilíbrio de forças para todas as moléculas que possuem moléculas vizinhas ao seu redor. Porém, aquelas que estão na interface com outro fluido não possuem a componente equivalente da força exercida pelas moléculas internas, gerando assim uma resultante (normalmente) na direção da superfície para o líquido, conforme ilustrado pela Figura 2, que apresenta esquematicamente o comportamento das moléculas de uma gota de água depositada sobre um sólido.

Figura 2: Esquematização de forças intermoleculares em um sistema trifásico contendo água, ar e um sólido.



Fonte: Adaptado de Felipe e Dias (2017)

Souza (2018) explica o efeito de contração apresentado na Figura 2 afirmando que tudo na natureza tende a tomar o caminho de menor energia, de modo que para o sistema trifásico exposto, as moléculas de água se aglomeram para gerar a mínima superfície possível com o ar e com o sólido, visto que o ar apresenta maior afinidade pelo sólido.

Sempre que dois fluidos imiscíveis dividem uma interface, a diferença entre as forças intermoleculares das moléculas quimicamente distintas irá fazer com que exista maior energia potencial nas moléculas da interface do que nas interiores ao fluido. Souza (2018) esclarece que “Essa diferença de energia potencial entre as moléculas da interface e as moléculas do corpo,

por unidade de área da interface, é denominada tensão interfacial (no caso de dois líquidos) ou superficial (no caso de um líquido e um gás)” (p. 50).

A energia potencial de uma molécula que compõe um determinado fluido, denominado fluido X, e que está na interface com outro fluido, digamos fluido Y, pode ser calculada considerando as forças de interação entre as moléculas do fluido X e do fluido Y. Deste modo, a diferença de energia das moléculas que estão no interior do fluido, para aquelas presentes na interface pode ser tida como  $\Delta E_X = E_{XX} - E_{XY}$ , onde  $E_{XX}$  se refere a energia de interação entre as próprias moléculas do fluido X e  $E_{XY}$  a energia de interação entre as moléculas do fluido X e do fluido Y. De forma similar,  $\Delta E_Y = E_{YY} - E_{XY}$ , sendo  $E_{YY}$  a energia de interação entre as moléculas do fluido Y.

Com esta definição, é possível calcular a tensão interfacial entre os fluidos seguindo a Equação 1,

$$\sigma = \frac{\Delta E_{tot}}{A_I}, \quad (1)$$

com  $\Delta E_{tot}$  sendo a soma das diferenças de energia ( $\Delta E_X + \Delta E_Y$ ), e  $A_I$  a área da interface entre os fluidos. Conhecendo o conceito microscópico que gera a tensão interfacial, é possível buscar uma compreensão macroscópica do fenômeno. A equação de Young-Laplace descreve a diferença de pressão capilar sustentada através da tensão interface entre dois fluidos estáticos, conforme apresentado abaixo,

$$\Delta p = \sigma \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (2)$$

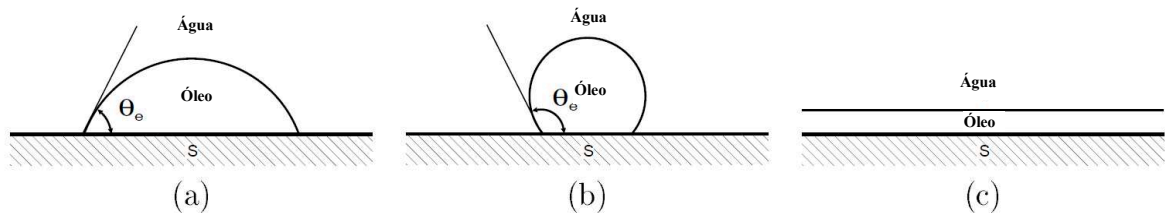
em que  $\Delta p$  é a diferença de pressão e  $R_1$  e  $R_2$  são os raios de curvatura das gotas, respectivamente. Usando um goniômetro e aplicando a Equação 2, é possível mensurar a tensão interfacial entre dois fluidos imiscíveis através do método de gota pendente. Este método foi usado neste trabalho para obter a tensão interfacial entre uma solução de água ultrapura e FC-43, sendo este o par de fluidos usado nos experimentos realizados para determinar o campo de velocidade na região de aprisionamento.

### 2.1.2 Ângulo de contato e molhabilidade

Além da diferença entre as energias potenciais para as moléculas na interface de fluidos imiscíveis, ocorre que um destes fluidos pode apresentar maior afinidade ao sólido, gerando com isso um ângulo entre a linha tangente à interface que separa os fluidos e a linha tangente à superfície do sólido. Essa configuração origina a definição do ângulo de contato estático,  $\theta_e$ .

Esse ângulo de contato é comumente usado para mensurar uma das propriedades mais importantes no escoamento bifásico em microescala, a molhabilidade, pois, quanto maior a afinidade do fluido com o sólido, menor será o ângulo de contato e conseqüentemente mais molhante o fluido será em relação ao outro presente no sistema (WOLF, 2006).

Figura 3: Ângulo de contato ente óleo e água para diferentes sólidos.



Fonte: Adaptado de Wolf (2006)

A Figura 3 ilustra o comportamento do ângulo de contato para diferentes sistemas trifásicos:

- (a) O óleo se espalha sobre a superfície sólida até atingir um ângulo de contato estático menor que  $90^\circ$ . Nesta condição o óleo é considerado molhante ao sólido;
- (b) O óleo se espalha sobre a superfície sólida até atingir um ângulo de contato estático maior que  $90^\circ$ , fazendo com que a água seja considerada molhante e o óleo não-molhante;
- (c) O óleo se espalha completamente, recobrendo toda a superfície sólida. Neste caso, presume-se que  $\theta_e \rightarrow 0$  e se assume que o óleo seja completamente molhante.

Esse comportamento da interface se deve ao modo como as forças intermoleculares dos líquidos agem, pois, conforme Bear (1988) explica, a tensão interfacial age tangencialmente

à superfície da interface entre os líquidos. Para um sistema trifásico, conforme ilustrado pela Figura 3, a configuração mais comum é o surgimento de três interfaces, o que acarreta nas seguintes tensões interfaciais:  $\sigma_{oa}$ ,  $\sigma_{os}$  e  $\sigma_{as}$ , sendo a tensão interfacial entre óleo e água, óleo e sólido e água e sólido, respectivamente.

Estas definições permitem que se chegue na famosa equação de Young,

$$\sigma_{ads} = \sigma_{os} - \sigma_{as} = \sigma_{os} \cos \theta , \quad (3)$$

sendo  $\sigma_{ads}$  a tensão de adesão e  $\theta$  o ângulo de contato entre as fases líquidas. Wolf (2006) comenta que essa equação pode ser usada para compreender a física envolvida na molhabilidade, pois se trata de uma propriedade com origem na competição entre as forças coesivas no líquido e as forças adesivas entre o líquido e o sólido.

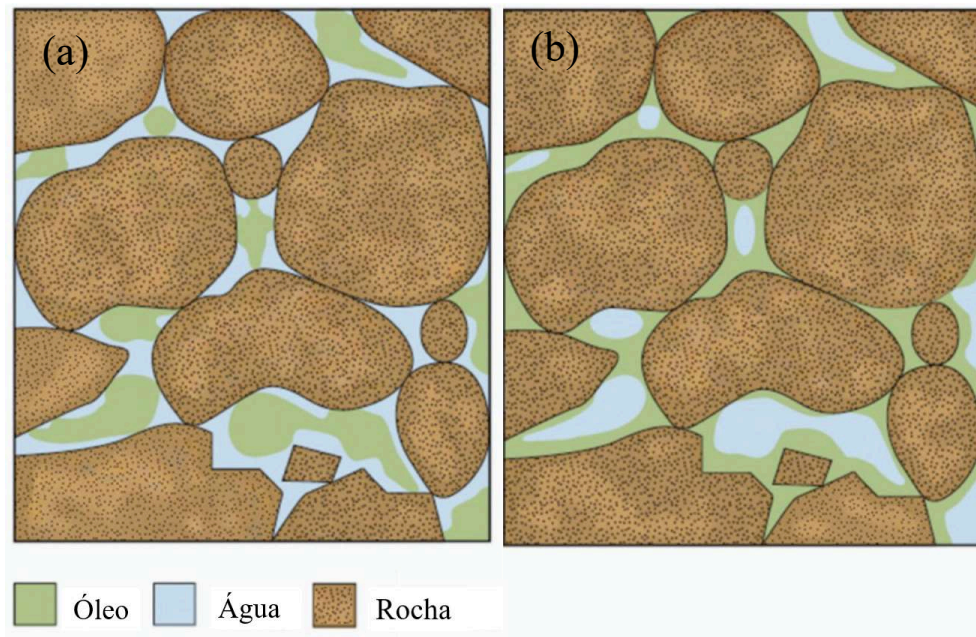
Em escoamentos bifásicos em microescala, a molhabilidade se mostra como uma das propriedades mais influentes, pois, conforme Souza (2018) comenta, em meios porosos a maior parte da superfície rochosa permanece em contato com o fluido molhante, formando uma camada entre a rocha e o outro fluido, conforme observado na Figura 4, que apresenta o comportamento de meios porosos com diferentes condições de molhabilidade. Este comportamento dos fluidos ficou claro nos trabalhos de Chang *et al.* (2009) em suas pesquisas a respeito do fenômeno denominado *snap off*, onde verificaram que o fluido molhante adere a superfície do micromodelo e mesmo que o fluido não-molhante não escoe, uma fina camada do fluido molhante permanece nas paredes e nos cantos do micromodelo.

Este comportamento interfere diretamente em diversos outros parâmetros do escoamento bifásico em meios porosos, como o que ocorre no processo de recuperação de petróleo. De acordo com Souza (2018), a molhabilidade afeta tanto a distribuição de água e óleo no meio poroso quanto a região acessada pela água no processo de recuperação secundário, mas o principal impacto diz respeito à permeabilidade relativa dos fluidos, que se relaciona diretamente com a quantidade de óleo remanescente nos reservatórios após todos os processos de recuperação.

De fato, se um meio poroso apresentar afinidade ao óleo, este tenderá a ficar retido nos poros menores e na superfície dos poros maiores, pois a água injetada no reservatório durante o processo de recuperação secundário avançará buscando um caminho preferencial passando

pelo centro dos poros maiores até alcançar o poço de extração e entrar em regime permanente, de modo que a mesma vazão de água injetada no poço de injeção, é extraída no poço de extração (SOARES, 2016).

Figura 4: Meios porosos contendo água e óleo onde a rocha é molhável a água em (a) e ao óleo em (b).



Fonte: Adaptado de Salas (2014)

### 2.1.3 Forças capilares e viscosas

A capilaridade é um fenômeno que pode ser facilmente observado quando um tubo fino (capilar) é imerso na superfície de um líquido em repouso, conforme ilustrado pela Figura 5. Novamente, três fases estão envolvidas: dois fluidos imiscíveis e um sólido.

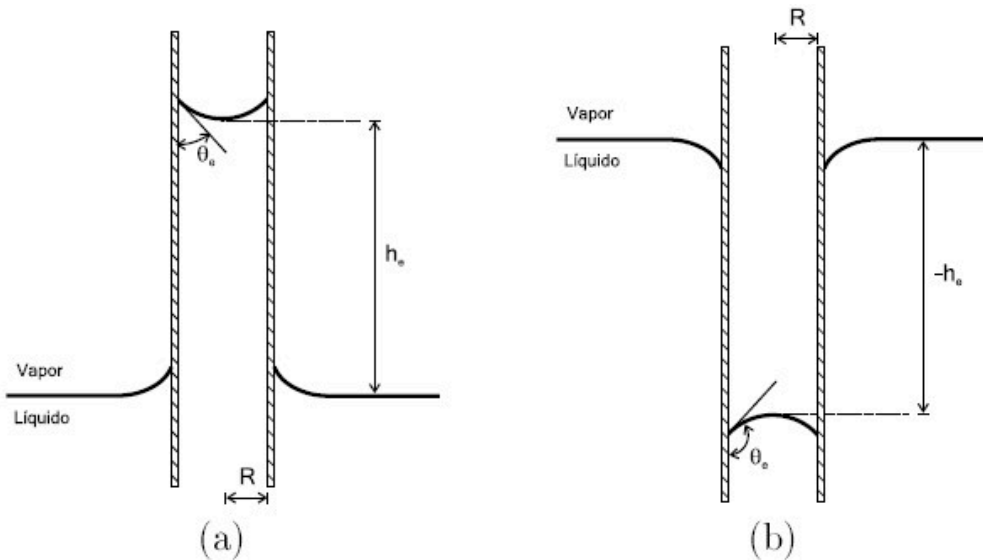
Quando uma das fases fluídicas apresenta maior afinidade pelo sólido, ou seja, o ângulo de contato é menor do que  $90^\circ$ , poderá existir uma diferença positiva  $h_c$  entre a altura da superfície interna e externa do capilar, sendo esta distância definida pelo equilíbrio mecânico entre as forças capilares e a força gravitacional que ocorre devido ao peso da coluna de fluido com maior massa específica.

Para o caso de um sistema em que o ângulo de contato seja maior do que  $90^\circ$ , a interface dos fluidos interna ao capilar poderá estar abaixo da interface externa, de modo que a altura  $-h_c$  será definida pelo equilíbrio entre as forças capilares e a força imposta ao fluido



interno ao capilar devido a diferença de pressão existente entre as posições das interfaces interna e externa ao capilar (WOLF, 2006).

Figura 5: Comportamento dos fluidos em um tubo capilar.



Fonte: Adaptado de Wolf (2006)

Usando esta abordagem, podemos definir a força capilar,  $F_c$ , que deve ser da mesma grandeza que a força gravitacional,  $F_g$ , gerada pela diferença de altura  $h_e$ , sendo esta força definida como  $F_g = \pi r^2 \Delta \rho h_e$ , onde  $r$  é o raio do tubo e  $\Delta \rho$  a diferença de massa específica dos fluidos. Deste modo, a força capilar será definida como  $F_c = 2\pi r \sigma_{LV} \cos \theta$ , sendo  $\sigma_{LV}$  a tensão interfacial entre as fases líquido e vapor e  $\theta$  o ângulo de contato (WOLF, 2006). Apesar de estar sendo considerado um sistema trifásico composto por um sólido, um líquido e um vapor, ou um gás, esta definição para a força capilar pode ser usada para quaisquer fluidos.

Quando se trata de fluidos em movimento, porém, a força capilar é usada juntamente com as forças viscosas para que um número adimensional seja determinado. A definição do número capilar é muito interessante quando se deseja comparar diferentes tipos de escoamentos. Esta cria uma relação direta entre as forças capilares e viscosas dos fluidos imiscíveis presentes no sistema, podemos definir condições nas quais determinados escoamentos ocorrem, como o exemplo do processo de recuperação de petróleo que se dá em números capilares entre  $10^{-5}$  e  $10^{-7}$  (CHATZIS; MORROW, 1984).

Schneider (2011) explica que dentre os diversos trabalhos já realizados para investigar o comportamento de escoamentos multifásicos em microescala, dois parâmetros se mostram dominantes: o número capilar,  $Ca$ ,

$$Ca = \frac{\mu_i V}{\sigma}, \quad (4)$$

e a razão entre viscosidades,  $M$ ,

$$M = \frac{\mu_i}{\mu_d}, \quad (5)$$

onde  $\mu_i$  e  $\mu_d$  são respectivamente as viscosidades dinâmicas dos fluidos injetado e deslocado,  $V$  a velocidade média do escoamento e  $\sigma$  a tensão interfacial entre os fluidos.

Uma vez que estes parâmetros dependem apenas das propriedades dos fluidos, é possível caracterizar o problema somente com esses dois números adimensionais seguindo o teorema da similaridade. Deste modo podem ser realizados diversos experimentos em laboratórios definindo os padrões de comportamento do escoamento com base em suas propriedades e, posteriormente, fazer comparações entre os experimentos com base nos valores encontrados para o número capilar e razão entre viscosidades adotados (SCHEIDER, 2011).

#### 2.1.4 Micromodelo

De acordo com Buchgraber (2013), os micromodelos são a principal ferramenta usada para investigar o comportamento de fluidos em escala micrométrica na indústria do petróleo, pois oferecem aos pesquisadores a possibilidade de visualizar o escoamento através de poros e canais que representam o meio onde o petróleo e o gás se encontram.

Produzidos normalmente a partir de materiais transparentes, como vidro e polímero, os micromodelos são fabricados de modo a reproduzir as diferentes geometrias encontradas nos reservatórios de petróleo. A configuração dos microcanais será de acordo com os objetivos do experimento que se busca realizar. Modelos mais simples, como os microcanais apresentados na Figura 6, podem ser projetados para que um fenômeno específico seja investigado, enquanto que modelos complexos podem ser feitos com base nas informações de uma rocha para estudar o comportamento dos fluidos escoando em meios porosos reais (FOLLES, 2012).

Neste trabalho, um escoamento é denominado bifásico quando dois fluidos imiscíveis estão presentes no mesmo meio. Com o uso de micromodelos é possível observar este tipo de condição quando um destes fluidos é injetado para que o outro seja removido, buscando simular o que ocorre no processo de recuperação de petróleo secundário em que água, ou outro fluido, é injetada no reservatório para manter ou elevar a pressão interna do mesmo a fim de que mais petróleo seja recuperado. (MUGGERIDGE, 2014).

Figura 6: Micromodelo com diversos microcanais utilizados para reproduzir no laboratório fenômenos que ocorrem no processo de recuperação de petróleo.

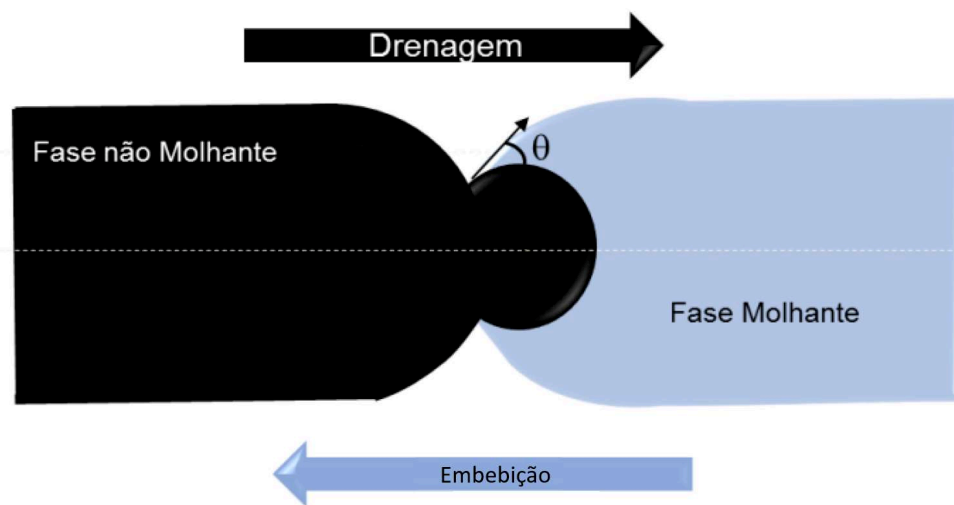


Fonte: Autor

A utilização de micromodelos que permitem visualizar o comportamento da interface durante escoamentos bifásicos propicia que diversas análises sejam feitas gerando dados qualitativos, ou no caso da utilização da técnica  $\mu$ PIV podem ser gerados dados quantitativos para diferentes condições do escoamento.

De acordo com Salas (2014) micromodelos que apresentam a superfície dos canais homogêneas permitem a realização, em termos gerais, de dois tipos de experimentos. Ensaios em que o fluido a ser injetado tem maior afinidade ao sólido em comparação ao outro fluido, são denominados de embebição. Já quando o fluido injetado, tem menos afinidade ao sólido, ou seja, é o fluido não-molhante, o experimento é denominado de drenagem. Um esquema dos processos de embebição e drenagem são apresentados na Figura 7.

Figura 7: Ilustração dos processos de drenagem e embebição.

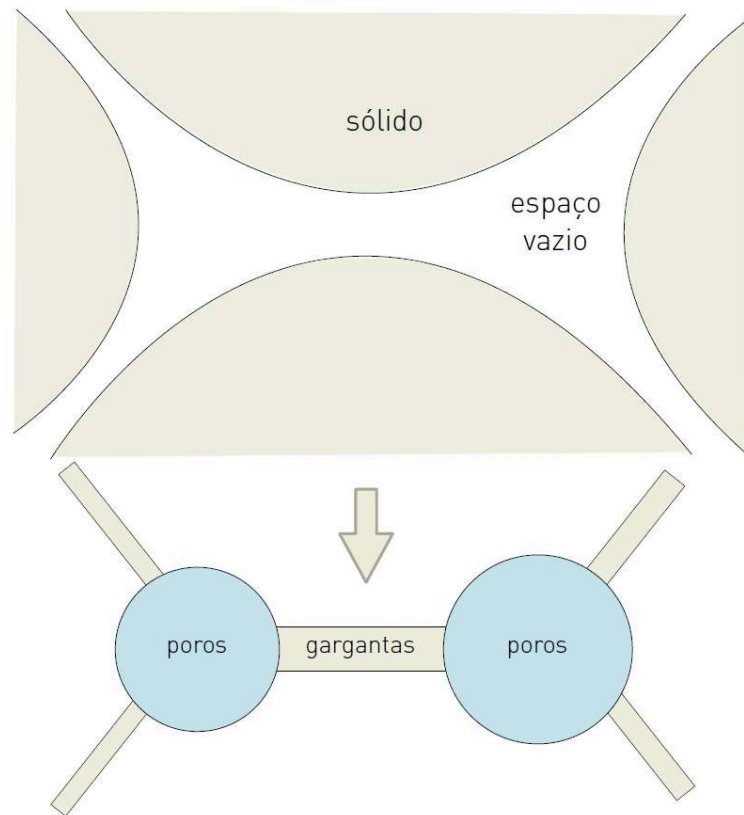


Fonte: Adaptado de Sales (2014)

### 2.1.5 Poro de duplo canal

Visto que o meio poroso é formado por uma estrutura totalmente irregular de poros e canais interconectados, é comum que sejam adotados modelos simplificados, Figura 8, que possibilitem a avaliação dos fenômenos desejados. Enfatizando a fase porosa, pois é através dela que ocorre o escoamento dos fluidos, um modelo comumente adotado é a denominação de poros para os grandes espaços vazios que funcionam como captadores, ao passo que os espaços vazios pequenos que fazem a conexão entre os poros são tratados como canais e recebem o nome de gargantas (CUNHA, 2012).

Figura 8: Representação do meio poroso em um modelo simplificado de poros e gargantas.



Fonte: Adaptado de Cunha (2012).

Dado que um mesmo poro pode ser acessado por diversas gargantas que possuem diferentes dimensões, existirá a tendência de que a fase deslocada (geralmente o óleo) fique aprisionada em uma destas gargantas. Quando se busca compreender os mecanismos físicos responsáveis pelo aprisionamento de uma fase por outra em processos de deslocamento imiscível, costuma ser utilizado o modelo idealizado do poro de duplo canal apresentado na Figura 1 (CHATZIS; DULIEN, 1983).

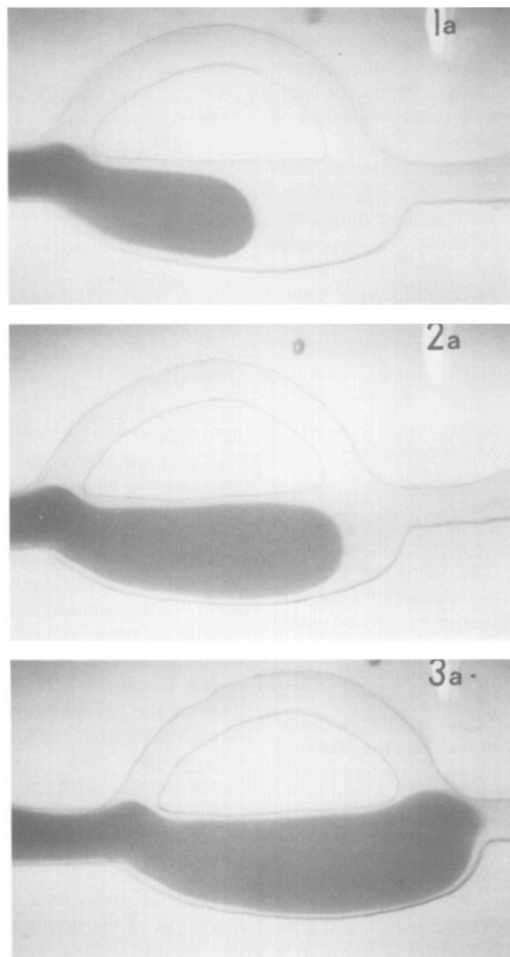
Este modelo representa dois capilares com diferentes dimensões acoplados entre si, sendo utilizado na compreensão das relações entre forças capilares e viscosas que acarretam no aprisionamento da fase deslocada, criando assim condições para que o fenômeno seja investigado.

Conforme Chatziz e Dullien (1983) explicam, o poro de duplo canal foi usado em diversas pesquisas para tentar entender os fenômenos que acarretam no aprisionamento de um fluido por outro durante escoamentos bifásicos na microescala. Eles comentam que apesar dos

diversos trabalhos que foram feitos, ainda existem dúvidas quanto ao comportamento dos fluidos e até mesmo trabalhos que se contradizem neste quesito. Assim, no trabalho de Chatziz e Dullien (1983) foram realizados diversos experimentos com o propósito de esclarecer as controvérsias encontradas na literatura definindo leis que governam o deslocamento de um fluido por outro nos escoamentos em microescala para os processos de drenagem e embebição.

Nos experimentos do tipo drenagem Chatziz e Dullien (1983) mostram que o fluido não molhante irá alcançar a região de bifurcação e não penetrará no canal menor da geometria, passando a escoar apenas pelo canal maior, conforme observado na Figura 9.

Figura 9: Deslocamento do N-decano pelo modelo de duplo canal saturado com água.



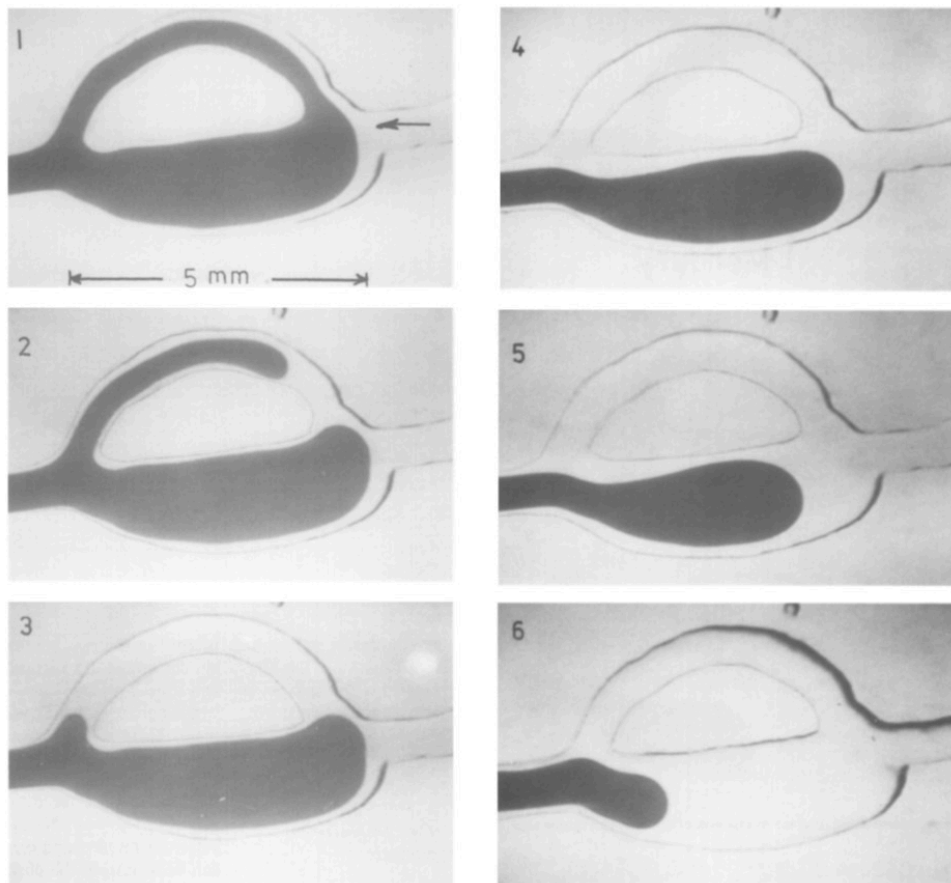
Fonte: Adaptado de Chatziz e Dullien (1983)

No experimento que gerou a Figura 9 foram utilizados como fluido molhante e não-molhante água e N-decano, respectivamente. Chatziz e Dullien (1983) comentam que mesmo elevando a vazão do fluido injetado, que no caso é o N-decano, o fluido molhante permanece

aprisionado sem nenhuma alteração. Eles ainda fizeram outro experimento em que gás foi usado como fluido não-molhante e obtiveram o mesmo resultado, afirmando então que sempre que o fluido não molhante for injetado, este escoará pelo canal mais largo do poro de duplo canal, deixando o fluido molhante aprisionado no canal menor.

Experimentos de embebição espontânea mostraram que o aprisionamento de fluido não ocorre para este processo, uma vez que o fluido molhante preenche os dois canais do modelo. Conforme observado na Figura 10, o fluido molhante alcança a bifurcação e passa a deslocar o fluido não-molhante presente no menor canal da geometria, porém quando alcança o fim da bifurcação, o canal maior também começa a ser preenchido pelo fluido molhante até a completa saturação do micromodelo. (CHATZIZ e DULLIEN, 1983).

Figura 10: Processo de embebição espontânea em que a água usada como fluido molhante está deslocando o N-decano.



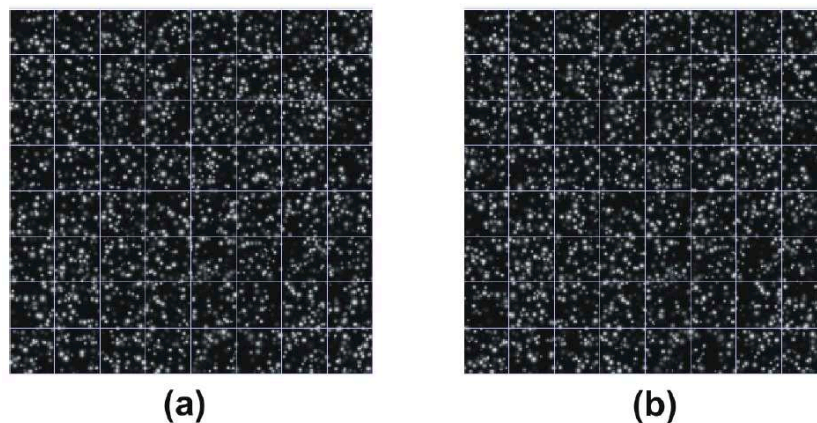
Fonte: Adaptado de Chatziz e Dullien (1983)

## 2.2 VELOCIMETRIA POR IMAGEM DE PARTÍCULAS

A realização do experimento ao qual será aplicada a técnica  $\mu$ PIV é razoavelmente simples. Primeiro deve ser definida uma região que será monitorada, na qual será injetado um fluido que possui partículas traçadoras dispersas. Durante o escoamento, a região de interesse é iluminada de modo a destacar as partículas traçadoras. No instante em que a região é iluminada são feitas capturas, gerando assim pares de imagens. Estas imagens são processadas, buscando se observar o deslocamento das partículas de uma imagem para a outra, possibilitando com isso a determinação do campo de velocidade do fluido (LINDKEN *et al.*, 2009).

O processamento das imagens é realizado seguindo uma metodologia bem estabelecida e que apresenta resultados com uma margem de erro pequena. Meinhart *et al.*, (1999) realizaram experimentos com  $\mu$ PIV e alcançaram resultados que apresentam uma diferença da ordem de 2% entre os resultados experimentais e teóricos. Dentro da escala de grandezas utilizadas, eles apontam que esta diferença é a menor banda possível para as medições  $\mu$ PIV no procedimento adotado.

Figura 11: Exemplo de par de imagem dividido em janelas de interrogação.



Fonte: Adaptado de Miranda (2004)

Essa metodologia consiste em subdividir as imagens em janelas de interrogação, conforme mostrado na Figura 11, sendo sua dimensão determinada por uma relação entre o diâmetro da partícula, a velocidade do escoamento, o tamanho da imagem em pixels e a taxa de captura da câmera. Para cada janela de interrogação o software define o ponto com maior intensidade luminosa, sendo esse ponto calculado com base em uma média dos pixels presentes na janela. Esse padrão de pixels é calculado para a primeira imagem do par sendo estabelecida



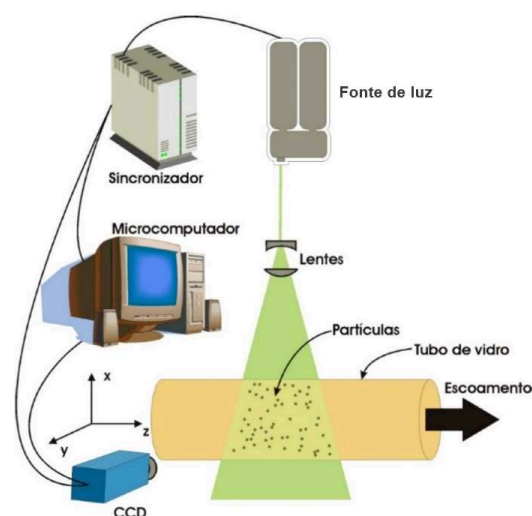
uma referência para as janelas de interrogação. Posteriormente, avaliando a segunda imagem, o software define uma nova posição para as janelas de interrogação por meio de uma correlação espacial cruzada. Os vetores velocidade são encontrados dividindo-se os deslocamentos das janelas de interrogação pelo tempo entre as imagens (RAFFEL *et al.*, 2007).

O intervalo de tempo entre as duas imagens deve ser suficientemente longo para permitir que o deslocamento das partículas traçadoras entre as imagens subsequentes seja determinado com resolução satisfatória, mas também curto o suficiente para evitar a deformação excessiva do padrão formado pelas partículas de uma imagem para a outra (LINDKEN *et al.*, 2009).

### 2.2.1 Configuração experimental

A configuração experimental de um sistema  $\mu$ PIV geralmente consiste em vários subsistemas, conforme mostrado na Figura 12. Na maioria das aplicações, as partículas traçadoras devem ser adicionadas ao escoamento. Essas partículas devem ser iluminadas em um plano do escoamento pelo menos duas vezes dentro de um curto intervalo de tempo, produzindo um par de imagens, que posteriormente são processadas para a determinação do campo de velocidade. (MIRANDA, 2004).

Figura 12: Configuração dos componentes de uma bancada experimental para coleta de imagens  $\mu$ PIV.



Fonte: Adaptado de Miranda (2004)

Miranda (2004) explica que:

O tubo de vidro onde se desenvolve o escoamento está representado na horizontal (eixo  $z$ ), e encerra o escoamento ao qual foram adicionadas as partículas traçadoras. Os *lasers*, responsáveis pela iluminação das partículas, passam por um conjunto de lentes que os conforma em um feixe plano e de pequena espessura. Este feixe atravessa o duto e ilumina a região de interesse, o plano  $xz$ . As partículas refletem luz, que é captada por uma câmera denominada CCD (do inglês *Charged Coupled Device*), montada perpendicularmente ao plano iluminado. A imagem resultante é transferida para o disco rígido de um microcomputador através de um captador de quadros, uma placa de aquisição de sinais montada no microcomputador e ligada diretamente no CCD. Após um breve intervalo de tempo (em torno de algumas centenas de milissegundos), o sincronizador ordena o disparo do segundo laser e a segunda imagem é armazenada. (p.14)

### 2.2.2 Região do escoamento

A bancada experimental para se realizar uma gravação  $\mu$ PIV precisa ser montada respeitando os objetivos do experimento e as limitações dos equipamentos. Devido à utilização de vários equipamentos, todos os parâmetros para uma medição devem ser escolhidos criteriosamente. São estes: região do escoamento, densidade de partículas, iluminação, óptica, implementação dos algoritmos  $\mu$ PIV e os padrões para tratamento de imagem (RAFFEL *et al.*, 2007).

A região onde será escoado o fluido normalmente é definida pelo tipo de experimento que se deseja fazer. O micromodelo usado nos experimentos realizados neste trabalho foi projetado pelo autor seguindo as relações dimensionais especificadas por Chatzis e Dullien (1983).

### 2.2.3 Partículas Traçadoras

O fluido deve ser transparente ao comprimento de onda da iluminação, então, determinando a iluminação a ser utilizada, já se restringe o fluido. Ao definir o fluido, podemos escolher as partículas adequadas, pois estas devem ter uma massa específica próxima à do fluido, a fim de garantir que o campo de velocidade observado no experimento seja o mais próximo possível ao do escoamento natural (RAFFEL *et al.*, 2007).

Além da massa específica, deve ser avaliado o diâmetro das partículas, pois quanto maior o diâmetro, mais luz será refletida, facilitando sua visualização no plano observado. Por outro lado, partículas maiores, devido a sua inércia, podem perturbar o escoamento em locais onde ocorrem mudanças bruscas de direção ou velocidade. Deste modo, é preciso encontrar um ponto ótimo entre o tamanho das partículas, o tipo de escoamento e os canais pelo qual o fluido passará (LINDKEN *et al.*, 2009).

O tamanho das partículas deve ser significativamente menor do que o diâmetro do menor canal pelo qual o fluido irá escoar. Lindken *et al.* (2009) sugerem que essa diferença seja de pelo menos duas ordens de grandeza, entretanto, alertam que é preciso se atentar ao fato de que quanto menor o tamanho da partícula, maior poderá ser o erro devido ao movimento Browniano ( $\varepsilon$ ):

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{2}{\Delta t} \frac{k_B T}{3\pi\mu d_p}}, \quad (6)$$

em que  $\Delta t$  é o tempo entre as imagens,  $k_B$  é a constante de Boltzmann,  $T$  a temperatura,  $\mu$  a viscosidade dinâmica do fluido e  $d_p$  o diâmetro da partícula. Para experimentos em microescala é recomendado o uso de partículas entre 0,5 e 1,5  $\mu\text{m}$  (LINDKEN *et al.*, 2009).

Santiago *et al.* (2015) afirmam que é importante calcular o tempo de resposta das partículas, pois vários experimentos mostraram que ocorrem saltos de Haines durante o escoamento de fluidos imiscíveis em micromodelos, o que poderá não ser avaliado da forma correta, caso o tempo de resposta seja elevado. Roman *et al.* (2016) comentam que estes saltos podem gerar velocidades de escoamento dez vezes maiores do que a velocidade de injeção. Por esse motivo Lindken *et al.* (2009) sugerem que as partículas sejam escolhidas criteriosamente para que tenham um tempo de resposta muito baixo, permitindo com isso, uma correta interpretação do campo de velocidade do fluido durante estes saltos.

O tempo de resposta,  $\tau$ , pode ser definido por:

$$\tau = \sqrt{\frac{\rho_p d_{poro}^2}{\rho_f 18 \nu}}, \quad (7)$$

em que  $\rho_p$  é a densidade da partícula,  $\rho_f$  a densidade do fluido,  $d_p$  é o diâmetro do poro e  $\nu'$  a viscosidade cinemática do fluido (LINDKEN *et al.*, 2009).

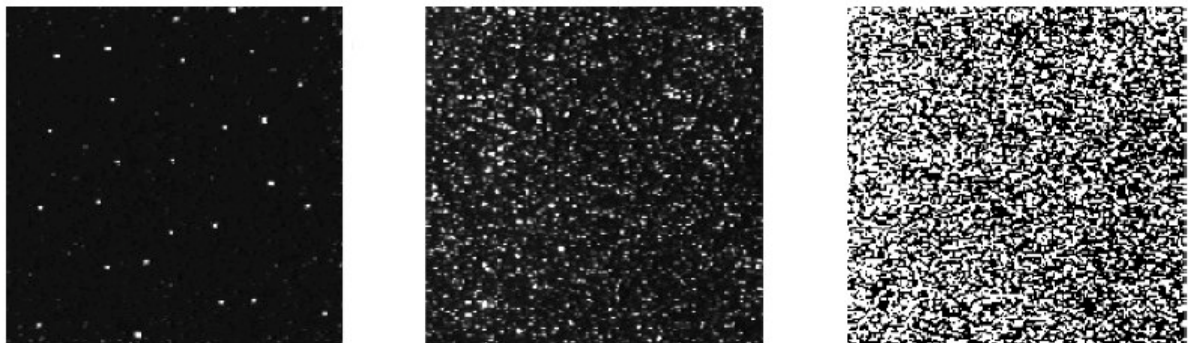
Conhecendo a velocidade que será imposta ao escoamento e obtendo o valor para o tempo de resposta, conforme calculado com a Equação 7, é possível calcular o número de Stokes,  $Stk$ , um número adimensional que caracteriza o comportamento de partículas suspensas em um escoamento de fluido (RAFFEL *et al.*, 2007). Este número é definido como a proporção do tempo característico de uma partícula, para um tempo característico do escoamento, ou de um obstáculo, e é calculado conforme a equação abaixo:

$$Stk = \frac{tu_0}{l_0}, \quad (8)$$

onde  $u_0$  é a velocidade longe do obstáculo e  $l_0$  é a dimensão característica do obstáculo (RAFFEL *et al.*, 2007).

Outro parâmetro importante que deve ser ajustado conforme os objetivos do experimento é a densidade de imagem. De acordo com Miranda (2004), três tipos diferentes de densidade de imagens podem ser distinguidos, observados na Figura 13. No caso de baixa densidade, as imagens de partículas individuais podem ser detectadas, possibilitando a identificação das mesmas em ambas as imagens do par.

Figura 13: Exemplos de densidade de imagem.



Fonte: Adaptado de Miranda (2004)

No caso da densidade média, as imagens das partículas individuais também podem ser detectadas. No entanto, não é possível identificar o movimento das partículas entre as imagens subsequentes por inspeção visual. A densidade média da imagem é necessária para aplicar as técnicas padrão de avaliação estatística  $\mu$ PIV de correlação cruzada, e é usada quando se busca

obter o perfil de velocidades do escoamento, pois é feito o acompanhamento do conjunto de partículas entre os pares de imagens (MIRANDA, 2004).

No caso de alta densidade de imagem, nem sequer é possível detectar imagens individuais à medida que as partículas se sobrepõem na maioria dos casos e formam manchas. Esta densidade é usada para outra técnica, chamada de *Laser Speckle Velocimetry* (LSV) (MIRANDA, 2004).

#### 2.2.4 Iluminação

É necessário garantir que a fonte de luz consiga causar o reflexo nas partículas traçadoras. A utilização de partículas maiores, por causa de sua melhor eficiência de dispersão ou emissão de luz, está em contradição com a demanda de ter partículas tão pequenas quanto possível para que sigam o escoamento fielmente (RAFFEL *et al.*, 2007).

Lindken *et al.* (2009) explicam que é preciso se atentar ao modo como a fonte de luz será sincronizada com a câmera que fará a captura das imagens, pois o tempo entre as imagens e a duração dos pulsos de luz dependem da velocidade do escoamento.

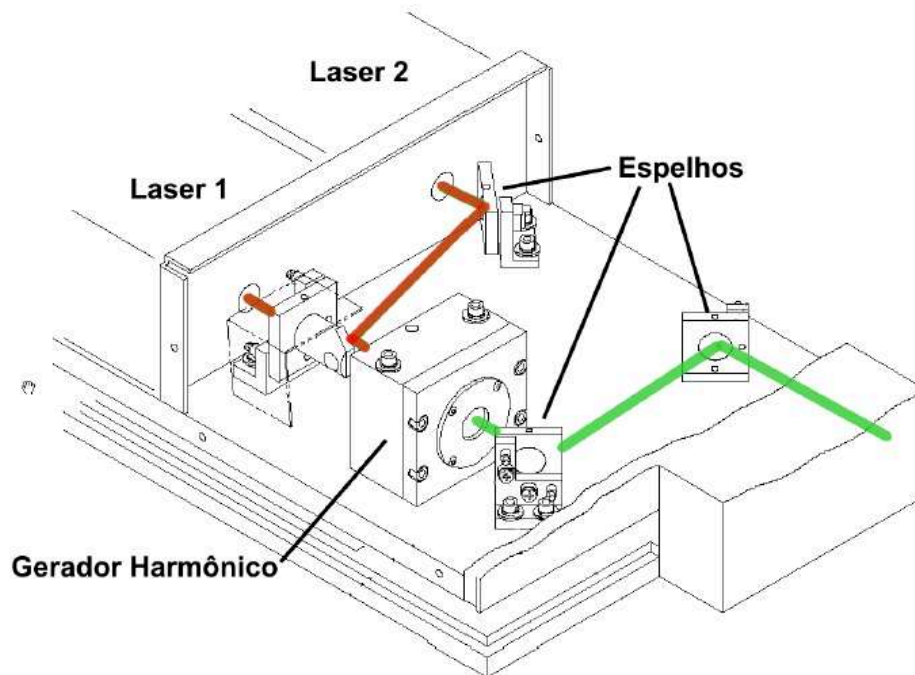
Raffel *et al.* (2007) comentam que a realização mais simples de um experimento  $\mu$ PIV é conseguida utilizando um microscópio equipado com uma lâmpada para iluminação contínua e uma câmera digital em modo vídeo que grava imagens sucessivas, sendo esta configuração adequada para escoamentos lentos e baixas ampliações.

Para escoamentos rápidos ou quando usada alta ampliação para visualização e captura das imagens, Lindken *et al.* (2009) explicam que o intervalo de tempo entre duas capturas consecutivas pode ser muito grande, resultando em borrões de movimento das partículas e decorrelação do sinal entre as imagens devido ao gradiente de velocidades.

Deste modo, é conveniente que exista uma sincronização, entre a fonte de luz e a câmera digital, por uma unidade de temporização. A sincronização é feita de forma que o primeiro pulso de luz seja ajustado no final da primeira gravação da câmera e o segundo pulso seja configurado em um momento arbitrário na segunda gravação. Com isso, o intervalo de tempo  $\Delta t$  é independente da taxa de quadros da câmera, mas definido pelo intervalo de tempo entre os dois pulsos de luz sincronizados, que pode ser definido com base na velocidade do escoamento estudado (LINDKEN *et al.*, 2009).

É preciso garantir que a duração do pulso de luz da iluminação seja suficientemente curto para congelar o movimento das partículas durante a exposição, a fim de evitar a desfocagem da imagem ou fazer com que as imagens das partículas fiquem alongadas ao invés de circulares (RAFFEL *et al.*, 2007).

Figura 14: Configuração de um sistema de iluminação utilizando dois lasers para reduzir o tempo entre as imagens a serem capturadas.

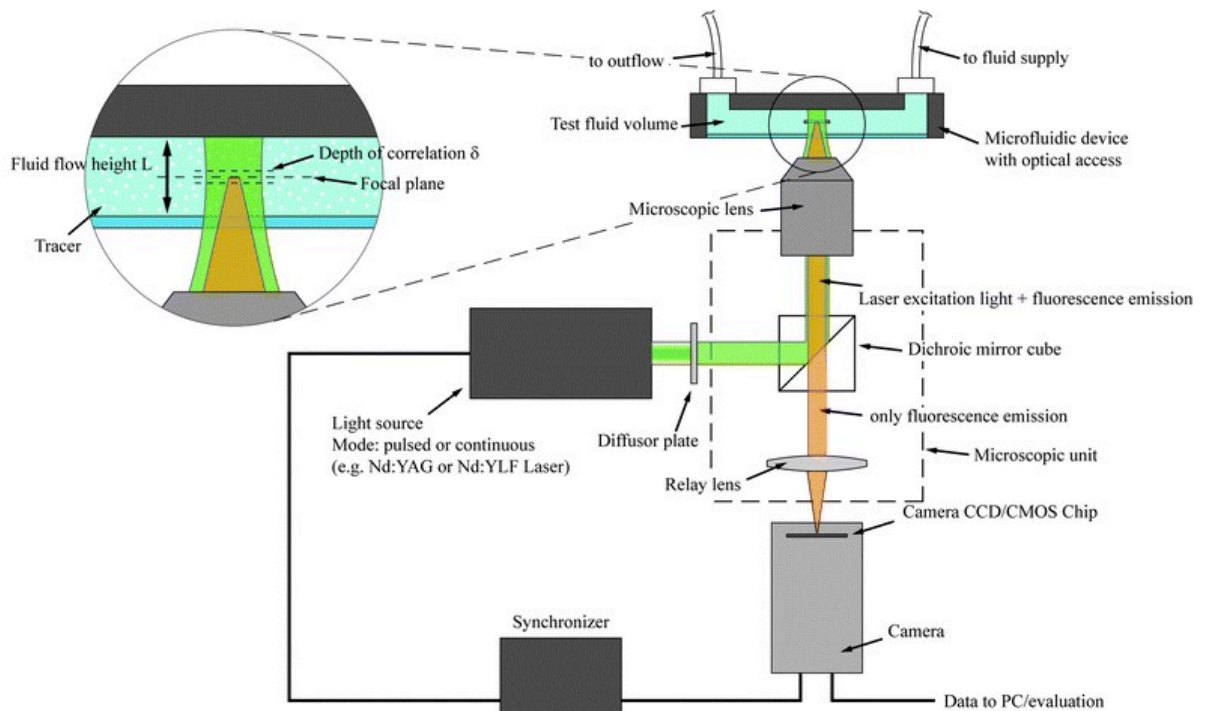


Fonte: Adaptado de Miranda (2004)

Para reduzir o tempo entre as iluminações é montado um sistema com dois lasers, conforme mostrado na Figura 14. O tempo de atraso entre os pulsos de iluminação deve ser suficientemente longo para se poder determinar o deslocamento entre as imagens das partículas traçadoras com resolução satisfatória, e suficientemente curto para evitar que partículas com um componente de velocidade para fora do plano não sejam capturadas entre as iluminações subsequentes (MIRANDA, 2004).

Lindken *et al.* (2009) explicam que uma alternativa para experimentos com  $\mu$ PIV, é o uso de fluorescência induzida por laser, conforme exemplo apresentado na Figura 15, pois este método elimina grande parte do ruído causado pela fonte de iluminação e reflexo dos demais componentes da região iluminada.

Figura 15: Esquema de iluminação utilizando um sistema de fluorescência induzida.

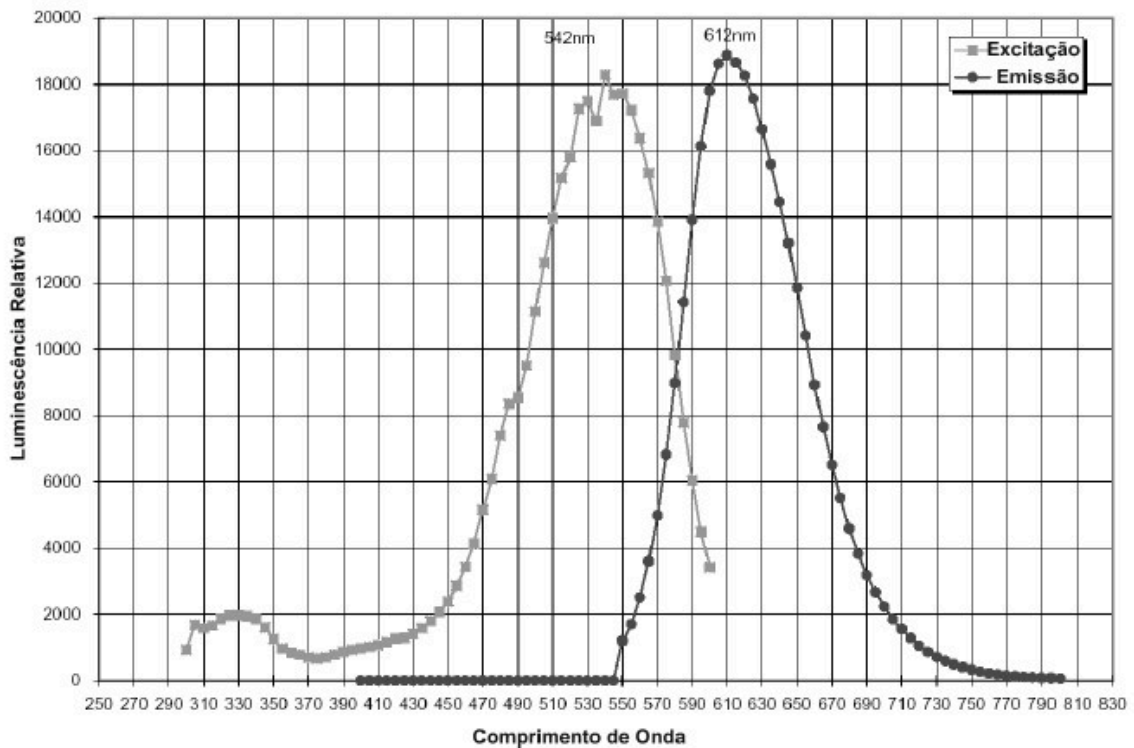


Fonte: Adaptado de Lindken *et al.* (2009)

Neste sistema de iluminação, uma fonte luminosa incide luz sobre o plano investigado com um comprimento de onda capaz de excitar as partículas. Após excitadas, as partículas passam a emitir luz em um comprimento de onda maior, conforme mostrado na Figura 16. É utilizado então um filtro óptico que bloqueia a maior parte da luz emitida pela fonte e também aquela refletida pelas paredes do micromodelo, fazendo com que a câmera registre sobretudo a luz emitida pelas partículas (LINDKEN *et al.*, 2009).

Com o auxílio do software utilizado para a captura das imagens, é possível eliminar totalmente o ruído luminoso remanescente, fazendo com que somente as partículas sejam visualizadas nas imagens geradas.

Figura 16: Diferença entre o comprimento de onda emitido pelo laser e pelas partículas.



Fonte: Adaptado de Miranda (2004)

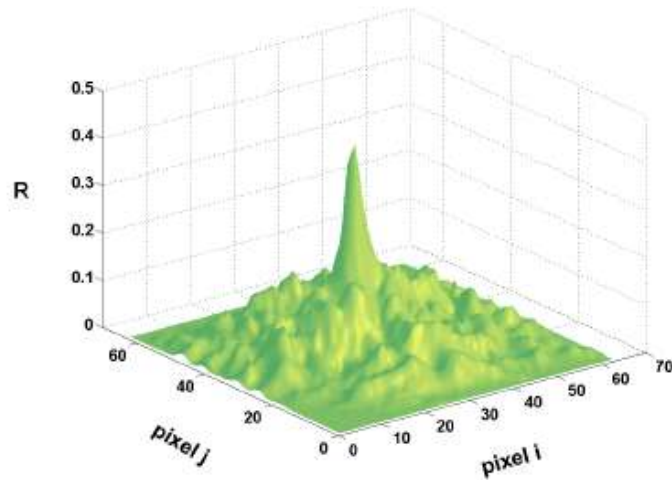
## 2.2.5 Óptica

A óptica envolvida no experimento é muito importante uma vez que o conceito da técnica está baseado na captura de imagens das partículas traçadoras presentes no fluido durante o escoamento. Estas imagens são divididas em janelas de interrogação, com tamanho suficientemente pequeno para que o deslocamento de partículas na região seja uniforme, e suficientemente grande para que a partícula não saia da janela de interrogação na imagem subsequente (LAAN, 2001).

Raffel *et al.* (2007) explicam que a posição central da imagem das partículas é determinada em função da intensidade luminosa captada pela câmera, conforme observado na Figura 17. O conjunto de partículas presente em uma janela de interrogação é padronizado de modo que o ponto com maior intensidade luminosa seja definido como o centro desta janela de interrogação.



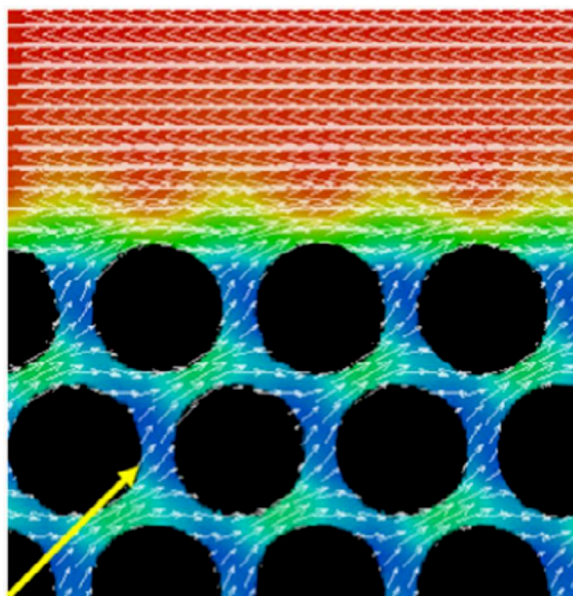
Figura 17: Posição da partícula definida a partir da intensidade luminosa.



Fonte: Adaptado de Miranda (2004)

Estes padrões são identificados nas imagens gravadas nos tempos  $t_1$  e  $t_2$ , e comparados estatisticamente, ou seja, uma análise de correlação espacial é realizada. O procedimento é repetido para todas as janelas de interrogação resultando em uma matriz com informações de deslocamentos, sendo estimados assim os vetores velocidade de todo o plano observado, conforme Figura 18 (ROMAN *et al.*, 2016).

Figura 18: Campo de velocidade entre os escoamentos de dois fluidos imiscíveis.



Fonte: Adaptado de Roman *et al.* (2016)

Para fazer a captura das imagens é necessária uma câmera apropriada. As principais características que devem ser avaliadas são: resolução, tamanho dos pixels, taxa de captura e sensibilidade a luz. Câmeras sofisticadas aumentaram muito os limites dos experimentos que podem ser feitos utilizando a técnica  $\mu$ PIV, pois avanços na sensibilidade de captura (na ordem de 0,01 Lux) e velocidade de captura das imagens (na ordem de 1  $\mu$ s) permitem que sejam realizados experimentos com maiores velocidades dos fluidos investigados e precisão dos dados adquiridos (LAAN, 2001).

### 2.2.6 Avanços da técnica $\mu$ PIV

Observando o número de possibilidades que a técnica PIV pode trazer à investigação de escoamentos em microescala é esperado que diversos trabalhos utilizando a técnica sejam realizados. Entretanto, devido a sua complexidade e por se tratar de uma técnica relativamente nova, muitos avanços podem ser feitos a fim de que sejam obtidos dados confiáveis sobre escoamentos que ocorrem em geometrias específicas ou que modelam o meio poroso.

Os problemas e as dificuldades enfrentadas pela realização de medições  $\mu$ PIV são numerosas e devem ser tratadas com atenção especial. Os sistemas  $\mu$ PIV geralmente usam sistemas ópticos complexos e caros, incluindo uma fonte de luz de alta potência, partículas traçadoras fluorescentes, um microscópio epifluorescente, uma câmera de alta velocidade para captura das imagens e filtros ópticos para bloquear os distúrbios de luz não fluorescentes. Além de toda essa complexidade sabe-se que dados gerados com a técnica podem produzir resultados que não são representativos das propriedades reais do escoamento e que devem ser validados antes de serem usadas com confiança (ROMAN *et al.* 2016).

Sen, Nobes e Mitra (2011) usaram a técnica  $\mu$ PIV para estudar os campos de velocidade em quatro regiões espaciais diferentes em um meio poroso. Em seu trabalho eles usaram um micromodelo formado por esferas de vidro com 200  $\mu$ m de diâmetro dispostas lado a lado buscando representar uma rede de poros de 10 a 50  $\mu$ m conectada. Foram usadas partículas com revestimento fluorescente de 2  $\mu$ m de diâmetro dispersas em água deionizada, sendo este o fluido de trabalho. Para eliminar o excessivo ruído gerado pelas paredes do micromodelo, foi usado um sistema que conta com um laser que emite luz verde e assim excita as partículas, então um filtro óptico é colocado entre a lente objetiva e a câmera para que a luz vermelha, emitida pelas partículas, seja capturada. O objetivo da pesquisa foi investigar de

forma detalhada o escoamento na escala de poros em diferentes localizações para obter o campo de velocidade bidimensional em vazões de 40, 60, 80 e 100  $\mu\text{l}/\text{min}$ .

Dando um passo a mais neste tipo de pesquisa, Blois, Barros e Christenses (2015) realizaram experimentos bifásicos com uma rede porosa bidimensional formada por cilindros circulares. Para eliminar o ruído gerado nas imagens, eles também utilizaram um sistema de fluorescência induzida com filtro óptico, porém, uma vez que foram usados dois fluidos, foi necessário usar partículas diferentes em cada fluido sendo estas revestidas com diferentes fluorescências. FluoSpheres<sup>®</sup> Microesferas modificadas com carboxilato (580/605 nm, Life Technologies Corporation) foram dispersas no glicerol aquoso, enquanto microesferas de sílica lipofílica (540/575 nm, Discovery Scientific Inc.) fabricadas especificamente para dispersão em óleo foram usadas para a fase oleosa de silicone. Com esta configuração, apesar da luz emitida sobre as partículas possuir uma faixa de comprimento de onda específica, as partículas presentes em cada fluido tinham o seu pico de emissão em faixas diferentes, permitindo assim a identificação de cada fluido.

Como pode ser observado, a complexidade da técnica aumenta significativamente com a investigação de duas fases, tornando o seu uso inapropriado em diversas pesquisas, devido ao alto custo envolvido. Uma solução para isso foi trazida por Roman *et al.* (2016) que realizaram um trabalho buscando aplicar a técnica  $\mu\text{PIV}$  em escoamentos bifásicos tendo como objetivo usar equipamentos simples aliados a uma aquisição e processamento de imagens eficiente. Como não foi usado um sistema de fluorescência o procedimento experimental utilizou apenas um microscópio óptico e uma câmera para a captura das imagens. Entretanto, um esforço muito maior precisou ser aplicado no processamento das imagens, para que o software usado na obtenção dos dados PIV pudesse fazer os cálculos e gerar dados com níveis de incertezas aceitáveis.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 BANCADA EXPERIMENTAL

A bancada experimental foi projetada especialmente para que fossem realizados experimentos utilizando a técnica  $\mu$ PIV em escoamentos de baixa velocidade aplicados a micromodelos. Para isso foram adquiridos diversos equipamentos e materiais apropriados, a fim de que todos os procedimentos necessários para realizar as gravações  $\mu$ PIV estivessem disponíveis. A Figura 19 apresenta os principais equipamentos da bancada.

Figura 19: Bancada experimental utilizada no trabalho para a execução da técnica  $\mu$ PIV.



Fonte: Autor.

Entretanto, apesar da complexidade da técnica e especificidade dos equipamentos, um dos objetivos do trabalho é montar uma bancada com a maior simplicidade e menor custo possíveis, para que os experimentos possam ser reproduzidos em outros laboratórios que disponham de equipamentos similares. Os principais componentes da bancada são: um microscópio com câmera para fazer a captura das imagens, o micromodelo, uma fonte de luz

de alta potência, as partículas traçadoras que são adicionadas ao fluido e o software utilizado no processamento de dados. Além destes componentes, diversos dispositivos e equipamentos estão disponíveis para que seja possível a realização dos experimentos, sendo estes descritos na seção 3.1.4.

### 3.1.1 Microscópio

O conjunto de equipamentos usados para fazer a captura das imagens é formado por um microscópio invertido trinocular Zeiss modelo Axio Observer 3, que possui sistema de iluminação refletida emitida por uma fonte luminosa LEJ HXP de 120 W para fluorescência, com caminho óptico que possui lentes apocromáticas e dois filtros, sendo um para temperatura de cor *yellow/green* (525 – 575 nm) e outro para *nile red* (535 – 590 nm). O microscópio conta ainda com duas lentes oculares focalizáveis de 10X, e um revolver codificado para seis objetivas: três objetivas epi-planacromáticas de cristal de fluorita de 5, 20 e 100 vezes de ampliação, e três objetivas planacromáticas ld de cristal de fluorita de 20, 40 e 63X com anel de correção. A câmera digital é colorida e tem sensibilidade para todas as técnicas de microscopia, possui resolução de 2.8 Mpx, sensor CCD e interface USB 3.0.

Os experimentos foram realizados com as lentes objetivas de 5 e 20X, sendo as imagens assim ampliadas em 50 e 200 vezes. No caminho óptico foi inserido o filtro *yellow/green* (525 – 575 nm) fazendo com que a luz observada no microscópio fosse majoritariamente a emitida pelas partículas e não a incidida pela fonte de luz, ou reflexos do micromodelo. Isso possibilitou que a maior parte do ruído luminoso fosse eliminada e houvesse um bom contraste entre as imagens das partículas e o meio em que estas se deslocavam. O software ZEN 2.6 Blue Edition é utilizado para fazer a captura e tratamento das imagens, o mesmo permite configurações muito precisas do espectro observado, o que com a utilização do filtro óptico tornou possível que apenas a luz emitida pelas partículas fosse registrada nas imagens.

Nos experimentos com a lente objetiva de 5X a espessura do plano focal do microscópio é um pouco maior do que a profundidade dos microcanais, o que facilitou o ajuste de altura do plano focal e possibilitou capturar imagens que apresentavam todas as partículas presentes no volume observado pelo microscópio e capturado pela câmera. Esta hipótese foi

feita pois havia uma banda muito pequena que possibilitava a observação de todas as partículas de forma nítida. Com essa lente a fonte luminosa foi colocada em sua intensidade máxima, pois a área observada é relativamente maior do que o tamanho das geometrias avaliadas, fazendo com que bastante luz fosse emitida para regiões sem interesse, dissipando a intensidade emitida pela fonte luminosa.

A utilização da lente de 20X apresentou maiores desafios, porém mostrou-se muito útil na análise  $\mu$ PIV para baixas velocidades. Como a espessura do plano focal desta lente é menor do que a profundidade dos microcanais, maior ruído luminoso era capturado pela câmera, sendo este ruído gerado pelas próprias partículas que se encontravam fora do plano focal. Além disso, o ajuste da altura do plano focal necessitou de grande delicadeza, pois para uma análise  $\mu$ PIV precisa, a captura das imagens deveria ser feita sobre o plano médio da profundidade do micromodelo. Com relação a intensidade luminosa, foi possível usar um valor intermediário, pois o quadro observado usando a lente de 20X tem aproximadamente 430 e 326  $\mu\text{m}$  de largura e altura, respectivamente, fazendo com que toda a luz incidida pela fonte fosse aplicada sobre a região de interesse.

Todos os experimentos foram realizados usando o filtro óptico, pois o conjunto de iluminação, filtro e partículas devidamente apropriados permitiu a captura de imagens muito adequadas para a técnica  $\mu$ PIV, deixando as partículas com muito brilho e o meio com baixíssimo, se não nulo, ruído.

### 3.1.2 Partículas Traçadoras

Para a realização dos experimentos foram adquiridos dois conjuntos de partículas traçadoras. As microesferas modificadas por Carboxilato (ThermoFisher Scientific) foram escolhidas porque essa modificação da superfície gera afinidade com a água, melhorando assim sua distribuição dentro do fluido e evitando a aglomeração entre partículas ou nas paredes do micromodelo. Estas micropartículas têm uma densidade de  $1.050 \text{ kg/m}^3$  que é relativamente próxima da água, garantindo assim que elas sejam carregadas ao longo do escoamento sem perturbar o mesmo. Sendo os experimentos realizados considerados em 2D, foi determinado que os menores canais utilizados estariam na ordem de grandeza de  $100 \mu\text{m}$ , necessitando assim que partículas de  $1 \mu\text{m}$  de diâmetro fossem escolhidas.

O segundo conjunto de partículas foi adquirido com a hipótese de que os experimentos bifásicos necessitariam que as partículas traçadoras tivessem afinidade com o óleo. Presumi-

se que a água ao ser deslocada não ficaria aprisionada no canal mais estreito da geometria do poro de duplo canal, pois para o sistema trifásico composto pelo material de fabricação do micromodelo, água e algum óleo, a água se comportaria como fluido não-molhante, e de acordo com Chatzis e Dullien (1983), em processos de embebição não ocorre o aprisionamento. Desse modo, o óleo que seria utilizado nos experimentos como fase molhante deveria conter as partículas, possibilitando que o campo de velocidade da fase aprisionada pudesse ser capturado, enquanto a água fosse injetada em um processo de drenagem.

As partículas com revestimento de Sultato (ThermoFisher Scientific) de 1  $\mu\text{m}$  de diâmetro possuem, de acordo com o fabricante, certo nível de fobia à água, o que gerou a suposição de que teriam afinidade com algum óleo. Infelizmente, isso não ocorreu com nenhum dos fluidos disponíveis no laboratório, com exceção da glicerina. Desse modo, as partículas com revestimento de Sulfato foram usadas em uma solução de glicerina e água, conforme será explicado no Apêndice A.

A fim de garantir que as partículas seriam adequadas aos experimentos, foram realizados cálculos para definir o erro devido ao movimento Browniano, o tempo de resposta e o número de Stokes, seguindo as Equações 5, 6 e 7, respectivamente. Considerando a velocidade do escoamento de  $1,03 \times 10^{-3}$  m/s, que corresponde à maior velocidade que poderia ser utilizada nos experimentos devido aos limites da bancada, o tempo de resposta  $\tau$  ficou em  $5,82 \times 10^{-8}$  s, gerando com isso um valor para o número de Stokes de  $4,81 \times 10^{-6}$ , o que corresponde a três ordens de grandeza abaixo da velocidade que seria imposta ao escoamento, demonstrando que as condições do escoamento podem ser consideradas apropriadas.

Apesar do tamanho das partículas estar o intervalo em que o erro devido ao movimento Browniano se torna significativo, pois de acordo com Raffel *et al.* (2007) partículas com diâmetros menores que 1,5  $\mu\text{m}$  podem ser afetadas por este fenômeno, o resultado da Equação 6 apresentou o valor de  $8,58 \times 10^{-6}$  m/s, que quando comparada a velocidade média representa um erro de apenas 0,83%. Para escoamentos com velocidades menores, este erro pode se tornar maior, porém, Raffel *et al.* (2007) explica que o erro devido ao movimento Browniano pode ser reduzido, ou mesmo eliminado, com a utilização de um maior número de pares de imagens, sendo esta recomendação seguida neste trabalho.

Com os resultados obtidos, as partículas se mostraram apropriadas aos experimentos. Na prática, a utilização das partículas contribuiu muito para que o processamento de dados fosse

executado de maneira mais simples, pois as imagens ficaram com um ótimo contraste e pouco ruído luminoso, permitindo que o software determinasse com acurácia a posição real das partículas entre os pares de imagens, gerando resultados confiáveis dentro de uma pequena faixa de incerteza.

### 3.1.3 Software para processamento de dados

O software usado no processamento de dados foi o PIVLab. Trata-se de um código aberto desenvolvido em Matlab (MathWorks Inc.) por Thielicke e Stamhuis (2014). O software possui uma interface simples e usabilidade descomplicada, porém, foi notado que para a obtenção de resultados confiáveis, é de grande importância que seja definida uma rotina para o processamento das imagens, sendo previamente definidos nesta rotina os parâmetros que devem ser usados. Isto se fez necessário, pois o software apresentou certa sensibilidade quanto aos diferentes parâmetros que podem ser aplicados no processamento das imagens, gerando resultados com maior ou menor confiabilidade de acordo com as configurações estabelecidas.

O software é organizado de modo que os passos a serem efetuados para realizar o processamento das imagens estão contidos em abas dispostas em sequência da esquerda para a direita. O primeiro passo é importar as imagens, o que é solicitado assim que o software é aberto. Realizada a importação das imagens capturadas durante a gravação  $\mu$ PIV, é possível fazer um pré-processamento com filtros que permitem otimizar o contraste entre as partículas e o meio, e também reduzir ou eliminar o ruído ou partículas fora de foco que podem aparecer de forma aleatória nas imagens.

Nesta etapa também é definido um dos parâmetros mais importantes para que o processamento de imagens seja realizado. Trata-se da definição de uma máscara que cobre a região pela qual as partículas irão se deslocar, com base nas imagens empregadas. O software permite também que seja selecionada uma região de interesse, caso a máscara não esteja disponível. Porém, este recurso não se mostrou eficiente.

Para a criação da máscara foi desenvolvido um código em Matlab, que faz a somatória de todas as imagens da gravação  $\mu$ PIV, resultando em um quadro preto com a região pela qual as partículas se deslocaram estando destacada em branco, este código é apresentado no Apêndice B. Posteriormente essa imagem foi invertida para que a região preta passasse a representar o canal, pois ao carregar essa imagem como uma máscara no PIVLab é a parte branca que será desconsiderada durante o processamento.



A análise  $\mu$ PIV pode ser feita utilizando dois métodos DCC (*Direct Cross Correlation*) e DFT (*Discret Fourier Transform*), sendo o último empregado neste trabalho. Devido à baixa densidade de partículas utilizada nos experimentos, a transformação discreta de Fourier se mostrou mais apropriada, pois permite que sejam feitas até quatro passagens com diferentes tamanhos para a janela de interrogação, dando ao software maior precisão quanto a orientação e grandeza dos vetores velocidade. Em cada passagem o software calcula um vetor para a janela de interrogação especificada, ou seja, na primeira passagem são calculados os vetores para a maior janela de interrogação estipulada, na segunda passagem são calculados os vetores para o segundo tamanho de janela de interrogação e assim sucessivamente. Isso permite que mesmo usando imagens com baixa densidade de partículas, vetores confiáveis sejam calculados, pois as primeiras passagens, que por usarem janelas maiores se baseiam em mais partículas, fornecem o valor do tamanho dos vetores, enquanto a janela menor é usada para dar a direção.

Apesar do maior custo computacional, para tornar os resultados mais confiáveis foram também empregados os recursos *spline* para a janela de interrogação, o que possibilita a deformação da janela em áreas apropriadas, e a repetição de cinco vezes da correlação entre as passagens das janelas, gerando uma média mais confiável. Embora na literatura esteja especificado que com 50 pares de imagens já é possível fazer uma análise  $\mu$ PIV, verificou-se que devido a baixa velocidade dos escoamentos monitorados e a condição de densidade de imagem ser um pouco inferior a adequada, seria necessário que mais pares de imagens fossem processados. Como para todos os experimentos a condição sob análise ocorre em regime permanente, fica subentendido que os resultados não deveriam mudar, ao usar um número maior de imagens. Deste modo, foram realizados testes, fazendo o processamento de diferentes quantidades de pares de imagens a fim de encontrar a quantidade ideal, com base na acurácia dos dados gerados. Neste trabalho se optou por processar 2.000 pares para cada experimento, dando, pois foi a melhor relação entre a precisão dos resultados pelo custo computacional envolvido.

Após fazer o processamento das imagens é necessário calibrar o software informando o tamanho real dos pixels das imagens. Isso pode ser feito determinando o valor de uma linha traçada em uma das imagens usadas no processamento, carregar uma imagem que possua o mesmo tamanho de pixel e fazer o mesmo procedimento, ou simplesmente registrar o tamanho

real dos pixels, caso essa informação seja conhecida. É preciso também informar ao software o tempo entre as imagens que serão usadas no processamento.

Nos experimentos realizados, o tamanho dos pixels foi calculado pelo PIVLab utilizando a imagem de uma lâmina de calibração capturada durante o processo de calibração do microscópio, ou seja, a mesma dimensão de referência usada para calibrar o microscópio foi usada para calibrar o software que realizou o processamento de dados. Quanto ao tempo entre as imagens, o valor foi obtido a partir da divisão do número de imagens capturadas pelo tempo necessário para fazer a captura, uma vez que a taxa de captura da câmera se mantém constante durante a gravação.

A quarta etapa se dá ao validar os vetores velocidades encontrados. Este pós-processamento é necessário porque existem condições do experimento e das imagens que acarretam em erros no processamento, porém, grande parte destes erros podem ser eliminados ao fazer a validação dos vetores. Este processo será explicado com mais detalhes na seção deste capítulo que trata dos limites da bancada.

Ao final, existem alguns parâmetros que podem ser ajustados para melhor apresentar os resultados obtidos, como o gradiente de cores que representa a magnitude das velocidades e o tamanho dos vetores. Ainda, a extração dos dados pode ser feita para todas as imagens processadas, ou o software calcula os vetores médios de todas as imagens, e um arquivo com os resultados desta média pode ser salvo.

### **3.1.4 Equipamentos e dispositivos usados nos experimentos**

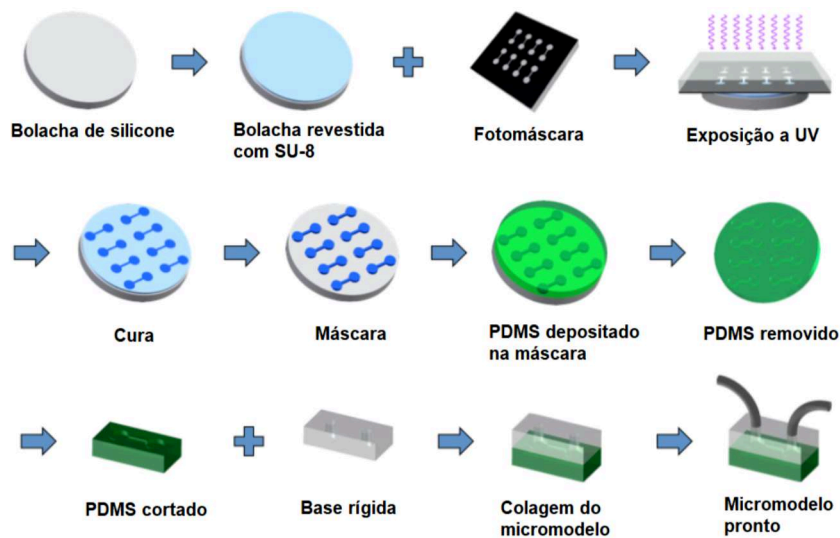
Diversos outros equipamentos e materiais foram usados nos experimentos, os mesmos serão descritos a seguir.

#### **3.1.4.1 Micromodelo**

O micromodelo corresponde ao objeto físico no qual estão dispostos os microcanais. Trata-se de uma placa de Polidimetilsiloxano (PDMS) onde, através de um processo de fotolitografia macia, são gravadas as geometrias em que se deseja realizar os experimentos. O processo de fabricação foi realizado pelo laboratório de microeletrônica da Universidade de São Paulo (USP) em parceria com a UFSC, e pode ser ilustrado pela Figura 20.

A fabricação dos microcanais foi realizada pela desmoldagem do PDMS de um molde SU-8 de 30  $\mu\text{m}$  de espessura com a geometria do microcanal. O SU-8 é um fotorresistor negativo (da MicroChem Corp) e o molde do SU-8 é fabricado em uma placa de vidro contendo uma fotomáscara de 50 mm x 50 mm coberta com uma camada de 100 nm de Cromo. A camada de Cromo é para melhor adesão. O dispositivo microfluídico fabricado neste trabalho é composto, basicamente, por duas peças. Uma tampa PDMS com os microcanais em si e uma placa de vidro com uma fina película de PDMS revestida por centrifugação, que funciona como a parte superior do microcanal, fazendo com que todo o canal seja do mesmo material.

Figura 20: Esquemática do processo de fabricação do micromodelo.



Fonte: adaptado de University of California Santa Cruz (2019)

Neste trabalho, os microcanais de PDMS foram fabricados em uma bancada laminar, utilizando PDMS Sylgard 184 da DOW CORNING Company em uma proporção de elastômero de dez para um (10: 1, elastômero para agente de cura). PDMS é derramado lentamente sobre o molde SU-8 mantido em um gabarito metálico que define o volume e a espessura total do PDMS. O modelo preenchido é colocado na placa de aquecimento por 30 minutos a 80°C para a cura do PDMS. Após a cura, o PDMS é desmoldado com o auxílio de um bisturi cirúrgico e uma pinça de plástico. O PDMS deve ser puxado devagar e com cuidado do molde para evitar rasgar a borracha de silicone e também destruir o SU-8. Após a desmoldagem, os orifícios de entrada e saída são feitos com um perfurador de biópsia de 2 mm de diâmetro, auxiliado por

uma câmera digital. A vedação dos microcanais é feita por meio de uma base de vidro com PDMS parcialmente curado em contato com a tampa do PDMS. Após o contato, o dispositivo é curado a 80°C por mais 30 minutos para concluir a cura do PDMS.

### 3.1.4.2 Bomba de injeção

O meio utilizado para impor uma vazão de fluido constante ao micromodelo foi a bomba de injeção Harvard Apparatus Pico Plus Elite 11. Trata-se de uma bomba de seringa que por meio de um motor e conjunto de engrenagens consegue deslocar de forma constante o êmbolo da seringa, sendo possível com isso, impor a vazão em uma grande faixa de valores.

A Figura 21 apresenta a bomba utilizada. Entre as vantagens, se destacam a possibilidade de impor vazões tão baixas quanto  $1,23 \times 10^{-20} \text{ m}^3/\text{s}$  utilizando a seringa de 500  $\mu\text{l}$ , que foi usada nos experimentos, e a alta precisão, que de acordo com o fabricante é de  $\pm 0,35\%$ .

Figura 21: Bomba de seringa usada para a injeção de fluidos nos microcanais.



Fonte: Autor.

### 3.1.4.3 Seringa

Em conjunto com a bomba, as seringas são utilizadas para injetar o fluido no micromodelo. Foram utilizadas seringas de precisão da fabricante Hamilton, modelo luer lock. Para os experimentos foram usadas seringas da série 1.700 com capacidade de 500  $\mu\text{l}$  e uma seringa da mesma série, porém, com capacidade de 50  $\mu\text{l}$  foi usada para coletar o volume de

partículas traçadoras a ser diluído no fluido. Para outros processos, como preenchimento e limpeza do micromodelo, também foram usadas seringas da série 1.000 com capacidades de 1, 2,5 e 5 ml. Todas as seringas utilizadas são apresentadas na Figura 22.

Figura 22: Seringas de precisão usadas nos experimentos.

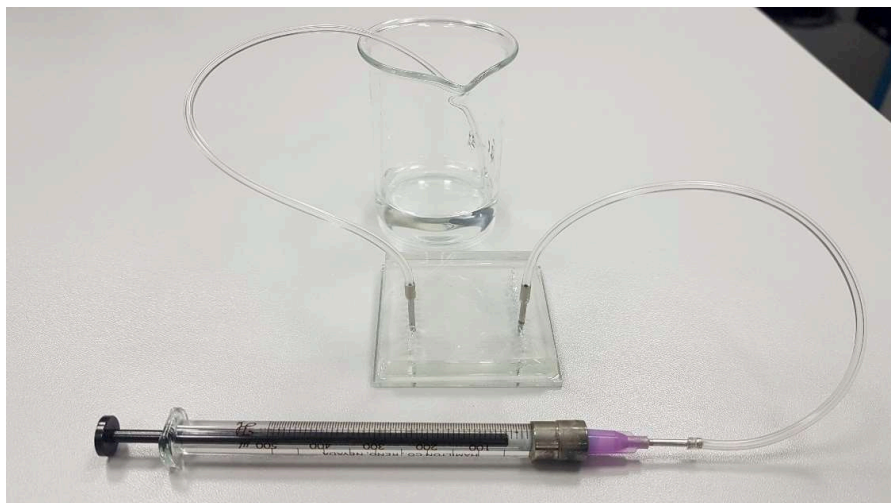


Fonte: Autor.

#### 3.1.4.4 Microtubos e conexões

Para deslocar o fluido da seringa até o micromodelo foi usada a configuração de microtubos e conexões apresentada na Figura 23.

Figura 23: Configuração de tubos e conexões usada nos experimentos.



Fonte: Autor

Esta configuração foi elaborada para ser a mais simples possível, pois durante o desenvolvimento do trabalho, foram realizados experimentos bifásicos com sistemas de tubos e conectores mais sofisticados em que gotas da fase molhante ficaram presas em conexões e posteriormente foram arrastadas pelo outro fluido, prejudicando assim os resultados do experimento.

Desse modo, foram usados apenas dois microtubos de 2,34 mm de diâmetro e 15 cm de comprimento acoplados em duas conexões de metal com diâmetro externo de 1,6 mm, sendo estas conexões colocadas diretamente no furo do micromodelo que é conectado com os microcanais.

#### 3.1.4.5 Equipamento de água ultrapura

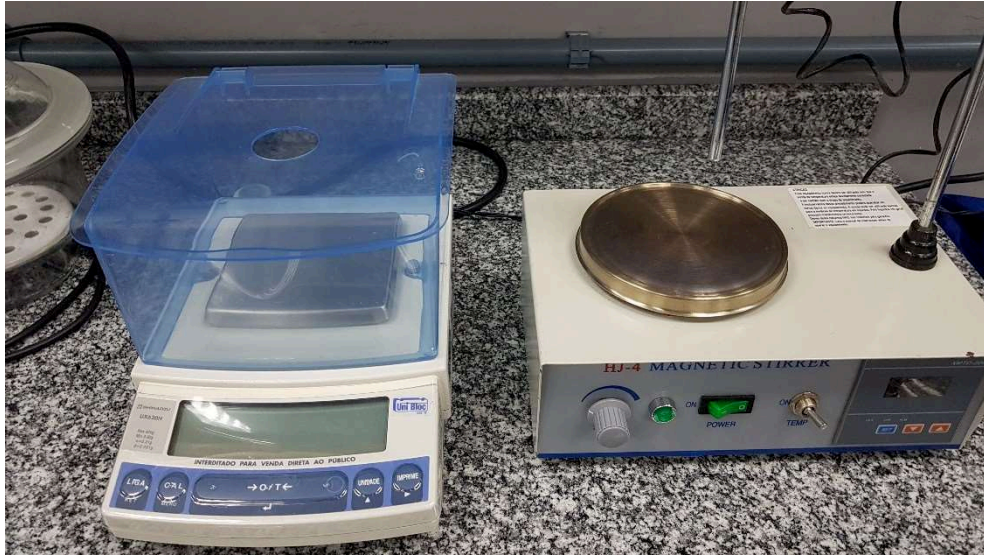
Ao se trabalhar com escalas de ordem micrométrica qualquer corpo indesejado presente na água pode interferir nos experimentos. Além disso, para ter maior confiabilidade nos valores referentes às propriedades da água, que são usados nos cálculos, é importante que a mesma esteja em um nível de pureza adequado. Assim sendo, a água utilizada nos experimentos e para fazer a limpeza dos micromodelos, das seringas e das demais vidrarias é obtida pelo purificador de água Milli-Q.

Durante a coleta, o equipamento faz a aferição da resistividade da água para estimar o faixa de pureza, o valor médio de 19,6 M $\Omega$ cm foi lido para a água usada nos experimentos, sendo esta considerada água ultrapura.

#### 3.1.4.6 Balança de precisão e agitador magnético

Como será explicado na seção de resultados, para realizar os experimentos bifásicos foi utilizada uma solução de glicerina e água. As respectivas quantidades de fluido que fazem parte da solução foram pesadas de acordo com a concentração em massa calculada utilizando a balança de precisão Shimadzu, modelo UX620H, apresentada na Figura 24, que possui uma resolução de 0,001 grama. Após feita a solução, o agitador magnético HJ-4 Magnetic Stirrer foi usado para homogeneizar a mesma. O equipamento também foi de grande utilidade para dispersar as partículas traçadoras nos fluidos ensaiados.

Figura 24: Balança de precisão e agitador magnético.



Fonte: Autor

### 3.2 EXPERIMENTOS MONOFÁSICOS

Tendo todos os equipamentos e dispositivos à disposição foram iniciados os trabalhos experimentais. Primeiramente foram realizados ensaios com apenas um fluido, para assim definir os parâmetros a serem usados e verificar os limites da bancada experimental. Posteriormente, experimentos com duas fases foram realizados, possibilitando assim a definição precisa do procedimento adotado para obter os resultados desejados com o trabalho.

Todos os experimentos com apenas um fluido foram realizados em temperatura ambiente de aproximadamente 24°C e pressão ao nível do mar. O fluido utilizado foi uma solução de água ultrapura com partículas traçadoras na proporção de 0,06% de volume de sólidos, seguindo a recomendação de Roman *et al.* (2016).

As partículas usadas neste trabalho foram adquiridas em uma solução aquosa onde, conforme especificado pelo fabricante, há 2% de sólidos, ou seja, o volume das partículas corresponde a 2% do volume total. Com essas informações, foi elaborada uma solução contendo 0,15 ml do fluido com partículas para 4,85 ml de água ultrapura. Como as partículas representam apenas 2% em volume, 0,15 ml do fluido com partículas representa 0,003 ml de sólidos. O volume total da solução foi de 5 ml e o volume representado pelas partículas



corresponde a  $0,003/5 = 0,06\%$ . De acordo com o fabricante, as partículas não alteram as propriedades físicas da água, sendo estas utilizadas para os cálculos.

Após realizados os primeiros ensaios, o procedimento experimental foi definido e se dá pelas etapas descritas a seguir:

1. Estando o micromodelo acoplado aos canais de entrada e saída conforme apresentado na Figura 23, o mesmo deve ser posicionado no microscópio de modo que a região de interesse possa ser observada;
2. Inicialmente deve ser injetado álcool isopropílico a uma vazão de 1 ml/h até que o micromodelo fique saturado. Esse passo é necessário, pois o ar é molhante ao PDMS em comparação a água, tornando difícil a saturação do micromodelo iniciando a injeção com este fluido;
3. Estando o micromodelo saturado com álcool isopropílico, visto que este é molhante ao PDMS e consegue remover todo o ar, são injetados 5 ml de água ultrapura a uma vazão de 2 ml/h;
4. Posteriormente é iniciada a injeção da solução de água ultrapura com partículas traçadoras, a vazão utilizada foi de 1 ml/h;
5. Quando a solução alcança a região de interesse, ou seja, é possível observar partículas no escoamento, a vazão é reduzida para 0,022 ml/h;
6. Em cerca de dez minutos o escoamento atinge a condição de regime permanente;
7. A lente selecionada para este experimento é de 5X;
8. O filtro óptico utilizado no microscópio é o *Yellow-Green* (525 – 575 nm);
9. O software responsável pela captura das imagens deve ser configurado de modo que apenas as partículas sejam visíveis e evitando ao máximo qualquer ruído luminoso que possa existir;
10. O quadro de captura deve ser ajustado para corresponder ao tamanho das imagens que se deseja capturar;
11. Estando o software devidamente configurado e o fluido escoando em regime permanente é iniciada a captura das imagens;
12. Deve-se aguardar até que sejam capturadas no mínimo 2.000 imagens para então cessar a captura;
13. Água ultrapura deve ser novamente injetada a uma vazão de 2 ml/h, para iniciar a etapa de limpeza do micromodelo;



14. Após injetar 5 ml de água ultrapura, mais 5 ml de álcool isopropílico são injetados com a mesma vazão para remover o maior número possível de partículas que ficaram aderidas às paredes do micromodelo durante o experimento;
15. Para finalizar a limpeza, são injetados mais 2 ml de água ultrapura a fim de remover o álcool isopropílico e em seguida 5 ml de ar a uma vazão de 4 ml/h deve ser injetado;
16. Quando concluída a captura das imagens, as mesmas são exportadas para uma pasta específica no formato TIFF sem qualquer compactação.
17. Com a execução do código média apresentado no Apêndice B é criada uma máscara que identifica a região do canal a partir de uma somatória de todas as imagens capturadas no experimento;
18. Após aberto o software PIVLab, as imagens são importadas como pares 1-2, 2-3 e assim por diante, pois a gravação  $\mu$ PIV foi realizada em modo contínuo;
19. Clicando no menu *Image settings* e acessando a aba *Exclusions* pode ser carregada a máscara que define a região do canal que deve ser considerada para os cálculos dos vetores velocidade;
20. Na aba *Image pre-processing*, contida no menu *Image settings*, a caixa *Enable CLAHE* é marcada e o tamanho da janela é definido para 12 px, o filtro *Contrast-Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE)* realça o contraste entre os pixels que representam as partículas e o restante da imagem, contribuindo para que o software defina a posição central das partículas com maior acurácia.
21. Na mesma aba o filtro *Wiener2 denoise* também é selecionado sendo informado como tamanho da janela o valor de 3 px, esse filtro é usado para que o software não considere partículas menores que o valor determinado no cálculo dos vetores.
22. O próximo passo é definir os parâmetros para realizar o processamento das imagens, para isso a aba *PIV settings* deve ser acessada clicando no menu *Analysis*;
23. O algoritmo PIV utilizado foi o DFT, a janela de interrogação da primeira passagem foi definida como 136 px com um passo de 68 px, e mais duas passagens foram definidas com 68 e 34 px, respectivamente;
24. A janela de deformação escolhida foi a *spline*, a lógica selecionada para estimar a posição da partícula foi a *Gauss 2x3-point* e a caixa para repetir a correlação cinco vezes dentro das janelas de interrogação foi marcada;

25. Definidos os parâmetros é realizada a análise  $\mu$ PIV;
26. Concluída a análise, a calibração é feita usando uma imagem de referência com uma distância conhecida e informando o tempo entre as imagens informado pelo software que fez a captura das mesmas;
27. A validação dos vetores encontrados pelo software é feita manualmente selecionando a região que contempla a maior parte dos vetores válidos, tendo como base a velocidade média do escoamento, e excluindo os *outliers*;
28. Para extrair os dados é acessada a aba *Parameters from poly-line* contida no menu *Extractions* e traçada uma linha reta transversal ao canal, o parâmetro a ser extraído deve ser selecionado como *Velocity Magnitude* e a caixa *extract and save for all frames* deve ser marcada para que então os arquivos texto pertinentes a cada par de imagem sejam salvos em uma pasta especificada.

Definido o procedimento experimental, foram realizados ensaios para verificar os limites da bancada e encontrar os parâmetros mais adequados.

### 3.2.1 Limites da bancada e definição de parâmetros

Primeiro foram realizados ensaios buscando determinar os limites da bancada com base nos equipamentos usados e a robustez do software utilizado para o processamento das imagens. Posteriormente, o procedimento experimental e os parâmetros usados no software foram definidos e empregados em experimentos monofásicos para assim fazer a comparação dos resultados experimentais com valores conhecidos e confiáveis.

As principais limitações da bancada são a taxa de captura de imagens da câmera, a intensidade luminosa fornecida pela fonte de luz, a pressão do fluido suportada pelo micromodelo e o tipo de fluido usado nos experimentos, uma vez que estes podem reagir com o material de fabricação dos micromodelos e das micropartículas.

Existe ainda outra barreira que dificulta a captura de imagens de boa qualidade quando utilizada a lente objetiva de 20X, que é a profundidade dos microcanais. Isso ocorre porque a espessura do plano focal diminui de acordo com a ampliação da lente objetiva utilizada. Deste modo, quando utilizada a lente de 20X ou maiores, a espessura do plano focal é várias vezes menor que a profundidade do canal, gerando assim muito ruído luminoso devido a luz emitida

pelas partículas que estão fora do plano. Devido a esta condição, as únicas lentes usadas nos experimentos foram de 5X e 20X.

Foi realizada uma sequência de experimentos em um canal de seção transversal retangular, variando a vazão de injeção do fluido a cada gravação de imagens, para verificar qual seria a velocidade máxima do escoamento, sendo ainda possível capturar imagens com boa qualidade. Estando a câmera configurada para operar em sua capacidade máxima, a maior taxa de captura alcançada foi de 84 fps.

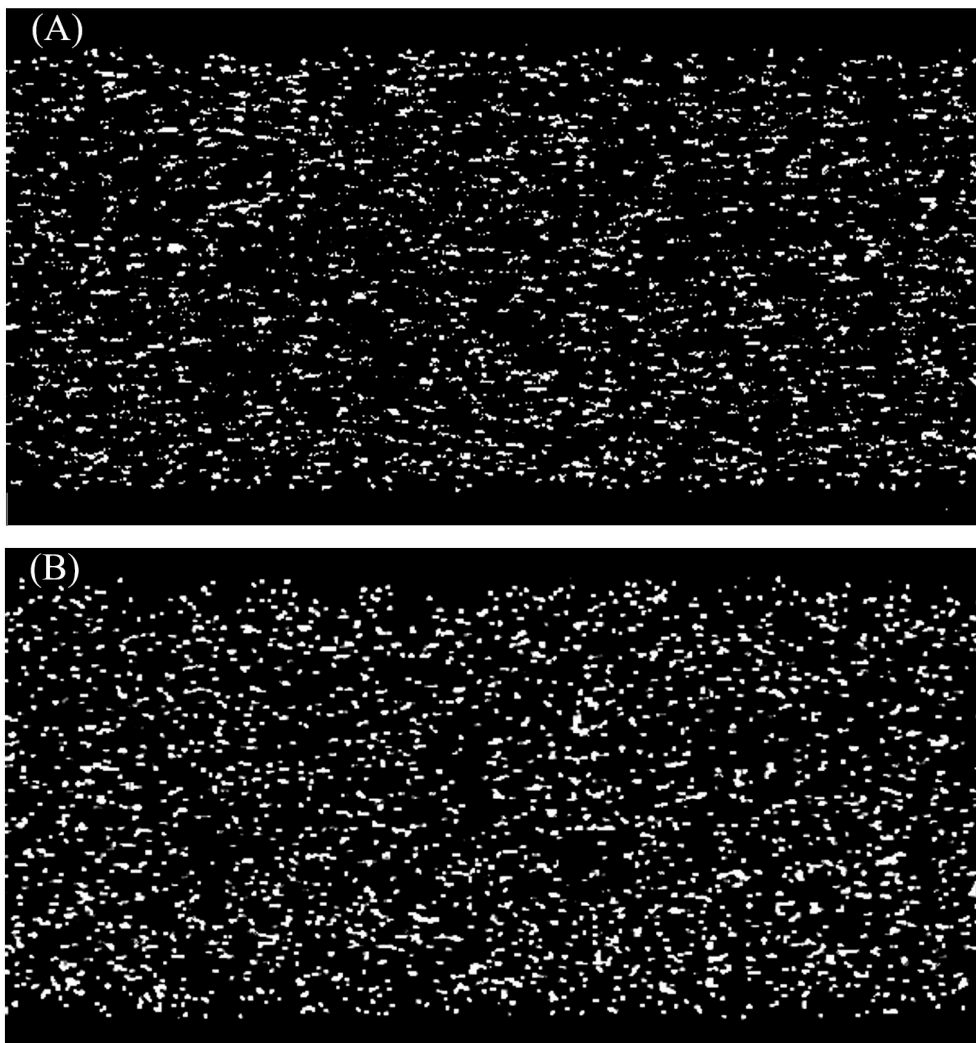
Porém, a limitação da taxa de captura da câmera também está ligada a limitação da intensidade luminosa da fonte de luz, pois para elevar a taxa de captura é preciso reduzir o tempo de exposição. Contudo, ao reduzir o tempo de exposição é necessária maior potência luminosa para que as imagens das partículas sejam capturadas com contraste suficiente e sem ruído luminoso.

Para a taxa de captura de 84 fps foi realizado uma gravação com uma vazão de  $1,11 \times 10^{-11}$  m<sup>3</sup>/s. Entretanto, como para tal vazão a velocidade média do escoamento é relativamente alta para as dimensões do micromodelo, as imagens obtidas não ficaram adequadas, pois apresentam muito ruído e a presença de partículas que aparecem e desaparecem entre os pares de imagens. Outros experimentos foram realizados, diminuindo a vazão de injeção, buscando encontrar a melhor relação entre a vazão do escoamento e a qualidade das imagens.

Conforme observado na Figura 25, existe uma grande diferença entre as imagens obtidas para a vazão de  $1,11 \times 10^{-11}$  m<sup>3</sup>/s da imagem (A) e  $6,11 \times 10^{-12}$  m<sup>3</sup>/s da imagem (B). A falta de homogeneidade das partículas apresentadas na Figura 25 (A) gera vetores incorretos quando feito o processamento destas imagens, o que se deve a dois tipos de erros intrínsecos ao software. Para determinar a posição das partículas, o software avalia individualmente cada pixel e arbitra a posição da partícula de acordo com o padrão de intensidade dos pixels, conforme já apresentado na Figura 17. Contudo, se entre o par de imagens o tamanho da partícula muda, a posição do pixel central mudará também, acarretando em um erro, apesar de pequeno, para o vetor velocidade daquele par. Outro problema ocorre quando as partículas desaparecem em uma imagem e reaparecem em outra, como é o caso dos pequenos pontos apresentados na Figura 25 (A). Quando isso acontece são gerados vetores errôneos cada vez que uma partícula reaparece entre as imagens do par avaliado, pois como o software avalia apenas os deslocamentos entre

os pares de imagens, quando uma partícula reaparece na segunda imagem do par, sem ter existido na primeira, o software considera que esta partícula tem uma velocidade tal que se deslocou desde o início da janela de interrogação avaliada até o ponto em que apareceu, no intervalo de tempo previamente definido e informado ao software.

Figura 25: Imagens das partículas para diferentes vazões, em (A) impondo uma vazão de  $1,11 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{s}$  as imagens das partículas ficaram com diversas formas e tamanhos, além de conter pontos que são considerados como ruído, em (B) com a vazão de  $6,11 \times 10^{-12} \text{ m}^3/\text{s}$  são visualizadas partículas mais nítidas apresentando um padrão circular, com pouca diferença de tamanho e quase não há ruído.

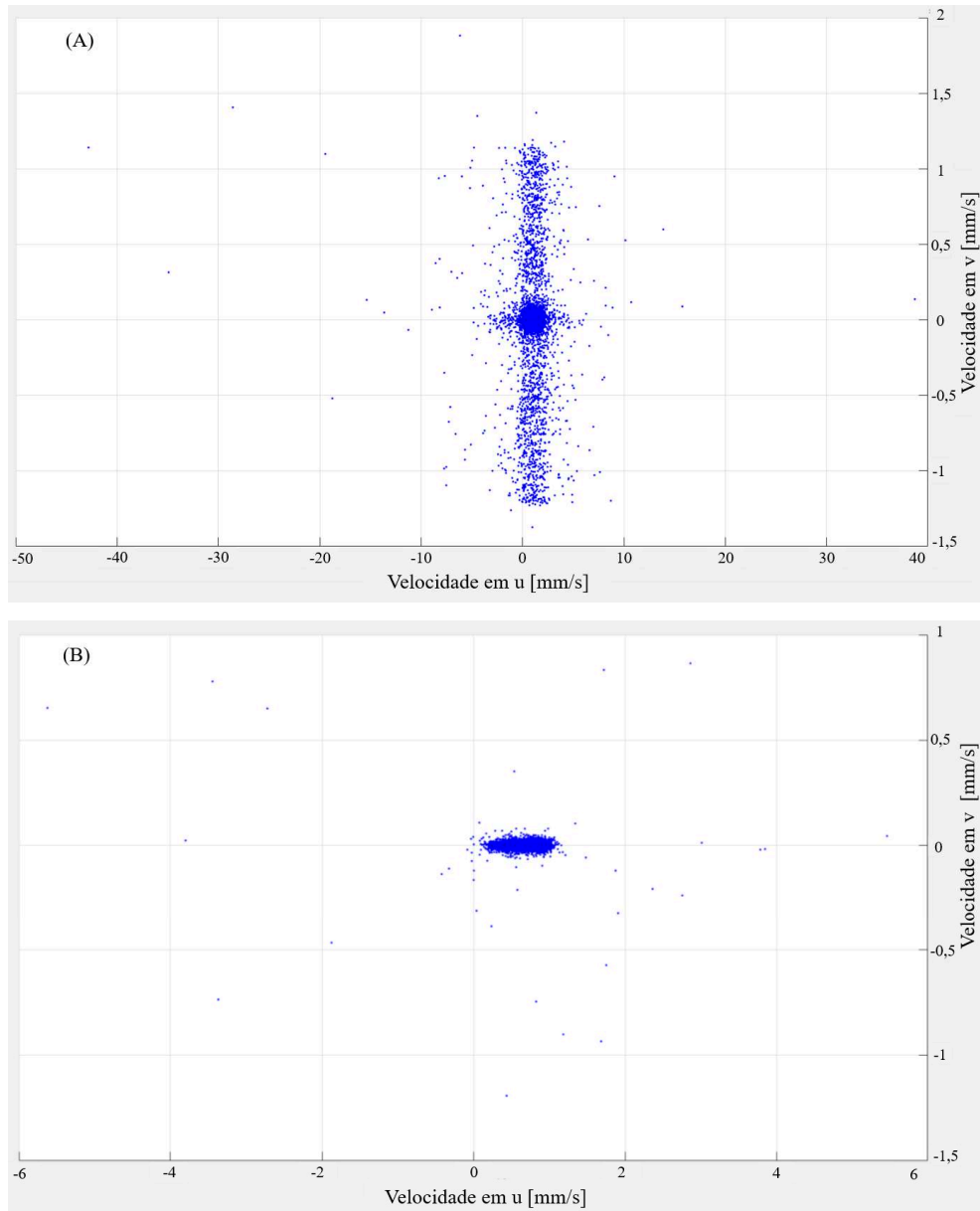


Fonte: Autor

Além da avaliação visual das imagens capturadas no experimento, durante o processamento de dados também se percebe que as imagens não apresentam boa qualidade,

pois o software não está interpretando a posição das partículas entre os pares de maneira adequada.

Figura 26: Disposição dos vetores com base nas velocidades em u e v para eliminação de *outliers*. Em (A) são apresentadas as grandezas dos vetores resultantes para o experimento em que foi imposta a vazão de  $1,11 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{s}$  e em (B) para a vazão de  $6,11 \times 10^{-12} \text{ m}^3/\text{s}$ .



Fonte: Autor

A Figura 26 (A) apresenta um gráfico com a magnitude das velocidades de todos os vetores avaliados no processamento das imagens obtidas com a vazão de  $1,11 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{s}$ . Fazendo a comparação entre as Figuras 26 (A) e (B) é notado que um grande número de vetores não representa valores de velocidade válidos para o escoamento, pois a velocidade na direção y não pode se aproximar da velocidade na direção x para um escoamento em canal retangular,  $V_y/V_x \ll 1$ . Além disso, existem muitos vetores distantes da média, denominados por Raffel *et al.* (2009) como *outliers*, que surgem justamente devido a erros no processamento das imagens. Na Figura 26 (B) também aparecem alguns vetores *outliers*, mas com menor intensidade. Para eliminar esses vetores errôneos, o software permite a seleção de um quadro que contempla apenas os vetores pertencentes à média, fazendo a interpolação daqueles que não são abrangidos pela seleção.

Além das limitações dos equipamentos, existe uma limitação física por parte dos micromodelos e das partículas. Utilizando um sensor de pressão, foi verificado que a pressão do fluido no interior do microcanal se eleva bastante quando líquidos viscosos (acima de 20 vezes a viscosidade da água) são injetados. Para fazer as gravações  $\mu\text{PIV}$  com o escoamento monofásico a vazão de injeção é baixa, entretanto, durante a drenagem, ou seja, quando o fluido molhante está aprisionado e o fluido não-molhante é injetado, são usados valores de vazão elevados (múltiplos inteiros da vazão inicial), o que poderia causar o descolamento do micromodelo da placa de vidro, tornando o uso do mesmo inapropriado. Para evitar que isso ocorra, foi definida como a pressão de trabalho máxima de  $1,4 \times 10^4 \text{ Pa}$ .

### 3.3 EXPERIMENTOS BIFÁSICOS

Tendo definida uma rotina experimental que foi devidamente validada, o próximo passo foi avançar no campo dos escoamentos bifásicos a fim de investigar quantitativamente o comportamento das fases molhante e não-molhante a partir do uso da técnica  $\mu\text{PIV}$ , sendo este o assunto da seção a seguir.

#### 3.3.1 Escolha dos fluidos

Para os experimentos em que se buscava avaliar o campo de velocidade da fase injetada foi usado como fluido molhante o FC-43 e como não-molhante a água ultrapura, a qual

recebeu as partículas traçadoras. Estes fluidos foram escolhidos devido a suas propriedades serem conhecidas e ambos serem inertes tanto ao micromodelo quanto às partículas traçadoras.

Com relação aos experimentos voltados a obter o campo de velocidade da região de aprisionamento, foram necessários diversos estudos e experimentos para que os fluidos pudessem ser escolhidos. Uma das maiores limitações da bancada para a execução de experimentos usando duas fases líquidas se dá justamente quanto aos poucos fluidos que podem ser usados nos micromodelos de PDMS e que tenham afinidade com as partículas.

Para realizar gravações  $\mu$ PIV e obter o campo de velocidade do fluido aprisionado, idealmente, o fluido molhante deveria receber as partículas traçadoras para que em um processo de drenagem fosse feita a captura das imagens na região do aprisionamento. Contudo, apesar de serem testados diversos fluidos, não foi encontrado um líquido que fosse molhante ao PDMS em comparação a água, e tivesse afinidade com as partículas sem dissolver as mesmas.

Desse modo, foi elaborada uma solução de água ultrapura e glicerina com base nos trabalhos de Glycerin Producers Association (1963) para obter um fluido com viscosidade de  $2,25 \times 10^{-2}$  Pa.s, gerando um valor aproximado de  $M = 4,3$  para a temperatura de  $20^\circ\text{C}$ , visto que a viscosidade do FC-43 é de aproximadamente  $5,23 \times 10^{-3}$  Pa.s, calculado com base nos dados informados pelo fabricante (3M Company). Usando então esta combinação de fluidos, a solução de água ultrapura e glicerina recebeu as partículas traçadoras e foram realizados os experimentos bifásicos.

### 3.3.2 Procedimento experimental

Os experimentos bifásicos foram realizados com o poro de duplo canal a pressão atmosférica e temperatura de  $20^\circ\text{C}$ . Tendo como objetivos realizar experimentos de drenagem buscando obter o campo de velocidade da fase que está deslocando e de embebição para estimar os vetores da fase aprisionada, foram definidos dois procedimentos experimentais. Entretanto, as principais diferenças entre os procedimentos usados no experimento monofásico e bifásico se resumem na sequência de injeção dos fluidos, desse modo, os passos apresentados abaixo se referem apenas às etapas que devem ser substituídas para cada experimento.

Experimento de drenagem:

As etapas um a cinco são iguais às do experimento monofásico.

6. Deve ser injetado em torno de 200  $\mu$ l de FC-43 a uma vazão de 1 ml/h;
7. Em seguida é injetada a solução de água ultrapura com partículas traçadoras. O volume injetado deve ser em torno de 200  $\mu$ l e a vazão utilizada pode permanecer em 1 ml/h;
8. Água ultrapura pode então ser injetada para carregar os fluidos até a geometria sob investigação;
9. A vazão de 1 ml/h é mantida até que o FC-43 se aproxime da entrada do micromodelo;
10. É preciso ajustar a vazão para o valor de 0,00618 ml/h e aguardar até que o FC-43 alcance a geometria;
11. Devem ser feitos os ajustes na posição do micromodelo e nas configurações da câmera para que a gravação  $\mu$ PIV possa ser iniciada;
12. Assim que a solução de água ultrapura com partículas alcança o poro de duplo canal, o FC-43 fica aprisionado no canal mais estreito;
13. O quadro de captura deve ser ajustado para corresponder ao tamanho das imagens que se deseja capturar;
14. Estando o software devidamente configurado e o fluido escoando em regime permanente é iniciada a captura das imagens;
15. Deve-se aguardar até que sejam capturadas pelo menos 2.000 imagens para então cessar a captura.

A seguir são realizadas as etapas 13 a 29 do experimento monofásico.

Experimento de Embebição:

1. A lente utilizada neste experimento foi a de 20X;
2. O filtro óptico utilizado no microscópio é o *Yellow-Green* (525 – 575 nm);
3. Estando o micromodelo acoplado aos canais de entrada e saída, o mesmo deve ser posicionado no microscópio de modo que a região de interesse possa ser observada;
4. Inicialmente deve ser injetado álcool isopropílico a uma vazão de 1 ml/h até saturar o micromodelo;
5. Após injetar 2 ml de álcool isopropílico, são injetados 5 ml de água ultrapura a uma vazão de 2 ml/h;
6. A solução de glicerina/água ultrapura com partículas pode então ser injetada;



7. Devem ser injetados cerca de 200  $\mu\text{l}$  da solução, a vazão pode ser mantida em 1 ml/h;
8. Posteriormente, é injetado o FC-43 a uma vazão de 1 ml/h, o volume necessário pode variar de acordo com a quantidade de gravações  $\mu\text{PIV}$  que se deseja fazer. No experimento realizado para este trabalho foram realizadas cinco gravações, para as quais foram injetados 400  $\mu\text{l}$  de fluido;
9. Novamente, água ultrapura é injetada em uma vazão de 1 ml/h, até que a solução se aproxime da entrada do micromodelo;
10. A vazão deve então ser reduzida para 0,05 ml/h;
11. Quando a solução de água ultrapura com partículas traçadoras alcança a geometria estudada devem ser feitos os ajustes na posição do micromodelo e nas configurações da câmera para garantir que as imagens sejam capturadas com boa qualidade;
12. Em seguida, o FC-43 irá alcançar a geometria, causando o aprisionamento de parte da solução no canal mais estreito;
13. Estando o escoamento em regime permanente pode ser iniciada a captura das imagens;
14. Para cada gravação são capturadas 2.000 imagens;
15. Ao término da captura, a vazão pode então ser elevada para 0,1 ml/h para que uma nova gravação  $\mu\text{PIV}$  seja feita;
16. Para esta condição de vazões, fluidos e dimensões do micromodelo, é recomendado que se espere cinco minutos antes de iniciar uma nova captura de imagens, pois foi observado que após esse período o escoamento tenha alcançado a condição de regime permanente;
17. Uma nova gravação  $\mu\text{PIV}$  pode então ser iniciada;
18. Os procedimentos 11, 12, 13 e 14 devem ser repetidos de acordo com o número de gravações que se deseja fazer;

As etapas 13 a 29 do experimento monofásico se repetem para concluir o procedimento experimental.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 VALIDAÇÃO DA BANCADA E DO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

É de grande importância validar os dados obtidos como resultado da técnica  $\mu$ PIV, pois, sendo uma técnica experimental, tanto a realização do experimento quanto o processamento das imagens podem levar a erros significativos.

A validação da bancada foi feita em duas etapas. Primeiro foram realizados experimentos monofásicos em um canal de seção transversal retangular, para assim fazer a comparação dos resultados experimentais com a solução analítica de Hagen-Poiseuille.

Posteriormente, uma solução de água ultrapura com partículas traçadoras foi injetada em um poro de duplo canal (CHATZIS; DULLIEN, 1983), com o intuito de fazer a captura das imagens do escoamento e comparar o campo de velocidade obtido a partir da técnica  $\mu$ PIV com os de uma simulação numérica que utiliza o método Lattice-Boltzmann (CHEN, H.; CHEN, S.; MATTHAEUS, 1992; QIAN; D'HUMIÈRES; LALLEMAND, 1992; HE; LUO, 1997; PHILIPPI *et al.*, 2006).

#### 4.1.1 Comparação do perfil de velocidade com o resultado analítico

A Figura 27 apresenta os vetores velocidade obtidos pela técnica  $\mu$ PIV, sendo utilizada a lente de 5X, com uma taxa de captura de 84 fps e vazão volumétrica imposta de  $6,11 \times 10^{-12} \text{ m}^3/\text{s}$ . A velocidade média do escoamento ficou em  $(7,71 \pm 0,28) \times 10^{-4} \text{ m/s}$ , o que está dentro do esperado, visto que para a vazão utilizada a velocidade média calculada deveria ser de  $(7,72 \pm 0,62) \times 10^{-4} \text{ m/s}$ , sendo este valor encontrado pela divisão da vazão de fluido injetado pela área da seção transversal do canal, que neste caso é de  $(7,92 \pm 0,59) \times 10^{-9} \text{ m}^2$ .

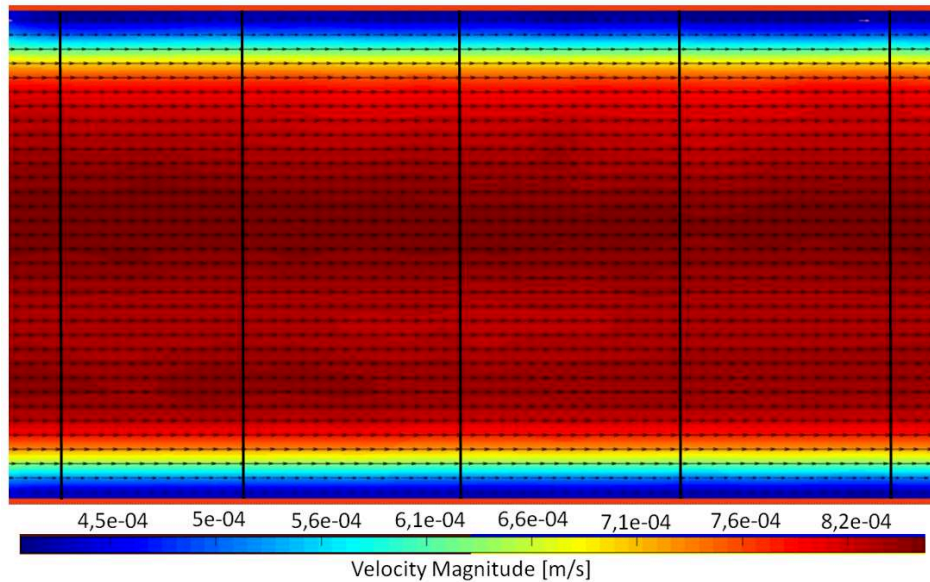
Como parte da mecânica dos fluidos, o escoamento de Hagen-Poiseuille já foi amplamente estudado e diversas deduções foram feitas a partir das equações originais. Mortensen, Okkels e Bruus (2005) deduziram uma equação que descreve o perfil de velocidades para um fluido escoando em um canal com seção transversal retangular, dado por:

$$V(x, y) = \frac{4Q\alpha}{\omega^2\pi^3} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{n^3} \left[ \frac{1 - \cosh\left(\frac{n\pi x}{h}\right)}{\cosh\left(\frac{n\pi w}{2h}\right)} \right] \text{sen}\left(\frac{n\pi x}{h}\right), \quad (9)$$

$$\alpha = \frac{\pi^3 \gamma^2}{8} \left\{ \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \left[ \frac{n\gamma}{\pi n^5} - \frac{2}{\pi^2 n^5} \tanh\left(\frac{n\pi\gamma}{2}\right) \right] \right\}^{-1}, \quad (10)$$

onde  $V(x, y)$  se refere à magnitude da velocidade em um ponto específico da seção transversal do canal avaliado,  $Q$  é a vazão imposta ao escoamento,  $\alpha$  é um fator de correção geométrica,  $\omega$  a largura do canal,  $h$  a profundidade e  $\gamma$  é a razão entre a largura e profundidade dada por:  $\gamma = \omega/h$ .

Figura 27: Vetores velocidade para um canal de seção retangular com cinco linhas transversais usadas para definir o perfil de velocidades do escoamento.



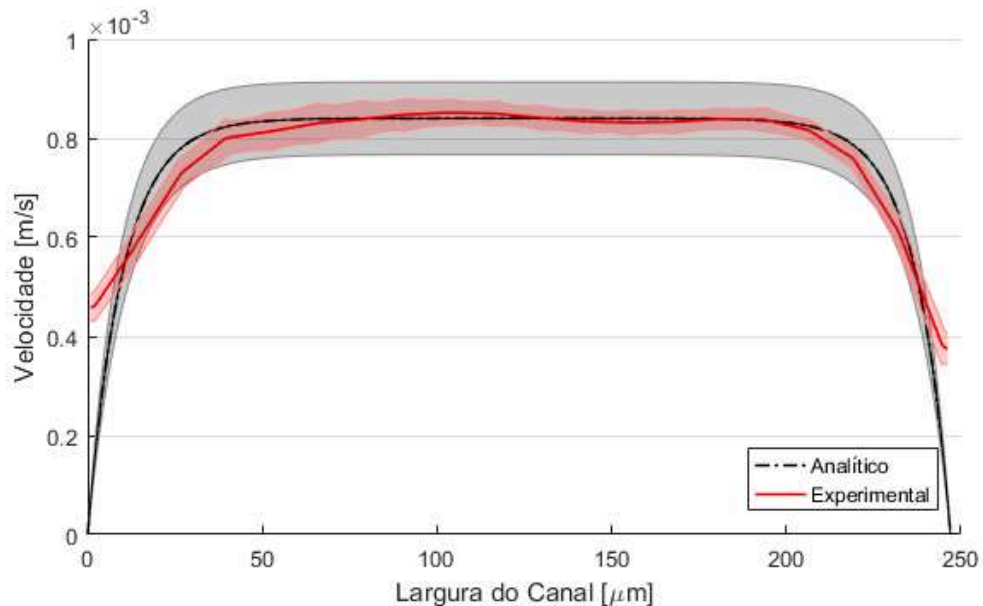
Fonte: Autor.

Os resultados da Equação 9 são apresentados na Figura 27 juntamente com o perfil de velocidades obtido pela análise  $\mu$ PIV e a incerteza expandida de ambas as técnicas. Como pode ser visto, as bandas que representam as incertezas de cada técnica se sobrepõem, mostrando que os resultados experimentais apresentam valores confiáveis dentro da incerteza atribuída para toda a região central do canal. Entretanto, como era esperado, a região próxima às paredes apresentou maiores diferenças entre os resultados analíticos e experimentais, visto que o perfil analítico considera a condição de não-escorregamento do fluido junto à parede do canal,

enquanto que na análise experimental as partículas rolam pela parede sendo empurradas pelo fluido que está escoando ao seu redor.

Entretanto, esse erro ocorre aproximadamente apenas nos primeiros 6  $\mu\text{m}$  em ambas as paredes. Considerando que o diâmetro da partícula é de 1  $\mu\text{m}$ , pode ser concluído que esta condição se aproxima dos limites da bancada experimental. Contudo, para a região central do canal, o campo de velocidade das duas análises se aproximou bastante, exibindo uma diferença máxima de apenas 8% entre os valores.

Figura 28: Comparação entre o perfil de velocidade analítico e experimental para um canal com  $(246,85 \pm 5,42)$   $\mu\text{m}$  de largura por  $(32,06 \pm 2,30)$   $\mu\text{m}$  de profundidade e uma vazão de  $(6,11 \pm 0,17) \times 10^{-12}$   $\text{m}^3/\text{s}$ .



Fonte: Autor

Visto que a solução desenvolvida por Mortensen *et al.* (2005) para a definição do perfil de velocidades apresenta certa complexidade, à incerteza relacionada a velocidade teórica foi estimada usando o método de Monte-Carlo (ANGELOTTI *et al.*, 2008). Para isso a Equação 9 foi calculada 2.000 vezes variando os dados de entrada dentro de suas respectivas incertezas e posteriormente estimando a incerteza para a velocidade média encontrada seguindo o procedimento estatístico para definição da incerteza apresentado por Albertazzi e Sousa (2008).

Como pode ser visto na Figura 28, a banda que representa a incerteza da velocidade analítica é maior do que a incerteza associada à velocidade experimental. Isso ocorre devido às incertezas do micromodelo utilizado neste experimento serem relativamente grandes em

comparação à dimensão do mesmo, pois apesar de ter uma incerteza de apenas 2,30  $\mu\text{m}$  na profundidade e 5,42  $\mu\text{m}$  na largura, estes valores são significativos quando comparados às dimensões que estão sendo medidas, que são de 32,06  $\mu\text{m}$  e 246,85  $\mu\text{m}$ , respectivamente.

A incerteza experimental foi estimada fazendo a soma de duas incertezas, uma que se refere à própria incerteza da técnica  $\mu\text{PIV}$  e outra relacionada à variabilidade do experimentador. Os dados resultantes do software PIVLab são gerados com base em uma linha definida pela pessoa que está fazendo a análise, conforme as linhas pretas apresentadas na Figura 27, para mensurar a incerteza relacionada a posição e ao tamanho da linha traçada pelo experimentador, a velocidade experimental foi calculada como sendo uma média da velocidade obtida para cinco linhas. Para os cinco perfis de velocidades obtidos é calculada a incerteza expandida seguindo o procedimento apresentado por Albertazzi e Sousa (2008). Na seção 4.4 deste trabalho será abordado com maiores detalhes como a incerteza  $\mu\text{PIV}$  foi calculada.

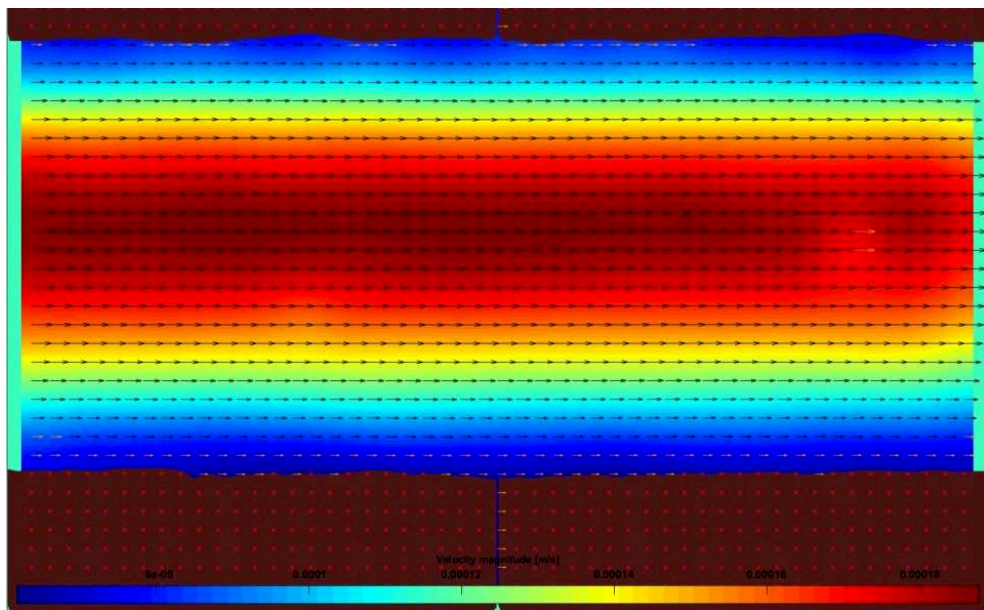
Tendo como objetivo verificar se o ruído causado pela diferença entre a espessura do plano focal da lente de 5X e 20X afetaria significativamente os resultados, foram realizados experimentos usando a lente de 20X. Contudo, o ensaio foi realizado com um canal de 100  $\mu\text{m}$  de largura, pois não é possível observar toda a seção transversal do canal de 250  $\mu\text{m}$  com a lente de 20X usando as mesmas configurações do software de captura. Neste experimento foi utilizada uma vazão de  $(3,95 \pm 0,11) \times 10^{-13} \text{ m}^3/\text{s}$  e a taxa de captura foi ajustada para 50 fps, as medições da largura do canal resultaram em  $(96,60 \pm 2,20) \mu\text{m}$ , e considerando a profundidade de  $(32,06 \pm 2,30) \mu\text{m}$  foi calculada a área transversal de  $(3,10 \pm 0,23) \times 10^{-9} \text{ m}^2$ .

O campo de vetores velocidade obtido para este experimento é apresentado na Figura 29. A diferença nos resultados se deve principalmente pela utilização de um canal com largura 2,5 vezes menor. Como este canal é mais estreito do que o anterior, o perfil de velocidades formou uma parábola mais arredondada, caracterizando com maior evidência a influência das paredes.

Outro ponto que deve ser esclarecido está relacionado a superfície das paredes. É possível notar que existe certa rugosidade, ou ondulações, tanto na parte superior, como inferior da Figura 29, algo que pode ser explicado por duas hipóteses. A primeira é que realmente o canal apresente estas imperfeições, o que está dentro da incerteza do micromodelo, pois a ordem de grandeza das ondulações nas paredes é de apenas 1  $\mu\text{m}$ . A outra hipótese é que isso tenha ocorrido devido a forma como a imagem foi construída.

A máscara utilizada no processamento das imagens foi criada a partir da soma de todas as imagens capturadas na gravação  $\mu$ PIV, ou seja, o caminho pelo qual as partículas efetivamente passaram. Isto não corresponde necessariamente a geometria exata do canal, pois a velocidade na parede é zero, de modo que não haverá o deslocamento de partículas exatamente na superfície sólida, pois as partículas nessa região passam a rolar por conta da diferença de velocidades das linhas de corrente do fluido. Além disso, a velocidade do fluido próximo às paredes é significativamente menor do que no restante da geometria, fazendo com que poucas partículas passem por essa região, realçando flutuações no movimento das mesmas quando realizada a somatória das imagens.

Figura 29: Campo de velocidade utilizando a lente de 20X em um canal de  $(96,60 \pm 2,20) \mu\text{m}$  de largura por  $(32,20 \pm 3,01) \mu\text{m}$  de profundidade e vazão de  $(3,95 \pm 0,11) \times 10^{-13} \text{ m}^3/\text{s}$ .

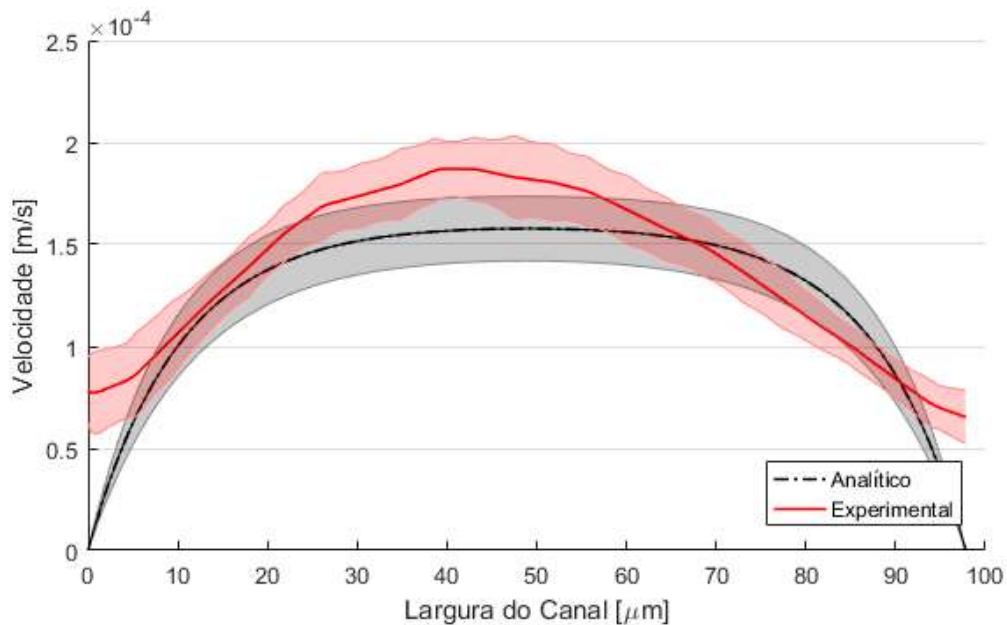


Fonte: Autor.

O perfil de velocidades com as bandas de incerteza da técnica é apresentado na Figura 30. O resultado do perfil experimental apresentou um leve achatamento na parte direita do canal, o que consequentemente fez as velocidades no centro serem maiores. A hipótese para esta condição é que exista um achatamento físico real no microcanal, pois no processo de fabricação a placa de PDMS que possui a gravação do micromodelo é colada sobre uma lâmina de vidro revestida por PDMS. Como esse procedimento é artesanal, existe a possibilidade de haver maior pressão aplicada em um dos lados da placa de PDMS, causando assim este

achatamento. Isso se mostrou mais intenso nos canais menores, justamente devido às proporções entre a largura do canal e a região achatada.

Figura 30: Perfil de velocidades usando a lente de 20X.



Fonte: Autor.

Com relação à velocidade média encontrada para as análises experimental e analítica, os valores se apresentaram dentro das incertezas atreladas a ambos os resultados. Como pode ser observado, a banda de incerteza analítica cobriu praticamente todo o perfil de velocidade experimental, com exceção da região central, porém, mesmo nessa região as incertezas de ambas as análises se sobrepõem, demonstrando que a técnica é confiável. A velocidade média do perfil analítico e experimental ficou em  $(1,26 \pm 0,16) \times 10^{-4}$  m/s e  $(1,39 \pm 0,15) \times 10^{-4}$  m/s, respectivamente, apresentando uma diferença máxima de 16% no centro do canal. As velocidades próximas às paredes ficaram com diferenças maiores, da mesma forma que no experimento anterior. Os cálculos e métodos usados para definição das incertezas são discutidos na seção 4.4 deste trabalho.

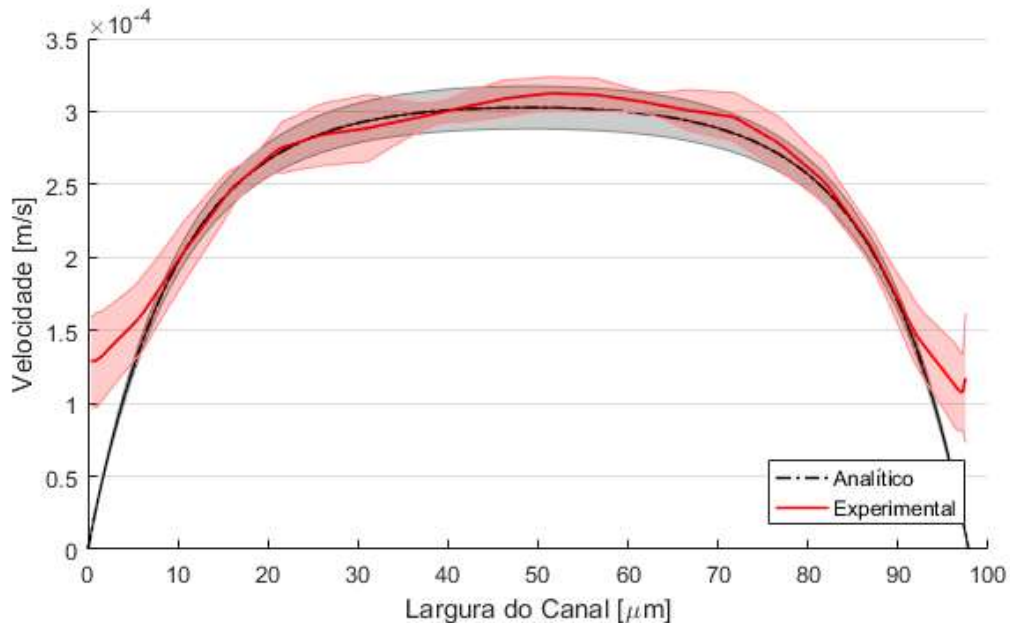
Uma última análise foi feita para dar maior segurança a respeito dos resultados obtidos com a técnica  $\mu$ PIV. Conforme comentado anteriormente, os microcanais usados nos experimentos que foram realizados neste trabalho apresentam grande incerteza nas dimensões, o que poderia ofuscar a precisão dos resultados experimentais. Por esse motivo, foram

realizados experimentos com um micromodelo fabricado pela empresa Flowjem, que possui maior precisão quanto às dimensões dos canais.

A Figura 31 apresenta o perfil de velocidades obtido a partir do experimento realizado com o micromodelo novo. A vazão de injeção utilizada foi de  $(1,96 \pm 0,06) \times 10^{-13} \text{ m}^3/\text{s}$  e com as dimensões de  $(103,98 \pm 0,49) \mu\text{m}$  para a largura e  $(33,1 \pm 0,8) \mu\text{m}$  para a profundidade, pode ser observado que a banda representando a incerteza analítica ficou muito menor. As velocidades médias teórica e experimental ficaram em  $(2,43 \pm 0,15) \times 10^{-4} \text{ m/s}$  e  $(2,45 \pm 0,11) \times 10^{-4} \text{ m/s}$  respectivamente.

Os resultados deste experimento mostraram que a técnica  $\mu\text{PIV}$  apresenta uma incerteza muito satisfatória, visto que tanto as linhas que representam os perfis de velocidade analítico e experimental quanto as bandas de incertezas das duas técnicas ficaram muito próximas.

Figura 31: Perfil de velocidades para um micromodelo com menores incertezas.



Fonte: Autor.

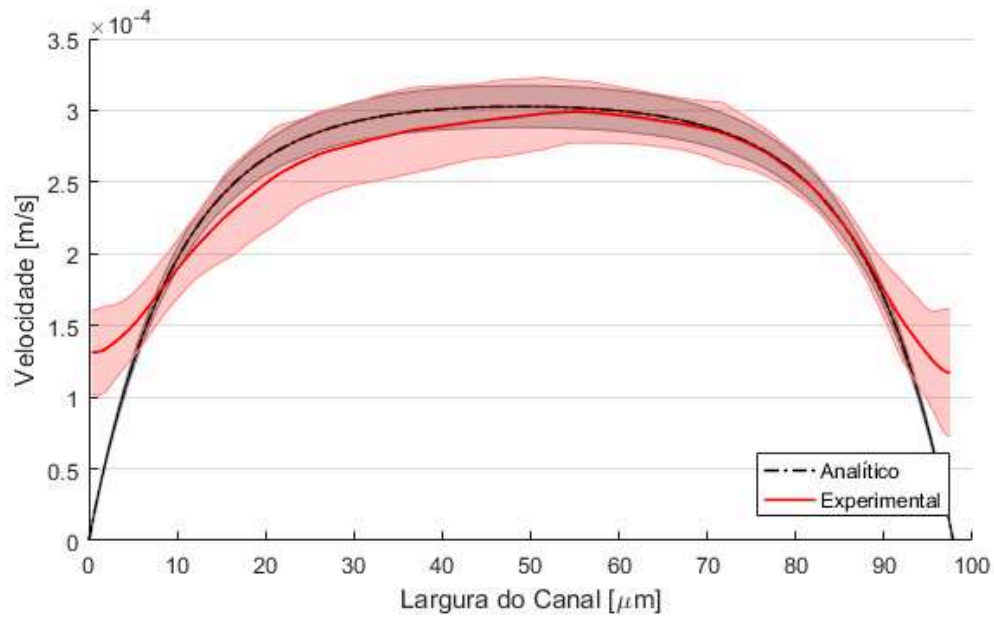
Neste mesmo experimento, buscando mensurar o perfil médio de velocidades do escoamento, foram realizadas doze gravações  $\mu\text{PIV}$  em posições diferentes ao longo do microcanal. O resultado é apresentado na Figura 32.

Conforme era esperado, a banda de incerteza experimental cobriu praticamente todo o perfil analítico, juntamente com a banda de incerteza deste. É preciso salientar que durante as



gravações feitas ao longo do micromodelo novo, muitas partículas se alojaram nas paredes do microcanal, fato que afeta o processamento de dados, sendo o principal motivo para um aumento tão expressivo na banda de incerteza experimental.

Figura 32: Perfil médio de velocidades calculado com base em 12 seções ao longo do microcanal.



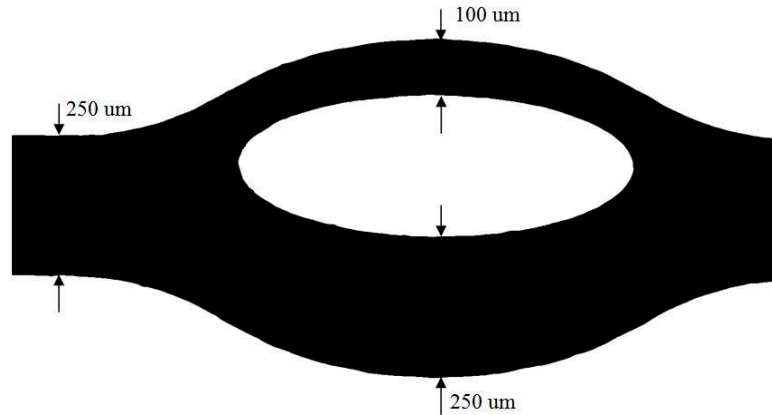
Fonte: Autor.

Tendo realizado esta primeira validação com um canal de seção transversal e validando os resultados obtidos ao compará-los com os gerados por uma solução analítica, o próximo passo foi realizar experimentos com o poro de duplo canal para definir um procedimento experimental adequado e que pudesse ser utilizado nos demais ensaios que seriam realizados neste trabalho.

#### 4.1.2 Comparação com uma simulação numérica

A experiência adquirida com a realização dos experimentos no canal de seção transversal foi usada para realizar experimentos monofásicos na geometria do poro de duplo canal. O canal utilizado tem a forma e dimensões apresentadas na Figura 33.

Figura 33: Geometria do poro de duplo canal.

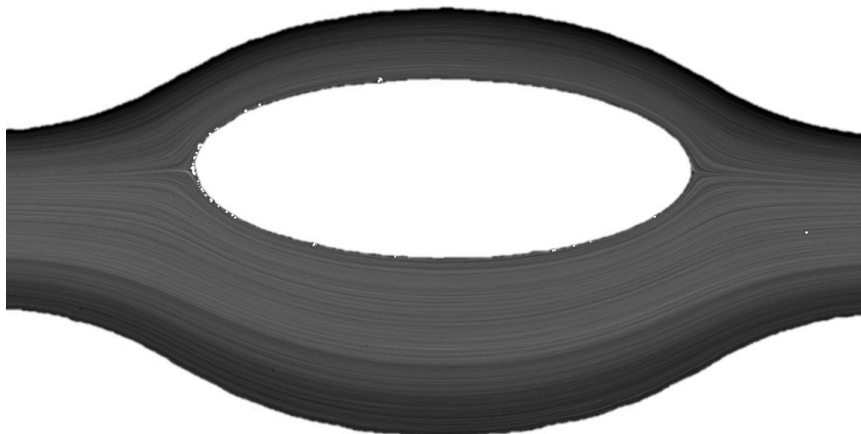


Fonte: Autor.

Neste experimento foi usada uma vazão de  $1,23 \times 10^{-12} \text{ m}^3/\text{s}$  e a taxa de captura foi ajustada em 50 fps. As imagens obtidas pela gravação  $\mu\text{PIV}$  apresentaram um contraste excelente entre as partículas e o meio por onde estas escoavam. Isso possibilitou gerar uma imagem que ilustra as linhas de corrente do fluido, conforme Figura 34.

Essa imagem também comprovou que não existiam muitas partículas paradas ao longo da geometria. Conforme pode ser observado, durante a captura das 2.000 imagens utilizadas no processamento de dados, apenas algumas partículas se alojaram na parede do obstáculo central, identificadas na figura como pontos brancos, e uma partícula permaneceu parada aproximadamente no centro do canal, ficando na parede da parte inferior do mesmo em relação ao eixo z.

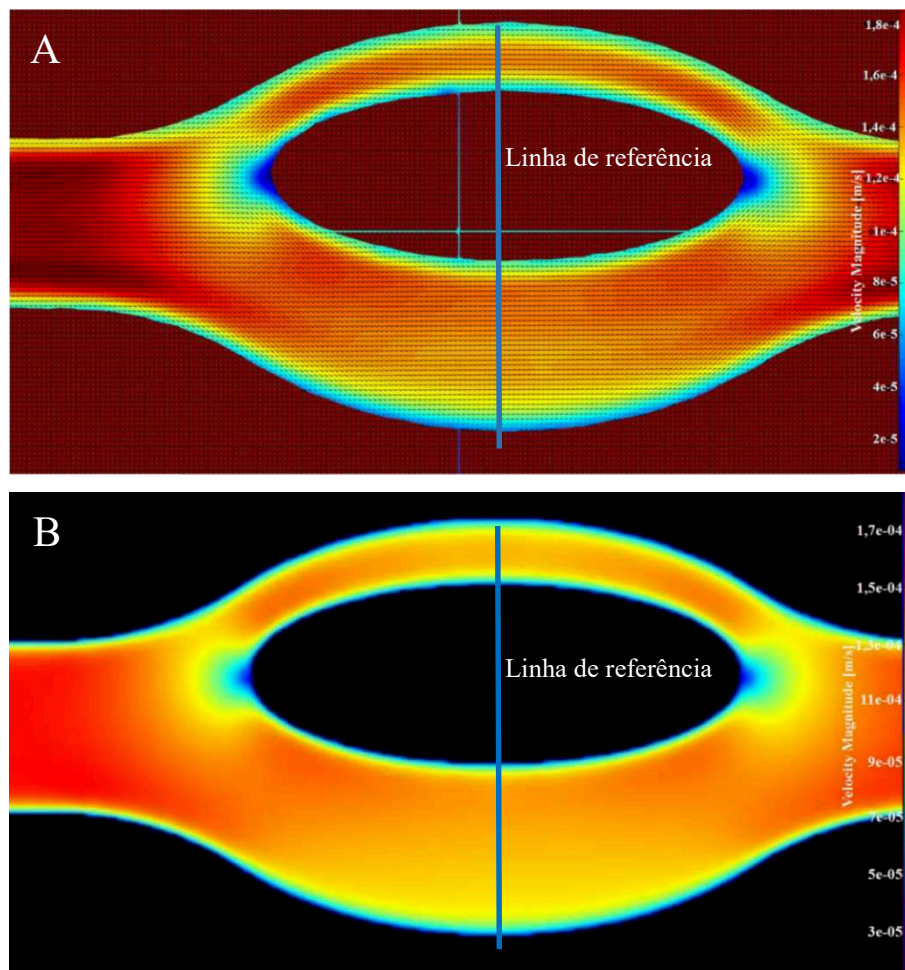
Figura 34: Linhas de corrente para o escoamento de água no poro de duplo canal.



Fonte: Autor

Essa comprovação é importante, pois um número excessivo de partículas paradas poderia afetar o comportamento natural do escoamento e acarretar em erros no processamento de dados, uma vez que o software calcula os vetores velocidade como uma média dos deslocamentos das partículas presentes na janela de interrogação, fazendo com que as partículas paradas reduzam a velocidade estimada, pois cada partícula imóvel é calculada para todos os pares de imagem como tendo um deslocamento nulo.

Figura 35: Comparação entre os campos de velocidades obtidos para as análises numérica e experimental.



Fonte: Autor

A mesma geometria e demais condições impostas ao escoamento foram informadas em uma simulação numérica que utiliza o método Lattice-Boltzmann. A simulação foi realizada pelo Leonardo Rudolfo Cardoso, que também faz parte do grupo de pesquisa GPoró. Ele usou

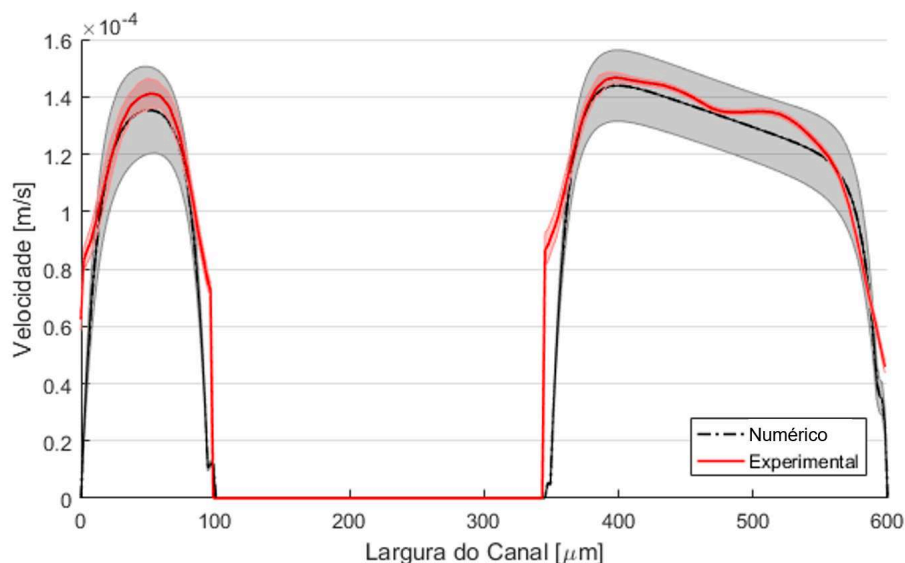
um código desenvolvido pelo grupo que foi criado seguindo os trabalhos de (CHEN, H.; CHEN, S.; MATTHAEUS, 1992; QIAN; D'HUMIÈRES; LALLEMAND, 1992; HE; LUO, 1997; PHILIPPI *et al.*, 2006).

A Figura 35 apresenta uma comparação qualitativa do campo de velocidade encontrado para a técnica experimental em A e numérica em B. Qualitativamente é possível identificar que os resultados se aproximam bastante. O fluido escoava com uma velocidade maior pela seção retangular e ao alcançar a bifurcação sua velocidade é reduzida, visto que a área transversal aumenta. Nas regiões próximas à parede a velocidade do escoamento é significativamente menor do que no centro do canal, e nas regiões em que existe deslocamento em y ocorre um leve aumento da magnitude de velocidade, tudo estando perfeitamente de acordo com o que era esperado para o escoamento neste tipo de geometria e condições.

Os dados quantitativos para as duas análises também ficaram próximos. Usando como base a linha azul traçada verticalmente no centro da geometria, conforme observado na Figura 35, a maior velocidade encontrada para a análise experimental foi de  $(1,47 \pm 0,02) \times 10^{-4}$  m/s, que é apenas 7,07% maior do que a velocidade máxima obtida pela simulação numérica de  $(1,37 \pm 0,12) \times 10^{-4}$  m/s. Ao fazer uma comparação entre todos os pontos avaliados nas duas análises, verificou-se que a diferença média entre as velocidades é de 8%, o que está dentro da incerteza inerente às técnicas.

A Figura 36 apresenta os perfis de velocidades criados com os dados resultantes das técnicas, como pode ser observado os valores ficaram dentro da banda de incerteza das análises.

Figura 36: Comparação entre o perfil de velocidades numérico e experimental.



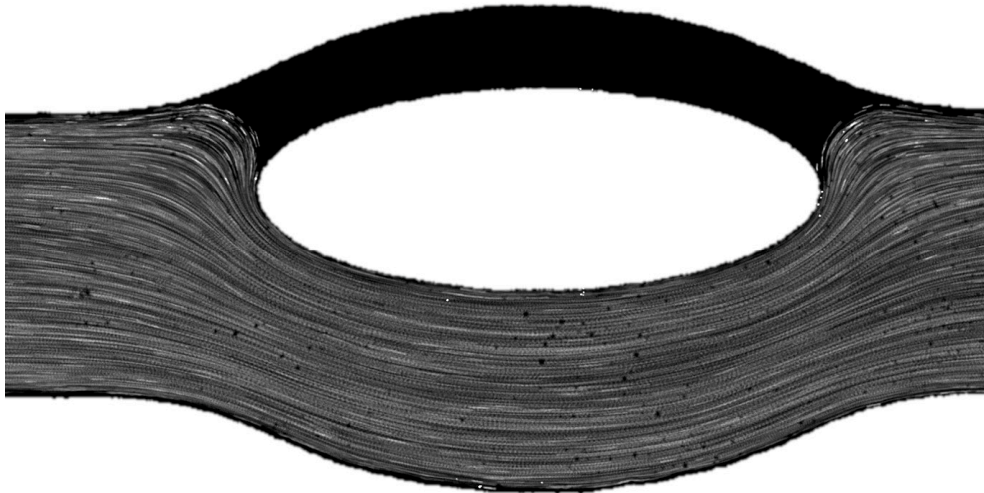
Fonte: Autor

## 4.2 CAMPO DE VELOCIDADE DA FASE INJETADA

Concluída a validação da bancada e do procedimento experimental, o passo seguinte foi realizar experimentos bifásicos. Dois tipos de experimentos puderam ser realizados: embebição e drenagem. Porém, certos desafios tiveram de ser superados, pois conforme já comentado, foram necessários diversos testes até que uma combinação possível de fluidos e partículas traçadoras pudesse ser utilizada para que o campo de velocidade fosse mensurado.

A realização dos experimentos mostrou que, sem dúvida, a molhabilidade é uma das propriedades mais importantes nos escoamentos em escalas micrométricas. No experimento em que foi realizado o processo de drenagem, os fluidos molhante e não-molhante foram FC-43 e água, respectivamente. As partículas traçadoras foram adicionadas apenas a água, pois não apresentaram afinidade ao FC-43, impossibilitando sua dispersão.

Figura 37: Linhas de corrente da fase não-molhante escoando pelo poro de duplo canal com o fluido molhante aprisionado no canal mais estreito da geometria.



Fonte: Autor

Uma vez que a água se comporta como fluido não-molhante para o sistema trifásico: água, FC-43 e PDMS, ao ser injetada, um filme de FC-43 ficou aderido na superfície do micromodelo e quando a interface dos fluidos alcançou a bifurcação, a água não conseguiu



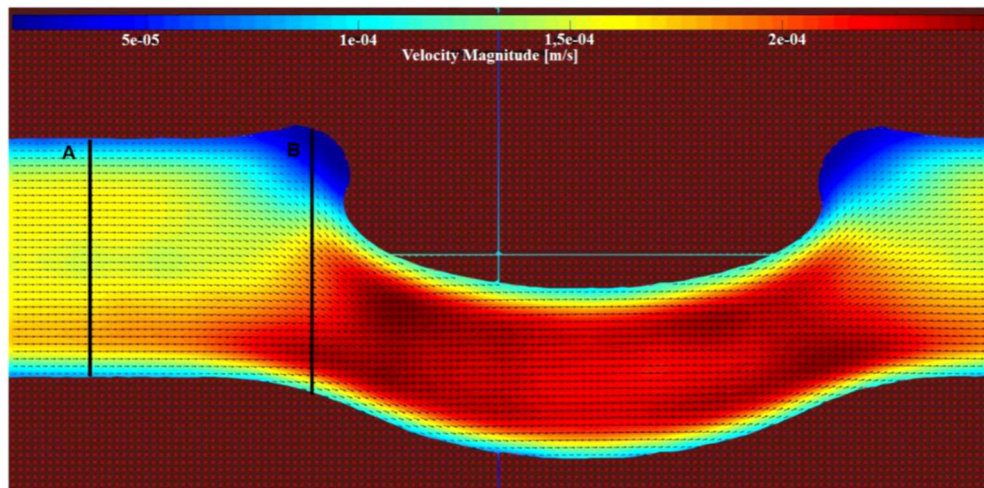
penetrar no canal estreito, ficando o FC-43 aprisionado, enquanto a água escoava pelo canal mais largo da geometria.

A região em que ocorreu o aprisionamento pode ser observada na Figura 37, visto que toda a área preta do canal superior contém FC-43, enquanto a solução de água com partículas escoava pelo canal mais largo da geometria. A figura também apresenta as linhas de corrente geradas pelo deslocamento das partículas traçadoras.

É possível notar que no início da bifurcação o fluido aprisionado se comporta como uma barreira, impedindo o avanço da água no canal mais estreito, porém, as linhas de corrente mostram um comportamento parecido na outra extremidade do canal, onde o fluido que está escoando impede a saída do FC-43, fazendo com que este permaneça aprisionado.

Avaliando os vetores velocidade mostrados na Figura 38, fica evidente que o escoamento percebe o obstáculo ao se aproximar da região de bifurcação e busca um caminho preferencial. Considerando a linha A, é notado que a velocidade na parte inferior do canal é levemente maior do que na parte superior. Já na linha B, percebe-se que existe um gradiente de velocidades com variação significativa entre a região superior e inferior da imagem

Figura 38: Vetores velocidade da fase não-molhante para o escoamento no poro de duplo canal com a fase molhante aprisionada.

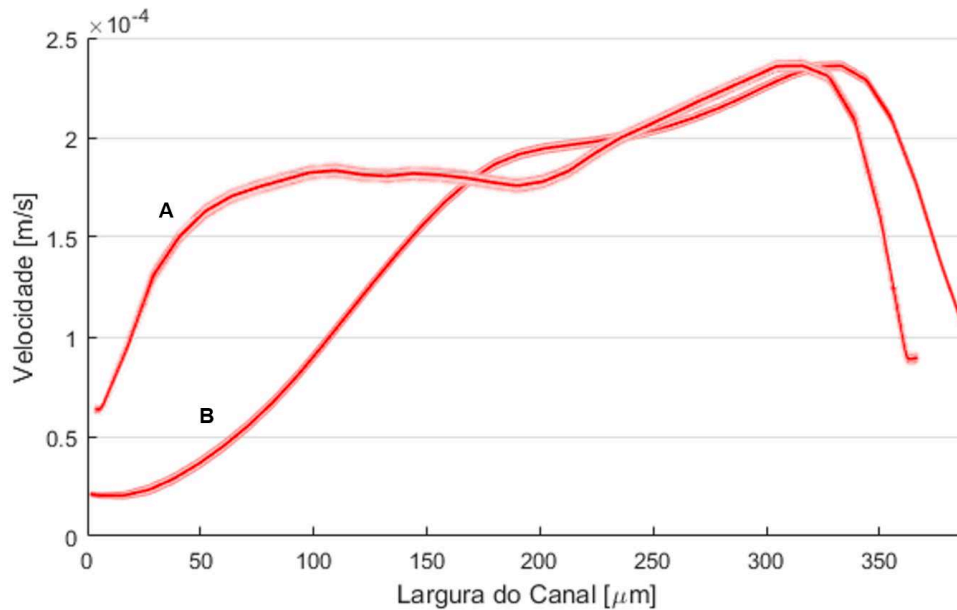


Fonte: Autor

A Figura 39 apresenta os perfis de velocidades gerados pelos vetores presentes nas linhas A e B, destacadas na Figura 38, tendo como referência a parte superior do canal. Como pode ser visto ao comparar os dois perfis, a água começa a escoar com maiores velocidades na parte inferior do canal assim que se aproxima do poro de duplo canal. Quando então alcança a

entrada do modelo, a velocidade próxima à parede inferior é quase dez vezes maior do que a velocidade próxima a parede superior, o que é interessante, pois a pressão deve ser aproximadamente a mesma para ambos os pontos.

Figura 39: Perfis de velocidades para as linhas A e B da Figura 38.



Fonte: Autor

A vazão utilizada neste experimento foi de  $(1,72 \pm 0,05) \times 10^{-12} \text{ m}^3/\text{s}$ , o que gerou um número capilar de  $(3,29 \pm 0,28) \times 10^{-6}$ . Porém, outros ensaios foram realizados para avaliar o comportamento do escoamento com o aumento da vazão de injeção. Entretanto, mesmo chegando ao limite da bancada experimental, utilizando uma vazão dez vezes maior do que a vazão inicial, não houve qualquer mudança na configuração dos fluidos e do escoamento. Ainda foram realizados experimentos com vazões maiores, mesmo que não fosse possível aplicar a técnica  $\mu\text{PIV}$  para mensurar o campo de velocidade. A maior vazão utilizada foi de  $(2,58 \pm 0,07) \times 10^{-10} \text{ m}^3/\text{s}$ , o que corresponde a 150 vezes a vazão inicial. Nesta condição, o número capilar foi de  $(4,94 \pm 0,43) \times 10^{-4}$  e ainda assim o FC-43 se manteve aprisionado.

Os experimentos em que foram adicionadas partículas traçadoras à fase não-molhante apresentaram resultados que estão de acordo com os expostos por Chatzis e Dullien (1983), uma vez que após saturar o micromodelo com o fluido molhante o fluido injetado alcançou a bifurcação e não invadiu o canal mais estreito da geometria, passando a escoar apenas pelo

canal mais largo. Deste modo, os dados experimentais confirmam que as teorias sobre o aprisionamento do fluido molhante pelo não-molhante para diferentes taxas de injeção, deduzidas sobre este tipo de escoamento como resultados das análises qualitativas, estão próximas à realidade.

Contudo, para ir além, foram realizados experimentos em que a fase aprisionada recebeu partículas traçadoras, sendo possível assim, definir o campo de velocidade para o fluido contido no canal mais estreito do poro de duplo canal enquanto o outro fluido era escoado pelo canal maior.

### 4.3 CAMPO DE VELOCIDADE DA FASE APRISIONADA

O próximo passo foi investigar a região de aprisionamento. Contudo, diversos líquidos foram testados até que se encontrasse um par de fluidos adequado. Os experimentos realizados para encontrar o par de fluidos são apresentados no Apêndice A. Após serem definidos os fluidos foram realizadas as gravações  $\mu$ PIV em dois canais com a geometria do poro de duplo canal, porém, com diferentes dimensões.

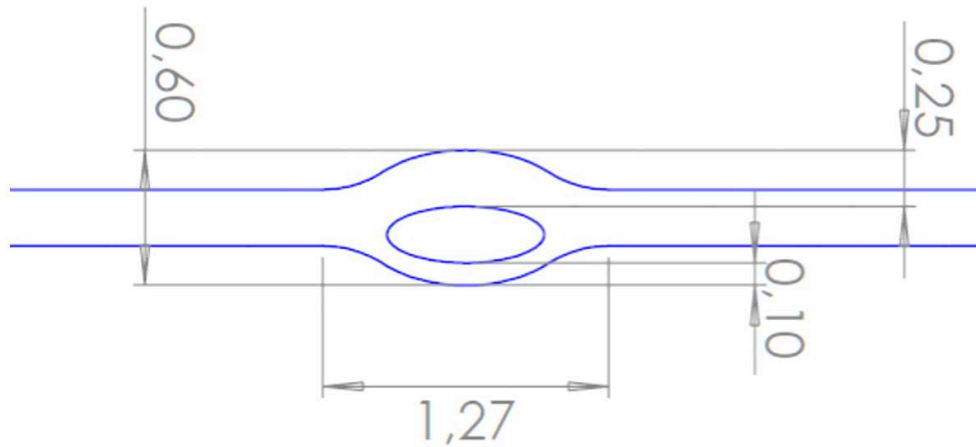
#### 4.3.1 Poro de duplo canal com canais longos

O primeiro canal utilizado possui as dimensões apresentadas na Figura 40, o que causou um aprisionamento de aproximadamente 50% do fluido não molhante no canal estreito, mas devido à área de interface entre os fluidos ser menor em comparação ao outro modelo testado, que será apresentado na seção 4.3.2, o campo de velocidade no fluido aprisionado foi menos intenso.

Estando o fluido que continha as partículas traçadoras aprisionado, foram iniciadas as gravações  $\mu$ PIV para obter as imagens que seriam utilizadas no processamento de dados a fim de estimar o campo de velocidade na região próxima à interface entre os fluidos. A primeira gravação de imagens foi feita sendo imposta uma vazão de  $1,39 \times 10^{-11}$  m<sup>3</sup>/s ao FC-43, o que acarretou em um número capilar de aproximadamente  $8,24 \times 10^{-4}$ . O cálculo do número capilar foi feito usando a Equação 4, sendo considerado o valor da tensão interfacial entre os fluidos de  $(58,8 \pm 1,85) \times 10^{-3}$  N/m, que foi obtido por meio de um procedimento experimental utilizando um goniômetro do laboratório de Plasmas, Filmes e Superfícies da UDESC sob a coordenação do professor Julio Sagás e ajuda da sua aluna de mestrado Thais Vieira.



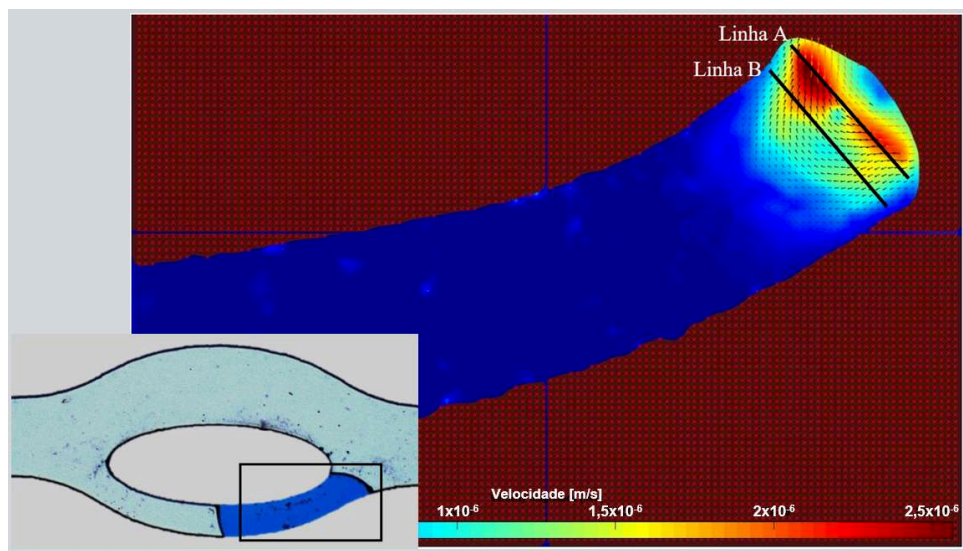
Figura 40: Dimensões do poro de duplo canal com canais longos, unidades em milímetros.



Fonte: Autor.

Depois de realizada a primeira gravação  $\mu$ PIV, a vazão foi elevada em múltiplos inteiros da vazão inicial a fim de avaliar o comportamento do campo de velocidade com diferentes valores para a vazão do FC-43 e diferentes números capilares. Na Figura 41 são apresentados os vetores velocidade resultantes da análise  $\mu$ PIV para a última gravação realizada, pois com base nessa imagem foram traçadas as linhas A e B para serem obtidos os valores das velocidades de todos os experimentos realizados com o microcanal.

Figura 41: Campo de velocidade da fase aprisionada no poro de duplo canal com canais longos.



Fonte: Autor.

Os resultados dos experimentos são apresentados na Tabela 1. A estimativa de velocidade do FC-43 foi calculada com base na vazão imposta e na área da seção retangular do canal.

Tabela 1: Resultados dos experimentos realizados com o poro de duplo canal com canais longos.

Vazão do FC-43 [m <sup>3</sup> /s]	Estimativa de velocidade do FC-43 [mm/s]	Maior velocidade na linha A [mm/s]	Média de velocidade na linha A [mm/s]	Maior velocidade na linha B [mm/s]	Média de velocidade na linha B [mm/s]	Número capilar
(1,39±0,04) x10 <sup>-11</sup>	1,75±0,14	(1,09±0,02) x 10 <sup>-3</sup>	(0,92±0,02) x 10 <sup>-3</sup>	(1,05±0,02) x 10 <sup>-3</sup>	(0,92±0,02) x 10 <sup>-3</sup>	(1,40±0,12) x10 <sup>-4</sup>
(2,78±0,08) x10 <sup>-11</sup>	3,51±0,28	(1,34±0,03) x 10 <sup>-3</sup>	(1,12±0,02) x 10 <sup>-3</sup>	(1,25±0,03) x 10 <sup>-3</sup>	(0,96±0,02) x 10 <sup>-3</sup>	(2,80±0,24) x10 <sup>-4</sup>
(6,94±0,20) x10 <sup>-11</sup>	8,77±0,70	(1,68±0,04) x 10 <sup>-3</sup>	(1,42±0,03) x 10 <sup>-3</sup>	(1,23±0,03) x 10 <sup>-3</sup>	(1,00±0,03) x 10 <sup>-3</sup>	(7,01±0,60) x10 <sup>-4</sup>
(1,39±0,04) x10 <sup>-10</sup>	17,55±1,4	(2,53±0,04) x 10 <sup>-3</sup>	(2,00±0,04) x 10 <sup>-3</sup>	(1,68±0,04) x 10 <sup>-3</sup>	(1,45±0,04) x 10 <sup>-3</sup>	(1,40±0,12) x10 <sup>-3</sup>
(2,78±0,08) x10 <sup>-10</sup>	35,1±0,28	(2,94±0,03) x 10 <sup>-3</sup>	(2,54±0,03) x 10 <sup>-3</sup>	(1,94±0,03) x 10 <sup>-3</sup>	(1,55±0,03) x 10 <sup>-3</sup>	(2,80±0,24) x10 <sup>-3</sup>

Fonte: Autor

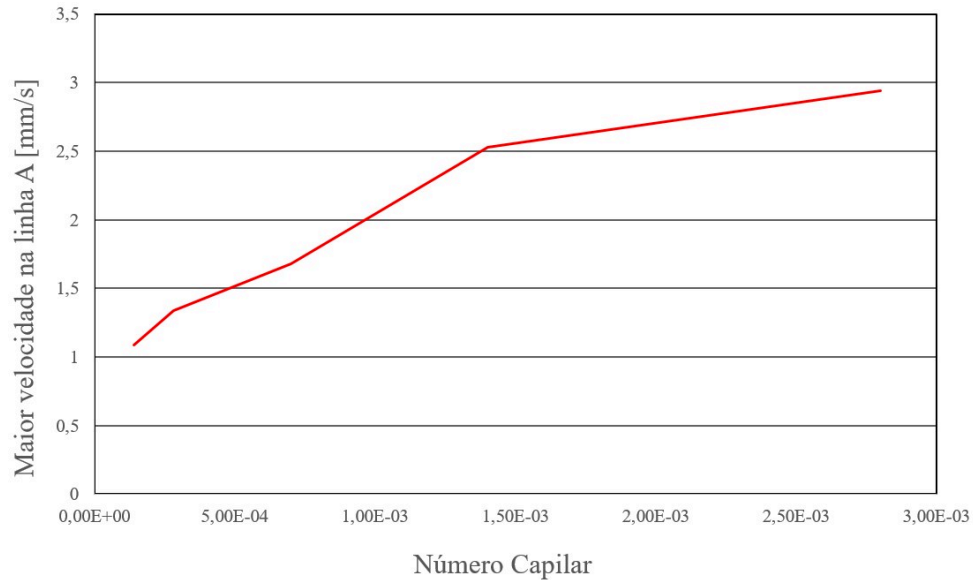
Observando os valores da Tabela 2 pode-se perceber que existe uma diferença maior que 1.000 vezes entre a velocidade do FC-43 que está sendo injetado, para a velocidade da solução de glicerina e água que está aprisionada.

Além disso, quando a vazão imposta ao escoamento de FC-43 é elevada, a relação entre as velocidades se distancia. O que é interessante, pois o número capilar aumenta de forma proporcional a elevação da velocidade com que o FC-43 escoar, porém, a velocidade do fluido aprisionado sofre menores mudanças com o aumento do número capilar, o que é facilmente observado na Figura 42.

São vários os motivos que levam a esta condição, mas sem dúvida, um ponto que foi apresentado neste trabalho diz respeito ao comportamento do fluido que está escoando, pois nos experimentos onde foram encontrados os vetores velocidade para a fase injetada ficou claro que a velocidade próxima à interface dos fluidos é muito menor do que a velocidade no centro

do canal. Esse comportamento se mostrou um dos grandes responsáveis pelo aprisionamento do fluido no canal menor.

Figura 42: Velocidade máxima do fluido aprisionado pelo número capilar do escoamento.



Fonte: Autor

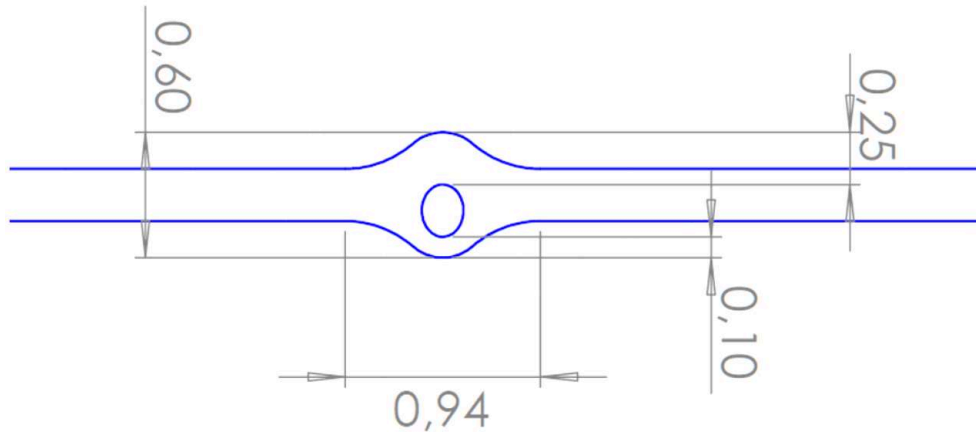
Outra característica interessante do experimento foi o surgimento de vórtices tridimensionais na fase aprisionada. Conforme observado na Figura 41, os vetores velocidade próximos à interface dos fluidos apontam na direção contrária ao esperado, já que o movimento do FC-43 é da parte superior para a inferior. Isto ocorre devido a movimentos tridimensionais que ocorreram nesta região, em que o fluido no fundo do canal se deslocava na mesma direção que o FC-43 enquanto o fluido próximo à superfície, que estava no plano focal do microscópio, fazia o movimento contrário. Este comportamento não é avaliado pelo software, pois a interpretação dos movimentos das imagens é em 2D.

#### 4.3.2 Poro de duplo canal com canais curtos

Para verificar o comportamento da fase aprisionada também foram realizados experimentos com outro micromodelo, que possui a geometria apresentada na Figura 43.

Devido a sua forma, apenas uma pequena quantidade de fluido com partículas ficou aprisionada no canal estreito, algo em torno de 20% a 30% do volume total do canal.

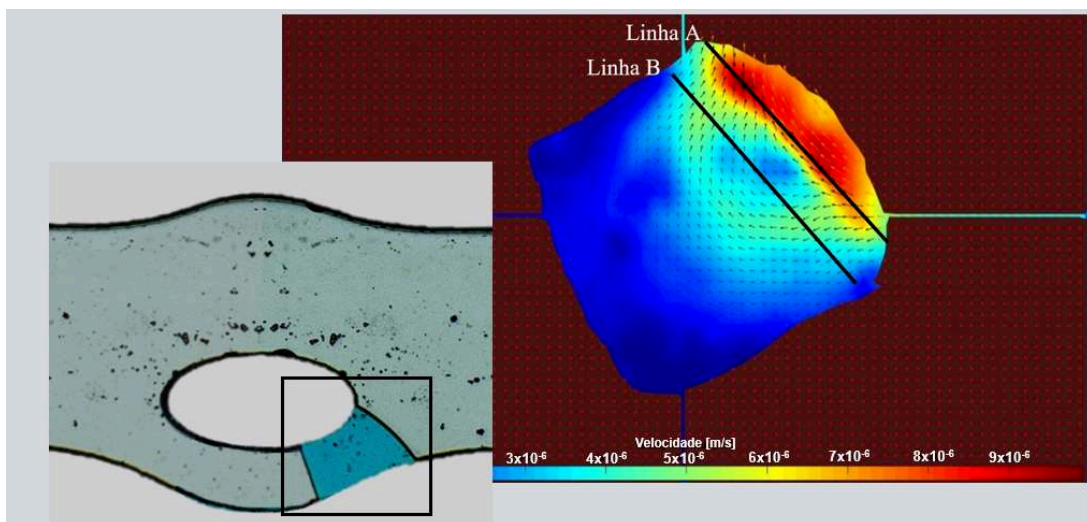
Figura 43: Dimensões do micromodelo com canais curtos, unidades em milímetros.



Fonte: Autor

O experimento foi realizado seguindo o mesmo procedimento e parâmetros do anterior, possibilitando assim a comparação dos valores resultantes. A Figura 44 apresenta o campo de velocidade para o último experimento, assim como as linhas de referência usadas para obtenção dos resultados. O surgimento de vórtices tridimensionais também foi notado, se mostrando ainda mais influentes para este tipo de geometria.

Figura 44: Campo de velocidade no poro de duplo canal com canais curtos.



Fonte: Autor.

Avaliando os valores apresentados na Tabela 2, é notado que não existe uma diferença tão significativa entre as velocidades encontradas para as linhas A e B, com exceção dos resultados obtidos para o quinto experimento. O motivo para esta condição é o deslocamento do centro do vórtice gerado.

Tabela 2: Resultados do experimento com canais curtos.

Vazão do FC-43 [m <sup>3</sup> /s]	Velocidade do FC-43 [mm/s]	Maior velocidade na linha A [mm/s]	Média de velocidades na linha A [mm/s]	Maior velocidade na linha B [mm/s]	Média de velocidades na linha B [mm/s]	Número capilar
(1,39±0,04) x10 <sup>-11</sup>	1,75±0,14	(2,07±0,05) x10 <sup>-3</sup>	(1,58±0,04) x10 <sup>-3</sup>	(1,64±0,04) x10 <sup>-3</sup>	(1,20±0,03) x10 <sup>-3</sup>	(1,40±0,12) x10 <sup>-04</sup>
(2,78±0,08) x10 <sup>-11</sup>	3,51±0,28	(1,91±0,04) x10 <sup>-3</sup>	(1,57±0,04) x10 <sup>-3</sup>	(1,68±0,05) x10 <sup>-3</sup>	(1,33±0,04) x10 <sup>-3</sup>	(2,80±0,24) x10 <sup>-04</sup>
(6,94±0,20) x10 <sup>-11</sup>	8,77±0,70	(2,46±0,05) x10 <sup>-3</sup>	(2,16±0,05) x10 <sup>-3</sup>	(1,77±0,05) x10 <sup>-3</sup>	(1,48±0,04) x10 <sup>-3</sup>	(7,01±0,60) x10 <sup>-04</sup>
(1,39±0,04) x10 <sup>-10</sup>	17,55±1,4	(3,86±0,08) x10 <sup>-3</sup>	(3,35±0,07) x10 <sup>-3</sup>	(2,29±0,07) x10 <sup>-3</sup>	(1,87±0,05) x10 <sup>-3</sup>	(1,40±0,12) x10 <sup>-03</sup>
(2,78±0,08) x10 <sup>-10</sup>	35,1±2,8	(14,39±0,32) x10 <sup>-3</sup>	(12,8±0,24) x10 <sup>-3</sup>	(6,71±0,18) x10 <sup>-3</sup>	(5,45±0,14) x10 <sup>-3</sup>	(2,80±0,24) x10 <sup>-03</sup>

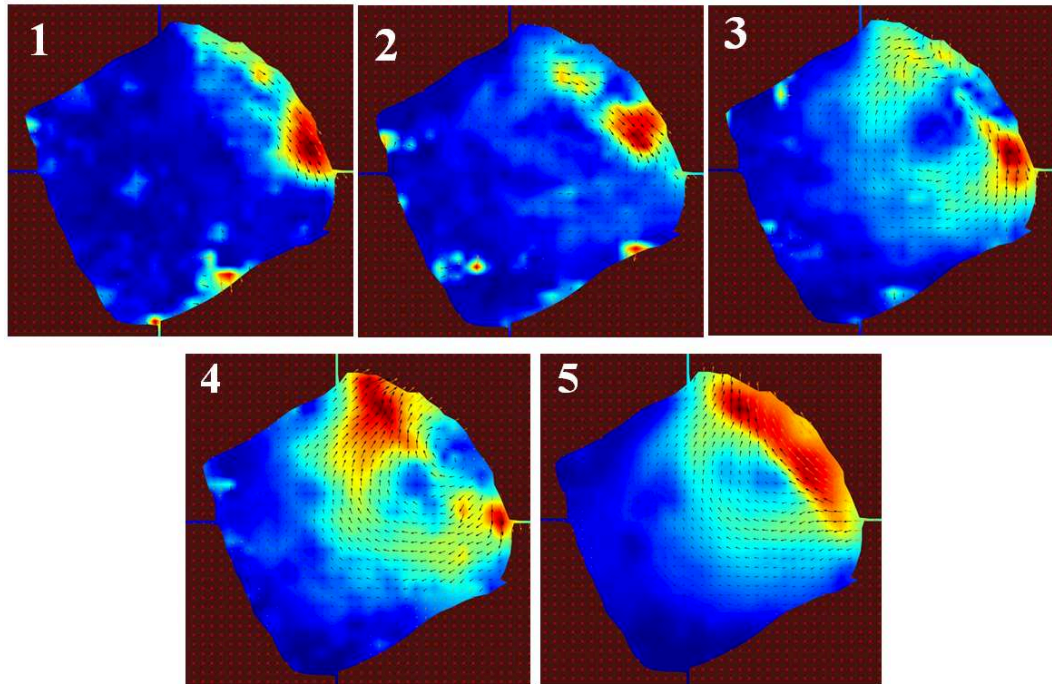
Fonte: Autor

Como para os primeiros experimentos as rotações tridimensionais não se mostraram com tanta intensidade, o vórtice gerado no plano observado apresentou seu centro mais distante da região de interface entre os fluidos. Entretanto, a imagem 5 da Figura 45 mostra que para o último experimento o vórtice tridimensional fez com que o sentido de rotação do fluido se mantivesse na mesma direção ao longo de todo o plano.

A Figura 45 esclarece em parte o fenômeno ocorrido durante os experimentos. Na imagem 1 existe um vórtice bidimensional no plano de avaliação, com as maiores velocidades sendo encontradas junto à interface dos fluidos, o que se repete na imagem 2 e 3, e teoricamente, seria o comportamento esperado. Porém, a imagem 2 já mostra vetores com comportamentos irregulares próximo à interface, onde na parte superior da imagem também são vistos vetores na direção contrária à do escoamento de FC-43. As imagens 3 e 4 deixam clara a existência de um vórtice tridimensional, pois na parte inferior das imagens os vetores apontam na direção do

escoamento de FC-43, enquanto que na parte superior os vetores gerados apontam na direção oposta. A imagem 5 por sua vez, não apresenta um vórtice bidimensional, justamente devido à intensidade do vórtice tridimensional que ocorreu neste experimento.

Figura 45: Movimento do fluido aprisionado no poro de duplo canal com canais curtos para diferentes velocidades da fase injetada.

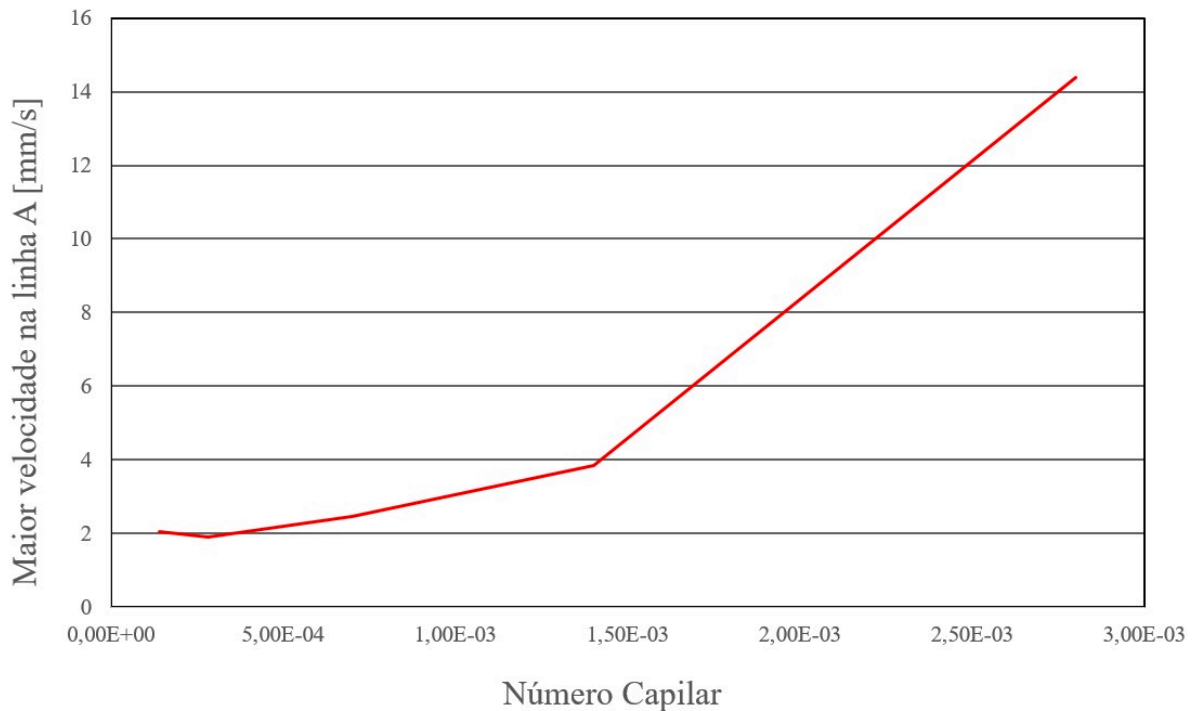


Fonte: Autor

Em contradição ao ocorrido no experimento com microcanal com canais longos, os resultados obtidos para esse experimento mostraram que o aumento do número capilar faz com que a velocidade na região de aprisionamento se eleve significativamente, conforme observado na Figura 46. Entretanto, a explicação para esse comportamento se dá pela maior região de contato entre os fluidos para o caso da geometria utilizada neste experimento, e como já foi comentado, pela intensidade com que o vórtice tridimensional atuou sobre o fluido aprisionado.

Os resultados do trabalho se mostraram muito interessantes, principalmente porque foram gerados dados quantitativos de escoamentos bifásicos em canais de apenas 100  $\mu\text{m}$  de largura, o que corresponde aproximadamente a espessura de um fio de cabelo. É preciso, porém, avaliar a confiabilidade destes dados, pois assim como para qualquer técnica experimental, a técnica  $\mu\text{PIV}$  apresenta incertezas em seus resultados, as quais são abordadas na seção a seguir.

Figura 46: Maior velocidade da linha A em razão do número capilar para o experimento com canais curtos.



Fonte: Autor

#### 4.4 ANÁLISE DE INCERTEZA DOS RESULTADOS

A velocimetria por imagem de partículas é uma técnica experimental que mede indiretamente o campo de velocidade do escoamento. Desse modo, três principais fontes de incertezas precisam ser avaliadas: as dimensões físicas que estão envolvidas nos experimentos, o processamento de dados e, devido a sensibilidade apresentada pelo software usado neste trabalho, o operador também se mostrou como uma fonte de incerteza.

##### 4.4.1 Análise de incerteza do processamento de dados

O software PIVlab é um *script* aberto desenvolvido no MATLAB por Thielicke e Stamhuis (2014). Possui uma interface simples e intuitiva, mas com um algoritmo bem sofisticado e que segue em grande parte o arranjo descrito por Raffel et. all (2007) quanto a definição do posicionamento das partículas e correlações usadas para determinar os vetores

velocidade do campo. Porém, todo o aparato matemático é desenvolvido sobre valores que carregam incertezas, fazendo assim com que estas existam nos resultados obtidos.

As incertezas apresentadas nos resultados gerados especificamente pelo software se devem principalmente por dois motivos. Para que sejam realizados os cálculos dos vetores velocidade, é necessário informar ao software o tempo entre as imagens e uma escala de comprimento que gere uma referência ao tamanho dos pixels, ambas as informações tem incertezas atreladas. Além disso, o próprio processamento de imagens apresenta algumas incertezas que foram bem explicadas por Raffel *et. all* (2007).

Para encontrar a grandeza destas incertezas, uma imagem capturada por um dos experimentos com seção transversal retangular foi usada como base para a criação de um conjunto de imagens sintéticas, ou seja, pares de imagens exatamente iguais, exceto por um deslocamento conhecido.

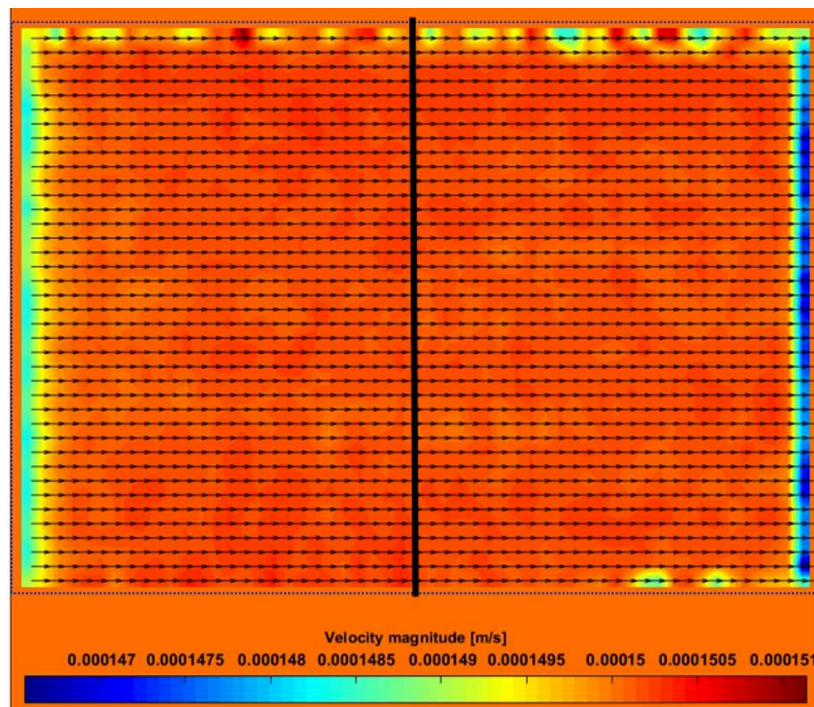
Essas imagens foram então processadas pelo software usando as mesmas configurações que foram adotadas para o processamento das imagens capturadas nos experimentos. Em paralelo, a velocidade do escoamento foi calculada usando as mesmas informações solicitadas pelo software, e que para este conjunto de imagens são exatas, uma vez que o deslocamento imposto é igual para todas as imagens.

Como pode ser observado na Figura 47, existem alguns erros na avaliação feita pelo software, pois como foram utilizadas imagens perfeitamente iguais, todos os vetores velocidade deveriam apresentar a mesma magnitude. No entanto, é preciso ressaltar que o software realça as diferenças dos vetores apresentados, sendo a maior diferença encontrada em todo o campo de velocidade de apenas  $4 \times 10^{-6}$  m/s, o que representa 2,67% da velocidade real, que é de  $1,5 \times 10^{-4}$  m/s.

Como pode ser notado, existe uma tendência para que os maiores erros fiquem na entrada e saída do canal. Esse comportamento é esperado visto que as janelas de interrogação calculadas para estas regiões recebem partículas entre as imagens do par, para o caso da lateral esquerda que é por onde o fluido entra no quadro de observação, e na lateral direita as partículas desaparecem, acarretando também em erros nos cálculos dos vetores velocidade. Entretanto, pode ser percebido também que na parte superior da Figura 47 há maior predominância de erros do que no restante da imagem. Isto ocorreu devido a imagem utilizada ter pontos com ausência de partículas na região superior, acarretando em pequenos erros para as velocidades calculadas.



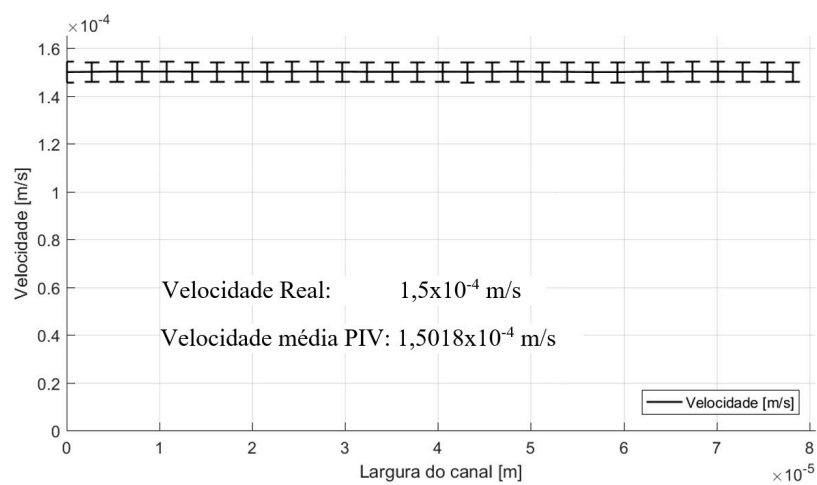
Figura 47: Campo de velocidade para imagens sintéticas.



Fonte: Autor

Usando como base a linha preta central apresentada na Figura 47, foi gerado o perfil de velocidades e posteriormente calculadas as respectivas incertezas. Como pode ser observado na Figura 48, a velocidade média do escoamento se aproximou muito da velocidade real, apresentando uma diferença de apenas 0,121%.

Figura 48: Perfil de velocidades para imagens sintéticas.



Fonte: Autor

Esta avaliação mostrou que o procedimento e parâmetros usados nos experimentos são robustos e apresentam valores relativamente confiáveis quanto ao processamento de imagens realizado. Isso é importante, pois nos experimentos realizados onde foram calculados os campos de velocidades para a fase aprisionada, não é possível estimar as incertezas pertinentes aos aspectos físicos do experimento, como a vazão ou a área de seção transversal, pois o movimento do fluido aprisionado se dá unicamente pelo atrito existente na interface dos fluidos devido ao arrasto viscoso. Com isso, as incertezas apresentadas para as velocidades da fase aprisionada foram estimadas apenas com base nos erros encontrados no processamento das imagens.

Todavia, para determinar o número capilar dos experimentos apresentados nas seções 4.31 e 4.32, foi preciso definir a velocidade média do escoamento do fluido injetado, a qual apresenta incertezas quanto o seu processo de medição.

#### 4.4.2 Análise de incerteza das medições

Infelizmente existe um custo intrínseco ao se trabalhar com escalas tão pequenas. Isso ocorre porque a incerteza de canais em macroescala é na ordem de micrometros, ou seja, para um canal de 30 mm de diâmetro com uma incerteza de  $\pm 0,1\%$ , o valor da incerteza será de 30  $\mu\text{m}$ . Entretanto, ao se trabalhar na microescala a grandeza dos canais utilizados pode ser de apenas 30  $\mu\text{m}$ , como é o caso deste trabalho. Deste modo, dificilmente a precisão do processo de fabricação dos microcanais alcançará resoluções da mesma ordem de proporção que em escalas normais. Isso acarreta em incertezas maiores quanto às dimensões dos canais usados nos experimentos em microescala.

Para se determinar a velocidade média do escoamento a seguinte equação é usada:

$$V = \frac{Q}{A} , \quad (11)$$

onde  $Q$  é a vazão volumétrica imposta pela bomba, dada em  $\text{m}^3/\text{s}$ , e  $A$  refere-se a área da seção transversal do micromodelo em  $\text{m}^2$ , que pode ser expressa pela multiplicação de  $w$  e  $h$ , sendo a largura e altura do microcanal, respectivamente. Como estas variáveis possuem incertezas, é preciso que seja calculada a propagação da incerteza expandida, encontrando assim o valor da velocidade do escoamento.

Albertazzi e Sousa (2008) explicam que a maneira mais simples de se determinar a incerteza padrão de uma variável que é determinada por um processo de medição, é a partir de

repetidas medições do mesmo mensurando. Com estes valores, pode ser usada a equação abaixo para encontrar a incerteza padrão das medições,

$$u(I) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (I_k - \bar{I})^2}{n - 1}}, \quad (12)$$

onde  $u(I)$  é a incerteza padrão calculada a partir de  $n$  medições,  $I_k$  é a  $k$ -ésima indicação,  $\bar{I}$  a média das indicações e  $n$  é o número de repetições efetuadas.

Para definir a incerteza padrão da largura do microcanal foram realizadas 20 medições em cada canal utilizado nos experimentos. Estas medições foram feitas com o microscópio utilizando a lente objetiva de 20X, sendo este primeiramente calibrado com o uso de uma régua de calibração. A incerteza do microscópio não foi levada em consideração, visto que é insignificante quando comparada a incerteza das dimensões dos microcanais. O valor médio para a largura de um dos canais ensaiados foi de 246,85  $\mu\text{m}$  e para a incerteza padrão das medições obteve-se o valor de 2,55  $\mu\text{m}$ , ficando a incerteza padrão para os demais canais usados no trabalho na mesma ordem de grandeza.

A incerteza padrão para a profundidade dos micromodelos produzidos pela USP foi calculada com base nos valores informados pelo fabricante. Foram realizadas oito medições em cada canal, tendo como resultado a profundidade média de 32,06  $\mu\text{m}$  e a incerteza padrão das medições de 0,97  $\mu\text{m}$  para o canal com 246,85  $\mu\text{m}$  de largura. Para o canal mais estreito de 96,60  $\mu\text{m}$  de largura, os valores para a profundidade resultaram em uma média de 32,20  $\mu\text{m}$ , com incerteza padrão de 1,27  $\mu\text{m}$ .

Para encontrar as incertezas das vazões utilizadas nos experimentos, foi usado o erro informado pelo fabricante da bomba de seringa como sendo a resolução do sistema de medição. Com isso foi possível calcular a incerteza seguindo o que Albertazzi e Sousa (2008) explicam para procedimentos não estatísticos com distribuição uniforme, dado por

$$u = \frac{R}{2\sqrt{3}}, \quad (13)$$

onde  $u$  é a incerteza padrão e  $R$  a resolução da bomba de seringa.

O passo seguinte é calcular a propagação da incerteza dos valores encontrados, para assim definir a incerteza associada a velocidade. Para simplificar, é possível começar calculando a propagação de incerteza da área da seção transversal, que é apresentada pela multiplicação de  $\omega$  por  $h$ . O cálculo da propagação de incerteza desta multiplicação é feito por.

$$u_A^2 = \left(\frac{\partial A}{\partial L}\right)^2 u_L^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial h}\right)^2 u_h^2, \quad (14)$$

onde  $u_A$  é a incerteza padrão da área. Posteriormente pôde ser calculada a propagação da incerteza para uma divisão, dada por

$$u_V^2 = \left(\frac{\partial V}{\partial A}\right)^2 u_A^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial Q}\right)^2 u_Q^2, \quad (15)$$

sendo  $u_V$  a incerteza expandida para a velocidade.

Após definir a incerteza padrão para velocidade, a incerteza expandida foi calculada seguindo a equação a seguir:

$$U_V = u_V t, \quad (16)$$

onde  $U_V$  é a incerteza expandida da velocidade e  $t$  o coeficiente de Student.

No caso do micromodelo fabricado pela empresa Flowjem o valor da profundidade e incerteza expandida do microcanal adquirido foi informado diretamente pelo fabricante, sendo o valor de  $(33,1 \pm 0,8) \mu\text{m}$  usado para os cálculos. A largura do canal foi definida por um procedimento estatístico, conforme os cálculos apresentados acima, resultando no valor de  $(103,98 \pm 0,49) \mu\text{m}$ .

## 5 CONCLUSÃO

Neste trabalho de dissertação, uma bancada experimental foi montada para utilizar a técnica  $\mu$ PIV na avaliação de escoamentos bifásicos em escala micrométrica possibilitando a obtenção de dados quantitativos que possam contribuir na compreensão da física que envolve este tipo de escoamento.

Uma ampla variedade de experimentos foi realizada, cujos principais objetivos foram verificar a consistência física dos resultados obtidos como resposta da técnica, determinar uma rotina para a realização das atividades e mapear os parâmetros a fim de identificar os mais adequados para o tipo de experimento que se buscou realizar. A bancada foi validada ao comparar os resultados gerados pelos experimentos em um canal de seção transversal aqueles obtidos analiticamente por uma derivação da equação de Hagen–Poiseuille. Já para uma geometria mais complexa, a do poro de duplo canal, os resultados experimentais foram comparados aos processados por uma simulação numérica confiável.

A bancada experimental, juntamente com a rotina estabelecida, apresentou consistência nos resultados dentro de pequenas incertezas, que em sua maioria, se devem às condições físicas dos dispositivos utilizados. Os resultados quantitativos obtidos com os experimentos bifásicos no poro de duplo canal contribuíram para um melhor entendimento das condições que levam ao aprisionamento do fluido e o motivo pelo qual a simples elevação da vazão não fará com que o fluido aprisionado seja deslocado.

Sendo uma propriedade considerada muito importante na literatura, a molhabilidade se mostrou novamente de fundamental relevância quando se busca entender o comportamento de escoamentos bifásicos em microcanais, visto que em todos os experimentos realizados o fluido molhante conseguia avançar por toda a geometria e saturar completamente o micromodelo, enquanto que para os processos de drenagem, o fluido não-molhante sempre buscou escoar pelo centro do canal, deixando gotas de fluido molhante nas paredes e no canal mais estreito da geometria do poro de duplo canal.

No entanto, a relação entre viscosidades  $M$  se mostrou com maior influência no comportamento do escoamento a medida que a afinidade ao sólido por parte do fluido molhante diminui. Para os experimentos realizados com um sistema trifásico em que um dos fluidos apresentou molhabilidade levemente maior e o valor de  $M$  ficou acima de quatro, ocorreu que

mesmo no processo de embebição houve o aprisionamento de fluido não-molhante no canal mais estreito do poro de duplo canal. Isso até então não havia sido exposto na literatura.

Os dados quantitativos obtidos no experimento de drenagem em que o FC-43 permaneceu aprisionado no menor canal da geometria enquanto uma solução de água ultrapura com partículas traçadoras escoava pelo canal maior apresentaram um perfil de velocidades interessante na seção transversal anterior a bifurcação, existindo uma diferença de nove vezes entre as velocidades da parte superior, a qual contém o fluido aprisionado a jusante, para as velocidades da parte inferior. Além disso, a grandeza dos vetores velocidade próximos a entrada e saída do menor canal ficou similar, tendo a componente da direção y em sentidos opostos.

Nos experimentos em que se buscou gerar dados quantitativos para a fase residual, foi necessário elaborar uma solução de glicerina e água ultrapura com partículas, para que após saturar o microcanal com esta solução, FC-43 fosse injetado. Apesar de se tratar de um processo de embebição, o fluido não-molhante ficou aprisionado, o que possibilitou o mapeamento do campo de velocidade na região do aprisionamento, visto que as partículas traçadoras foram dispersas nesse fluido.

Os resultados mostraram a existência de um vórtice bidimensional no plano observado, o que como era esperado foi gerado pelo arrasto viscoso entre os fluidos. Porém, com o aumento da velocidade do fluido injetado, se passou a observar também um vórtice tridimensional, o que acarretou na contradição dos resultados para os dois modelos ensaiados neste tipo de experimento.

Também é interessante observar que os dados gerados para os canais ensaiados deixam clara a importância da geometria do canal, e conseqüentemente a área de contato entre os fluidos, para a velocidade na região de aprisionamento. Ao comparar os gráficos gerados com a velocidade na interface em relação ao número capilar para os dois modelos ensaiados, é notada uma grande diferença nos resultados. Para o micromodelo com canais longos, o aumento do número capilar não acarretou em um aumento proporcional na velocidade do fluido aprisionado. Já para a geometria com canais curtos, a velocidade do fluido aprisionado próximo à interface aumentou com maior intensidade a medida que o número capilar foi elevado.

Os dois modelos ensaiados possuem canais com seção transversal de igual dimensão e nos experimentos foram usados os mesmos valores de vazão de fluido injetado, ou seja, a velocidade da fase injetada para os dois modelos deveria ser a mesma em cada análise feita. Entretanto, já era esperado que para a geometria com canais curtos o efeito gerado no fluido

aprisionado seria mais significativo, devido a maior área de contato entre os fluidos para esta geometria.

A hipótese para o fenômeno do vórtice tridimensional se deve então pelo fato de se tratar de um experimento de embebição. Uma vez que o fluido não-molhante tenha ficado aprisionado, se espera que exista um ângulo de contato menor entre a linha que tangencia a superfície sólida e a linha tangente a interface dos fluidos, para o caso de o ângulo ser avaliado sobre o fluido molhante. Este mesmo comportamento ocorre também no plano yz, de modo que haverá linhas de corrente com diferentes velocidades passando por esse plano, acarretando assim em vórtices tridimensionais.

Os resultados obtidos com essa dissertação de mestrado mostraram que a técnica  $\mu$ PIV pode ser de grande ajuda para o entendimento dos fenômenos que ocorrem com os escoamentos bifásicos em microescala. Com o intuito de incentivar o seu uso em pesquisas relacionadas, foi buscado montar uma bancada que disponha de equipamentos relativamente simples, mas que mesmo assim gere resultados proveitosos. A utilização de um sistema de iluminação empregando fluorescência induzida foi de fundamental importância, viabilizando o uso da técnica com maior simplicidade e mesmo assim gerando resultados confiáveis, uma vez que as imagens capturadas durante as gravações apresentavam excelente contraste e não careciam de pré-processamentos sofisticados. Apesar da complexidade, a técnica foi consistente e gerou resultados válidos com uma margem de incerteza aceitável, além de existir uma gama considerável de experimentos que podem ser feitos, mostrando que a utilização da mesma poderá contribuir imensamente para o avanço da ciência que envolve o meio poroso.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A técnica  $\mu$ PIV se mostrou interessante na aplicação de escoamentos em microescala, gerando resultados quantitativos com precisão muito satisfatória considerando as dimensões dos canais estudados. Porém, neste trabalho foram realizados experimentos bifásicos em apenas duas geometrias do poro de duplo canal com um par de fluidos.

Avaliando a robustez da técnica e a diversidade de modelos que podem ser ensaiados, presume-se que inúmeros trabalhos investigando outras geometrias e utilizando outros pares de fluidos possam ser feitos seguindo os mesmos procedimentos e parâmetros adotados neste.

Para gerar resultados ainda mais precisos a respeito do movimento no fluido aprisionado decorrente do arrasto viscoso com a fase injetada, é de grande interesse que seja encontrado um par de fluidos em que ambos possam receber partículas traçadoras. Tal experimento apresentaria valores para as velocidades da fase injetada e aprisionada na interface das mesmas, o que tornaria possível explorar a dependência entre as velocidades na interface com o número capilar, ou outra propriedade que afete o escoamento.

No que toca os limites da bancada experimental, poderiam ser realizados experimentos que monitorassem velocidades do escoamento em uma gama maior de valores caso a câmera acoplada ao microscópio tivesse maior taxa de captura de quadros por segundo. Do mesmo modo, para investigar geometrias ainda menores, visto que o microscópio dispõe de lentes objetivas com maiores capacidades de ampliação, seria recomendado o uso de micromodelos que apresentem canais com menor profundidade, pois, conforme relatado no trabalho, para as dimensões utilizadas os resultados foram influenciados fortemente pela componente  $z$ , o que não é bom já que as análises são feitas para apenas 2 dimensões.



## REFERÊNCIAS

ALBERTAZZI, A.G.Jr.; SOUSA, A.R. **Fundamentos de metrologia científica e industrial**. Florianópolis: Editora Manole, 2008.

ANGELOTTI, Wagner Fernando Delfino et al. Uma abordagem simplificada do método Monte Carlo Quântico: da solução de integrais ao problema da distribuição eletrônica. **Química Nova**, [s.l.], v. 31, n. 2, p.433-444, 2008. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-40422008000200044>.

BALAN, Catalin Mihai; MARCULESCU, Catalin; ILIESCU, Ciprian. Micro-PIV measurements for hydrodynamic characterizations of microfluidic flows. **Cas 2012 (international Semiconductor Conference)**, [s.l.], p.247-250, out. 2012. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/smicnd.2012.6400641>.

BEAR, Jacob. **Dynamics of fluids in porous media**. New York: Dover publications, 1988.

BLOIS, Gianluca; BARROS, Julio M.; CHRISTENSEN, Kenneth T.. A microscopic particle image velocimetry method for studying the dynamics of immiscible liquid–liquid interactions in a porous micromodel. **Microfluidics And Nanofluidics**, [s.l.], v. 18, n. 5-6, p.1391-1406, 7 jan. 2015. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10404-014-1537-1>.

BUCHGRABER, Markus. **Microvisual investigations to assess and understand enhanced oil recovery processes using etched silicon micromodels**. 2013. Dissertação (Doutorado em filosofia) – Departamento de engenharia e recursos energéticos, Universidade de Stanford, Santa Clara, 2013.

CANCIAM, César Augusto. EFEITO DA TEMPERATURA NA VISCOSIDADE DE ÓLEOS VEGETAIS REFINADOS. **Publicatio Uepg: CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA, CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS.**, Ponta Grossa, v. 16, p.7-12, jun. 2010. Disponível em: <<https://www.revistas2.uepg.br/index.php/exatas/article/view/1604>>. Acesso em: 29 maio 2019.

CHANG, Liang-cheng et al. Experimental study on imbibition displacement mechanisms of two-phase fluid using micro model. **Environmental Earth Sciences**, [s.l.], v. 59, n. 4, p.901-911, 20 fev. 2009. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-009-0085-6>.

Chatzis, I. and Dullien, F.A.L., 1983. “Dynamic immiscible displacement mechanisms in pore doublets: Theory versus experiment”. **Journal Of Colloid And Interface Science**, Vol. 91, No 1, pp.199-222.

Chatzis, I. and Morrow, N.R., 1984. “*Correlation of Capillary Number Relationships for Sandstone*”. **Society Of Petroleum Engineers Journal**. Vol. 24, No. 5, pp. 555-562.

CHEN, Hudong; CHEN, Shiyi; MATTHAEUS, William H.. Recovery of the Navier-Stokes equations using a lattice-gas Boltzmann method. **Physical Review A**, [s.l.], v. 45, n. 8, p.5339-5342, 1 abr. 1992. American Physical Society (APS). <http://dx.doi.org/10.1103/physreva.45.r5339>.

Cunha, Andre Rafael. **Caracterização de sistemas porosos de rochas reservatório de petróleo a partir da extração de redes poro-ligações**. 2012. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais) – Departamento de engenharia de materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2012.

FELIPE, Lorena de Oliveira; DIAS, Sandra de Cássia. Surfactantes sintéticos e biossurfactantes: vantagens e desvantagens. **Química Nova na Escola**, [s.l.], v. 39, n. 3, p.228-236, 2017. Sociedade Brasileira de Química (SBQ). <http://dx.doi.org/10.21577/0104-8899.20160079>.

FOLLES, Havard Nakken. **Fluid displacements during multiphase flow visualized at the pore scale using micromodels**. 2012. Dissertação (Mestrado em Física de Reservatórios) - Departamento de Física e Tecnologia, Universidade de Bergen, Bergen, 2012.

GLYCERINE PRODUCERS ASSOCIATION. Physical properties of glycerine and its solutions, 1963.

HE, Xiaoyi; LUO, Li-shi. Theory of the lattice Boltzmann method: From the Boltzmann equation to the lattice Boltzmann equation. **Physical Review e**, [s.l.], v. 56, n. 6, p.6811-6817, 1 dez. 1997. American Physical Society (APS). <http://dx.doi.org/10.1103/physreve.56.6811>.

ISFAHANI, A.h. Meghdadi; AFRAND, Masoud. Experiment and Lattice Boltzmann numerical study on nanofluids flow in a micromodel as porous medium. **Physica e: Low-dimensional Systems and Nanostructures**, [s.l.], v. 94, p.15-21, out. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.physe.2017.07.008>.

JAMALOEI, Benyamin Yadali et al. Pore-scale two-phase filtration in imbibition process through porous media at high- and low-interfacial tension flow conditions. **Journal Of Petroleum Science And Engineering**, [s.l.], v. 72, n. 3-4, p.251-269, jun. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.petrol.2010.03.026>.

KAZEMIFAR, Farzan et al. Quantifying the flow dynamics of supercritical CO<sub>2</sub>-water displacement in a 2D porous micromodel using fluorescent microscopy and microscopic PIV. **Advances In Water Resources**, [s.l.], v. 95, p.352-368, set. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2015.05.011>.

LAAN, Flávio Tadeu van der. **Medição de campo de velocidade em fluidos com técnicas “intraframe” de processamento digital de imagens (PIV)**. 2001. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

LIFTON, Victor A.. Microfluidics: an enabling screening technology for enhanced oil recovery (EOR). **Lab On A Chip**, [s.l.], v. 16, n. 10, p.1777-1796, 2016. Royal Society of Chemistry (RSC). <http://dx.doi.org/10.1039/c6lc00318d>.

LINDKEN, Ralph et al. Micro-Particle Image Velocimetry ( $\mu$ PIV): Recent developments, applications, and guidelines. **Lab On A Chip**, [s.l.], v. 9, n. 17, p.2551-2567, 2009. Royal Society of Chemistry (RSC). <http://dx.doi.org/10.1039/b906558j>.

MEINHART, C. D.; WERELEY, S. T.; SANTIAGO, J. G.. PIV measurements of a microchannel flow. **Experiments In Fluids**, [s.l.], v. 27, n. 5, p.414-419, 4 out. 1999. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s003480050366>.

MIRANDA, Márcio Alexandre Cano. **Utilização de velocimetria por imagem de partícula na visualização e caracterização de escoamento bifásico**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia e Ciências Térmicas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

MORTENSEN, Niels Asger; OKKELS, Fridolin; BRUUS, Henrik. Reexamination of Hagen-Poiseuille flow: Shape dependence of the hydraulic resistance in microchannels. **Physical Review e**, [s.l.], v. 71, n. 5, p.1-5, 5 maio 2005. American Physical Society (APS). <http://dx.doi.org/10.1103/physreve.71.057301>.

MUGGERIDGE, Ann et al. Recovery rates, enhanced oil recovery and technological limits. **Philosophical Transactions Of The Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, [s.l.], v. 372, n. 2006, p.1-25, 13 jan. 2014. The Royal Society. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2012.0320>.

PAIVA, Kleber Vieira de. **Desenvolvimento de novas tecnologias para minitubos de calor: análise teórica e experimental**. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia e Ciências Térmicas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

PHILIPPI, Paulo C. et al. From the continuous to the lattice Boltzmann equation: The discretization problem and thermal models. **Physical Review e**, [s.l.], v. 73, n. 5, p.1-12, 9 maio 2006. American Physical Society (APS). <http://dx.doi.org/10.1103/physreve.73.056702>.

QIAN, Y. H; D'HUMIÈRES, D; LALLEMAND, P. Lattice BGK Models for Navier-Stokes Equation. **Europhysics Letters (epl)**, [s.l.], v. 17, n. 6, p.479-484, 1 fev. 1992. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1209/0295-5075/17/6/001>.

RAFFEL, Markus et al. **Particle image velocimetry: a practical guide**. Gottingen: Springer, 2007.

ROMAN, Sophie et al. Particle velocimetry analysis of immiscible two-phase flow in micromodels. **Advances In Water Resources**, [s.l.], v. 95, p.199-211, set. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2015.08.015>.

SALAS, Mildre Karina Silva. **Estudo da injeção de água na recuperação melhorada de petróleo: efeito da salinidade e surfactante**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

SANTIAGO, C. et al. Pore-Scale Simulations of Haines Jumps during Two-Phase Flow in Porous Media. *In: GEO CONVENTION*, 4 a 8 de maio de 2015. Disponível em: [https://pdfs.semanticscholar.org/577e/0f3d3a89e883b043cf32b1fbb8db182443ac.pdf?\\_ga=2.137830967.600698674.1578665442-794867816.1578665442](https://pdfs.semanticscholar.org/577e/0f3d3a89e883b043cf32b1fbb8db182443ac.pdf?_ga=2.137830967.600698674.1578665442-794867816.1578665442). Acesso em 20/11/2018.

SCHNEIDER, Mark. **Wettability patterning in microfluidic systems and applications in the petroleum industry**. 2011. Tese (Doutorado em Física de Partículas com Matéria Condensada) – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

SEN, Debjyoti; NOBES, David S.; MITRA, Sushanta K.. Optical measurement of pore scale velocity field inside microporous media. **Microfluidics And Nanofluidics**, [s.l.], v. 12, n. 1-4, p.189-200, 9 ago. 2011. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10404-011-0862-x>.

SINGH, Kamaljit et al. Dynamics of snap-off and pore-filling events during two-phase fluid flow in permeable media. **Scientific Reports**, [s.l.], v. 7, n. 1, p.1-13, 12 jul. 2017. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-017-05204-4>.

SOARES, Ana Paula Justino. **Influência da molhabilidade da rocha na recuperação de petróleo de reservatórios carbonáticos**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

SOUZA, Felipe Pardini de. **Análise estatística e determinação experimental de ângulos de contato e molhabilidades de sistemas óleo-salmoura-mineral análogos ao pré-sal brasileiro**. 2018. Projeto de Graduação (Graduação em Engenharia de Petróleo) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

SUN, Yankun et al. Laboratory core flooding experimental systems for CO<sub>2</sub> geosequestration: An updated review over the past decade. **Journal Of Rock Mechanics And Geotechnical Engineering**, [s.l.], v. 8, n. 1, p.113-126, fev. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.12.001>.

THIELICKE, William; STAMHUIS, Eize J.. PIVlab – Towards User-friendly, Affordable and Accurate Digital Particle Image Velocimetry in MATLAB. **Journal Of Open Research Software**, [s.l.], v. 2, p.1-10, 16 out. 2014. Ubiquity Press, Ltd.. <http://dx.doi.org/10.5334/jors.bl>.

VERRI, I. et al. Development of a Digital Rock Physics workflow for the analysis of sandstones and tight rocks. **Journal Of Petroleum Science And Engineering**, [s.l.], v. 156, p.790-800, jul. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.petrol.2017.06.053>.

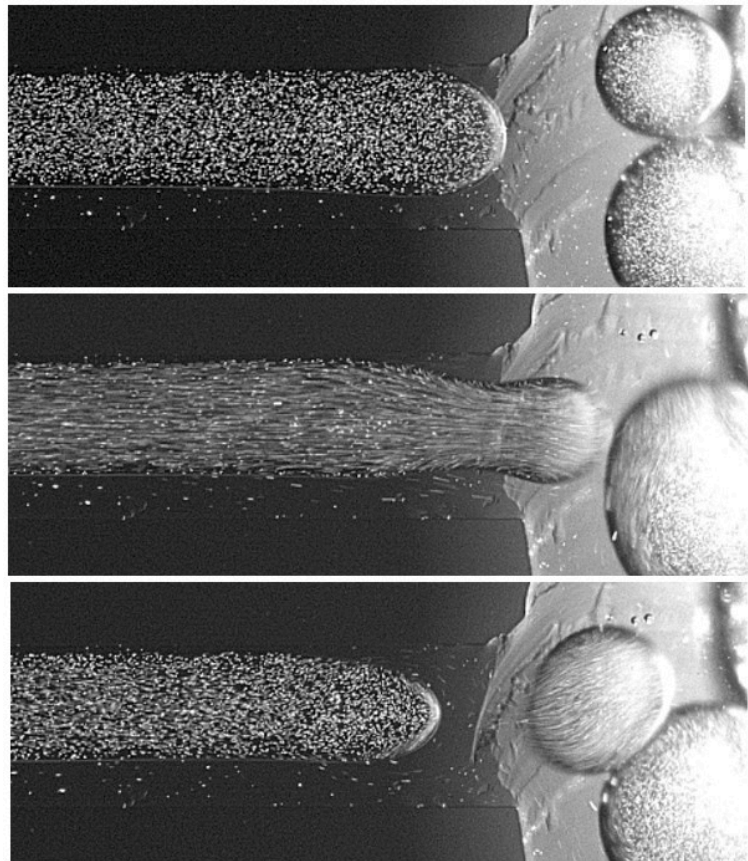
WAN, Jiamin; WILSON, John L.; KIEFT, Thomas L.. Influence of the Gas-Water Interface on Transport of Microorganisms through Unsaturated Porous Media. **American Society For Microbiology**, Socorro, v. 60, n. 2, p.509-516, fev. 1994.

WOLF, Fabiano Gilberto. **Modelagem da interação fluido-sólido para simulação de molhabilidade e capilaridade usando o modelo Lattice-Boltzmann**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

## APÊNDICE A – EXPERIMENTOS REALIZADOS PARA A DEFINIÇÃO DOS FLUIDOS UTILIZADOS NA SEÇÃO 4.3

Conforme comentado no trabalho, um dos maiores desafios para a realização dos experimentos em que se buscou encontrar o campo de velocidade para a fase aprisionada foi encontrar um par de fluidos que permitisse a dispersão de partículas no fluido que ficaria aprisionado. Deste modo, foi necessário realizar diversos experimentos a fim de gerar as condições experimentais que permitissem obter os resultados que se buscava.

Figura 49: Escoamento de água com micropartículas em um canal de seção retangular saturado com óleo de girassol.



Fonte: Autor

Ao realizar os experimentos bifásicos nos microcanais, foi observado que o fluido molhante sempre avançou pelos cantos e pelas paredes do canal durante o processo de embebição, enquanto que o fluido não-molhante se deslocava pelo centro, deixando um filme de fluido molhante nas paredes, quando realizado o processo de drenagem.

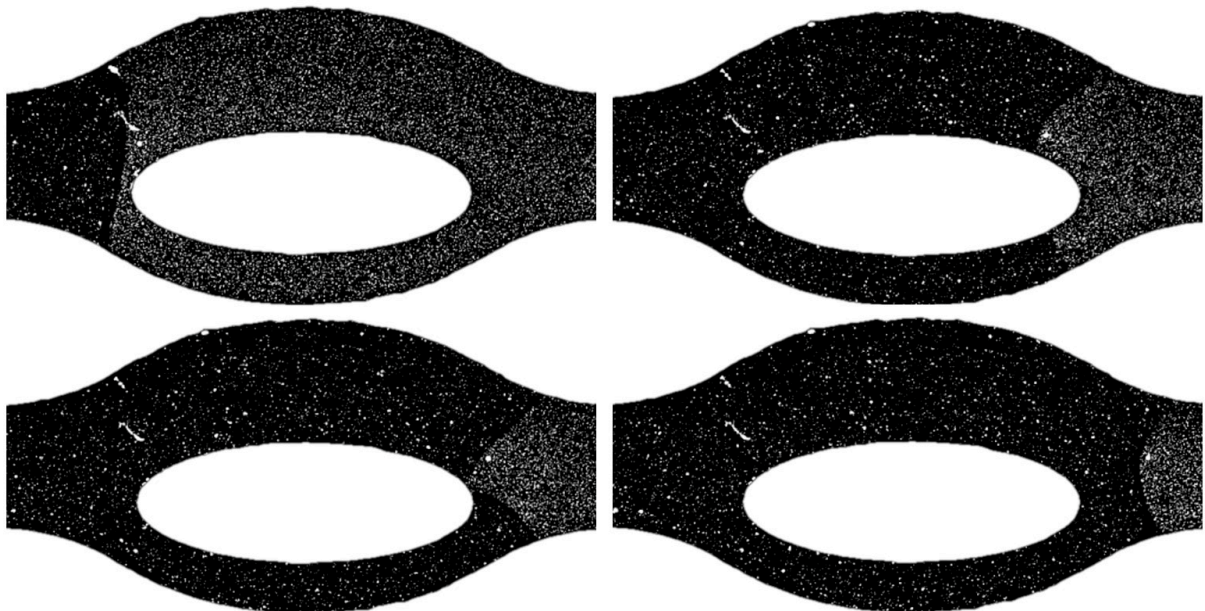


No experimento ilustrado pela Figura 49, o micromodelo estava preenchido com óleo de girassol, que para este sistema é o fluido molhante, e a solução de água com partículas foi injetada, mostrando como o fluido não-molhante se comporta durante o processo. É possível notar que existe um filme de óleo entre as paredes do microcanal e a água. O experimento mostra também como ocorre o fenômeno denominado de *snap off*, o qual faz com que o escoamento de água deixe de ser constante e gera gotas que se deslocam pelo óleo aprisionado na saída do canal.

Em outro procedimento realizado, para encontrar possíveis combinações de fluidos, o micromodelo estava saturado com a solução de água e partículas, e uma mistura de óleo de girassol com partículas traçadoras foi injetada. Sendo este um experimento do tipo embebição, foi possível avaliar como a fase molhante se desloca.

Conforme pode ser observado na Figura 50, apesar de o óleo estar empurrando a água que está a sua frente, ainda o ângulo de contato da água é maior que  $90^\circ$ , caracterizando assim o óleo como fluido molhante.

Figura 50: Deslocamento da interface durante o processo de embebição em que óleo de girassol desloca a água inicialmente contida na geometria.



Fonte: Autor

O objetivo de injetar uma solução de óleo de girassol e partículas era fazer o preenchimento deste fluido no micromodelo para posteriormente injetar apenas água e assim investigar o comportamento do fluido aprisionado durante o processo de drenagem. Foi realizado o teste com óleo de girassol, pois este foi um dos poucos óleos que apresentaram certa afinidade com as partículas. Porém devido a relação entre viscosidades  $M$  ter um valor alto, uma vez que o óleo de girassol é em torno de 58 vezes mais viscoso que a água (CANCIAM, 2010) para a temperatura de 25°C, não foram observados movimentos das partículas no fluido aprisionado durante o processo de drenagem.

Dentre os fluidos disponíveis no laboratório, alguns como n-decano, toluol e acetona, dissolveram as partículas, de modo que sua utilização se tornou inviável. Outros fluidos como, vaselina e FC-43 não apresentaram afinidade com as partículas, sendo que estas se aglomeravam entre si ou grudavam nas paredes dos canais assim que o fluido era injetado.

As dificuldades em realizar experimentos que investigassem o comportamento da fase aprisionada se deram principalmente na busca por uma combinação apropriada entre dois fluidos imiscíveis, sendo que um deles tivesse afinidade com as partículas e ficasse aprisionado.

O álcool isopropílico se mostrou uma opção, visto que tem afinidade com as partículas, além de ser imiscível ao FC-43 e em comparação a este fluido é molhante para o PDMS, ficando assim aprisionado durante o processo de drenagem. Porém, devido a sua alta volatilidade, foi possível notar efeitos de difusão do álcool no FC-43, fazendo com que os experimentos não pudessem ser realizados conforme o objetivo do trabalho.

Como não foi possível realizar experimentos com álcool isopropílico, outro álcool foi testado, a glicerina. Contudo, a injeção de FC-43 não gerou movimento nas partículas presentes na glicerina que ficou aprisionada no canal mais estreito da geometria, devido à alta viscosidade deste fluido. A alternativa foi elaborar uma solução de glicerina e água, pois para a temperatura de 20°C, uma solução contendo 30% de água e 70% de glicerina já reduz a viscosidade em aproximadamente 63 vezes, conforme observado na Tabela 3.

Após elaborada a solução foram realizados os ensaios. Nos experimentos realizados com o par de fluidos, água e FC-43, foi visível um menor ângulo de contato para o FC-43, demonstrando assim que este é o fluido molhante do par. Em contrapartida, no experimento realizado com glicerina e FC-43 não foi possível determinar com precisão qual dos fluidos tinha maior afinidade com o PDMS. Como na solução preparada para obter o campo de velocidade da fase aprisionada havia apenas 30% de água em massa, a molhabilidade permaneceu neutra, existindo um ângulo de contato levemente menor para o FC-43.



Tabela 3: Viscosidade de soluções de glicerina e água a 20°C.

Percentual em massa de Glicerina	Viscosidade dinâmica
70	22,6
75	36,6
80	60,1
85	109
90	219
91	259
92	310
93	367
94	437
95	523
96	624
97	765
98	939
99	1150
100	1410

Fonte: Adaptado de Glycerine Producers Association

Esta condição permitiu que mesmo as partículas não sendo adicionadas ao fluido molhante propriamente dito, foi possível realizar os experimentos e obter o campo de velocidade da fase aprisionada, pois a afinidade do FC-43 para o PDMS não foi suficiente para evitar o aprisionamento da solução de glicerina e água no canal mais estreito, já que esta era cerca de quatro vezes mais viscosa do que o FC-43.

O ocorrido foi que, estando o micromodelo saturado com a solução de glicerina e água, foi iniciada a injeção de FC-43, quando a interface chegou na bifurcação do microcanal, a velocidade do escoamento no canal mais estreito foi menor, de modo que o fluido escoando pelo canal mais largo chegou primeiro no outro lado da geometria, causando assim o aprisionamento da solução de glicerina e água (fase não-molhante) que ainda estava presente no canal mais estreito.

Os resultados obtidos com a realização deste experimento vão em contradição ao que Chatzis e Dullien (1983) afirmaram sobre o poro de duplo canal para o escoamento do tipo embebição. É preciso salientar que existem diferenças entre os trabalhos, uma vez que Chatzis e Dullien (1983) realizaram o processo de embebição com um fluido completamente molhante,

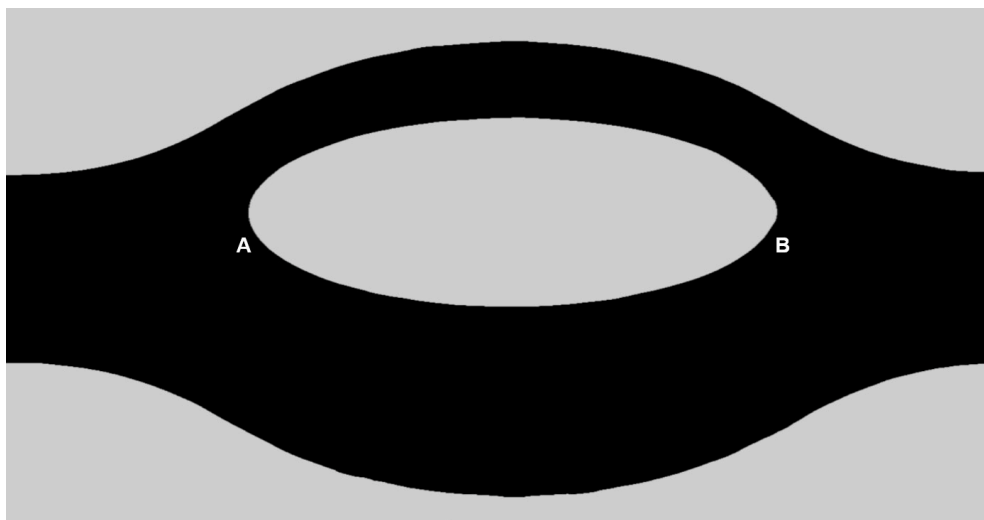
enquanto que neste trabalho o fluido molhante apresentou uma afinidade levemente superior ao sólido em comparação ao não-molhante. Além disso, a geometria usada neste trabalho apresenta uma diferença quanto à seção transversal, visto que Chatzis e Dullien (1983) usaram canais com seção transversal circular e no presente trabalho foram usados canais retangulares.

Apesar das diferenças, Chatzis e Dullien (1983) reiteraram que em um processo de embebição, onde a fase molhante avança da direita para a esquerda na Figura 51, independentemente da vazão imposta ao escoamento, o fluido molhante entrará no canal mais estreito em A, avançando até B, onde irá permanecer parado e só então o canal maior começará a ser preenchido até alcançar o ponto B. Após o preenchimento dos dois canais o escoamento se manteria em regime permanente tendo removido todo o fluido não-molhante de toda a geometria.

Entretanto, o ocorrido foi que quando a interface dos fluidos alcançou o ponto A, o fluido molhante avançou pelos dois canais, mas com velocidades diferentes, sendo que a interface no canal mais largo chegou primeiro ao ponto B. Quando isto aconteceu, o escoamento no canal estreito cessou, ficando assim o restante de fluido que havia neste canal aprisionado, enquanto o fluido molhante escoava apenas pelo canal mais largo.

A realização dos experimentos deixou clara a importância da razão de viscosidades  $M$  no aprisionamento dos fluidos, pois apesar da maior afinidade com o sólido por parte do FC-43, este não conseguiu remover todo o fluido do canal mais estreito para um valor de  $M$  maior que quatro.

Figura 51: Poro de duplo canal usado nos experimentos.

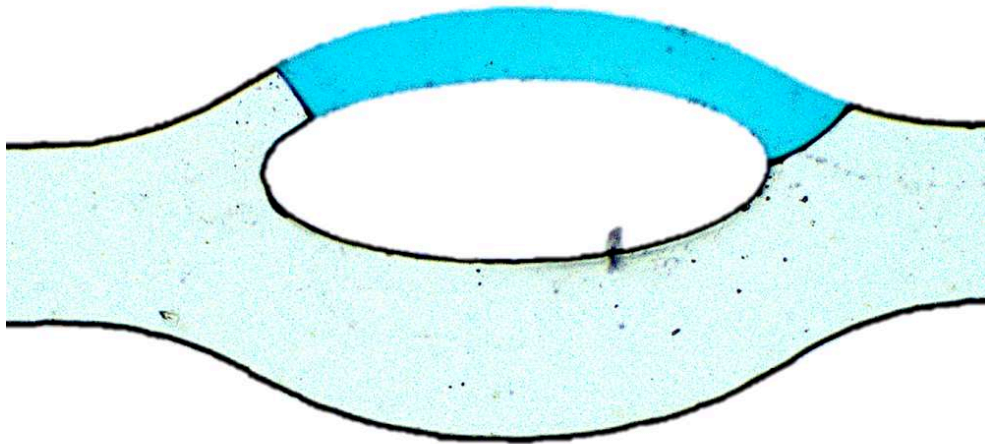


Fonte: Autor

Antes de encontrar uma solução ideal para a realização dos experimentos, alguns testes precisaram ser feitos, variando a viscosidade da solução glicerina-água.

Para o caso de uma solução com 90% de glicerina e 10% de água, a relação entre as viscosidades desta solução e do FC-43 ficou em aproximadamente 43, o que acarretou no aprisionamento de fluido não-molhante em praticamente toda a extensão do canal mais estreito, conforme apresentado na Figura 52. Porém, devido a grande diferença entre as viscosidades, não houve movimento das partículas na interface dos fluidos, mesmo impondo uma vazão alta ao escoamento de FC-43.

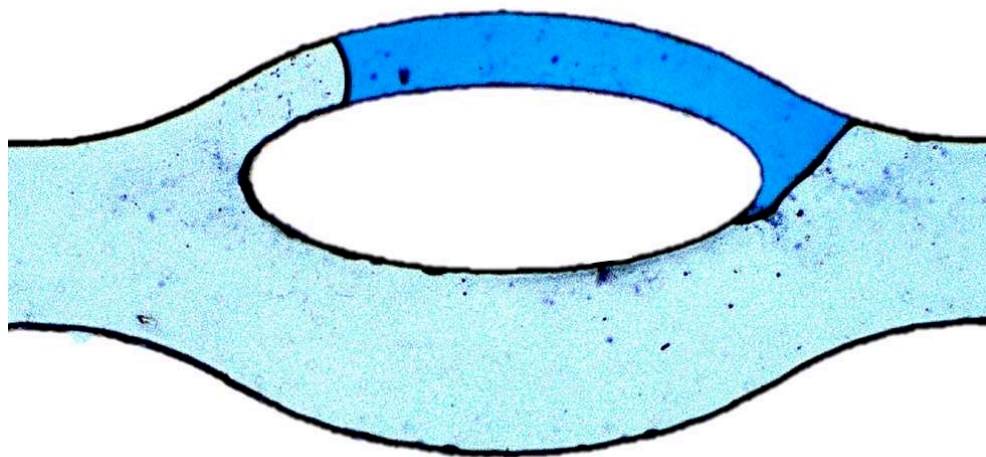
Figura 52: Solução de 90% glicerina e 10% de água aprisionada no poro de duplo canal.



Fonte: Autor

Para a solução de 80% de glicerina e 20% de água, mostrado na Figura 53, o FC-43 conseguiu remover cerca de 25% do fluido molhante e após o aprisionamento, puderam ser observados alguns movimentos nas partículas devido ao arrasto viscoso dos fluidos, quando impostas vazões altas ao fluido molhante.

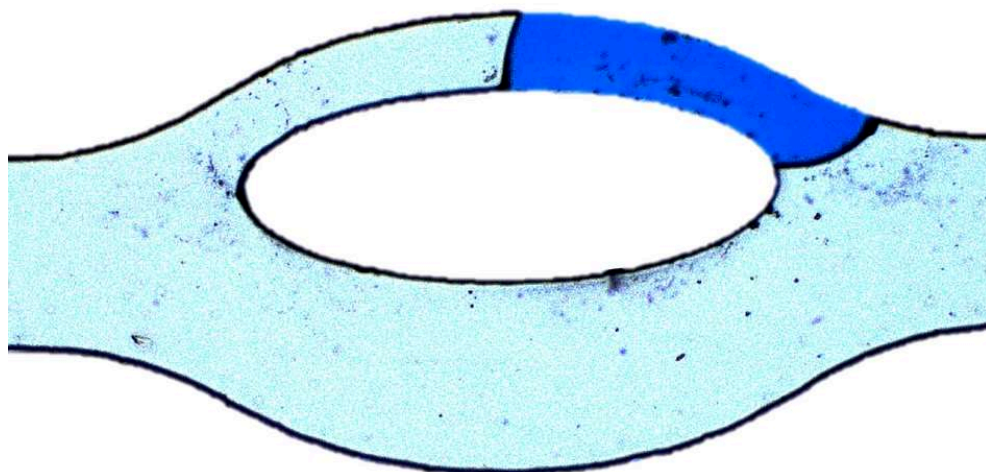
Figura 53: Solução de 80% glicerina e 20% de água aprisionada no poro de duplo canal.



Fonte: Autor

Porém, para uma maior versatilidade dos experimentos, optou-se por usar a solução com 70% de glicerina e 30% de água, ficando o fluido aprisionado conforme apresentado na Figura 54.

Figura 54: Solução de 70% glicerina e 30% de água aprisionada no poro de duplo canal.



Fonte: Autor

**APÊNDICE B – ALGORITMO USADO PARA GERAR A MÁSCARA USADA NO  
SOFTWARE PIVLAB**

```

1      clc
2      clear all
3
4      myFolder = 'pasta_contendo_as_imagens';
5      saveFolder_avg='pasta_de_destino\';
6      filePattern = fullfile(myFolder, '*.tif');
7      tifFiles = dir(filePattern);
8
9      i_media=im2double(imread(tifFiles(1).name)) :
10                                     im2double(imread(tifFiles(1).name));
11                                     %Cria uma imagem de valores zero
12      i_soma=i_media;
13
14      intensidade_ruído=10; %Define o valor de ruído na imagem a ser
15      retirado
16
17      i_tira_ruído=i_media+intensidade_ruído;
18
19      for k = 1:length(tifFiles)
20          baseFileName = tifFiles(k).name;
21          I=im2double(imread(baseFileName));
22          i_media=i_media+I/length(tifFiles);
23          i_soma=i_soma+I;
24      end
25
26      intensidade_melhora_contraste=5;
27      i_contraste_melhorado=i_media;
28      for k = 1:intensidade_melhora_contraste
29          i_contraste_melhorado=i_contraste_melhorado+i_media;
30      end
31
32      imwrite(i_media, [saveFolder_avg 'media'.tif]); % Media das imagens
33      imwrite(i_contraste_melhorado, [saveFolder_avg 'media_com_contraste'
34                                     .tif]); %Media das imagens com contraste melhorado
35      imwrite(i_soma i_tira_ruído, [saveFolder_avg 'mascara'.tif]);
36      %Mascara

```



25<sup>th</sup> ABCM International Congress of Mechanical Engineering  
October 20-25, 2019, Uberlândia, MG, Brazil

## COB-2019-690

### PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY APPLIED TO THE FLOW IN PORE DOUBLETS

**Anderson Rohweder**

**Fabiano G. Wolf**

**Diogo N. Siebert**

**Leonardo R. Cardoso**

UFSC, Grupo de Pesquisa em Meios Porosos (PORO), Rua Dona Francisca, 8300, Joinville, 89.219-600, Brazil a.rohweder@posgrad.ufsc.br fabiano.wolf@ufsc.br diogo.siebert@ufsc.br leonardorudolfocardoso@gmail.com

**Marcelo N.P.Carreño**

**Alexandre T. Lopes**

USP, Av. Prof. Luciano Gualberto 158, São Paulo, 05424-970, Brazil carreno@lme.usp.br alopes@lme.usp.br

**Rodrigo Surmas**

CENPES/PETROBRAS, Leopoldo Américo Miguez de Mello Research and Development Center, Rio de Janeiro, 21941-598, Brazil surmas@petrobras.com.br

**Abstract.** *In order to advance the knowledge of the flow of biphasic fluids in porous media, an experimental technique that has been gaining considerable space in several research areas is used, due to its great versatility in terms of the generated data. The technique called Particle Image Velocimetry (PIV) is very interesting for the study of geometries that present uncertainties regarding the behavior of fluid flow, as is the case of the doublet-pore model. This is due to the fact that it is a non-intrusive optical technique that allows simultaneous monitoring of the entire velocity field of the region of interest. In this work, PIV recordings were performed for a single-phase water flow in both a rectangular channel and doublet-pore geometry. The data resulting from the experiment were compared to those obtained by the analytical solution for a rectangular channel and those generated by a reliable numerical simulation for the doubletpore model, in order to validate the adopted experimental procedure. Recordings were then made on a double-pore flow in which the oil was trapped in the smaller channel while the water was drained by the larger one. The results showed that for a two phase flow in which the wetting fluid is more viscous than the non-wetting fluid, there will be no way to remove the trapped fluid in the minor channel just by raising the flow rate.*

**Keywords:** *PIV, Porous Media, Microchannels, Doublet pore model.*

## 1. INTRODUCTION

Understanding the physical phenomena that occur when two phases flow through micrometric channels is of great interest to the oil industry, since the reservoirs are formed by porous media impregnated with oil, water and gas. The physical concepts developed for normal scale flow do not apply precisely to micrometric scales, since fluid properties such as viscosity, interfacial tension and solubility exert a strong influence on the flow, as well as with factors pertinent to the porous medium where the fluid is drained, such as permeability and wettability, which are very relevant in micrometric flow (Wolf, 2006).

The technological advance contributed significantly to the development of numerical methods for the fluid flow simulation. However, as stated by Roman et al. (2016), due to the specificities of the microscale flow, conventional algorithms to simulate macroscale flows become inadequate. Thus, it is desirable to perform experimental work for providing data on the actual conditions found in the microscale fluid flow. Miranda (2004) states that, under this analysis, the PIV technique is one of the most suitable because it allows the field of velocities to be obtained with high spatial resolution, even in difficult access regions, such as near-wall flow and where vortices occur.

Particle image velocimetry is an experimental technique coupled with data processing that intends to find the velocity field of a given flow within a region of interest. The experimental procedure is summarized in capturing images of the fluid flow, to which tracer particles were previously added, and later perform the processing of these images by the cross correlation technique (Thielicke and Stamhuis, 2014) that defines the position of the particles at specific times for the sequence of images, finding the distance and direction traveled by the particles, enabling the calculation of velocity vectors, assuming that the particle motion behaves like that of the fluid (Raffel et al., 2007).

The use of the PIV technique to investigate the interface movement of two immiscible fluids flowing inside microchannels is very interesting and has been studied in several studies (Kazemifar et al., 2016, Li et al., 2017, Ashwood et al., 2015, Kim et al., 2004) due to the great contributions that quantitative data collection in this area can bring. However, caution should be taken in evaluating the results, since errors in such small dimensions may be high and data processing in the PIV technique may present incorrect results if the procedure is not predefined

by reliable data. Therefore, the experimental results must be validated by comparing the results with numerically modeled flow data or analytical solutions.

In this work, experiments were performed with rectangular cross-section channels with the aim of comparing the results of the  $\mu$ -PIV technique with the Poiseuille solution (Mortensen, 2005). Also, velocity field measurements in a doublet-pore model were carried out for the single-phase fluid flow. These obtained data were compared to the results of numerical simulations using the Lattice Boltzmann method (Venturoli and Boek, 2006), thus validating the experimental technique and defining the appropriate procedure for that experimental setup. Finally, the velocity field was determined for an experiment in which oil was trapped in the smaller pore of the model, while water with particles flowed through the larger pore.

## **2. MATERIALS AND METHODS**

### **2.1 Micro channels fabrication**

The micro channels fabrication was made by demolding of the micromodel material (Polydimethylsiloxane, PDMS) from a 30  $\mu$ m thick SU-8 master with the micro channel geometry. SU-8 is a negative photoresist (from MicroChem Corp) and the SU-8 master is fabricated on 50 mm x 50 mm photomask glass plate covered with a 100 nm Cr layer. The Cr layer is for adhesion reasons. The microfluidic device fabricated in this work is composed, basically, by two pieces. A PDMS lid with the micro channels itself and a glass plate with a thin spin coated PDMS film, that works as a micro channels cover. In this work the PDMS micro channels were fabricated in a laminar flow bench, utilizing Sylgard 184 PDMS from DOW CORNING Company in a (10:1) elastomer to cure agent ratio.

The PDMS is slowly poured over the SU-8 master placed on a metallic template that define the total volume and thickness of PDMS. The filled template is placed on hotplate by 30 minutes at 80°C for PDMS cure. After the cure, the PDMS is demolded with the aid of a surgical scalpel and a plastic tweezer. The PDMS should be carefully and slowly pulled from master to avoid tearing the silicone rubber and also destroying the SU-8. After demolding, the inlet and outlet holes are made with a 2 mm diameter biopsy puncher aided by a digital camera.

The micro channels sealing is made by means of a glass base with partially cured PDMS place in contact with the PDMS lid. After contact, the device is cure at 80°C for another 30 minutes to complete the PDMS cure.



## 2.2 Experimental procedure

A workstation specially designed for experiments with  $\mu$ -PIV under low flow rates was assembled. It is composed of a Zeiss trinocular inverted model Axio Observer III, which has a reflected light system with a 120 watt halide metal lamp for fluorescence. The optical path has lenses with apochromatic correction and two filters, one for yellow/green (525-575 nm) and one for Nile red (535-590 nm). The digital camera has sensitivity for all microscopy techniques, has 2.8 MP resolution, CCD sensor, USB 3.0 interface and can capture up to 90 frames per second.

The experimental bench, as seen in Figure 1, also has a syringe pump (Harvard Apparatus, Pico Plus Elite,  $\pm 0.5\%$  accuracy) that is used to inject fluid into the micromodel. The pump has an integrated operating system that supports the use of various syringes, which allows varying the volumetric flow rate in a wide range of values.

The objective of the setup is to provide  $\mu$ -PIV recordings in two-phase flows in a well-studied doublet-pore channel model (Chatzis and Dullien, 1983, Sorbie et al., 1995, Lundström et al., 2008, Nabizadeh et al., 2018), but that still presents uncertainties. As Chatzis and Dullien (1983) explain, when there is displacement from one phase to another in porous media, the competition between capillary and viscous forces causes more influence than the injection flow rate and gravitational forces themselves, which leads to anomalous behavior, being the doublet pore configuration widely used to investigate the entrapment of the displaced phase during the flow of immiscible fluids in porous media. Qualitative studies performed with micromodels simulating the flow in doublet pores presented insufficient results for flow modeling, and quantitative data will contribute to a better understanding of the trapping phenomenon.

To perform experiments with  $\mu$ -PIV in liquid flows, the addition of tracer particles to the fluid is required. Lindken et al. (2009) argue that these particles need to be chosen judiciously because various details must be evaluated to obtain reliable data as a result of the experiments. As in the present work the objective is to perform experiments with water, tracer particles suitable for this type of fluid were selected.



Figure 1. Experimental setup for use of the  $\mu$ -PIV technique.

The carboxylate modified microspheres (FluoSpheres) were chosen because such surface modification generates affinity for water, thereby enhancing their distribution within the fluid and avoiding agglomeration between particles or the walls of the micromodel. These microparticles have a density of  $1,050 \text{ kg/m}^3$  which is relatively close to that of the water, this ensures that they will be transported with the flow without disturbing the same. The particle diameter was chosen based on the smaller channel of the micromodel, according to Raffel et al. (2007), it is convenient that the particle size are two orders of magnitude smaller than the channels through which the fluid will flow, thus with particles of  $1 \text{ }\mu\text{m}$ , it will be possible to perform experiments with micromodels having channels of at least  $100 \text{ }\mu\text{m}$ .

In order to perform PIV recordings, the micromodel must be pre-filled with water, since the objective of the experiment is to evaluate the single-phase fluid flow, which does not occur if there is air inside the channel and how the air is a wetting fluid for the PDMS compared to water, it is not possible to fill just by injecting water. In this way, isopropyl alcohol is injected, since it is a wetting fluid for PDMS compared to air, which allows the complete filling of the micromodel. As alcohol is soluble in water, after injecting  $5 \text{ ml}$  of ultrapure water the entire geometry gets filled with only water.

After filling, a solution of water and particle tracer in the ratio of  $0.06\%$  particle to water, based on volume, was injected into the micromodel. The water was injected using a Hamilton 1700 series precision syringe with  $500 \text{ }\mu\text{l}$ . The flow rate was adjusted according to the frame

rate and particle size. According to Roman et al. (2016) it is advisable for the particles to move up to three diameters between the images of the pair, which results in a speed of  $1008 \mu\text{m/s}$ , considering for the calculation that the image of the particle in the magnification used is  $4 \mu\text{m}$  in diameter and that the camera has been set to capture 84 frames per second. Knowing the fluid velocity and the smallest channel dimension, which is approximately  $250 \mu\text{m}$  wide and  $30 \mu\text{m}$  deep, the water injection flow rate can be calculated, resulting in  $7.56 \times 10^{-12} \text{ m}^3/\text{s}$ . However, a somewhat smaller volumetric flow was used, since with the increase of the displacement velocity of the particles, the luminous noise was also increased, making the particles images difficult to be followed by the software. The flow rate used was  $6.11 \times 10^{-12} \text{ m}^3/\text{s}$ , which allowed capturing better defined images and, consequently, more reliable results.

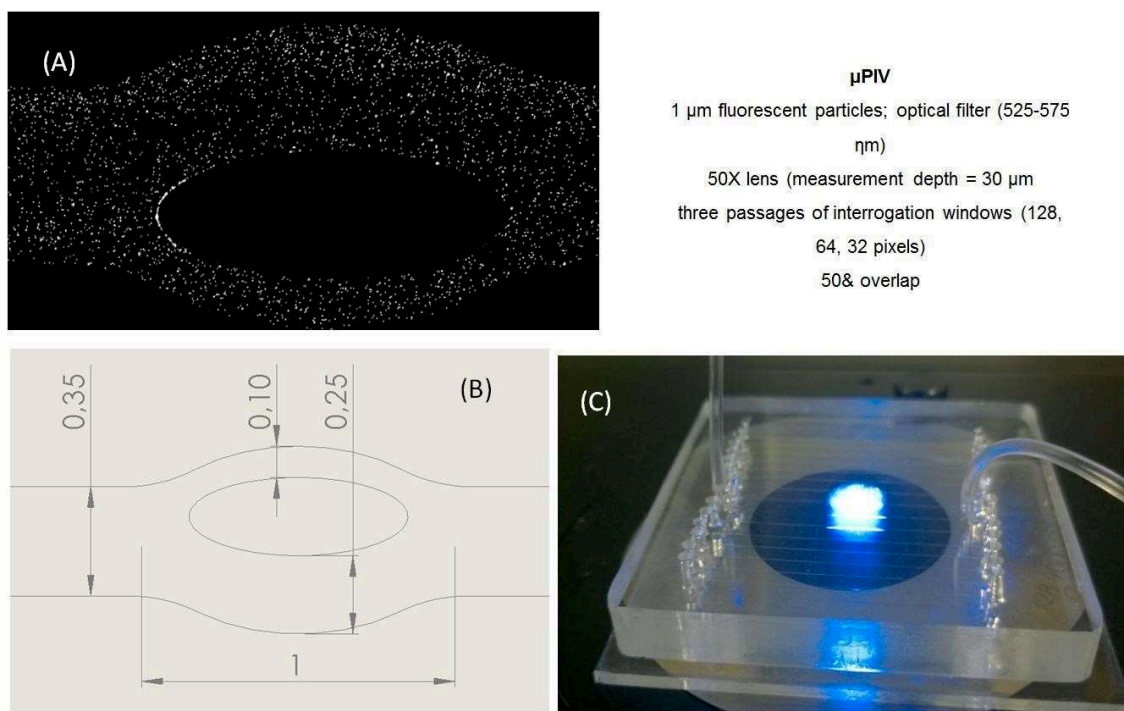


Figure 2. (A) The particles within the channel, (B) the geometry design in mm and (C) the micromodel.

To eliminate luminous noise, an induced fluorescence system is used. The light source emits light at high intensity, exciting the particles in the water. These particles after excited emit light at a wavelength greater than that emitted by the light source. An optical filter placed between the observed region and the objective lenses allows only light passing with a

wavelength between 525 and 575 nm, which corresponds to the range of light emitted by the particles. In addition to the optical features, the ZEN 2.6 Blue Edition software allows a very specific configuration for the light spectrum presented in the images, generating a high contrast between the particles in the water and the rest of the observed region, as observed in Figure 2.

The micromodel must be placed under the microscope and positioned precisely in the region where the images will be captured. After filling with ultrapure water, the injection of the water/particles solution was started, so when the steady-state condition is reached, the camera is triggered to start capturing the images.

The software used to perform the image processing was PIVLab, a MATLAB® tool developed by Thielicke and Stamhuis (2014). In order to improve the contrast between the particles and the water, a limited contrast adaptive histogram equalization of 20 pixels was applied and an adaptive wiener denoise filter with three pixels was applied to prevent out-of-plane particles from being part of the velocity vector calculations. This pre-processing options are available in the PIVLab tool.

Due to the optical filter used in the microscope, only the light emitted by the particles is captured by the camera, being necessary to create a mask to identify the position of the channel in the images. This mask was made by adding all captured images using a MATLAB® script and applying a reversal of color so that the region of the channel becomes black and the rest white. When making the sum of the images, the entire region through which particles have passed will become white and the rest will turn black, thereby creating a perfect mask of the region to be evaluated.

To determine the velocity vectors between the pairs of images a discrete Fourier transform correlation with several passages was used and a window overlay algorithm was then used for cross-correlation of the image data. Despite the higher computational cost, four passages with interrogation windows that differ by a factor of two were used whenever possible. Larger interrogation windows have a better signal-to-noise ratio, but lead to very low vector resolution. For this reason, the first pass is made with relatively large windows and in subsequent passages the size of the interrogation window is halved. However, there is a minimum threshold for the size of the interrogation window, according to Roman et al. (2016), it is interesting that the smaller window is at least three times larger than the particle image diameter. Thus, windows of 128, 64, 32 and 16 pixels were used, since the particle diameter in the image magnification was four pixels.

PIV recordings were performed at a 50-fold magnification and the images captured for the rectangular cross-section channel are 600 x 400 pixels in size, whereas for the doublet-pore model the images have 1500 x 800 pixels. Under these conditions, although the particles are only 4  $\mu\text{m}$  in diameter in the obtained images, they become relatively large, this induces the experiments to be performed with a relatively low density of particles. This led to the need to use a high number of pairs of images to obtain reliable results, despite the computational cost, this guarantees more accurate data, since the fluid flow is under steady-state condition and the experiment is intended to find the speeds for the streamlines. For each experiment more than two thousand images were captured, what allowed the software generates an image with the averaged vectors of the calculated image pairs, as shown in Figure 3.

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

#### 3.1 Fluid flow in a rectangular channel

It is of great importance to validate the data obtained as a result of the PIV technique, because although it is an experimental technique, both the experiment and the image processing can lead to significant errors. Thus, image recordings were done in an experimental setup in which the water/particle solution was injected through a rectangular cross-section channel.

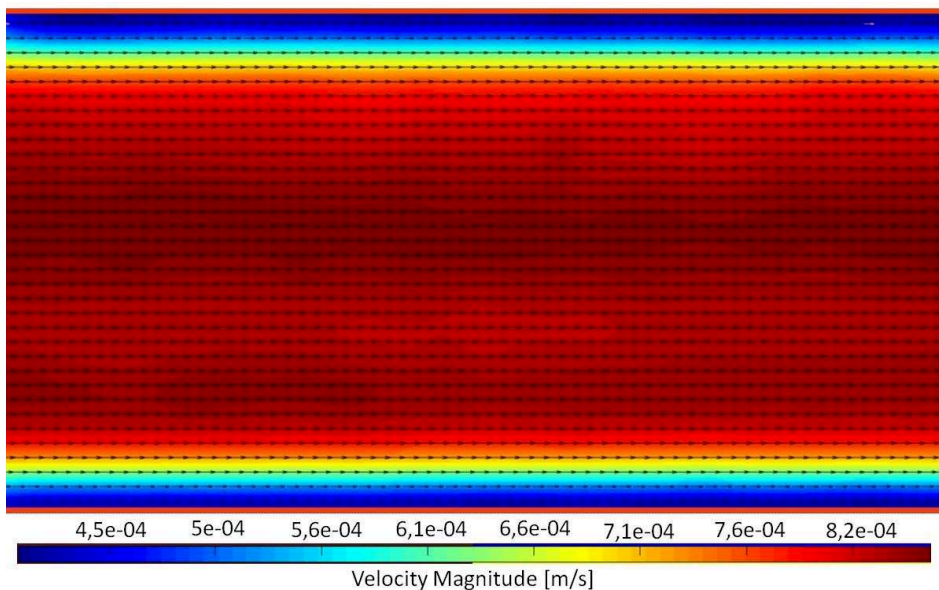


Figure 3. Average vector field for rectangular section channel.

The experimental data were then compared to the analytical solution obtained by solving the Poiseuille equation (Mortensen, 2005) to verify the proximity of the results. Figure 3 shows the channel with the field of velocity vectors and in Figure 4 the profile generated by the analytical solution is compared with the results obtained with the experiment.

There were significant errors between the obtained velocities for the regions near the channel walls. This was already expected since the analytical profile considers the non-slip condition of the fluid close to the channel wall, whereas in the experimental analysis the particles slide (or roll) on the wall when they are dragged by the fluid that is in the vicinity of them (Gutiérrez, 2013, Silva, 2008). However, this error occurs approximately only around 6  $\mu\text{m}$  far from both walls, considering that the particle diameter is 1  $\mu\text{m}$ , we conclude that this condition approaches the limits of the experimental bench. For the central region of the channel, the velocity field obtained by the analytical and experimental analyzes was very close, with a maximum difference of 7.93% between the values, remaining within the uncertainty calculated from the experimental data.

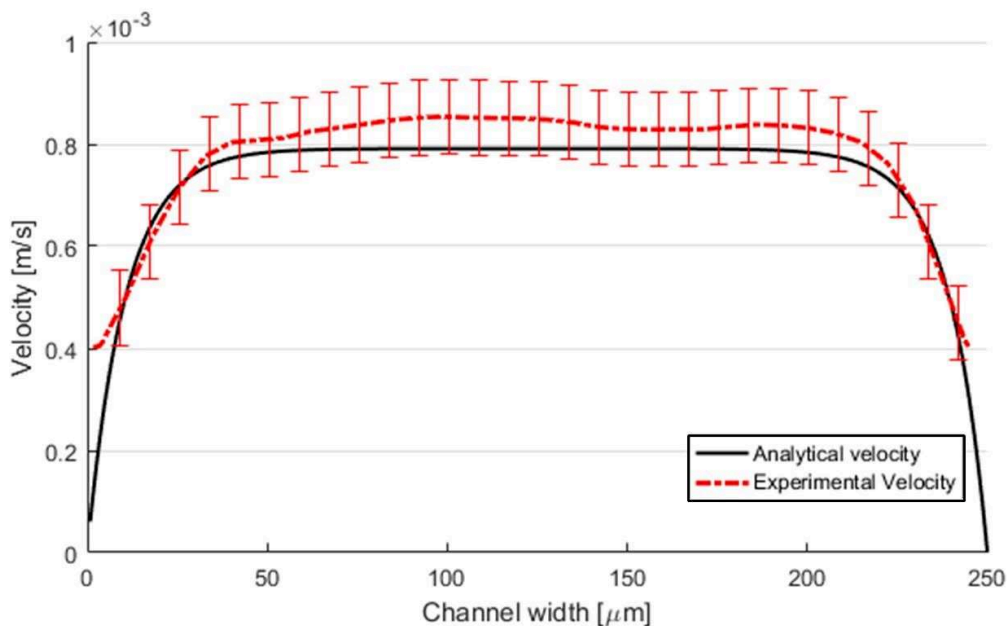


Figure 4. Comparison between the field of analytical and experimental velocities

In addition to the comparison between the experimental and analytical values, calculations were made for the uncertainties associated with channel width and depth measurements, as well as for the flow rate imposed by the pump. The magnitude of the mean velocity is found by dividing the volumetric flow rate by the area of the cross-section channel.



The pump used to inject the fluid in the micromodel has an uncertainty of 0.5% provided by the manufacturer, and for the uncertainty calculation of the area, the depth values reported by the manufacturer of the micromodel and the values measured in the microscope for the width of the channel used. With the values in Table 1 the uncertainty was calculated for the velocity that results in  $\pm 7.27 \times 10^{-5}$  m/s, according to error bars shown in Figure 4.

Table 1. Values and uncertainties related to the experiment.

Quantity	Value
Volumetric flow rate	$(6.1111 \pm 0.035) \times 10^{-12}$ m <sup>3</sup> /s
Channel depth	$(3.37 \pm 0.32) \times 10^{-5}$ m
Channel width	$(2.468 \pm 0.056) \times 10^{-4}$ m

In addition to the uncertainties with respect to the input data provided by PIVLab, presented in Table 1, other quantities were also calculated to serve as a guide to understand if the experimental analysis was generating reliable data. The response time ( $\tau$ ),

$$\tau = \sqrt{\frac{\rho_p d_p^2}{\rho_f 18\nu}} \quad (1)$$

in which  $\rho_p$  is the density of the particle,  $\rho_f$  is the fluid density,  $d_p$  is the pore diameter and  $\nu$  is the kinematic viscosity of the fluid (Lindken et al., 2009), refers to the behavior of the particles in the fluid, whether or not they are following the fluid and what confidence can be attributed to the data found by comparing the response time with the higher magnitudes of velocities present in the flow. From Equation (1) it was verified that the response time for the conditions of the experiment was  $5.83 \times 10^{-8}$  s.

From the knowledge of the highest speed achieved by the fluid and the response time, it was possible to calculate the Stokes number as given by

$$Stk = \frac{tu_0}{l_0} \quad (2)$$

being  $u_0$  the highest flow velocity and  $l_0$  the channel dimension, in order to understand if with the proposed experimental setup, there would be a very large error due to the drag of the

particles by the fluid. Solving Equation (2), we obtain the Stokes number of  $1.99 \times 10^{-7}$ , showing that the error due to the drag on the particles by the fluid is quite small, less than 1%, according to Raffel et al. (2007).

Another characteristic of the flow that has been evaluated is the error related to the Brownian motion,

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{2}{\Delta t} \frac{k_B T}{3\pi\mu d_p}} \quad (3)$$

in which  $\Delta t$  is the time between the successive images,  $k_B$  is the Boltzmann constant,  $T$  is the temperature,  $\mu$  the dynamic viscosity of the fluid and  $d_p$  the particle diameter, because the particles that are used in the experiment have a diameter of 1  $\mu\text{m}$ , and according to (Lindken et al., 2009), particles with diameter less than or equal to 1  $\mu\text{m}$  may exhibit non-standard behavior due to Brownian motion, leading to errors in the results obtained with the experiment. Using Equation (3), we obtain the value of  $\varepsilon = 9,13 \times 10^{-6}$  m/s, which divided by the mean speed of  $7.76 \times 10^{-4}$  m/s, results in 1.18% error. However, as already commented, the uncertainty analysis was done based on the average of the vectors generated by more than 2,000 pairs of images, which makes this error negligible.

### 3.2 The Pore-doublet model

Other validation step of the PIV technique was done comparing the results obtained from a single-phase fluid flow experiment with the numerical simulation using the Lattice-Boltzmann method (LBM) (Sukop and Thorne, 2007). The CFD model used in this work is based on the Boltzmann conceptual view but substantially simplified by reducing possible positions and microscopic momenta from a continuum to a discretized problem. Basically, the particle positions are confined to the lattice nodes, and their variations in momenta are reduced to a determined number of directions. It was used the BGK (Bhatnagar-Gross-Krook) collision operator, which is commonly used for the simplest LBM. The method was applied based on D3Q19 scheme, which implements the variation in momenta within 18 directions (plus one for the rest particles), represented in a three-dimensional space. At the solid-fluid interface, it was implemented the bounce-back boundary condition. The entry condition was established from the analytical solution for a rectangular cross-section channel. For the exit, it was chosen the Von Neumann boundary condition for



incompressible fluid flow, which had shown good performance during the tests with no noticeable disturbance upstream.

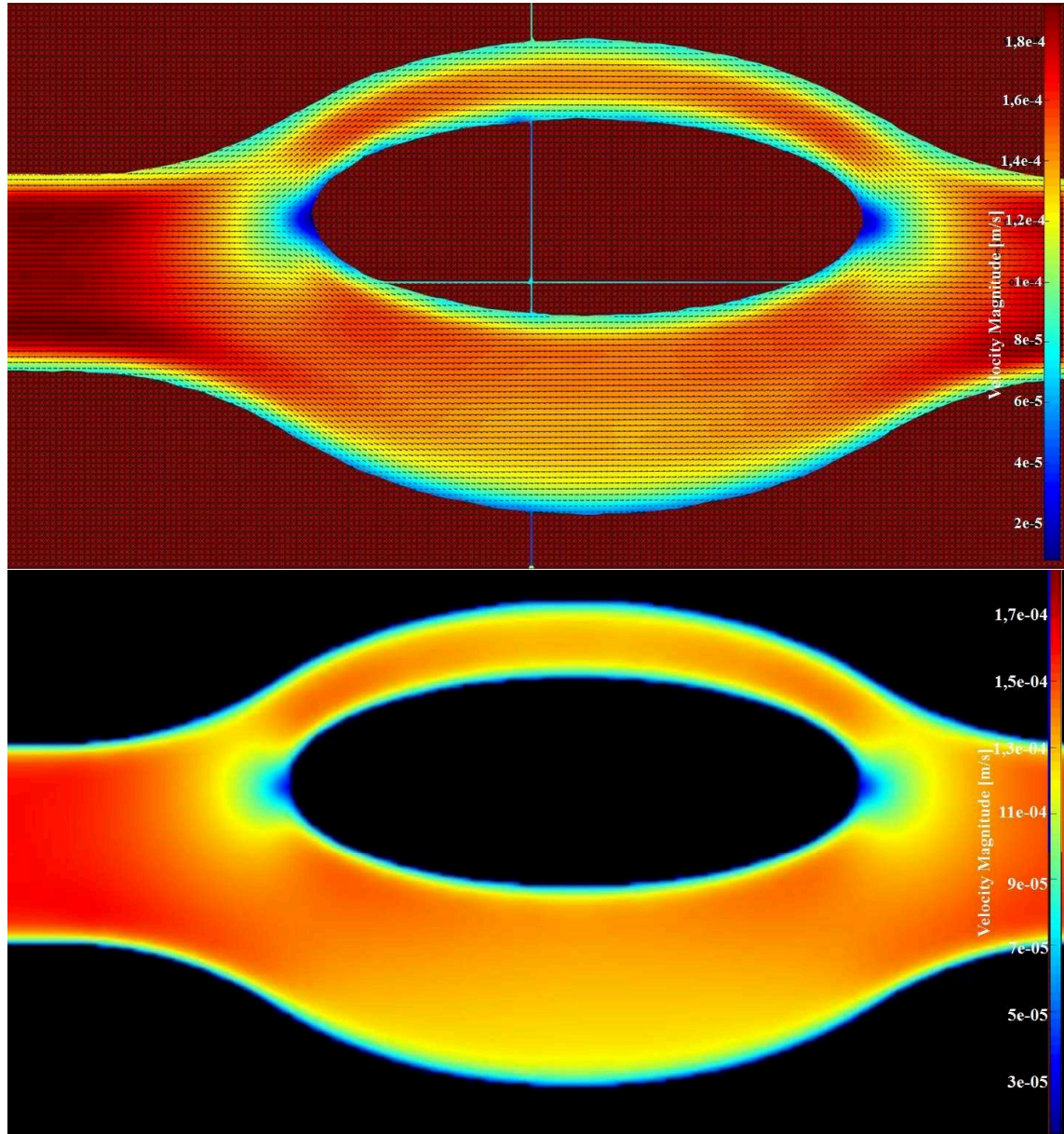


Figure 5. Water flow in doublet-pore model.

It can be observed, in figure 5 that obtained results were qualitatively very similar and are in agreement with what was already expected for this geometry. In Figure 6 we present the quantitative results for the velocity magnitude from baseline drawn across the center of the channel comparing analytical and experimental results. As can be seen, the  $\mu$ PIV velocities were slightly higher, which probably was caused by imperfections in the internal structure of

the channels (particularly due to the variability of the channel depth), resulting in a local increase in velocity, but the difference between the experimental and simulation velocities is within the uncertainties of the experiment.

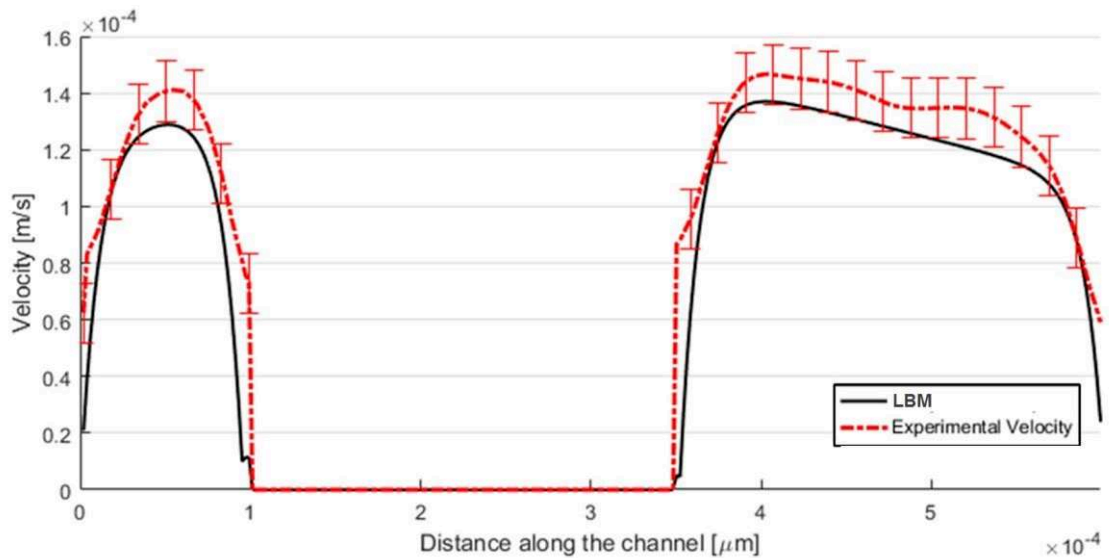


Figure 6. Comparison between the analytical and experimental results for the double-pore model.

After verifying the correctness of the results obtained by the PIV technique, some experiments were performed with two immiscible fluids in order to identify the interface dynamics during the flow, as shown in Figure 7. The fluids used were water and Heptacosafuorotributylamine (FC-43). However, as the particles did not show affinity with this fluid, being agglomerated between them and even attached to the glass of the Becker where the solution was made, experiments were carried out in which only the water received the tracer particles, thus preventing the visualization of the phase during the experiment.

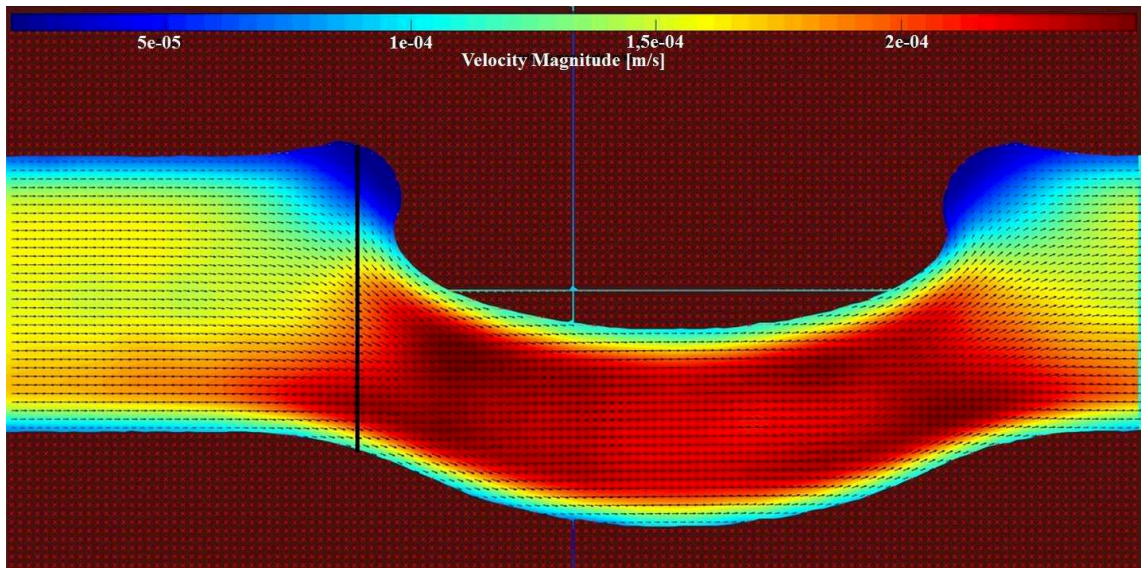


Figure 7. Velocity field in the two-phase fluid flow.

For this experiment,  $2.0 \times 10^{-11} \text{ m}^3$  of FC-43 was injected into the channel, enough to fill the tube connecting the syringe to the micromodel and the channel analyzed. Then, the water solution with tracer particles, in the same proportion as in the previous experiment, was injected at a flow rate of  $1.72 \times 10^{-12} \text{ m}^3/\text{s}$  which resulted in the vector field of Figure 7. The injection rate imposed for this experiment was calculated according to the capillary number ( $C_a$ ),

$$C_a = \frac{\mu u}{\sigma} \quad (4)$$

where  $\mu$  is the dynamic viscosity of the injected fluid and  $\sigma$  and the interfacial tension between the fluids, since according to Chatzis and Morrow (1984) in the oil recovery process the values found for the capillary number vary between  $10^{-5}$  and  $10^{-7}$ . The capillary number for this condition is  $2.73 \times 10^{-6}$  which is among the values found in the oil recovery process.

As shown in Figure 8, which shows the velocity profile of the black line drawn in Figure 7, the velocity vectors field is completely in agreement with what was expected. Even before the fluid reaches the bifurcation region, there is an increase in fluid velocity at the bottom of the channel of about 20% relative to the mean, this is because the hydraulic resistance of the upper region of the channel increases when fluid approaches the central obstacle. This condition causes the wetting fluid, which remains trapped in the minor channel as mentioned above, not to be disturbed by the flow of water in the larger channel under the flow conditions

which have been imposed. However, even raising the flow rate up to  $2.78 \times 10^{-10} \text{ m}^3/\text{s}$ , which generates a capillary number of  $4.42 \times 10^{-4}$ , there were no changes in the fraction of the trapped phase.

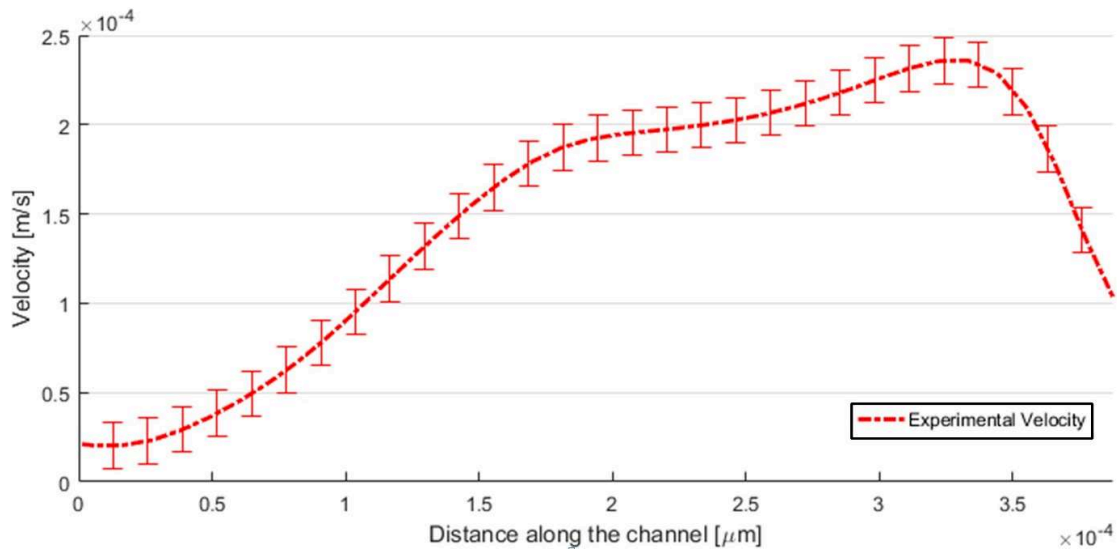


Figure 8. Profile of the vector field in the two-phase fluid flow.

#### 4. CONCLUSION

With the development of this work it became clear how the PIV technique can contribute to research involving micrometric fluid flow, both by understanding the physical phenomena involved, and by obtaining quantitative data that can later be used for flow modeling. It is noted that a great effort is still needed so that the experimental results can contribute significantly to the research, since the tests performed were in only one geometry and the uncertainties found were relatively large for the employed dimensions. In order to obtain reliable data and in a wider range of conditions, regarding the geometries used and the combination of fluids to be tested, it will be necessary to expand the limits of the bench, equipping it with more advanced devices and defining for each type of experiment a proper procedure. However, this work showed that the effort is viable due to the excellent results obtained, among them the confirmation of some theories, such as the slipping of a wet phase liquid film during the drainage process and the imprisonment of the nonwet phase in low capillary numbers, and unpublished results such as the relationship between the velocities of the fluid injection and the interface between the fluids in the trapping region.



## 5. ACKNOWLEDGEMENTS

Thanks to Petrobras for the financial support provided.

## 6. REFERENCES

- Ashwood, A.C., Vanden Hogen, S.J., Rodarte, M.A., Kopplin, C.R., Rodríguez, D.J., Hurlburt, E.T. and Shedd, T.A., 2015. “A multiphase, micro-scale PIV measurement technique for liquid film velocity measurements in annular twophase flow”. *International Journal Of Multiphase Flow*. Vol. 68, pp. 27-39.
- Chatzis, I. and Dullien, F.A.L., 1983. “Dynamic immiscible displacement mechanisms in pore doublets: Theory versus experiment”. *Journal Of Colloid And Interface Science*, Vol. 91, No 1, pp.199-222.
- Chatzis, I. and Morrow, N.R., 1984. “Correlation of Capillary Number Relationships for Sandstone”. *Society Of Petroleum Engineers Journal*. Vol. 24, No. 5, pp. 555-562.
- Gutiérrez, J.A.F., 2013 “Escoamento de gotas de óleo através de micro capilares”. Dissertation, Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.
- Kazemifar, F., Blois, G., Kyritzis, D.C. and Christensen, K.T., 2016. “Quantifying the flow dynamics of supercritical CO<sub>2</sub> –water displacement in a 2D porous micromodel using fluorescent microscopy and microscopic PIV”. *Advances In Water Resources*. Vol. 95, pp 352-368.
- Kim, B.J., Liu, Y.Z. and Sung, H.J., 2004. “Micro PIV measurement of two-fluid flow with different refractive indices”. *Measurement Science And Technology*. Vol. 15, No 6, pp. 1097-1103.
- Li, Y., Kazemifar, F., Blois, G. and Christensen, K.T., 2017. “Micro-PIV measurements of multiphase flow of water and liquid CO<sub>2</sub> in 2-D heterogeneous porous micromodels”. *Water Resources Research*, Vol. 53, No. 7, pp. 61786196.
- Lindken, R., Rossi, M., Grobe, S. and Westerweel, J., 2009. “Micro-Particle Image Velocimetry ( $\mu$ PIV): Recent developments, applications, and guidelines”. *Royal Society of Chemistry (RSC)*, Vol. 9, No. 17, pp. 2551-2567.
- Lundström, T.S., Gustavsson, L.H., Jēkabsons, N. and Jakovics, A., 2008. “Wetting dynamics in multiscale porous media. Porous pore-doublet model, experiment and theory”. *American Institute of Chemical Engineers*, Vol. 54, pp.372-380.

- Miranda, M.A.C., 2004. “*Utilização de velocimetria por imagem de partícula na visualização e caracterização de escoamento bifásico*”. Dissertation, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.
- Mortensen, N.A., Okkels, F. and Bruus, H., 2005. “Reexamination os Hagen-Poiseuille flow: shape-dependence of the hydraulic resistance in microchannels”. *American Physical Society (APS)*, Vol. 71, No. 5, pp. 1-5.
- Nabizadeh, A., Adibifard, M., Hassanzadeh, H., Fahimpour, J. and Moraveji, M.K., 2018. “Computational fluid dynamics to analyze the effects of initial wetting film and triple contact line on the efficiency of immiscible twophase flow in a pore doublet model”. *Journal Of Molecular Liquids*, Vol. 273, pp. 248-258.
- Raffel, M., Willert, C.E., Scarano, F., Kähler, C., Wereley, S.T. and Kompenhans, J., 2007. *Particle image velocimetry: a practical guide*. Gottingen: Springer, 2<sup>nd</sup> edition.
- Roman, S., Soulaine, C., Abu AlSaud, M., Kovscek, A. and Tchelepi, H., 2016. “Measurements and simulation of liquid films during drainage displacements and snap-off in constricted capillary tubes”. *Journal Of Colloid And Interface Science*, Vol. 507, pp.279-289.
- Silva, G., Leal, N. and Semiao, V., 2008. “*Micro-PIV and CFD characterization of flows in a microchannel: Velocity profiles, surface roughness and Poiseuille numbers*”. *International Journal Of Heat And Fluid Flow*. Vol. 29, No. 4, pp. 1211-1220.
- Sorbie, K.S., Wu, Y.Z. and McDougall, S.R., 1995. “The extended washburn equation and its application to the oil/water pore doublet problem”. *Journal Of Colloid And Interface Science*, Vol. 174, pp.289-301.
- Thielicke, W. and Stamhuis, E.J., 2014. “PIVlab – Towards User-friendly, Affordable and Accurate Digital Particle Image Velocimetry in MATLAB”. *Journal of Open Research Software*, Vol. 2, pp. 30-40.
- Venturoli, M. and Boek, E. S., 2006. “Two-dimensional lattice-Boltzmann simulations of single phase flow in a pseudo two-dimensional micromodel”. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Vol. 362, pp. 23-29.
- Wolf, F.G., 2006. “*Modelagem da Interação Fluido-sólido para Simulação de Molhabilidade e Capilaridade Usando o Modelo Lattice-Boltzmann*”. Ph.D. thesis, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.

## 7. RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.