

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA AEROESPACIAL

GEORGE LUIZ RINGAWESKI VEGINI

ANÁLISE DE ESCOAMENTOS EM MICROPOROS PELA TÉCNICA DE
VELOCIMETRIA POR IMAGEM DE PARTÍCULAS

Joinville
2019

GEORGE LUIZ RINGAWESKI VEGINI

ANÁLISE DE ESCOAMENTOS EM MICROPOROS PELA TÉCNICA DE
VELOCIMETRIA POR IMAGEM DE PARTÍCULAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como requisito parcial para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Aeroespacial,
na Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Orientador: Prof. Dr. Fabiano Gilberto Wolf

Joinville
2019

ANÁLISE DE ESCOAMENTOS EM MICROPOROS PELA TÉCNICA DE
VELOCIMETRIA POR IMAGEM DE PARTÍCULAS

GEORGE LUIZ RINCAWESKI VEGINI

Esta Monografia foi julgada e aprovada como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Aeroespacial, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 04 de Julho de 2019

Banca Examinadora:

Dr. Fabiano Gilberto Wolf
Presidente/Orientador

Dr. Ernane Silva
Membro

Dr. Diogo Nardelli Siebert
Membro

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família por seu apoio incondicional.

Agradeço aos meus professores que juntos, desde minha infância, ajudaram-me nesta jornada em busca de conhecimento, em especial ao prof. Fabiano Wolf que adotou-me durante a graduação e auxiliou-me em meu desenvolvimento acadêmico.

Agradeço aos meus amigos pela companhia, em especial ao companheiro de laboratório Anderson Rohweder, cujo auxílio nos procedimentos experimentais deste trabalho foi fundamental.

Agradeço ao laboratório de microeletrônica da Universidade de São Paulo, especialmente ao Alexandre T. Lopes e ao Marcelo N. P. Carreño, pela fabricação dos micromodelos utilizados nesse trabalho.

Poyekhali!

Yuri Alekseyevich Gagarin

RESUMO

O estudo de microfluídica tem despertado elevado interesse devido à sua aplicabilidade na extração de petróleo e recuperação de solo contaminado, tendo assim grande impacto econômico e ambiental. Como qualquer tema na engenharia, a microfluídica pode ter três abordagens diferentes: analítica, experimental e numérica. É importante que cada abordagem produza resultados compatíveis e comparáveis entre si, entretanto, tal comparação não é trivial, uma vez que os dados provenientes de uma abordagem não estão disponíveis em outra. Um exemplo claro disso é o campo de velocidade, sempre disponível na abordagem numérica mas de difícil obtenção no caso experimental. O recente desenvolvimento na técnica de velocimetria por imagem de partículas em microcanais (μ -PIV) vem de encontro ao citado, pois permite que se capture o campo de velocidade do escoamento. Este trabalho propõe-se a utilizar μ -PIV para a análise de escoamento em duas estruturas diferentes de microporos. Avalia-se também o comportamento do fluido aprisionado no microporo em um escoamento bifásico. As geometrias dos poros abordados são circular e triangular. Os fluidos de trabalho são água ultrapura e FC-43, as micropartículas utilizadas são de poliestireno com superfície modificada de carboxilato e possuem $1 \mu\text{m}$ de diâmetro. Variou-se o número capilar no escoamento de 10^{-6} até 10^{-3} . Os resultados obtidos mostram forte dependência com a profundidade do canal e a necessidade que o escoamento injetado seja da ordem de $10^4 \mu\text{m/s}$ para o fluido aprisionado no poro apresentar movimento na ordem de $10^1 \mu\text{m/s}$.

Palavras-chave: Microfluídica. Escoamento em microcanais. Microporos. Velocimetria por imagem de partículas. μ -PIV.

ABSTRACT

The study of microfluidics has great economic and environmental interest due to its applicability at oil recovery and polluted soil decontamination. As any topic in engineering, microfluidics may have three different approaches: analytical, experimental and numerical. It is important that each approach yields compatible and comparable results. However, such comparison is not trivial, as the data prevented from one approach may not be available at the other. One example of this is the velocity field, always available at the numerical approach but of difficult acquirement at the experimental one. The recent development of the particle image velocimetry technique in microchannel flow (μ -PIV) comes as an alternative to the situation mentioned as it allows to determine the velocity field of the flow. This study intends to use μ -PIV in order to analyze the flow at two different micropores structures. It is also evaluated the imprisoned fluid behavior in a two phase flow. Round and triangular pore geometries are used. The fluids used are ultrapure water and FC-43, the microparticles have diameter of 1 μm . The capillary number ranged from 10^{-6} to 10^{-3} . The results show strong channel depth influence and an injection flow at the order of $10^4 \mu\text{m/s}$ to the imprisoned fluid produce motion of the order of $10^1 \mu\text{m/s}$.

Keywords: Microfluidics. Microchannel flow. Micropores. Particle Image Velocimetry. μ -PIV.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Extração de petróleo secundário.	15
Figura 2 – Exemplo de poro sem-saída.	15
Figura 3 – Noção de escala.	17
Figura 4 – Molhabilidade.	19
Figura 5 – Drenagem e embebição.	20
Figura 6 – Capilaridade	21
Figura 7 – Correlação espacial discreta.	26
Figura 8 – Geometria dos microporos. Medidas em mm.	29
Figura 9 – Micromodelo. Medidas em mm.	30
Figura 10 – Processo de fotolitografia macia	31
Figura 11 – Bancada experimental.	32
Figura 12 – Espectro da fonte luminosa.	33
Figura 13 – Plano focal.	33
Figura 14 – Resultado de perfil Poiseuille para o canal com poros circulares. . .	41
Figura 15 – Resultado de perfil Poiseuille para o canal com poros triangulares. .	41
Figura 16 – Linhas de corrente para o escoamento C1.	43
Figura 17 – Linhas de corrente para os escoamentos C2 a C8.	43
Figura 18 – Campo de velocidade para o escoamento C1.	45
Figura 19 – Campo de velocidade para os escoamentos C2 a C8.	46
Figura 20 – Evolução do perfil de velocidade u para o caso de poro circular. . . .	47
Figura 21 – Evolução do perfil de velocidade v para o caso de poro circular. . . .	48
Figura 22 – Velocidade média no volume aprisionado no poro circular em função do número capilar.	49
Figura 23 – Campo do módulo de vorticidade para o escoamento C1. Direção do vetor vorticidade entrando na página.	50
Figura 24 – Campo do módulo de vorticidade para os escoamentos C2 a C8. Direção do vetor vorticidade entrando na página.	51
Figura 25 – Evolução do perfil de vorticidade para o caso de poro circular. Rotação no sentido horário é positiva.	52
Figura 26 – Linhas de corrente para o escoamento T1.	53
Figura 27 – Linhas de corrente para o escoamento T2 a T8.	53
Figura 28 – Campo de velocidade para o escoamento T1.	54
Figura 29 – Campo de velocidade para os escoamentos T2 a T8.	55

Figura 30 – Evolução do perfil de velocidade u para o caso de poro triangular.	56
Figura 31 – Evolução do perfil de velocidade v para o caso de poro triangular.	56
Figura 32 – Velocidade média no poro triangular em função do número capilar.	57
Figura 33 – Campo do módulo de vorticidade para o escoamento T1. Direção do vetor vorticidade entrando na página.	58
Figura 34 – Campo do módulo de vorticidade para os escoamentos T2 a T8. Direção do vetor vorticidade entrando na página.	59
Figura 35 – Evolução do perfil de vorticidade para o caso de poro triangular. Rotação no sentido horário é positiva.	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização do canal de microporos circulares.	31
Tabela 2 – Caracterização do canal de microporos triangulares.	31
Tabela 3 – Parâmetros do experimento do canal com microporos circulares. . .	36
Tabela 4 – Parâmetros do experimento do canal com microporos triangulares. .	37
Tabela 5 – Parâmetros das imagens para processamento.	39

LISTA DE SÍMBOLOS

Δt	Intervalo de tempo [s]
Δx	Deslocamento [m]
γ	Razão entre a largura e a altura do canal
v	Velocidade [m/s]
v_{max}	Velocidade limite máxima [m/s]
v_{min}	Velocidade limite mínima [m/s]
μ	Viscosidade dinâmica [Pa.s]
μ_i	Viscosidade dinâmica do fluido injetado [Pa.s]
ω	Vorticidade [1/s]
\bar{v}	Velocidade média [m/s]
ρ	Densidade [kg/m ³]
ρ_p	Densidade da partícula [kg/m ³]
σ	Tensão interfacial [N/m]
σ_v	Desvio padrão das velocidades [m/s]
τ	Tempo de relaxação da partícula [s]
θ_e	Ângulo de contato
ε	Erro associado ao movimento Browniano
$\vec{\nabla}$	Operador nabla
A	Área [m ²]
Ca	Número capilar
D	Dimensão espacial
d_p	Diâmetro da partícula [m]
h	Profundidade do canal [m]
k_B	Constante de Boltzmann [J/K]
L	Escala característica [m]
n_s	Rigidez do filtro de velocidades
P	Perímetro [m]
p	Pressão [Pa]
p_c	Pressão capilar [Pa]
p_m	Pressão do fluido molhante [Pa]
p_{ext}	Pressão exterior [Pa]
p_{int}	Pressão interior [Pa]
p_{nm}	Pressão do fluido não-molhante [Pa]

Q	Vazão volumétrica [m^3/s]
Q_1	Primeira vazão volumétrica [m^3/s]
R	Raio da gota [m]
r	Raio do canal [m]
Re	Número de Reynolds
Re_i	Número de Reynolds do fluido injetado
s_{rms}	Deslocamento médio quadrático de uma partícula devido ao movimento Browniano [m]
St	Número de Stokes
T	Temperatura [K]
t	Tempo [s]
u	Velocidade na direção longitudinal ao escoamento [m/s]
v	Velocidade na direção transversal ao escoamento [m/s]
v_p	Velocidade de uma partícula [m/s]
W	Trabalho de superfície [J]
w	Largura do canal [m]
C1	Escoamento 1 no último poro circular
C2	Escoamento 2 no último poro circular
C3	Escoamento 3 no último poro circular
C4	Escoamento 4 no último poro circular
C5	Escoamento 5 no último poro circular
C6	Escoamento 6 no último poro circular
C7	Escoamento 7 no último poro circular
C8	Escoamento 8 no último poro circular
L	Fase líquida
P1	Escoamento no canal imediatamente antes do primeiro poro circular
P2	Escoamento no canal imediatamente antes do último poro circular
P3	Escoamento no canal imediatamente antes do primeiro poro triangular
P4	Escoamento no canal imediatamente antes do último poro triangular
S	Fase sólida
T1	Escoamento 1 no primeiro poro triangular
T2	Escoamento 2 no último poro triangular
T3	Escoamento 3 no último poro triangular
T4	Escoamento 4 no último poro triangular
T5	Escoamento 5 no último poro triangular
T6	Escoamento 6 no último poro triangular
T7	Escoamento 7 no último poro triangular
T8	Escoamento 8 no último poro triangular
V	Fase gasosa

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivo Geral	13
1.2	Objetivos Específicos	13
2	REVISÃO TEÓRICA	14
2.1	Microfluídica	16
2.1.1	O mundo micro	17
2.1.2	Micromodelos de sistemas porosos	17
2.2	Mecânica dos fluidos	18
2.2.1	Tensão interfacial	18
2.2.1.1	Pressão de Laplace	19
2.2.2	Molhabilidade	19
2.2.2.1	Capilaridade	20
2.2.3	Equações de conservação	21
2.2.4	Vorticidade	22
2.3	Números adimensionais	22
2.3.1	Número de Reynolds	22
2.3.2	Número capilar	22
2.3.3	Número de Stokes	23
2.4	Movimento Browniano	23
2.5	Microvelocimetria por imagem de partículas	24
2.5.1	Partículas	24
2.5.2	Iluminação	25
2.5.3	Processamento	25
3	METODOLOGIA	28
3.1	Micromodelo real	28
3.1.1	Fabricação	28
3.1.2	Caracterização	30
3.2	Equipamentos e sistema μ-PIV	31
3.3	Procedimento experimental	33
3.4	Processamento das imagens	38
4	RESULTADOS	40
4.1	Validação	40
4.2	Poros circular	42
4.2.1	Linhas de corrente	42

4.2.2	Campo de velocidade	44
4.2.3	Campo de vorticidade	49
4.3	Poro triangular	52
4.3.1	Linhas de corrente	52
4.3.2	Campo de velocidade	54
4.3.3	Campo de vorticidade	57
5	CONCLUSÕES	61
6	TRABALHOS FUTUROS	63
	REFERÊNCIAS	64
	APÊNDICE A - Algoritmo para o cálculo da máscara e média do escoamento.	67
	APÊNDICE B - Algoritmo para o cálculo da solução analítica de Poiseuille em canal de seção retangular.	68

1 INTRODUÇÃO

Processos que envolvem escoamento em meio poroso, tais como o de extração de petróleo e recuperação de solo contaminado tendem a possuir baixa eficiência e são de difícil entendimento. Isso ocorre porque os poros do meio avaliado são de geometria complexa e possuem escala micrométrica. Há também forte influência de propriedades que normalmente não afetam um escoamento em escala dita regular, como a molhabilidade e a tensão interfacial entre fluidos.

Para se realizar uma investigação experimental adequada desses fenômenos utiliza-se da microfluídica, ou seja, a ciência e tecnologia de sistemas que processa ou manipula pequenos volumes de fluidos (WHITESIDES, 2006). A técnica de velocimetria de imagem de partículas aplicada em sistema microfluídicos, chamada de μ -PIV, permite a medição do campo de velocidade do escoamento em microporos, e por consequência, a avaliação do comportamento da interação de fluidos no mesmo.

Pode-se utilizar os resultados provenientes da técnica μ -PIV para comparação com os resultados provenientes de análise analítica e/ou numérica, possibilitando sua validação. Tendo-se a compreensão adequada dessas interações entre fluidos na geometria porosa via múltiplas abordagens pode-se avaliar o efeito real do escoamento nos microporos na eficiência do processo final e como otimizá-lo.

1.1 Objetivo Geral

Quantificar o campo de velocidades de escoamentos em microporos utilizando-se o método de velocimetria por imagem de partículas.

1.2 Objetivos Específicos

Este trabalho possui como objetivos específicos:

- Validar o método empregado comparando-o com resultados analíticos dados pela equação de Poiseuille em canal retangular;
- Caracterizar o escoamento em microporos por meio do campo de velocidade e vorticidade;
- Avaliar o comportamento do fluido aprisionado no poro para o caso de escoamento bifásico;
- Estimar o efeito do número Capilar no escoamento.

2 REVISÃO TEÓRICA

Nesta seção busca-se contextualizar os conceitos e o problema abordado juntamente com o embasamento teórico e revisão do que está disponível na literatura. Ainda assim, o autor ressalta que para melhor compreensão do assunto leituras complementares são recomendadas.

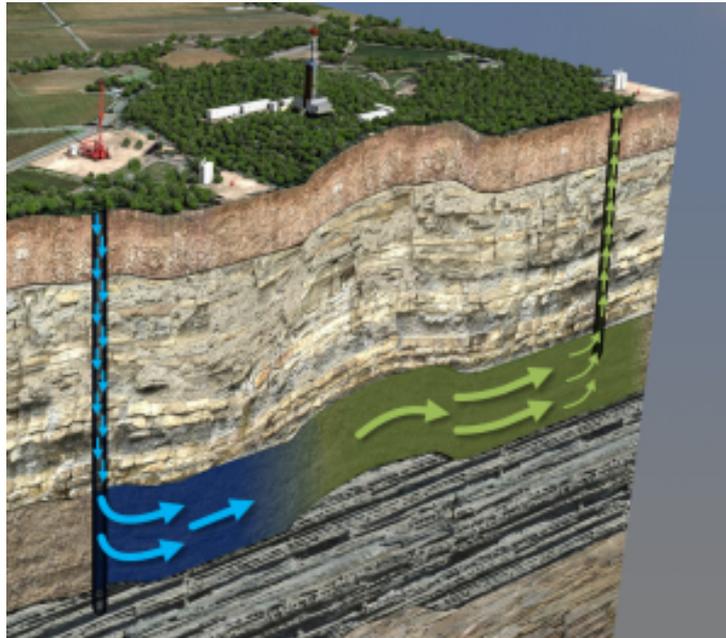
Todo escoamento em meio poroso depara-se com uma mesma restrição: o aprisionamento de fluido em poros sem-saída, ou, do inglês, *dead-end pores*. Esse aprisionamento não só torna o escoamento que já é inerentemente complexo mais difícil, como pode influenciar o resultado final de diversas maneiras, sendo que para as principais aplicações ele reduz significativamente a eficiência do processo. Alguns dos problemas de escoamentos em meio poroso com maior pesquisa da atualidade são os casos de extração de petróleo e remediação de solo poluído, como exemplos dos desenvolvimentos nesses tópicos tem-se: Li et al. (2017), Broens e Unsal (2018) e Maalouf (2017).

No ano de 2012, petróleo e outros hidrocarbonetos representaram cerca de 38% de toda a fonte energética para eletricidade e transporte do planeta (BILGEN, 2014). A United States Energy Information Administration (2016) apresentou dados históricos de consumo de petróleo e outros hidrocarbonetos juntamente com suas projeções. No ano citado, o mundo consumiu 90,3 milhões de barris por dia, e no ano de 2040 consumirá 120,9 milhões de barris ao dia.

O processo de extração de petróleo e gás de um poço ocorre em três etapas. Na etapa primária o petróleo verte devido à pressão interna do poço, na etapa secundária, representada na figura 1, um fluido, usualmente água marítima, é injetado no poço deslocando o fluido já existente. Após o término das duas primeiras etapas algo entre 50% e 70% do petróleo original permanece na rocha (NILSSON et al., 2013). Na etapa terciária utiliza-se métodos aprimorados de extração, métodos esses mais caros e cujo uso varia com o tempo, devido à sua viabilidade técnica e econômica.

O motivo de tamanha retenção após as duas primeiras etapas é que em um meio poroso a água injetada não varre o óleo em uma frente uniforme, mas segue caminhos preferenciais. A física do surgimento desses caminhos preferenciais é um tópico de muito interesse na comunidade científica, podendo-se citar como exemplos os trabalhos de Homsy (1987), Lenormand (1990), Vegini et al. (2016) e Heshmati e Piri (2018). Não obstante, mesmo no fluxo de fluido no caminho preferencial há petróleo residual nos poros sem-saída, pois devido a forças capilares o petróleo

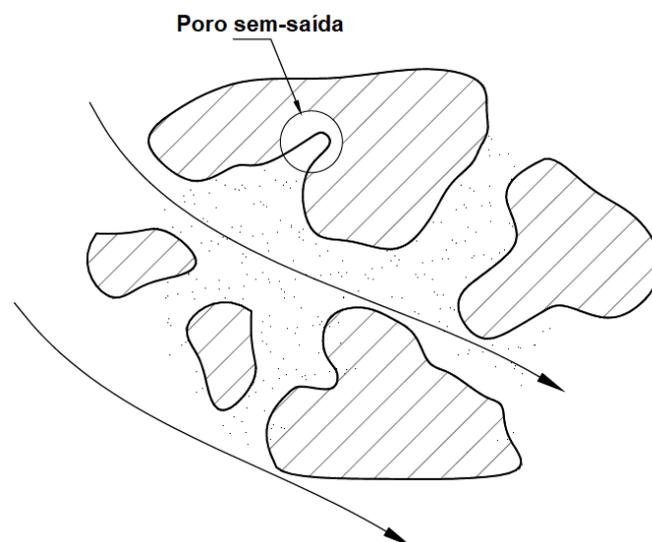
Figura 1 – Extração de petróleo secundário.



Fonte: O'Brien (2015) .

permanece estagnado dentro da região. A figura 2 apresenta a existência de um poro sem-saída. Esses poros possuem diversos formatos e tamanhos, sua quantidade também pode variar dependendo da rocha. De fato, a quantidade de poros sem-saída dentro de uma região porosa não é uma informação comum na literatura, Coats e Smith (1964) calcularam em duas amostras rochosas seu volume e afirmaram que para suas amostras 7% e 10% de todo o volume poroso se trata de volume estagnado.

Figura 2 – Exemplo de poro sem-saída.



Fonte: adaptado de Maalouf (2017).

Outra aplicação relevante do objeto de estudo deste trabalho é o caso de remediação de solo e/ou aquífero poluído. A relevância ambiental deste tópico é significativa, uma vez que afeta diretamente a sociedade e o meio ambiente onde vivemos. Somente nos Estados Unidos existem 1300 locais contaminados por lixo tóxico agendados para limpeza (MAALOUF, 2017). Uma vez que o solo ou aquífero subterrâneo esteja poluído devido ao despejo de contaminante ou ao seu mau uso, e.g. lixões, necessita-se limpá-lo de alguma forma. Usualmente faz-se um processo semelhante ao citado para extração de petróleo, injetando-se água e/ou agentes químicos despoluidores no poço a ser limpo, retirando-se ou reagindo com o poluidor. Entretanto, os contaminantes aprisionados em poros estagnados dificilmente são deslocados pela frente de limpeza, encontrando, então, a mesma barreira de eficiência do caso de extração de petróleo.

Deve-se, portanto, avaliar adequadamente como a existência desses poros sem-saída afetam o escoamento no meio poroso e qual a física envolvida. Como qualquer tema de engenharia pode-se abordar o problema de maneira analítica, numérica ou experimental. A abordagem analítica para problemas de mecânica dos fluidos tende a ser demasiadamente complexa, de modo que ela sempre vem acompanhada de uma das demais. Tradicionalmente, a avaliação numérica para esse tipo de estudo utiliza o método de Lattice-Boltzmann (WOLF, 2006). Devido a ordem de grandeza do tamanho dos poros, avalia-se experimentalmente o tema via microfluídica. É importante que cada abordagem produza resultados compatíveis e comparáveis entre si; entretanto, tal comparação não é trivial, uma vez que os dados provenientes de uma abordagem não estão disponíveis em outra.

2.1 Microfluídica

Whitesides (2006) define microfluídica como "a ciência e tecnologia de sistemas que processa ou manipula pequenos volumes de fluidos (10^{-9} a 10^{-18} litros), usando canais com dimensões de dezenas a centenas de micrometros". Embora os poros dos exemplos abordados anteriormente variem conforme a rocha ou ambiente encontrado, possuem escala micrométrica, tornando a abordagem microfluídica bastante conveniente.

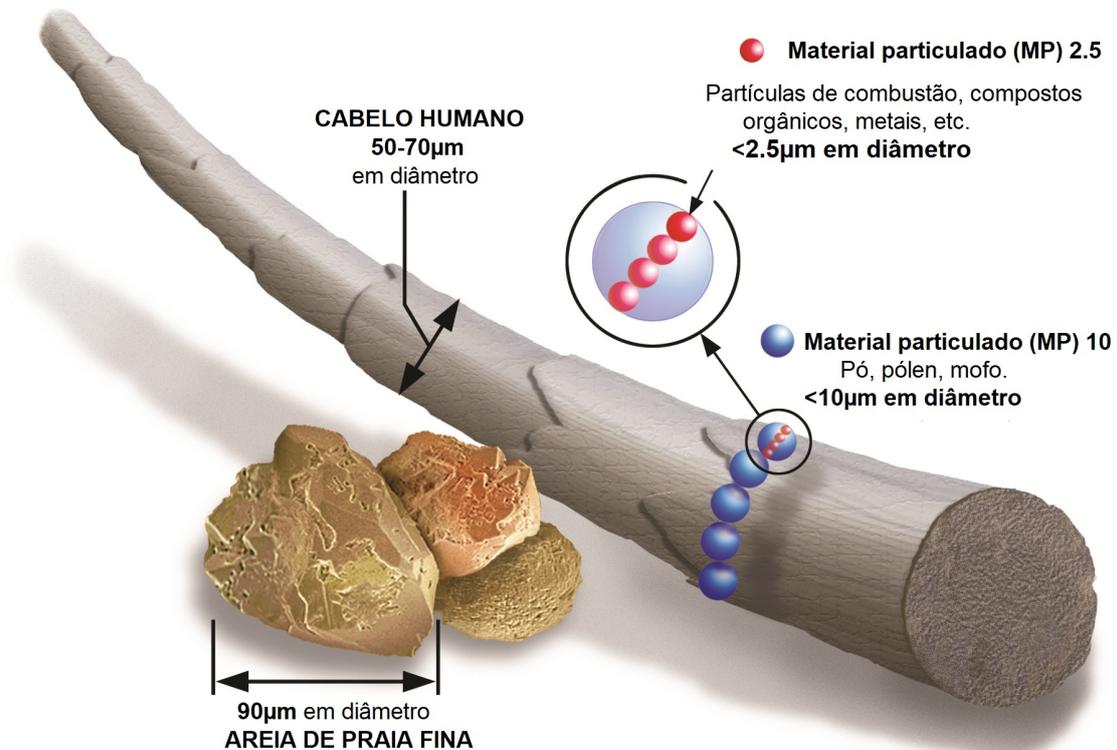
A fenomenologia em escala micrométrica difere consideravelmente daquela em uma escala dita normal. A interação entre fluido e sólido se torna relevante, de modo que propriedades cujo efeito são imperceptíveis em escala normal tem papel intenso em escala micrométrica, como exemplo dessas propriedades pode-se citar a tensão interfacial e a molhabilidade. É interessante notar que a escala de trabalho é intermediária entre a escala habitual, caracterizada em metros e centímetros e a molecular, pois embora os efeitos moleculares ainda estejam reduzidos, eles já

começam a ser sentidos via movimento Browniano.

2.1.1 O mundo micro

A escala micrométrica é de difícil percepção para os humanos. Devido à ausência de comparação intuitiva, o leitor pode se questionar ao longo deste documento qual realmente é a escala abordada, sendo assim, a figura 3 tenta esclarecer o tópico. É interessante fazer uma comparação com células sanguíneas, segundo Montanari (2016) hemácias medem em média 7 a 8 μm e plaquetas medem de 2 a 4 μm . Antecipando o que será apresentado na seção 3.2, as micropartículas utilizadas para a técnica de μ -PIV neste trabalho possuem em média 1 μm de diâmetro.

Figura 3 – Noção de escala.



Fonte: adaptado de United States Environmental Protection Agency (2018).

2.1.2 Micromodelos de sistemas porosos

Idealmente na abordagem experimental deve-se realizar uma avaliação de maneira mais fidedigna ao encontrado nas circunstâncias reais, portanto, deveria-se utilizar uma amostra real da rocha. Entretanto, a aquisição de dados num caso desse se tornaria muito difícil e custosa. Utiliza-se então modelos representativos que do ponto

de vista estatístico imitam o real, mas cuja aquisição de dados e análise é facilitada. O modelo físico representativo chama-se micromodelo.

É necessário que os micromodelos utilizados em experimentos de microfluídica possam cumprir as tolerâncias de fabricação, permitam uso em microscópio (sejam transparentes) e que não se deformem com o escoamento. Usualmente utiliza-se micromodelos de vidro ou de polímero.

2.2 Mecânica dos fluidos

A investigação realizada nesse trabalho se encaixa dentro da grande área da mecânica dos fluidos. A mecânica dos fluidos é o estudo de fluidos em repouso ou movimento (FOX; PRITCHARD; MCDONALD, 2011). Nesta seção serão abordadas e definidas as propriedades básicas necessárias para a adequada caracterização e compreensão do problema tratado.

2.2.1 Tensão interfacial

Toda esta subseção tem como referência o primeiro capítulo do livro escrito por Gennes, Brochard-Wyart e Quéré (2004).

Os fluidos tendem sempre à forma de menor energia, i.e., a forma com menor superfície, conseqüentemente bolhas e gotas tendem ao formato esférico. A propriedade física relacionada a este fenômeno é a tensão superficial, ou interfacial no caso de separação de líquidos imiscíveis. É interessante notar que a superfície de fronteira criada pela tensão superficial é extremamente suave e as suas flutuações de espessura são da ordem de Ångströms, causando uma variação brusca de densidades entre os fluidos.

A tensão superficial é uma medida direta da energia por unidade de área, e existe pois uma molécula que se encontra no meio de um líquido está em um estado favorável se beneficiando da interação com todos os seus vizinhos, enquanto uma molécula segregada à superfície está em um estado desfavorável, tendo somente metade da energia de coesão quando comparada à molécula anterior,

Pode-se relacionar diretamente a tensão superficial ao trabalho de superfície,

$$\delta W = \sigma \cdot dA, \quad (2.1)$$

sendo W , σ e A o trabalho realizado pela superfície, a tensão superficial e a área, respectivamente. Sendo assim, σ é a quantidade de energia por unidade de área que deve ser fornecida/retirada para aumentar/diminuir a área superficial de uma gota.

2.2.1.1 Pressão de Laplace

Para uma gota em equilíbrio mecânico, a tensão superficial está diretamente relacionada à diferença de pressão entre seu interior e exterior, como mostrado pela equação de Young-Laplace:

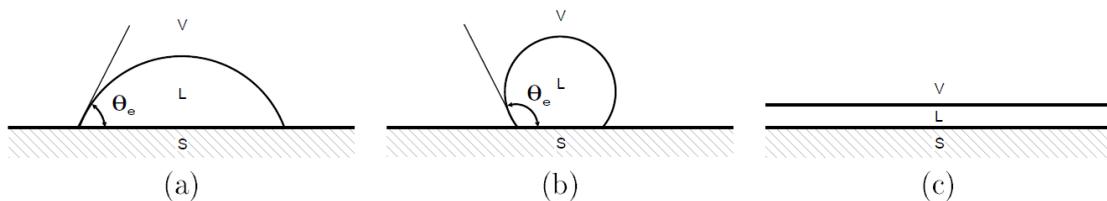
$$\Delta p = p_{ext} - p_{int} = (D - 1) \frac{\sigma}{R}, \quad (2.2)$$

sendo, Δp , D e R a diferença de pressão entre o interior (p_{int}) e o exterior da gota (p_{ext}), a dimensão espacial e o raio da gota, respectivamente (WOLF, 2006).

2.2.2 Molhabilidade

Silva e Dawe (2003) definem molhabilidade como a tendência de um fluido de se espalhar ou aderir à uma superfície sólida na presença de outro fluido imiscível e é caracterizado pelo ângulo de contato θ_e , como ilustrado na figura 4.

Figura 4 – Molhabilidade.



Fonte: adaptado de Wolf (2006)

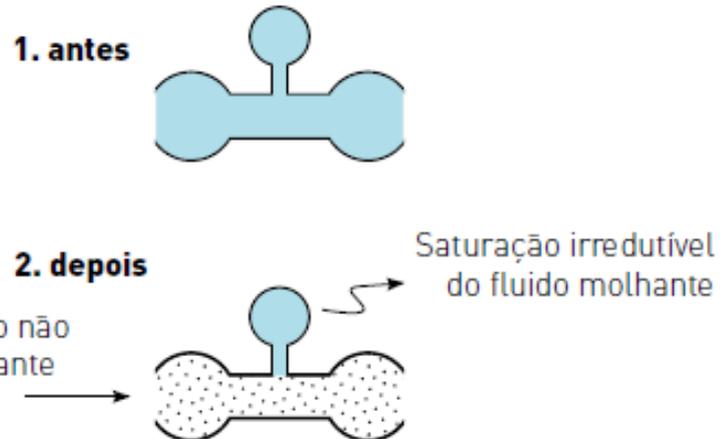
Na figura, V, L e S representam os componentes gasoso, líquido e sólido, respectivamente. Na configuração (a) da figura 4, $\theta_e < 90^\circ$, resultando então numa configuração em que o fluido é molhante. Na configuração (b) $\theta_e > 90^\circ$, resultando numa configuração em que o fluido é não-molhante. Na configuração (c) $\theta_e = 0^\circ$, forma-se então um filme de fluido molhante (WOLF, 2006). Para situações em que os dois ângulos de contato de uma mesma gota diferem entre si há a histerese do ângulo de contato, o que representa uma dependência da história do sistema, como a de uma contaminação na superfície do sólido (DULLIEN, 1992).

Com o conceito de molhabilidade podemos definir os processos de drenagem e embebição. Drenagem é o deslocamento de um fluido molhante por um não-molhante, enquanto a embebição é o inverso, o deslocamento de um fluido não-molhante por um molhante (CUNHA, 2012). Para compreender os processos consulte a figura 5.

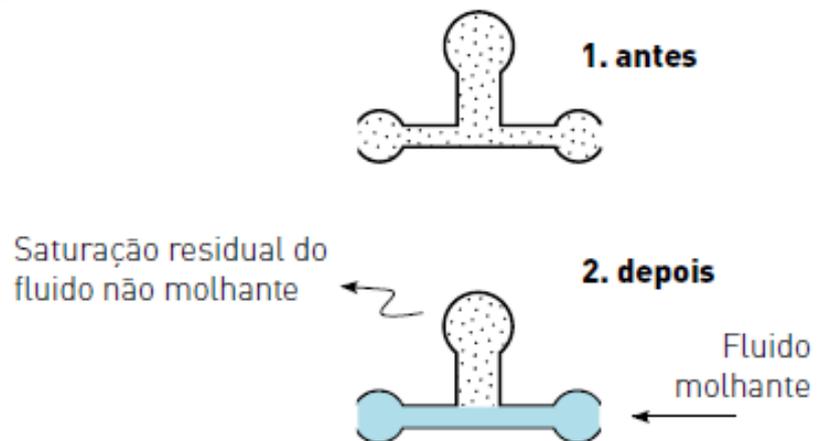
Na figura 5 fica evidente a existência do fluido residual aprisionado dentro do poro sem-saída, mesmo com a passagem do fluido injetado.

Figura 5 – Drenagem e embebição.

Drenagem



Embebição



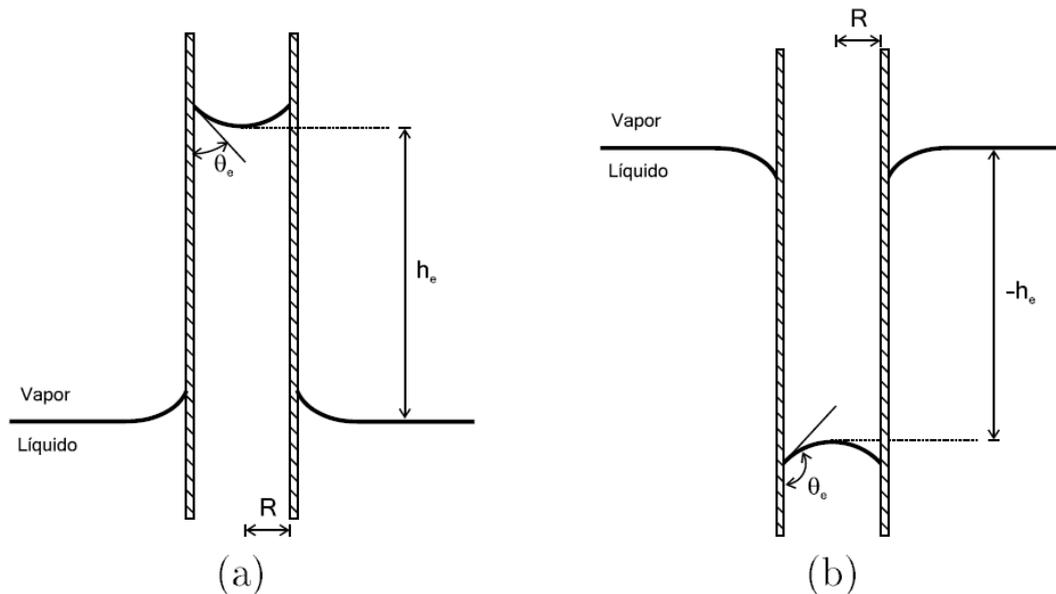
Fonte: adaptado de Cunha (2012)

2.2.2.1 Capilaridade

Capilaridade é uma consequência da molhabilidade para a situação em que o sólido não é mais uma superfície plana, mas um meio poroso, como apresentado na figura 6 (WOLF, 2006). Forças capilares levam o fluido a invadir a região do tubo, sempre levando a uma disputa de forças.

Na situação (a) da figura 6 o líquido invade o tubo, portanto, ele é molhante, no caso (b) ele é não-molhante. A discontinuidade entre os fluidos causa a pressão

Figura 6 – Capilaridade



Fonte: adaptado de Wolf (2006)

capilar, para o caso de um tubo cilíndrico, a pressão capilar é:

$$p_c = p_{nm} - p_m = \frac{2\sigma \cos \theta_e}{r}, \quad (2.3)$$

sendo p_c , p_{nm} , p_m e r a pressão capilar, pressão do fluido não-molhante, pressão do fluido molhante e o raio do tubo, respectivamente (SILVA; DAWE, 2003). Percebe-se da equação que para o processo de drenagem quanto maior o tamanho do poro (maior o raio) mais facilmente ele será preenchido pelo fluido injetado, pois menor será a pressão capilar a ser superada.

2.2.3 Equações de conservação

Na descrição contínua, ou seja, quando a escala de estudo é muito maior que a escala de colisões moleculares, emprega-se as equações de conservação para modelamento da mecânica dos fluidos. As equações de conservação nos mostram como determinadas variáveis evoluem espacialmente e temporalmente no sistema abordado e podem ser deduzidas do teorema de transporte de Reynolds, como mostrado em Fox, Pritchard e McDonald (2011).

Neste trabalho utilizaremos as equações de conservação da massa (equação 2.4) e movimento (equação 2.5), também chamada de equação de Navier-Stokes, para escoamento incompressível, isotérmico e sem forças de corpo:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{v} = 0 \quad (2.4)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} \right) = -\nabla p + \mu \left(\nabla^2 \vec{v} \right) \quad (2.5)$$

sendo ρ, \vec{v}, p e μ , a densidade, a velocidade, a pressão e a viscosidade, respectivamente. Não há solução analítica geral para essas equações.

2.2.4 Vorticidade

Define-se o vetor vorticidade como o rotacional do campo de velocidade (PAPANASTASIOU; GEORGIU; ALEXANDROU, 1999), ou seja,

$$\vec{\omega} \equiv \nabla \times \vec{v}, \quad (2.6)$$

sendo $\vec{\omega}$ e ∇ o vetor vorticidade e o operador nabla, respectivamente. O vetor vorticidade indica o estado de rotação do escoamento, sendo igual a zero para o caso irrotacional.

2.3 Números adimensionais

Números adimensionais são parâmetros poderosos utilizados na mecânica dos fluidos para comparação de fenômenos fisicamente similares, mas em escalas diferentes. Os números adimensionais tem significado físico extremamente relevante, uma vez que é possível recuperá-los adimensionalizando-se as equações de conservação.

2.3.1 Número de Reynolds

O número de Reynolds é a razão entre forças inerciais e viscosas, mostrando assim qual delas domina o escoamento. O número de Reynolds é calculado como:

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu}, \quad (2.7)$$

sendo v e L a velocidade do escoamento e a escala característica, respectivamente. É um parâmetro importante para a determinação do nível de turbulência do sistema (FOX; PRITCHARD; MCDONALD, 2011).

2.3.2 Número capilar

O número capilar é a razão entre forças viscosas e capilares entre fluidos imiscíveis. O número capilar é calculado como:

$$Ca = \frac{\mu_i v}{\sigma}, \quad (2.8)$$

sendo μ_i a viscosidade do fluido injetado. Perceba que o número capilar só existe quando há mais de um fluido. Essencial para avaliar a quantidade de fluido residual em

um sistema, define-se usualmente que para $Ca < 10^{-5}$ o escoamento é predominado por forças capilares. Em processos de extração de petróleo o número capilar costuma estar entre 10^{-5} e 10^{-7} (CHATZIS; MORROW, 1984), para se alcançar valores maiores necessita-se de vazões de injeção maiores, nem sempre possíveis.

2.3.3 Número de Stokes

O número de Stokes é um parâmetro que relaciona uma partícula suspensa em um fluido com seu escoamento e será essencial na técnica de μ -PIV (RAFFEL et al., 2018). O número de Stokes é calculado como:

$$St = \frac{\tau V}{L}, \quad (2.9)$$

onde τ representa o tempo de relaxação de uma partícula. O tempo de relaxação é o tempo necessário para uma partícula sentir uma mudança no escoamento e responder à ela, podendo ser quantificada como,

$$\tau = \rho_p \frac{d_p^2}{18\mu}, \quad (2.10)$$

onde ρ_p e d_p representam a densidade da partícula e o diâmetro da partícula respectivamente (LINDKEN et al., 2009).

Quanto menor o número de Stokes, mais as partículas concordam com os movimentos do escoamento. Pode-se associar o número de Stokes à chuva, quanto menor e mais leve a gota mais ela acompanhará a direção do vento.

2.4 Movimento Browniano

O movimento aleatório de uma partícula suspensa em um fluido é chamado de movimento Browniano. Ele ocorre devido às colisões das moléculas do fluido na partícula, sendo as colisões aleatórias o resultado é um movimento randômico. O movimento Browniano tem relevância histórica na física, pois a partir do estudo de Einstein (1905) pode-se determinar o número de Avogadro, dando forte suporte à teoria atômica (KREMER, 2010).

O deslocamento médio quadrático de uma partícula devido ao movimento Browniano é:

$$s_{rms} = \sqrt{\frac{2 k_B T}{3 \pi \mu d_p} \Delta t}, \quad (2.11)$$

sendo k_B , T e Δt a constante de Boltzmann, a temperatura e o intervalo de tempo avaliado, respectivamente (SANTIAGO et al., 1998).

2.5 Microvelocimetria por imagem de partículas

Como visto, em diversos estudos é necessário visualizar um escoamento e medir seu campo de velocidades. Como exemplo de instrumento para mensurar a velocidade de um fluido tem-se o tubo de Pitot e o anemômetro. Em ambos os casos o instrumento deve ser inserido no escoamento para realizar a medição, medindo a velocidade localmente (FOX; PRITCHARD; MCDONALD, 2011). Devido à inserção do instrumento no escoamento, o próprio dispositivo perturba o fluido, sendo então de pouca valia para diversas análises. Uma maneira de realizar essa avaliação que em geral não perturba tanto o escoamento é inserindo e acompanhando partículas suficientemente pequenas no fluido. Essa técnica é chamada de velocimetria por imagem de partículas, comumente reduzida à PIV, do inglês *Particle Image Velocimetry*. O μ -PIV é uma derivação da técnica PIV para sistemas micrométricos.

No μ -PIV um volume de fluido com as partículas traçadoras é focado e iluminado com auxílio do microscópio. No instante t a posição das partículas é capturada por uma câmera, após um pequeno intervalo de tempo Δt , a posição das partículas é novamente capturada, gerando então um par de imagens. A posição das partículas muda uma distância Δx entre as imagens, podendo-se calcular a velocidade da mesma pela seguinte relação:

$$v_p = \frac{\Delta x}{\Delta t}. \quad (2.12)$$

Lembrando-se que a partícula se move com a mesma velocidade do fluido, podendo-se considerar $v_p = v$. As sequências de pares de imagens são então processadas e o campo de velocidades mensurado (LINDKEN et al., 2009).

O resultado da técnica de μ -PIV é chamado de *quasi-2D*, uma vez que o produto final é um campo bidimensional proveniente de um meio 3D.

2.5.1 Partículas

Ao definir-se as partículas traçadoras empregadas na técnica deve-se tomar uma série de considerações. Lindken et al. (2009) apresenta algumas:

- A densidade do fluido e da partícula devem ser próximas para que as partículas não decantem ou flutuem;
- O tamanho das partículas deve ser significativamente menor que o tamanho do canal onde ocorre o escoamento, para que não modifique o escoamento e não altere os dados devido à sua inércia. Recomenda-se duas ordens de magnitude menor;
- O tamanho das partículas deve ser suficientemente grande para que o erro devido

ao movimento Browniano não seja significativo. Calcula-se esse erro ε como,

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{2 k_B T}{\Delta t 3\pi\mu d_p}} \quad (2.13)$$

- O tempo de resposta τ da partícula deve ser menor que a menor escala de tempo do escoamento;
- A densidade de partículas no fluido deve ser grande o suficiente para que se possa avaliar o máximo de velocidades para compor o campo de velocidades;
- A densidade de partículas no fluido deve ser pequena o suficiente para que as partículas não alterem o escoamento e cada partícula possa ser avaliada individualmente;
- As partículas devem ser reativamente inertes ao fluido;
- As partículas não devem alterar as propriedades físicas do fluido, por exemplo, transformando-o em não-Newtoniano;
- As partículas não devem reagir entre si, nem se aglomerar.

2.5.2 Iluminação

Pode-se ter duas configurações de iluminação, a primeira utilizando fonte luminosa de laser que causa reflexo na partícula e a segunda em que a fonte luminosa gera fluorescência nas partículas.

Lindken et al. (2009) menciona as considerações que se deve tomar para definir a fonte e iluminação:

- O fluido deve ser transparente ao comprimento de onda avaliado;
- A fonte de luz deve conseguir causar reflexo/fluorescência na partícula;
- Para a configuração experimental com laser, a fonte de luz deve estar sincronizada com a câmera de captura de imagens.

2.5.3 Processamento

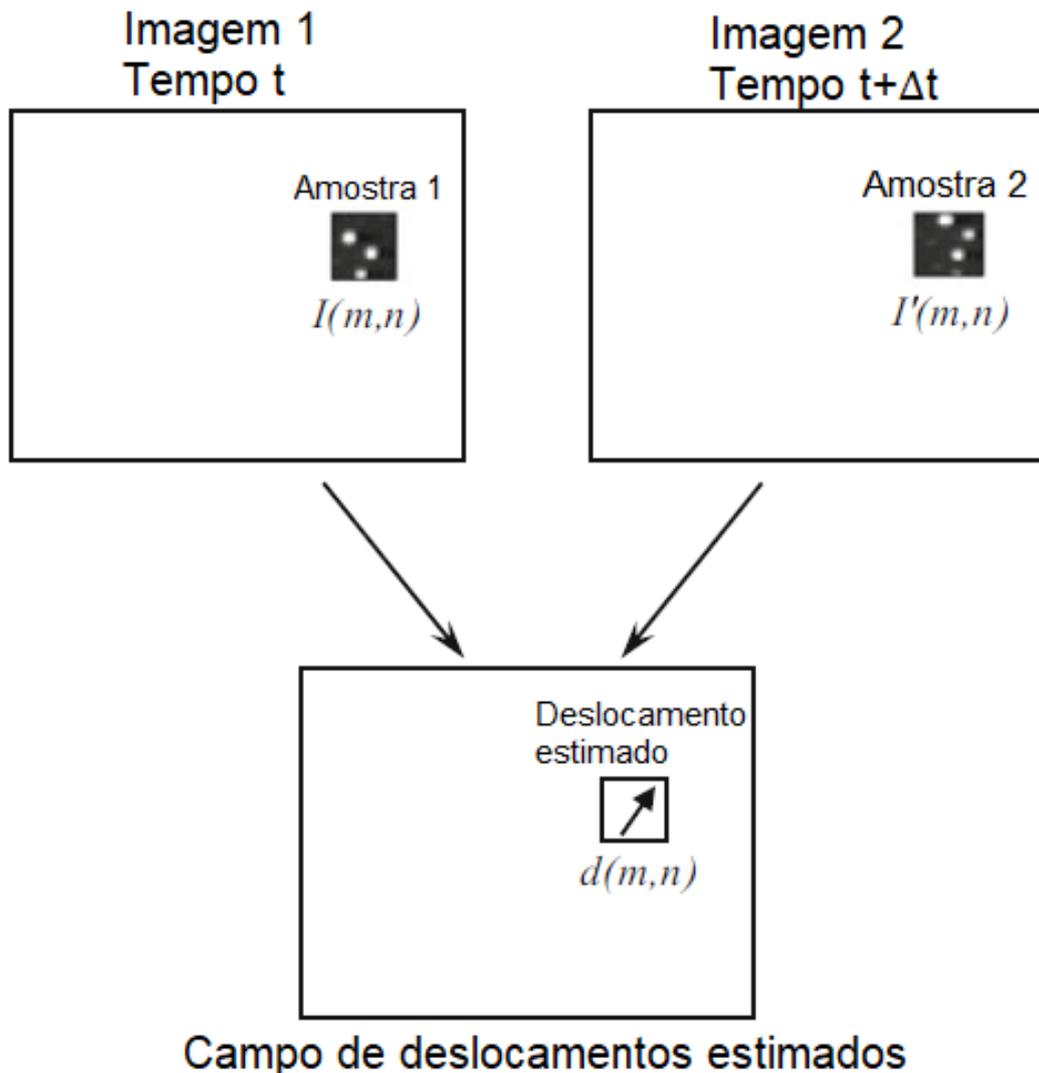
Tendo-se adquirido a sequência de pares de imagens deve-se processá-las. Existem diversas opções de softwares que realizam esse tipo de tarefa, sejam eles comerciais ou não. De qualquer maneira todos eles seguem as seguintes etapas: pré-processamento, processamento e pós processamento.

O pré-processamento é uma abordagem para aprimorar a qualidade das medições antes da correlação das imagens (THIELICKE; STAMHUIS, 2014). O tipo de pré-processamento realizado vai depender da condição das imagens capturadas, dos processos disponíveis no software usado e do conhecimento do experimentalista.

A técnica de processamento utilizada neste trabalho é a correlação espacial discreta, na qual uma imagem é dividida em subimagens, chamadas de áreas de

interrogação, gera-se um mapa de partículas na área de interrogação mensurando-se a intensidade luminosa de cada partícula. Toma-se então duas áreas de interrogação I e I' , e interpreta-se que a área de interrogação I' , tomada no tempo $t + \Delta t$ seja um deslocamento da área de interrogação I da imagem de tempo t , como exemplificado na figura 7. Para realizar o cálculo de \vec{d} a técnica utiliza a função de correlação cruzada avaliando-se diversas áreas de interrogação. Quanto maior o tamanho da área de interrogação mais fácil será definir o deslocamento das partículas, entretanto, sacrifica-se a quantidade vetores \vec{d} gerados, deve-se buscar então, uma relação intermediária (RAFFEL et al., 2018; THIELICKE; STAMHUIS, 2014).

Figura 7 – Correlação espacial discreta.



Fonte: adaptado de Raffel et al. (2018)

No pós-processamento faz-se a validação dos vetores velocidade, ou seja, avalia-se a existência de vetores irrealis. Esse tipo de vetor pode ocorrer por diversos

motivos, tais como, partículas que passam por baixo uma das outras dificultando então sua diferenciação, ruído das imagens ou partículas distantes do plano focal. Para a validação define-se os limites de valores aceitáveis:

$$v_{min} = \bar{v} - n_s \sigma_v \quad (2.14)$$

$$v_{max} = \bar{v} + n_s \sigma_v \quad (2.15)$$

onde v_{min} , v_{max} , \bar{v} , n_s e σ_v representam a velocidade limite mínima, velocidade limite máxima, velocidade média, rigidez do filtro e desvio padrão, respectivamente. A rigidez do filtro é definida pelo experimentalista. Os vetores retirados são então substituídos por uma interpolação dos vetores mais próximos (THIELICKE; STAMHUIS, 2014).

3 METODOLOGIA

Nesta seção serão abordados os equipamentos utilizados para o procedimento experimental, mencionando sua aplicabilidade e seus erros associados. Também serão apresentados os passos para a realização do experimento.

Inicialmente vamos explorar a escolha da geometria de poro e sua execução no micromodelo real.

3.1 Micromodelo real

Como mencionado na seção 2.1.2 o micromodelo representa o modelo físico idealizado da rocha/solo. Os formatos escolhidos como microporos, circular e triangular, apresentados na figura 8, são geometrias simplificadas, capazes de capturar os efeitos de aprisionamento desejados e ainda de simples execução numa análise numérica. As dimensões foram definidas mantendo-se a escala de trabalhos similares como o estudo de Roman et al. (2016), a profundidade é de 30 μm .

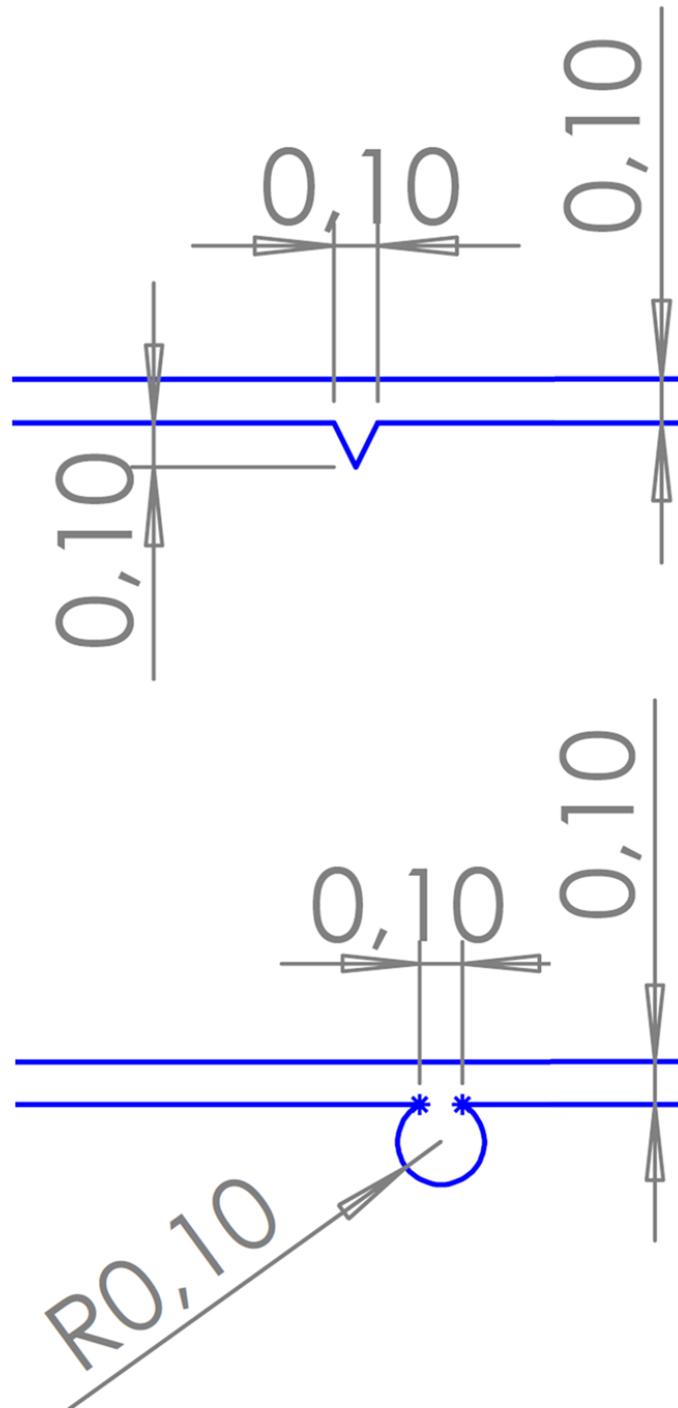
Para maximizar o uso do micromodelo tende-se a projetar diversos canais no mesmo, como ilustrado na figura 9. O segundo canal de cima para baixo contém os microporos triangulares, enquanto o terceiro canal contém os microporos circulares, são 5 microporos por canal.

3.1.1 Fabricação

Os micromodelos foram fabricados em polidimetilsiloxano (PDMS) pelo laboratório de microeletrônica da Universidade de São Paulo pela técnica de fotolitografia macia. O PDMS é um material polimérico de uso comum na microfluídica. Suas principais desvantagens são o inchaço quando em contato com hidrocarbonetos solventes e deformação com a pressão do escoamento (DANGLA; GALLAIRE; BAROUD, 2010).

O processo de fotolitografia macia segue a sequência apresentada na figura 10. Uma bolacha de silicone é revestida com filme de SU-8. O filme de SU-8 juntamente com uma fotomáscara que já possui o formato desejado dos canais do micromodelo é exposto à luz ultravioleta. Após a exposição, o conjunto é levado à cura. Uma solução reativa remove toda o volume não exposto à luz ultravioleta, criando assim a máscara. PDMS líquido é depositado na máscara e levado à cura. A camada de

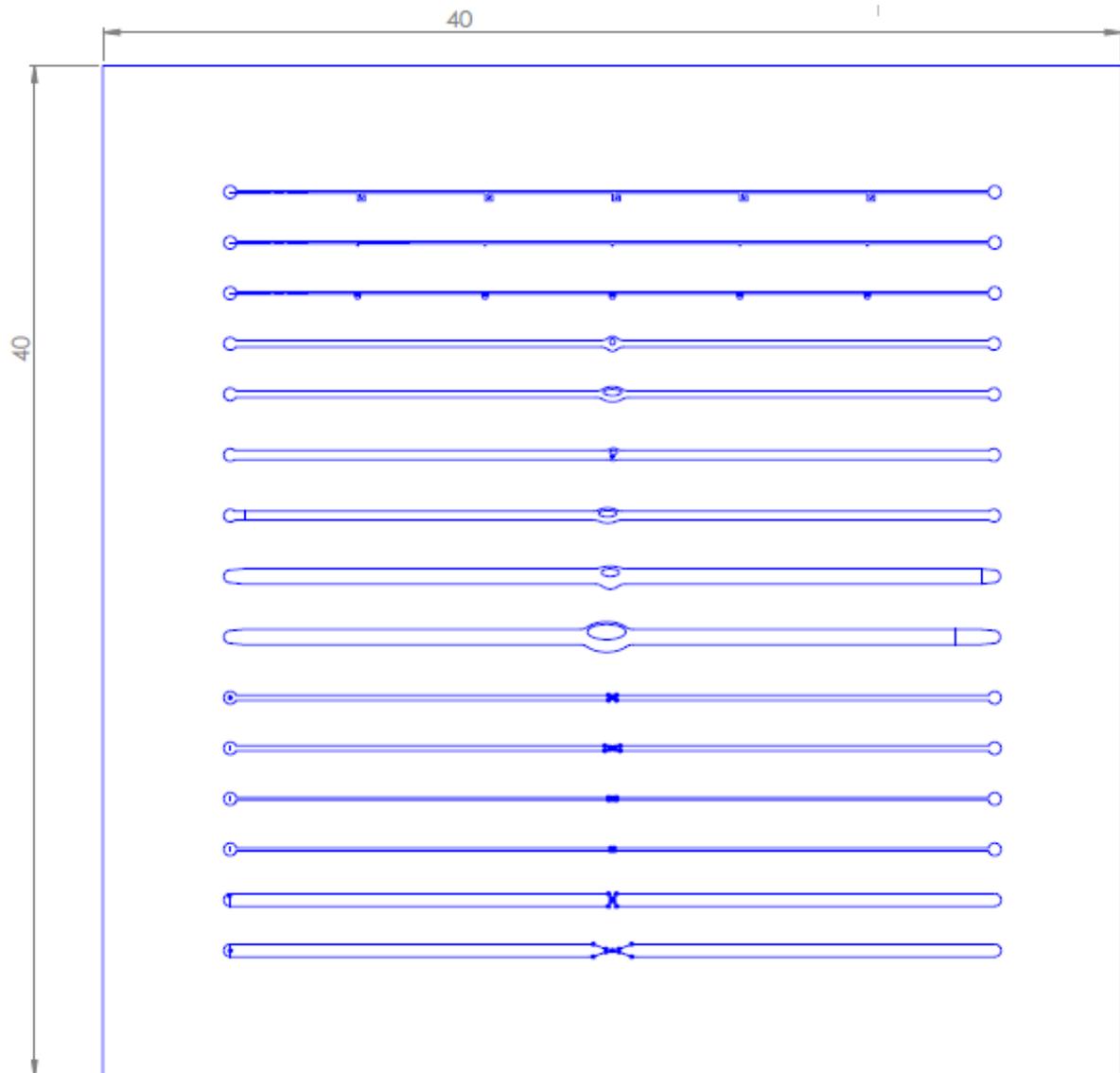
Figura 8 – Geometria dos microporos. Medidas em mm.



Fonte: Autor

PDMS solidificada é então removida da máscara e cortada no formato do micromodelo. Fura-se o PDMS permitindo a conexão com o exterior. Uma base rígida de vidro com uma camada de PDMS é colada no micromodelo, garantindo assim que todas as paredes do canal sejam de PDMS. Tem-se então o micromodelo pronto (VEGINI et al., 2016; University of California Santa Cruz, 2019).

Figura 9 – Micromodelo. Medidas em mm.



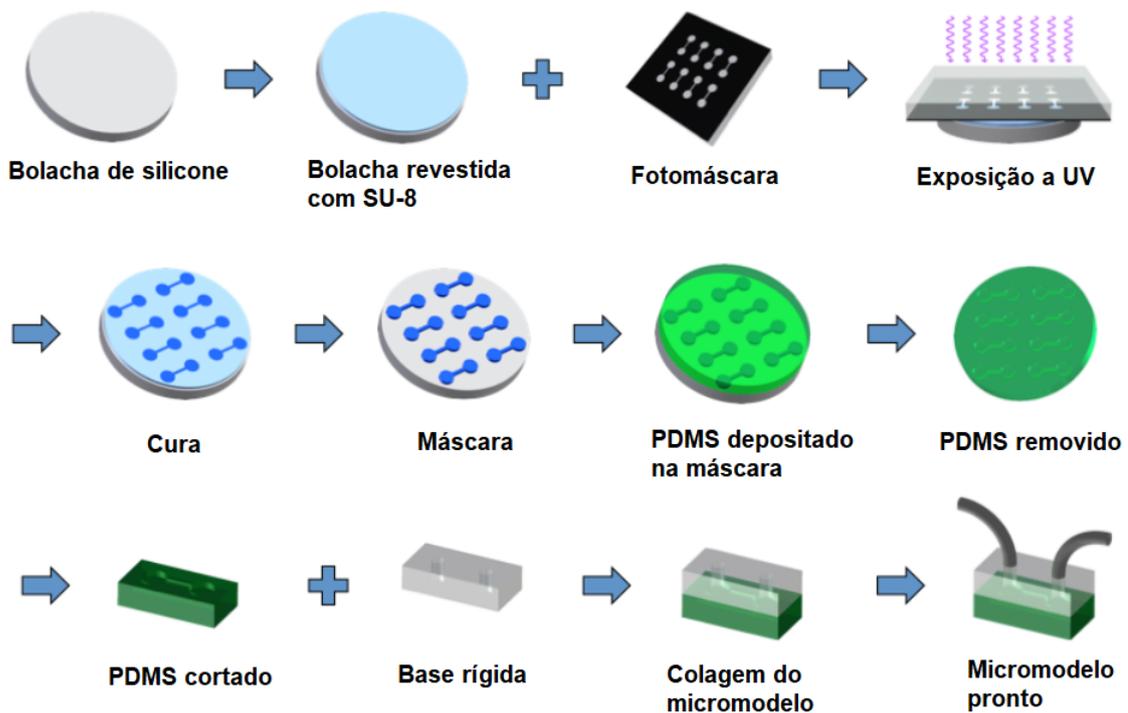
Fonte: Autor

3.1.2 Caracterização

Tendo-se o micromodelo podemos avaliar a qualidade de sua fabricação, para tanto mediu-se as dimensões em um microscópio. Os resultados da caracterização dos canais são descritas nas tabelas 1 e 2.

As medições de profundidade foram informadas pelo laboratório fabricante do micromodelo usando um perfilômetro Alpha Step 500. Como já se é conhecido do método de fabricação, a profundidade é seu maior revés. Da tabela percebe-se que a maior fonte de erro é justamente essa dimensão. A profundidade além de variar de um canal para o outro pode variar ao longo do próprio canal.

Figura 10 – Processo de fotolitografia macia



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

Tabela 1 – Caracterização do canal de microporos circulares.

	Profundidade [μm]	Largura do canal [μm]	Raio [μm]
Real	$33,68 \pm 3,08$	$101,93 \pm 1,37$	$101,79 \pm 0,71$
Nominal	30,00	100,00	100,00
Diferença	12,27%	1,93%	1,79%

Fonte: Autor.

Tabela 2 – Caracterização do canal de microporos triangulares.

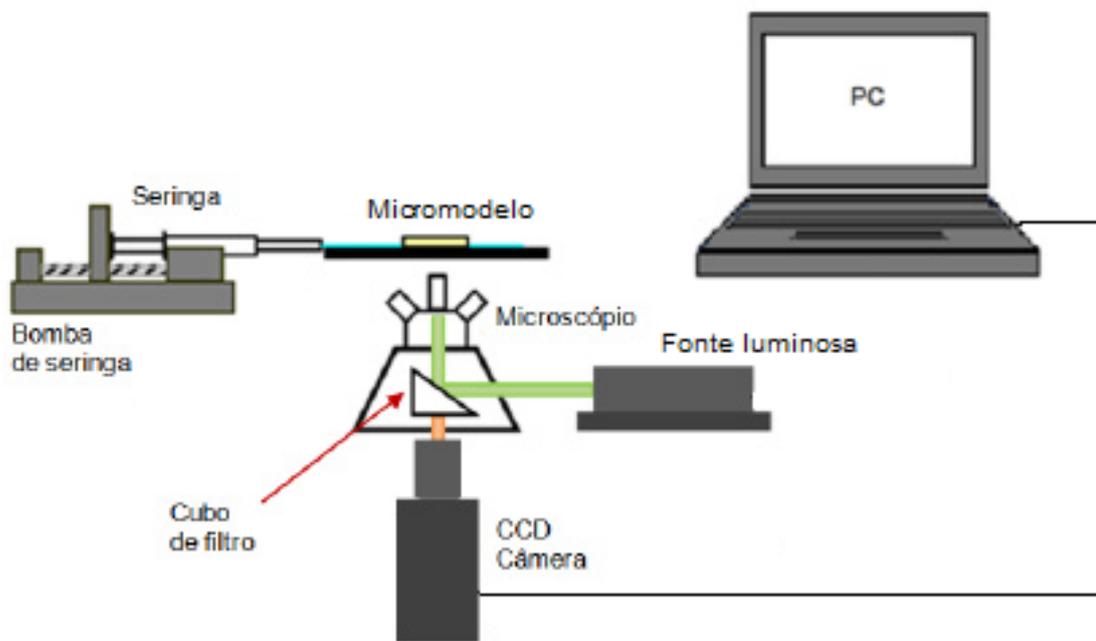
	Profundidade [μm]	Largura do canal [μm]	Altura [μm]
Real	$33,68 \pm 3,08$	$91,81 \pm 0,98$	$91,87 \pm 0,66$
Nominal	30,00	100,00	100,00
Diferença	12,27%	8,19%	8,13%

Fonte: Autor.

3.2 Equipamentos e sistema μ -PIV

Neste trabalho utiliza-se a técnica de μ -PIV para o caso de partículas fluorescentes. A figura 11 apresenta de maneira genérica a bancada para o sistema μ -PIV operado. Vamos analisar nesta subseção cada um dos itens e equipamentos utilizados para o procedimento experimental.

Figura 11 – Bancada experimental.



Fonte: adaptado de Gutiérrez (2013)

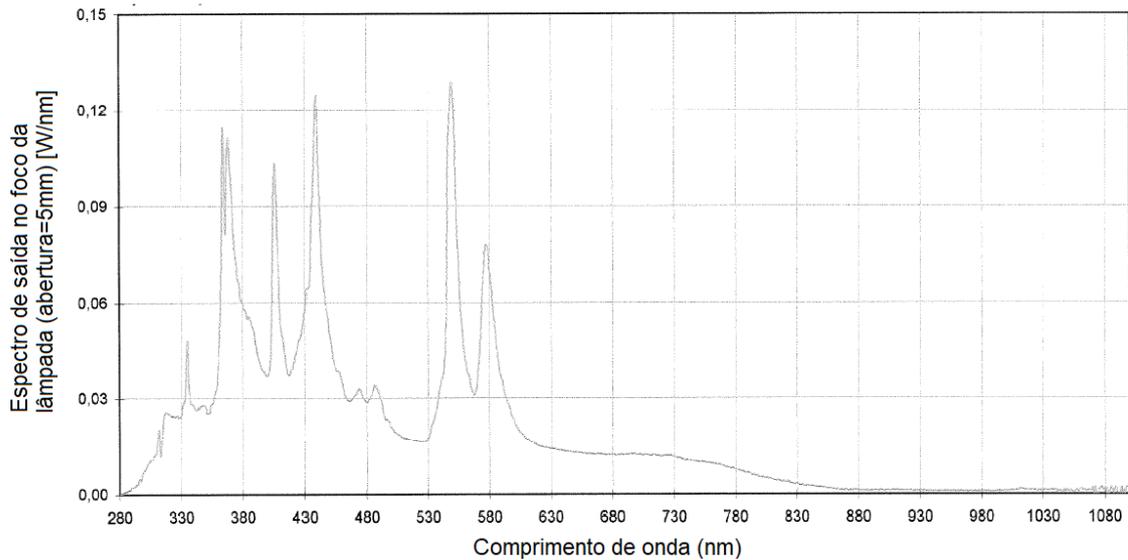
Utiliza-se para a injeção de fluido no micromodelo a bomba injetora Harvard Apparatus Pico Plus Elite 11 com precisão de $\pm 0,35\%$, seringas Hamilton série 1000 e 1700 de 0,5 ml, 1,0 ml e 5,0 ml, tubos de teflon e conectores de uso microfluídico.

Para o sistema óptico emprega-se um microscópio Zeiss Axio Observer 3 com objetiva de 20x e filtro amarelo/verde 525-575 nm. A fonte luminosa para fluorescência é uma LEJ HXP 120 V, sendo seu espectro emitido apresentado na figura 12. Utiliza-se uma câmera de sensor CCD e o software de aquisição de imagens ZEN 2.6 blue edition. É importante ressaltar que a altura do plano focal decorrente do sistema óptico é menor que a profundidade do canal do micromodelo, como representado na figura 13. Desse modo, as partículas fora do plano focal ficam embaçadas, gerando ruído ao resultado final ou nem mesmo aparecendo.

Aplica-se as microesferas fluorescentes da marca FluoSpheres como partículas traçadoras. As microesferas são de poliestireno com superfície modificada com carboxilato, possuem diâmetro de $1 \mu\text{m}$, densidade de 1050 kg/m^3 e espectro fluorescente amarelo/verde 505 nm a 515 nm. Ainda que o espectro da fonte luminosa seja reduzido na faixa de trabalho, mostrou-se suficiente.

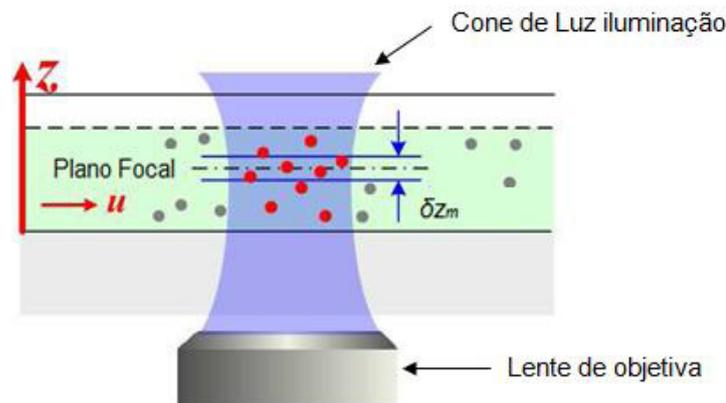
Para os procedimentos laboratoriais de limpeza de vidraria, preparo de solução e agitação da solução serviu-se de uma estufa à vácuo Tecnal TE-395, equipamento de água ultrapura Milipore Direct Q-3 e agitador magnético HJ-4.

Figura 12 – Espectro da fonte luminosa.



Fonte: adaptado de LEJ (2013).

Figura 13 – Plano focal.



Fonte: adaptado de Gutiérrez (2013).

3.3 Procedimento experimental

Todos os procedimentos foram realizados em temperatura ambiente (aprox. 24°C) e pressão ao nível do mar. Para o procedimento experimental todas as vidrarias foram previamente limpas com ácido nítrico 10% e enxaguadas abundantemente com água ultrapura. Com base em Roman et al. (2016) fez-se a solução de água ultrapura com partículas traçadoras contendo 0,06% de volume de sólidos. Seguindo as informações do fabricante considera-se que as partículas não alteram as propriedades físicas da água. Utilizando-se a relação de Crittenden et al. (2012) na temperatura avaliada tem-se que a viscosidade da água é 1,101 mPa.s e interpolando-se os valores fornecidos tem-se que a densidade é 997,24 kg/m³. A razão de densidades entre

partícula e água é $\rho_p/\rho = 1,05$. Utilizou-se como segundo fluido o perfluorotributilamina (FC-43). Escolheu-se o FC-43 devido à sua estabilidade reativa e uso na literatura. O fluido possui viscosidade de 4,7 mPa.s, densidade de 1860,00 kg/m³ e a solubilidade da água em FC-43 é de 7 µg/ml, conforme ficha técnica (FLUORINERT, 2000). Yakhshi-Tafti, Kumar e Cho (2011) estabelecem uma correlação para a tensão interfacial entre FC-43 e água em função da temperatura, para 24 °C a tensão é 48,858 mN/m. É importante ressaltar que o FC-43 não contém partículas traçadoras.

Com as propriedades mencionadas podemos calcular o tempo de relaxação das partículas. Utilizando-se a equação 2.9 tem-se que o tempo de relaxação é de $5,29 \times 10^{-11}$ s e pode-se considerar, portanto, que o tempo de resposta das partículas é instantâneo. Conseqüentemente, o número de Stokes se torna muito baixo. Para o escoamento mais veloz abordado neste trabalho chega-se a $St = 4,13 \times 10^{-8}$.

A vazão de injeção é uma função de parâmetros do canal e definições do experimentalista. Sendo A a área de seção transversal do canal, h a profundidade do canal, w a largura, e lembrando-se que a partícula move-se com a velocidade do escoamento, tem-se:

$$Q = \bar{v}A \quad (3.1)$$

$$= v_p A \quad (3.2)$$

$$= \frac{\Delta x}{\Delta t} hw. \quad (3.3)$$

Definindo-se que a taxa de captura de imagens seja de 40 fps (quadros por segundo), Δt resulta em 1/40 s. O valor de Δx é definido como $1\mu m$, isto é, para cada par de imagens a partícula irá se mover uma distância do tamanho de seu diâmetro. Assim, o sistema μ -PIV terá boa resolução e não terá dificuldades em calcular o campo de velocidade. Por consequência dos valores impostos a velocidade média \bar{v} é 40 µm/s. A primeira vazão de análise é definida como Q_1 e é usada como referência para as demais vazões.

Com a informação de Δt e a equação 2.13, calcula-se que o erro associado ao movimento Browniano é de $5,62 \times 10^{-6}$, podendo ser negligenciado.

Temos agora todas as ferramentas e informações para o início do procedimento experimental em si, que consistiu dos seguintes passos:

1. Injetou-se álcool isopropílico a 1 ml/h no canal para completo preenchimento do mesmo;
2. Injetou-se água ultrapura a 1 ml/h para completa remoção do álcool;
3. Injetou-se a solução de água ultrapura com partículas a 1 ml/h, de modo que o canal ficasse com uma distribuição uniforme de partículas em seu interior;
4. Reduziu-se a vazão de injeção para o valor Q_1 até que o sistema alcançasse regime permanente;
5. Realizou-se a captura de imagens nas regiões de interesse;

6. Injetou-se o FC-43 na vazão Q_1 até regime permanente ser alcançado. Neste momento, houve o aprisionamento da solução de água com partículas nos microporos;
7. Capturou-se as imagens nas regiões de interesse;
8. Aumentou-se novamente a vazão de FC-43 até regime permanente ser alcançado;
9. Capturou-se as imagens nas regiões de interesse;
10. Repetiu-se as duas etapas anteriores até o limite do sistema.

O limite do sistema consiste na vazão máxima antes do início de vazamento ou do fim da quantidade de fluido disponível, aquele que ocorrer primeiro.

Cada etapa do experimento em que se adquiriu imagens do escoamento é nomeada e caracterizada. Os nomes dos escoamentos são definidos conforme a região de interesse, C para poros circular, T para poros triangular e P para escoamento de comparação com a equação de Poiseuille. As tabelas 3 e 4 informam os parâmetros dos experimentos com canal de poro circular e triangular, respectivamente. Avalia-se somente o primeiro e o último poro de cada canal. Nos escoamentos P1, P2, P3 e P4, a região de interesse é o próprio canal e não o poro, pois esses dados serão utilizados para a validação do método.

Perceba que o valor de \bar{v} , utilizado como critério para a definição da vazão difere do calculado anteriormente de $40 \mu\text{m/s}$, isso ocorreu pois o autor utilizou informações equivocadas sobre as dimensões da geometria do canal, resultando então em valores errados. Posteriormente, aumentou-se a vazão Q_1 em função da velocidade média do escoamento em múltiplos da inicial, 10 vezes, 50, 100, 250, 500 e 1000, devido ao uso inicial das dimensões erradas os erros se propagam, não seguindo mais a proporção desejada. Para cálculo dos parâmetros apresentados nas tabelas 3 e 4 utilizou-se as dimensões reais dos canais informadas nas tabelas 1 e 2. Em todos os escoamentos manteve-se a taxa de captura de imagens de 40fps, aumentando-se a vazão somente do FC-43, que não contem partículas.

Para o cálculo do número de Reynolds do fluido injetado em canal de seção retangular a escala característica L é a razão $4A/P$, onde P é o perímetro do retângulo, assim a equação 2.7 se torna:

$$Re_i = \frac{\rho \bar{v} 4A}{\mu_i P} \quad (3.4)$$

$$= \frac{2\rho \bar{v} hw}{\mu_i (h + w)}. \quad (3.5)$$

Tabela 3 – Parâmetros do experimento do canal com microporos circulares.

Escoamento	Vazão Q [ml/h]	Razão Q/Q_1	Região de interesse	Fluido injetado	\bar{v} [$\mu\text{m/s}$]	Re_i	Ca
P1	0,00046	1	Canal imediatamente antes do primeiro poro	Solução de água e partículas	37,99	0,0017	-
P2	0,00046	1	Canal imediatamente antes do último poro	Solução de água e partículas	37,99	0,0017	-
C1	0,00046	1	Último poro	Solução de água e partículas	37,99	0,0017	-
C2	0,00046	1	Último poro	FC-43	37,99	0,0008	$3,65 \times 10^{-6}$
C3	0,00471	10,24	Último poro	FC-43	388,96	0,0077	$3,74 \times 10^{-5}$
C4	0,02354	51,18	Último poro	FC-43	1943,96	0,0384	$1,87 \times 10^{-4}$
C5	0,04709	102,37	Último poro	FC-43	3888,75	0,0767	$3,74 \times 10^{-4}$
C6	0,11772	255,91	Último poro	FC-43	9721,47	0,1918	$9,35 \times 10^{-4}$
C7	0,23544	511,83	Último poro	FC-43	19442,93	0,3836	$1,87 \times 10^{-3}$
C8	0,47088	1023,65	Último poro	FC-43	38885,87	0,7673	$3,74 \times 10^{-3}$

Fonte: Autor

Tabela 4 – Parâmetros do experimento do canal com microporos triangulares.

Escoamento	Vazão Q [ml/h]	Razão Q/Q_1	Região de interesse	Fluido injetado	\bar{v} [$\mu\text{m/s}$]	Re_i	Ca
P3	0,00046	1	Canal imediatamente antes do primeiro poro	Solução de água e partículas	41,30	0,0018	-
P4	0,00046	1	Canal imediatamente antes do último poro	Solução de água e partículas	41,30	0,0018	-
T1	0,00046	1	Primeiro poro	Solução de água e partículas	41,30	0,0018	-
T2	0,00046	1	Último poro	FC-43	41,30	0,00081	$3,97 \times 10^{-6}$
T3	0,00471	10,24	Último poro	FC-43	422,84	0,0082	$4,07 \times 10^{-5}$
T4	0,02354	51,18	Último poro	FC-43	2113,29	0,0412	$2,03 \times 10^{-4}$
T5	0,04709	102,37	Último poro	FC-43	4227,47	0,0825	$4,07 \times 10^{-4}$
T6	0,11772	255,91	Último poro	FC-43	10568,22	0,2061	$1,02 \times 10^{-3}$
T7	0,23544	511,83	Último poro	FC-43	21136,45	0,4123	$2,03 \times 10^{-3}$
T8	0,47088	1023,65	Último poro	FC-43	42272,89	0,8246	$4,07 \times 10^{-3}$

Fonte: Autor

3.4 Processamento das imagens

Utilizou-se o software de código aberto PIVlab (THIELICKE, 2019), implementado em MATLAB (MATHWORKS, 2017), para o processamento das imagens. Thielicke e Stamhuis (2014) apresentam as características do software e como operá-lo. Escolhe-se importar os pares de imagens no software na sequência 1-2, 2-3, 3-4, sucessivamente, e não no formato 1-2, 3-4, 5-6.

O primeiro passo para se processar as imagens é diferenciar o sólido do fluido, e ainda, identificar dentro da região de fluido a área a ser avaliada. Para isso, cria-se a chamada máscara, na qual se define a região em que serão realizados os cálculos. A máscara é formada pela soma de todas as imagens correspondentes ao escoamento. O algoritmo que faz esse processo está apresentado no apêndice A e foi desenvolvido pelo autor. A máscara é então binarizada utilizando-se o software ImageJ, desenvolvido pelo United States National Institutes of Health (2018), e inserida no PIVlab.

Para o pré-processamento escolhe-se utilizar o método CLAHE, do inglês, *Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization* (PIZER et al., 1987), disponível no PIVlab. Nessa operação a imagem é dividida em pequenos quadros cuja intensidade é equalizada, escolhe-se utilizar quadros de 20 px. Thielicke e Stamhuis (2014) citam que o uso do método CLAHE melhora a eficiência na detecção de vetores válidos em imagens experimentais em $4,7\% \pm 3,2\%$. Faz-se uso também do processo de eliminação de ruído do próprio PIVlab, o tamanho do ruído eliminado é de 5px.

Para o processamento opera-se a correlação espacial discreta usando a função de correlação cruzada do PIVlab. A área de interrogação é escolhida individualmente para cada escoamento e o passo é sempre 50% da área definida.

Valida-se os vetores definindo a rigidez do filtro n_s igual a 3 nas equações 2.14 e 2.15. Em alguns casos, principalmente naqueles com área de interrogação menor que $60 \times 60 \text{ px}^2$ há existência significativa de vetores não conformes. Os vetores não conformes são provenientes de ruídos das imagens (partículas fora de foco e/ou com fraca emissão de luz) e são claramente diferenciáveis dos vetores conformes pois suas direções e magnitudes são irrealistas quando comparados com o restante do escoamento. Nestes casos o autor definiu os limites de velocidade do escoamento anulando todos os vetores não conformes antes de aplicar o filtro, o filtro então é definido com o valor de 5.

Gera-se uma média temporal das imagens com vetores validados, a qual é utilizada para a análise dos resultados. A tabela 5 apresenta o parâmetros utilizados para o processamento de imagens para cada escoamento.

Tabela 5 – Parâmetros das imagens para processamento.

Escoamento	Quantidade de imagens analisadas	Dimensão das imagens [px ²]	Dimensão da área de interrogação [px ²]
P1	1500	1024x600	80x80
P2	1500	1024x600	80x80
C1	916	1936x1460	80x80
C2	1428	1024x1024	70x70
C3	1022	1024x1024	70x70
C4	1020	1024x1024	60x60
C5	1024	1024x1024	60x60
C6	1179	1024x1024	60x60
C7	1024	1024x1024	60x60
C8	1037	1024x1024	60x60
P3	1500	1920x760	90x90
P4	1500	1920x760	90x90
T1	1500	1920x960	120x120
T2	1420	760x760	60x60
T3	1165	760x760	60x60
T4	1309	760x760	60x60
T5	1414	760x760	60x60
T6	1418	760x760	50x50
T7	1358	760x760	50x50
T8	1500	760x760	50x50

Fonte: Autor.

4 RESULTADOS

Nesta etapa são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir da metodologia descrita na seção 3.

4.1 Validação

Para mostrar que o sistema μ -PIV utilizado está correto e dentro dos limites de erro aceitáveis é necessário passar por um processo de validação. Neste, compara-se os resultados obtidos do sistema com um caso conhecido. Escolhe-se validá-lo comparando-o com o caso analítico de escoamento de Poiseuille em canal de seção retangular.

O escoamento de Poiseuille é um caso clássico da mecânica dos fluidos, no qual o fluido escoar dentro de um tubo de seção constante. No caso mais tradicional, considera-se um tubo circular, resultando então em um perfil de velocidade parabólico. Para se determinar o escoamento de Poiseuille para uma seção retangular deve-se resolver a equação de Navier-Stokes (eq. 2.5) aplicando-se a condição de não-deslizamento nas paredes. Drazin e Riley (2006) apresentam uma solução deduzida por Boussinesq (1868). O autor implementou a solução apresentada mas ela se mostrou numericamente instável, rapidamente divergindo para o infinito. O autor decidiu então utilizar a solução descrita por Mortensen, Okkels e Bruus (2005). A equação do perfil resultante é:

$$v(x, y) = \frac{4Q\alpha}{w^2\pi^3} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{n^3} \left[1 - \frac{\cosh\left(\frac{n\pi x}{h}\right)}{\cosh\left(\frac{n\pi w}{2h}\right)} \right] \text{sen}\left(\frac{n\pi x}{h}\right), \quad (4.1)$$

$$\alpha = \frac{\pi^3\gamma^2}{8} \left\{ \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \left[\frac{n\gamma}{\pi n^5} - \frac{2}{\pi^2 n^5} \tanh\left(\frac{n\pi\gamma}{2}\right) \right] \right\}^{-1}, \quad (4.2)$$

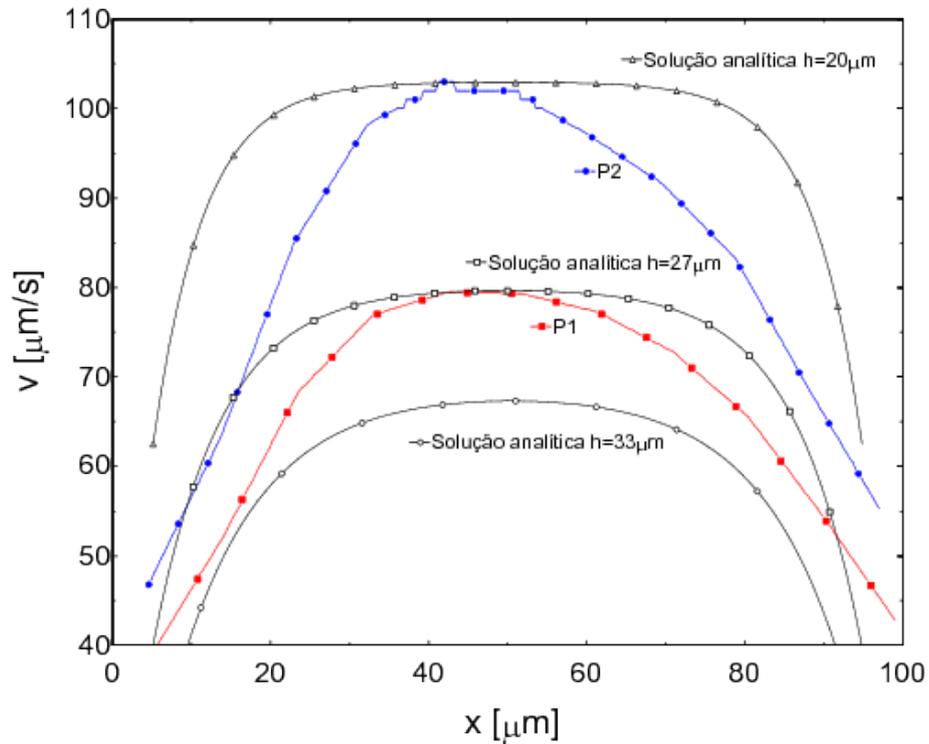
$$(4.3)$$

sendo $\gamma = w/h$ e o domínio definido no intervalo $-w/2 \leq x \leq w/2$ e $0 \leq y \leq h$. Avaliando-se em $y = h/2$, considerando-se os 100 primeiros termos da série e utilizando os valores reais das dimensões do micromodelo nas tabelas 1 e 2, temos a solução analítica. O algoritmo que realiza o cálculo da solução analítica está apresentado no apêndice B.

Avalia-se o perfil de Poiseuille no centro do canal nos escoamentos P1, P2, P3 e P4. As figuras 14 e 15 apresentam os resultados provenientes da técnica μ -PIV,

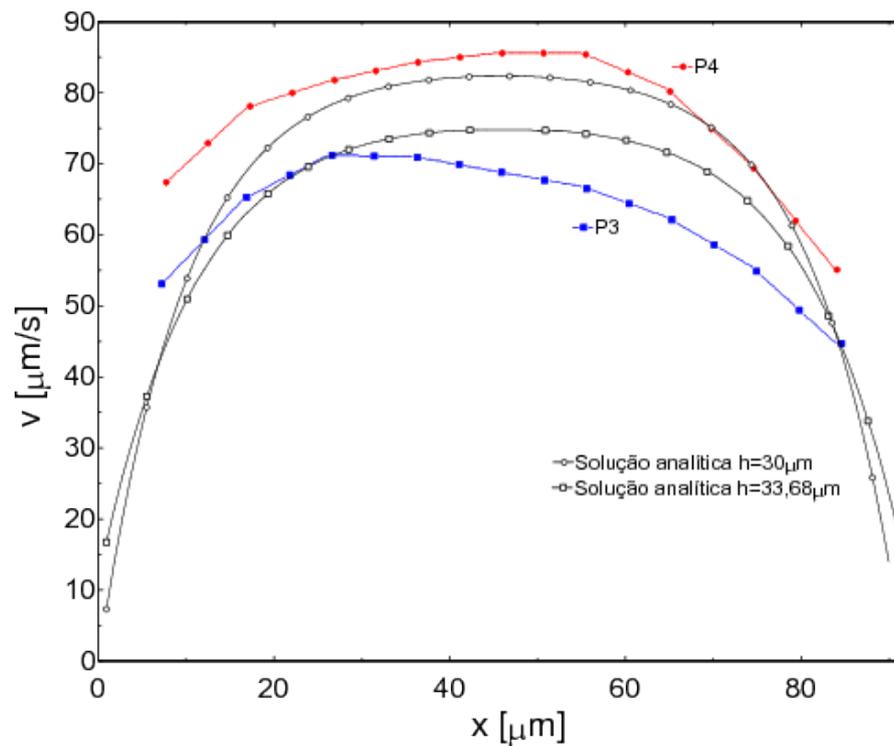
assim como os resultados analíticos para diversas profundidades.

Figura 14 – Resultado de perfil Poiseuille para o canal com poros circulares.



Fonte: Autor

Figura 15 – Resultado de perfil Poiseuille para o canal com poros triangulares.



Fonte: Autor

Perceba que os resultados da técnica μ -PIV não obedecem a condição de não deslizamento nas paredes, isso ocorre porque as partículas rolam nas paredes. Comparando-se com validações semelhantes encontra-se o mesmo efeito em Gutiérrez (2013) e Silva, Leal e Semiao (2008), sendo a velocidade na parede correspondente a 14% e 5% da velocidade máxima no escoamento para a primeira e segunda referência, respectivamente.

Como visto anteriormente o perfil de velocidade está diretamente vinculado à profundidade do canal, quanto menor a profundidade mais rápido será o escoamento. No caso do canal de poros circulares (figura 14) há uma diferença significativa entre os perfis para o mesmo canal, enquanto que para o canal de poros triangulares a diferença mantém-se aproximadamente dentro da incerteza de profundidade informada pelo fabricante, $33,68 \pm 3,08 \mu\text{m}$. Baseando-se nos resultados obtidos o autor acredita que a variância na profundidade do canal de poros circulares seja ainda maior que o informado. Não se pode afirmar que as diferenças dos perfis provem unicamente da diferença de profundidade, uma vez que há alteração considerável no achatamento das curvas, o autor julga que a discrepância nos achatamentos seja proveniente da altura do plano focal, que não está localizado na profundidade média do canal.

Percebe-se que a metodologia necessita melhorias, ainda assim, sendo os resultados para o canal de poros triangulares satisfatórios, o autor considera que o procedimento experimental é validado para a técnica de μ -PIV.

4.2 Poro circular

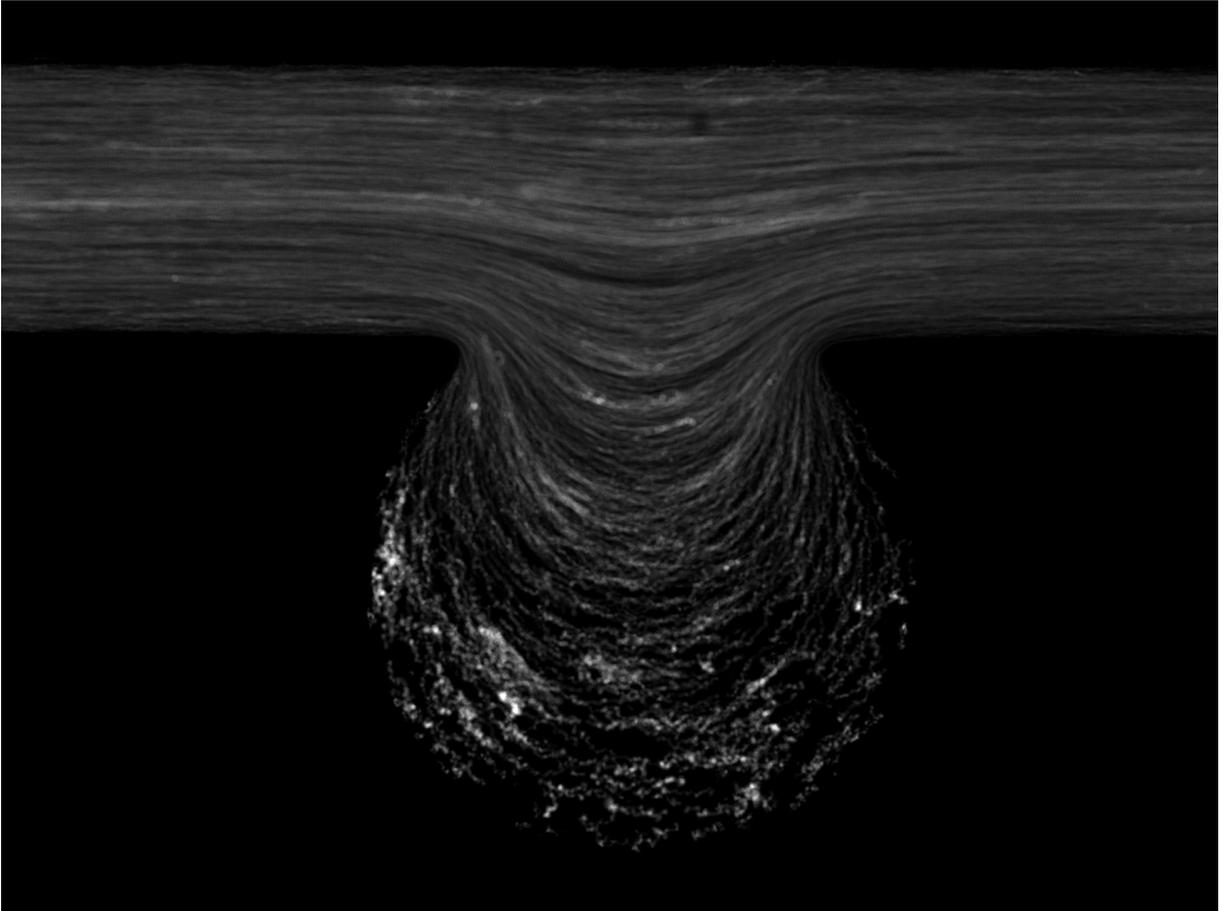
Como mencionado, aceita-se o procedimento experimental validado e os cálculos para o canal de poros circulares serão apresentados a seguir. Entretanto, o autor recomenda cautela no uso de seus dados para trabalhos futuros devido aos seus erros associados à altura do canal.

4.2.1 Linhas de corrente

Para o cálculo de linhas de corrente fez-se a média temporal das imagens obtidas, melhorando-se o contraste das mesmas. O algoritmo que realiza essas operações é apresentado no apêndice A. As imagens 16 e 17 a seguir apresentam as médias para os escoamentos realizados no poro circular.

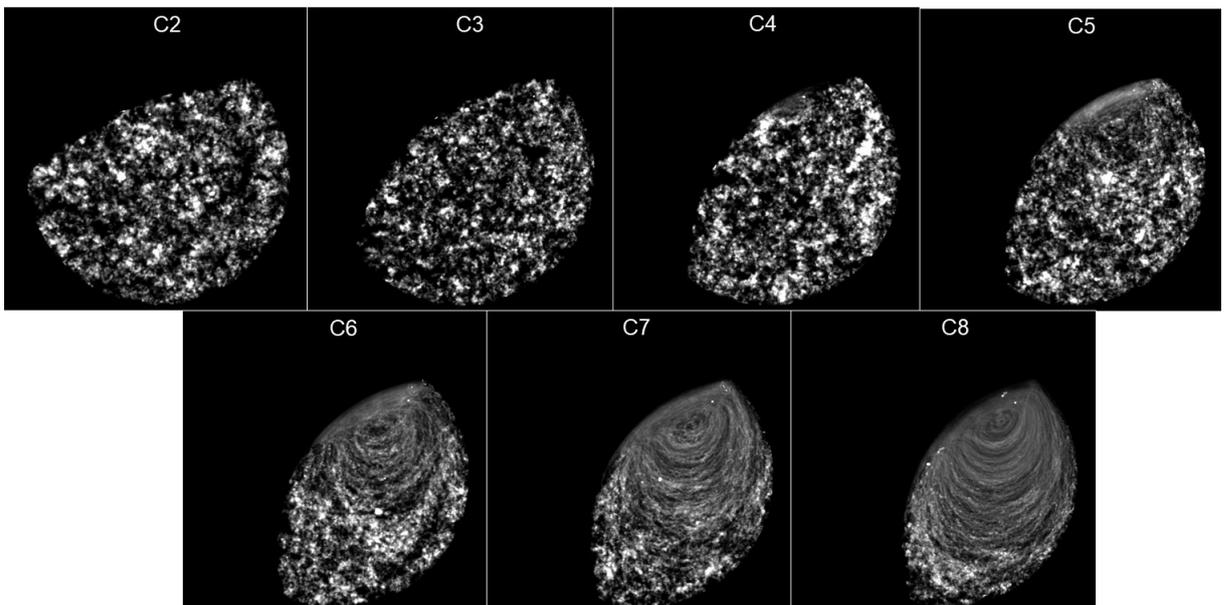
Na figura 16 há somente água com partículas, o fundo preto sem linhas de corrente é o sólido. Fica evidente o desvio do fluido do canal principal em direção ao poro. Na figura 17 há a presença do FC-43, que pela ausência de partículas traçadoras também fica preto. Percebe-se que o FC-43 aprisiona a água no poro pois é mais molhante ao PDMS que a água, portanto, o processo apresentado é uma embebição.

Figura 16 – Linhas de corrente para o escoamento C1.



Fonte: Autor

Figura 17 – Linhas de corrente para os escoamentos C2 a C8.



Fonte: Autor

A única movimentação possível dentro da gota de água aprisionada é decorrente da transferência de movimento proveniente do fluxo de FC-43. A falta de uma linha de corrente definida, como nos escoamentos, C2, C3 e C4, é decorrente da ausência de movimentação ordenada das partículas, sendo, então, resultante puramente do movimento Browniano. Perceba que no escoamento C4 o FC-43 já está escoando a 50 vezes da vazão inicial quando comparada ao caso de C1 sem gerar movimento. Nos escoamentos C6, C7 e C8 a movimentação se torna aparente e há a formação de um vórtice. Em vídeo, é perceptível que na interface entre fluidos próxima do vórtice ocorre uma movimentação tridimensional das partículas, descendo de um lado e voltando no outro, enquanto que, na média aparece somente um borrão na região.

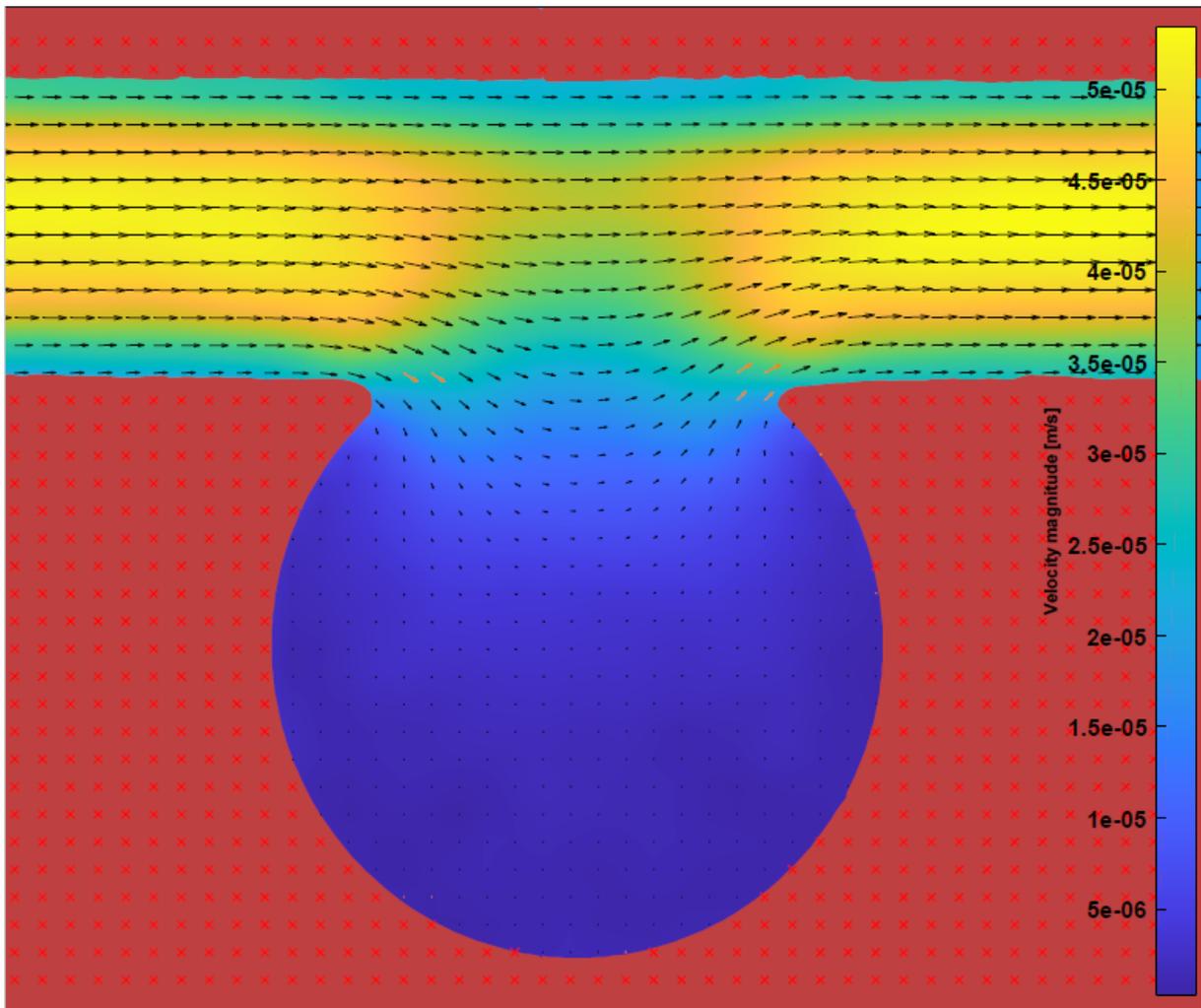
Perceba que há redução no volume total de fluido aprisionado com o decorrer do escoamento, porém, mantendo-se a quantidade de partículas traçadoras no volume. As razões possíveis para isso são: formação de filme de água nas paredes do canal e/ou difusão da água no FC-43. Embora o canal seja retangular, o que favorece a formação de filme de fluido residual nas paredes, filme esse tão fino que nem mesmo as partículas traçadoras passariam, o fato do FC-43 ser molhante ao PDMS com relação à água faz com que descartemos essa possibilidade. Conclui-se então que a água está difundindo-se no FC-43, difusão essa esperada e informada em ficha técnica.

4.2.2 Campo de velocidade

O campo de velocidade dos escoamentos C1 ao C8 são apresentados nas figuras 18 e 19, na qual o sólido é representado pela região rosada com marcações de X.

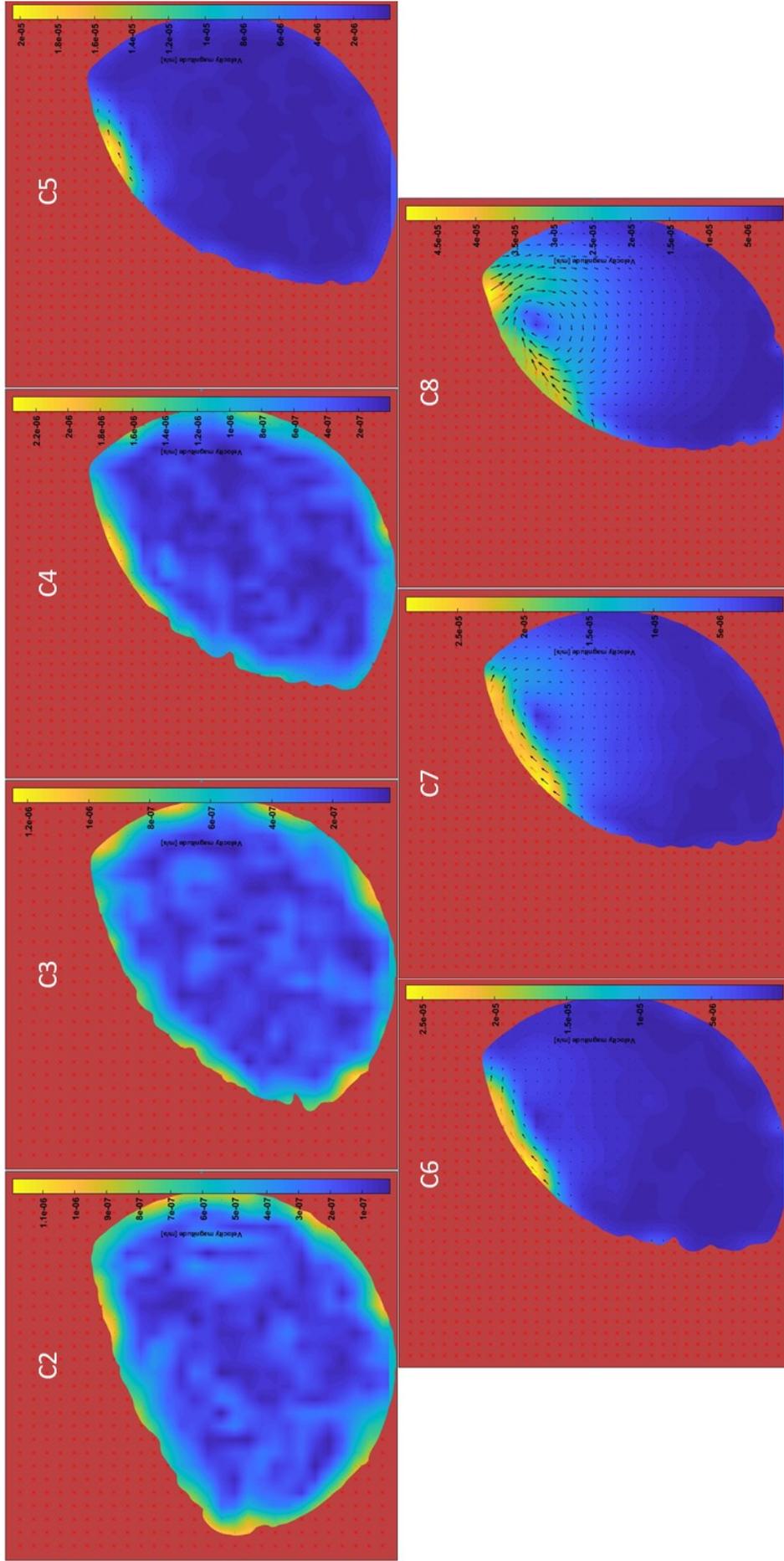
Note a diferença nas escalas dos escoamentos, saindo da ordem de $10^{-1} \mu\text{m/s}$ para $10^1 \mu\text{m/s}$, inicialmente sem direção definida para posterior regime comportado e identificável. É interessante avaliar que por maior que seja a velocidade alcançada, ela ainda é irrisória quando comparada com a do FC-43, que no escoamento C8 escoava a 1024 vezes a vazão Q_1 , com velocidade média no canal na ordem de $10^4 \mu\text{m/s}$.

Figura 18 – Campo de velocidade para o escoamento C1.



Fonte: Autor

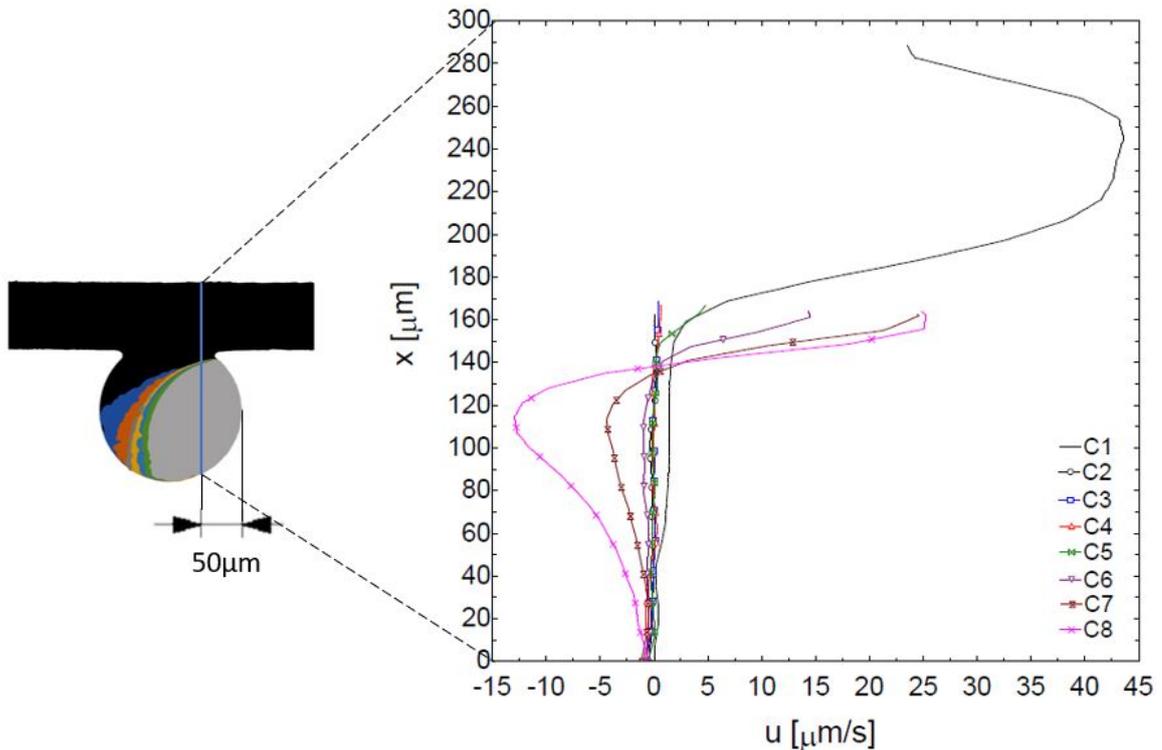
Figura 19 – Campo de velocidade para os escoamentos C2 a C8.



Fonte: Autor

Para pôr-se em perspectiva a evolução do sistema avaliou-se a mudança da velocidade nas direções longitudinal (u) e transversal (v) ao escoamento em determinadas posições do poro, como apresentado nas figuras 20 e 21, respectivamente. Na figura 20 é apresentada também a evolução do volume aprisionado através da sobreposição das máscaras geradas.

Figura 20 – Evolução do perfil de velocidade u para o caso de poro circular.



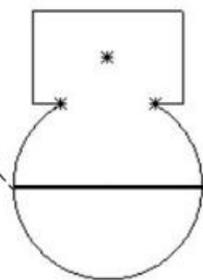
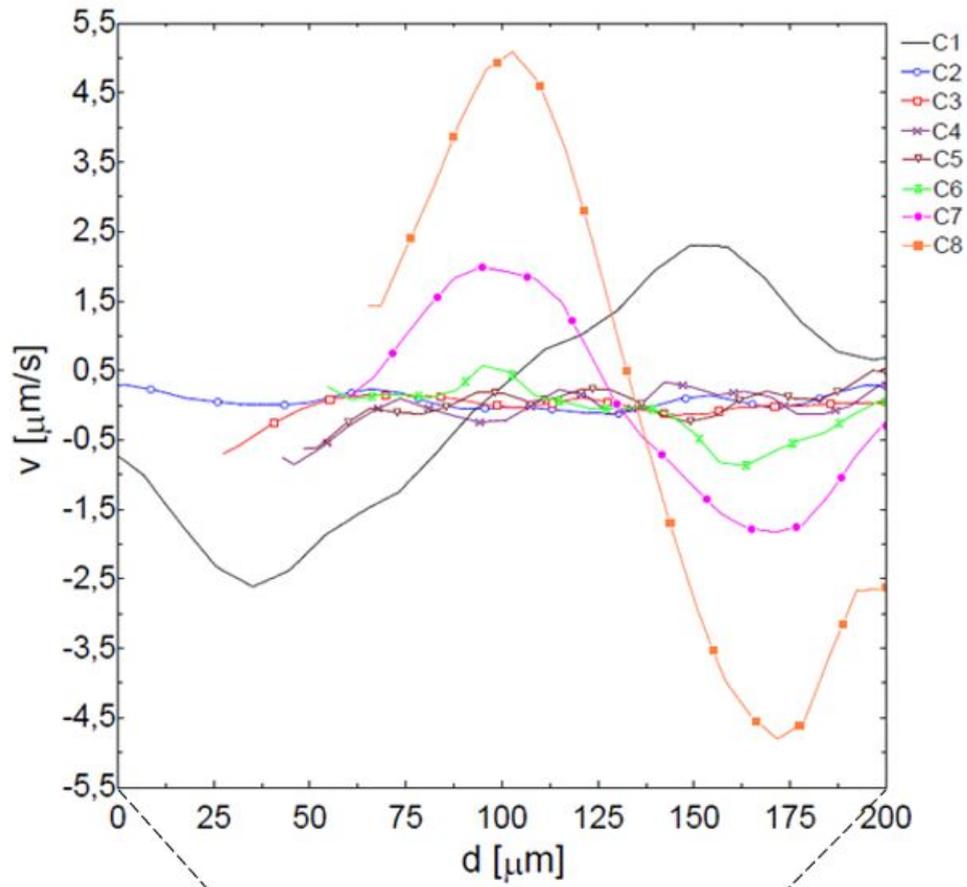
Fonte: Autor

Como esperado, a existência do vórtice causa uma curva em S para ambos os casos, com uma seção positiva e outra negativa. É interessante notar que o vórtice gera uma rotação no sentido horário, movimentando o fluido ao contrário ao que seria o escoamento não aprisionado, como em C1.

Perceba da figura 21 o movimento nos escoamentos C2 a C5 é quase puramente Browniano possuindo uma escala de $\pm 0,5 \mu\text{m/s}$.

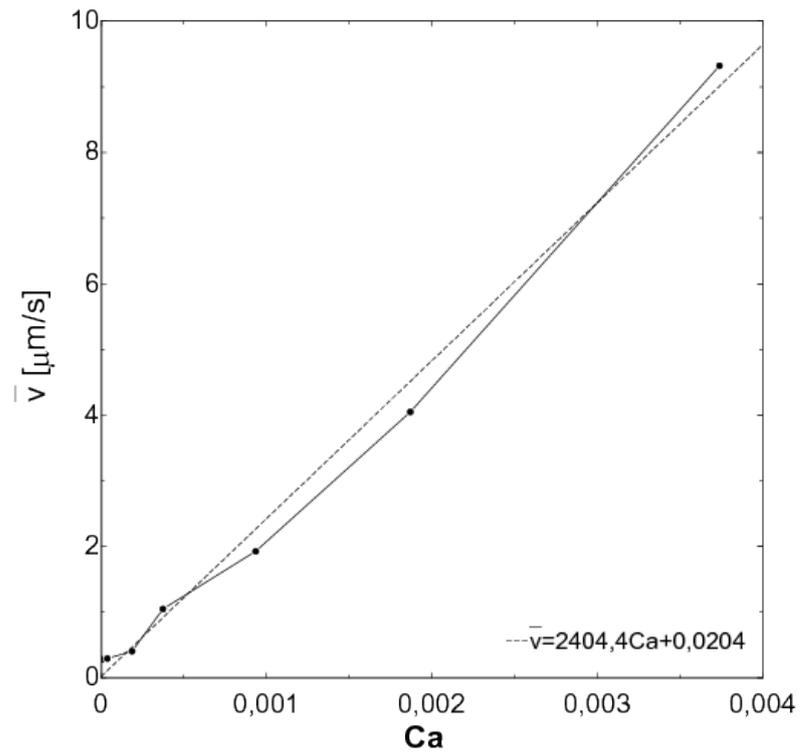
Calcula-se a velocidade média dentro do volume aprisionado para cada caso, sendo, portanto, uma velocidade média espacial proveniente da média temporal do escoamento. A figura 22 relaciona a velocidade média calculada no poro circular em função do número capilar. Percebe-se uma relação linear entre os termos. A linha de tendência correspondente é calculada e também apresentada na figura 22.

Figura 21 – Evolução do perfil de velocidade v para o caso de poro circular.



Fonte: Autor

Figura 22 – Velocidade média no volume aprisionado no poro circular em função do número capilar.

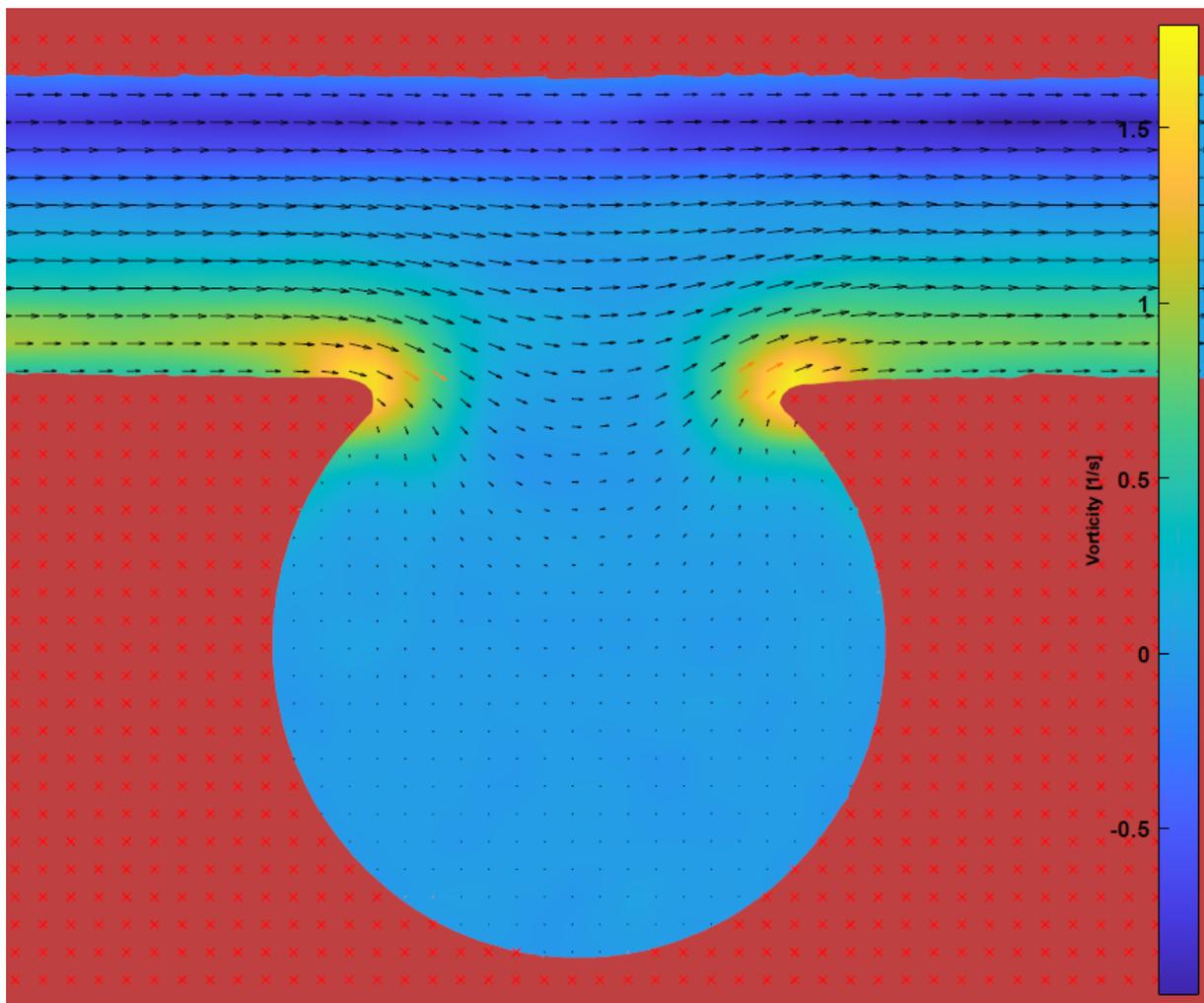


Fonte: Autor

4.2.3 Campo de vorticidade

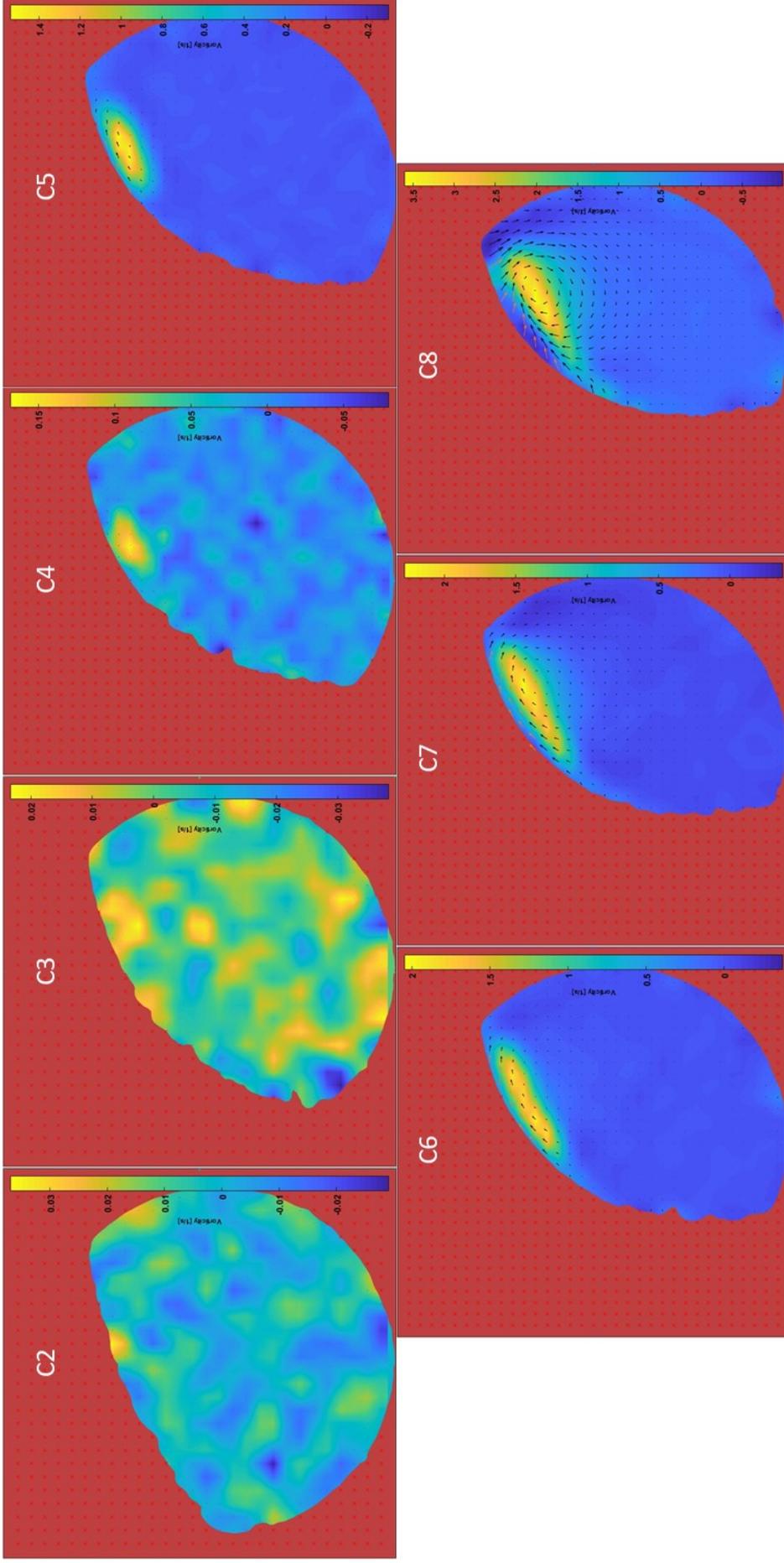
Os campos de vorticidade dos escoamentos C1 ao C8 são apresentados nas figuras 23 e 24.

Figura 23 – Campo do módulo de vorticidade para o escoamento C1. Direção do vetor vorticidade entrando na página.



Fonte: Autor

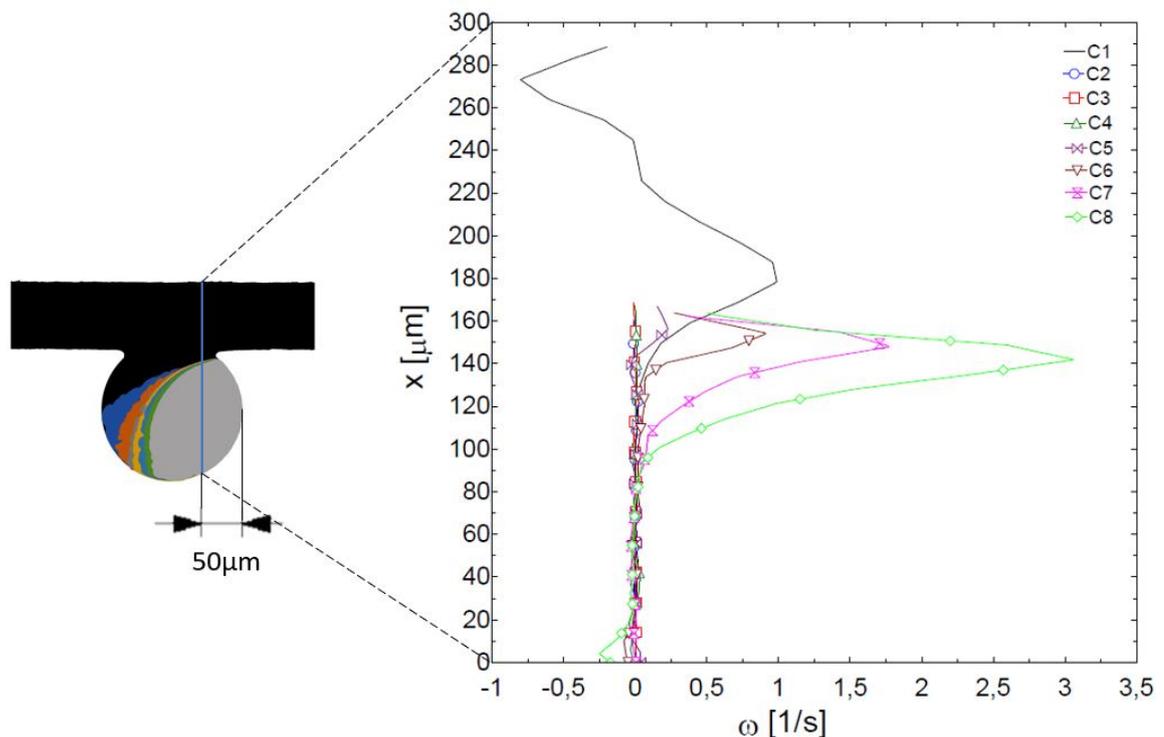
Figura 24 – Campo do módulo de vorticidade para os escoamentos C2 a C8. Direção do vetor vorticidade entrando na página.



Fonte: Autor

Novamente, o sistema mostra-se evoluir de uma movimentação aleatória para um vórtice bem definido, cujo centro chega a $3,5 \text{ s}^{-1}$ no escoamento C8. A evolução do perfil de vorticidade é apresentada na figura 25. Perceba que a distância utilizada como tomada de medida não corresponde ao centro do vórtice pois o valor máximo da vorticidade em C8 é aproximadamente 3 s^{-1} .

Figura 25 – Evolução do perfil de vorticidade para o caso de poro circular. Rotação no sentido horário é positiva.



Fonte: Autor

4.3 Poro triangular

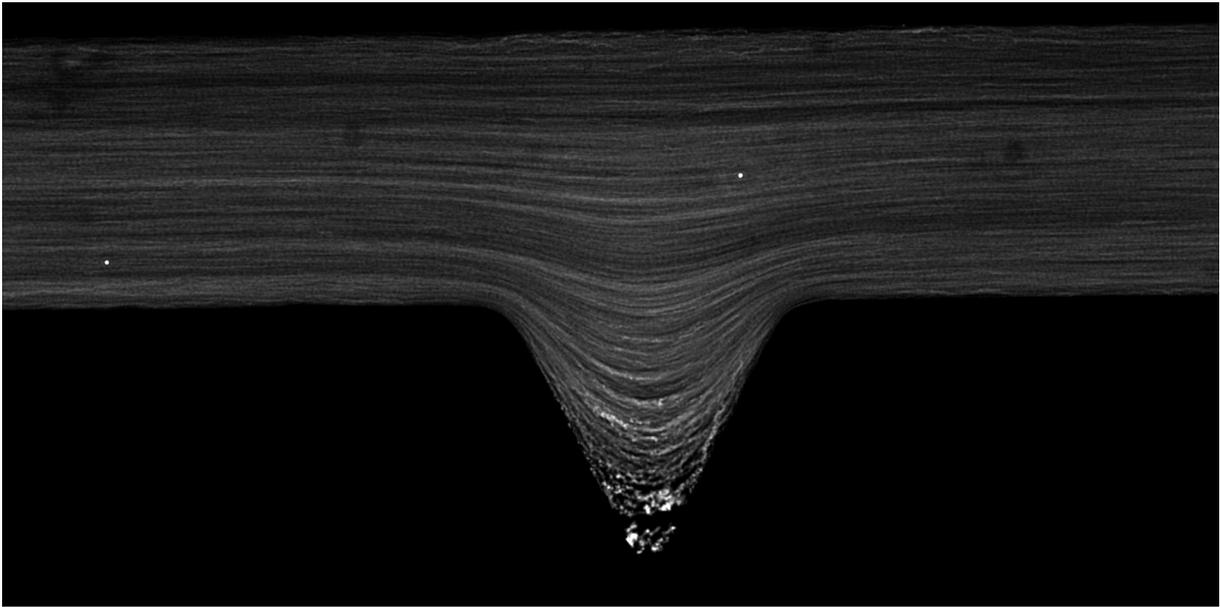
Analogamente ao caso anterior do caso de poro circular, repete-se o processo para o poro triangular, dessa vez sabendo-se que a profundidade do micromodelo está dentro do informado pelo fabricante.

4.3.1 Linhas de corrente

As figuras 26 e 27 apresentam as linhas de corrente para o canal de poros triangulares.

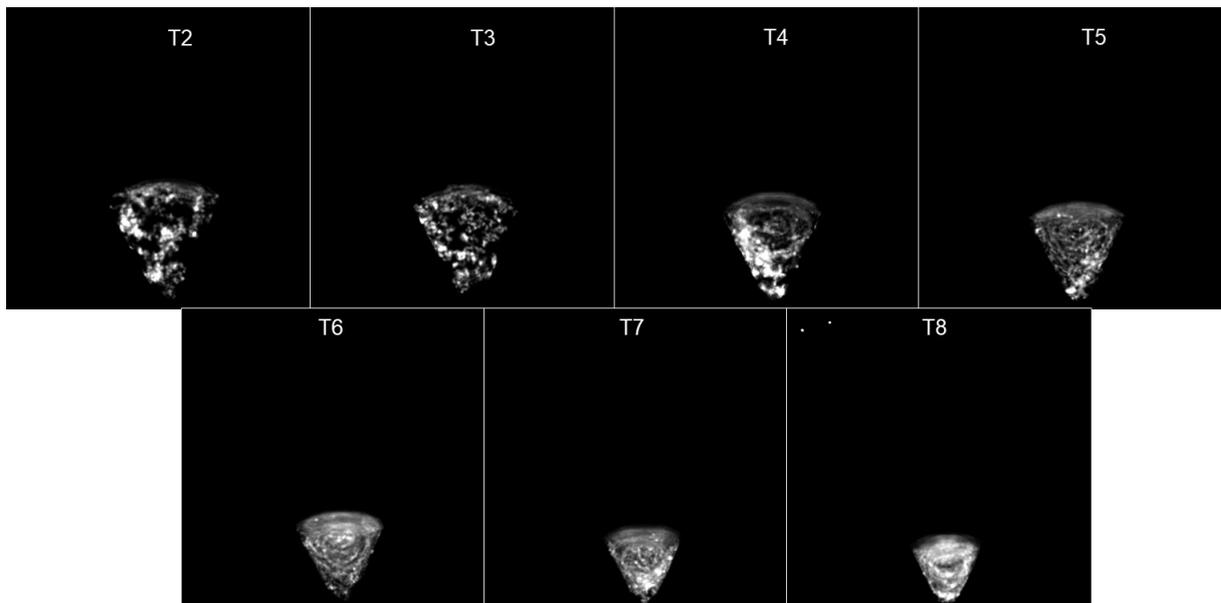
As conclusões dessa seção são semelhantes àsquelas da seção 4.2.1, a principal diferença consiste na redução significativa de volume presente no poro com o decorrer do escoamento de modo a dificultar o processamento das imagens obtidas. A razão para o efeito de difusão ser mais significativo no poro triangular que o circular é

Figura 26 – Linhas de corrente para o escoamento T1.



Fonte: Autor

Figura 27 – Linhas de corrente para o escoamento T2 a T8.



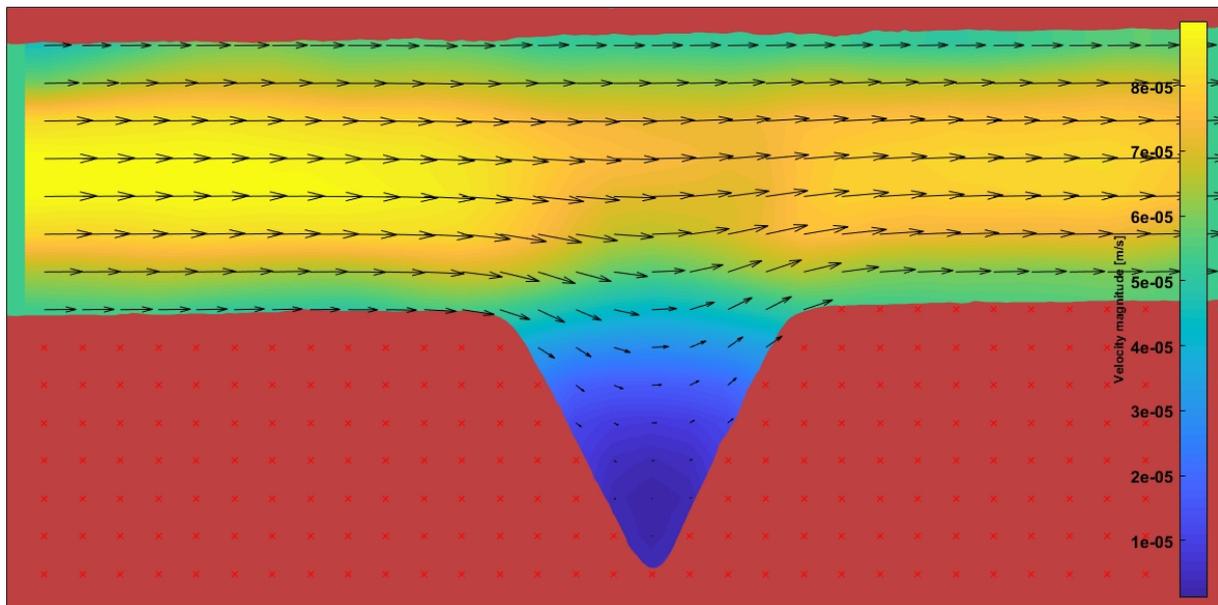
Fonte: Autor

que o primeiro é "mais aberto" ao escoamento, fazendo que as moléculas difundidas de água sejam rapidamente carregadas pelo escoamento, dando lugar a novas moléculas. Como o volume aprisionado no poro triangular é menor que no poro circular e a quantidade de partículas traçadoras mantém-se a mesma no volume aprisionado, tem-se um sistema cuja identificação individual de cada partícula é dificultada.

4.3.2 Campo de velocidade

O campo de velocidade dos escoamentos T1 a T8 são apresentados nas figuras 28 a 29 .

Figura 28 – Campo de velocidade para o escoamento T1.



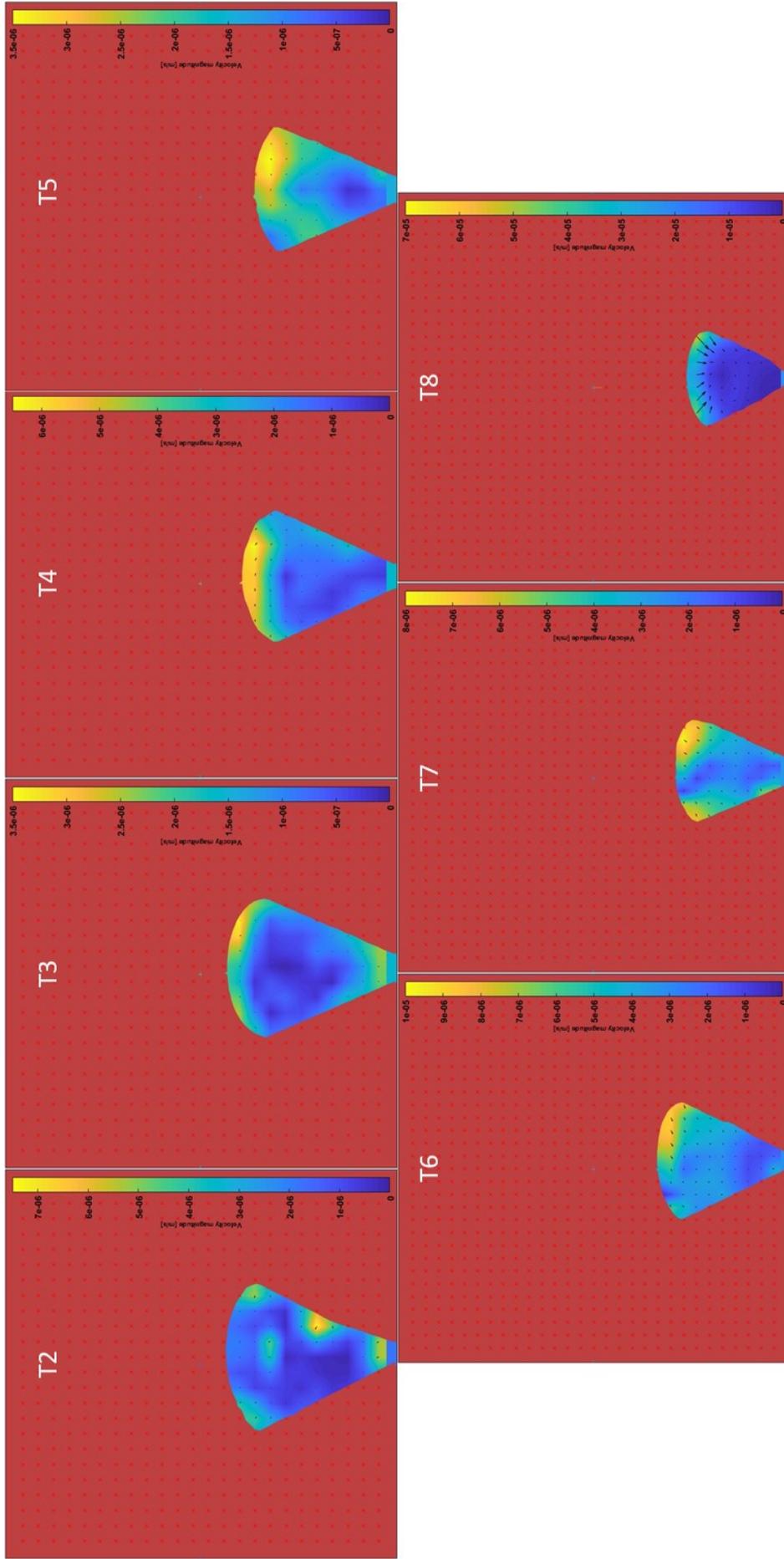
Fonte: Autor

Novamente há a evolução de um sistema aleatório para bem definido, sendo a movimentação sentida principalmente na região de fronteira com o FC-43.

As figuras 30 e 31 apresentam a evolução dos perfis de velocidade longitudinal e transversal ao escoamento em determinadas posições. A evolução do volume apresentada é formada pela sobreposição das máscaras geradas.

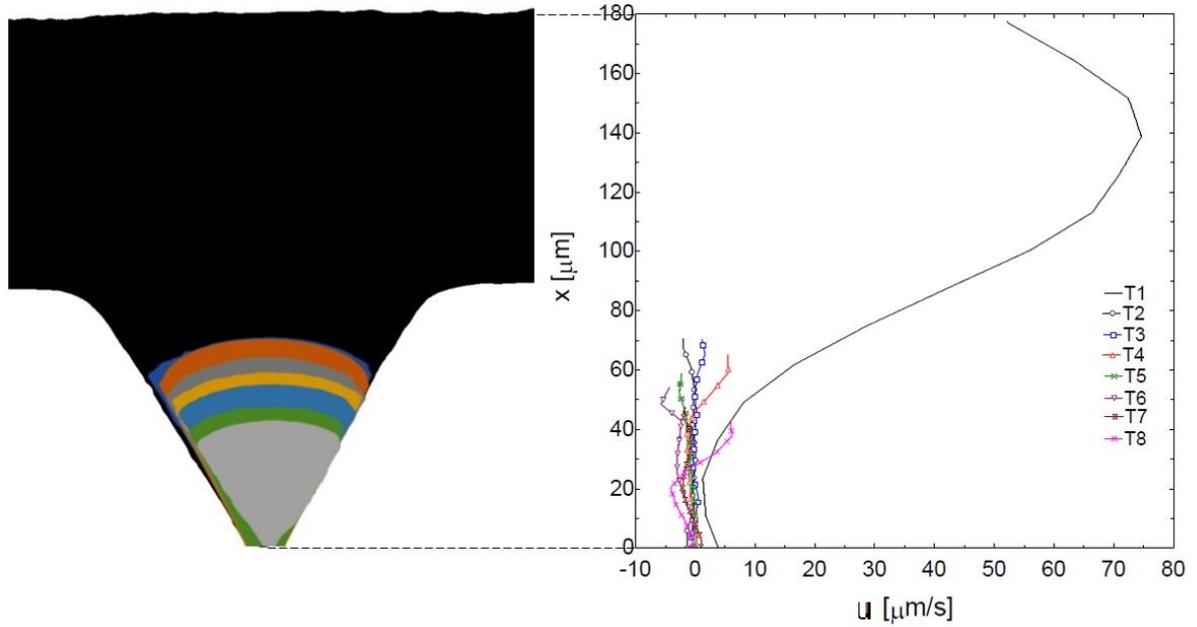
Devido ao próprio volume de fluido reduzido e, por consequência, a quantidade de área em contato com o FC-43, o movimento gerado é pequeno, mas ainda assim perceptível. Na figura 31 para o escoamento T2, na segunda metade do comprimento medido, tem-se velocidade próxima e até superior aquela do escoamento T1, algo não visto até o momento, cujas vazões indicam que o movimento do fluido é basicamente Browniano. Entretanto, como a escala de velocidade avaliada está próxima daquela associada ao movimento Browniano pode ser que os valores obtidos sejam uma anomalia proveniente dessa aleatoriedade e que seriam compensados com uma análise de mais pares de imagens para o mesmo caso. Perceba o desenvolvimento da formação em S característica do vórtice no sentido horário.

Figura 29 – Campo de velocidade para os escoamentos T2 a T8.



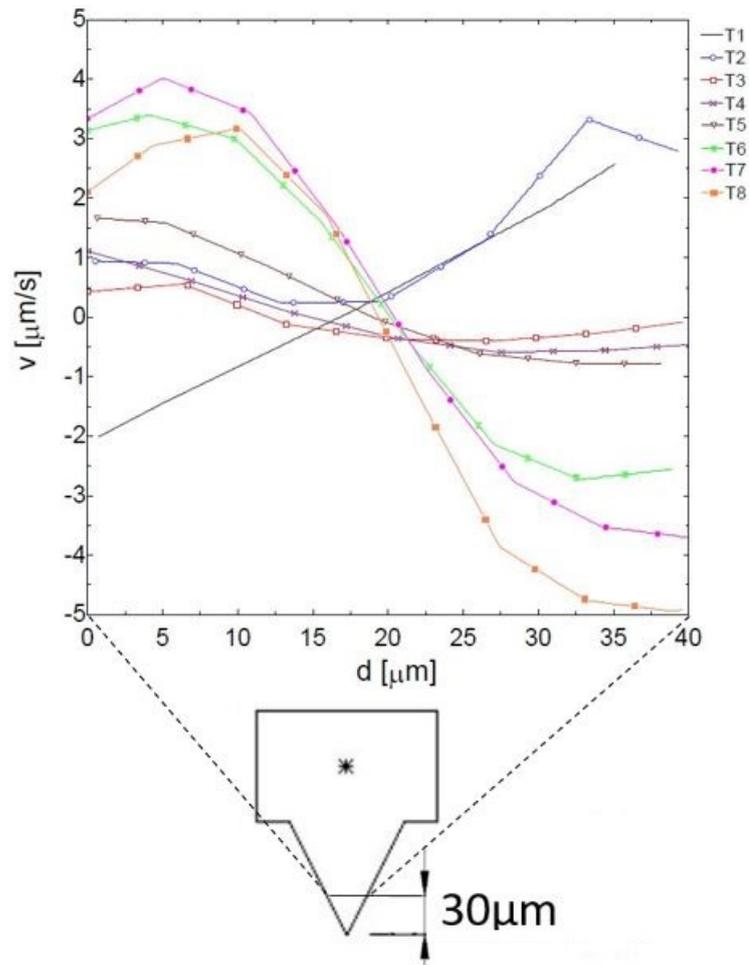
Fonte: Autor

Figura 30 – Evolução do perfil de velocidade u para o caso de poro triangular.



Fonte: Autor

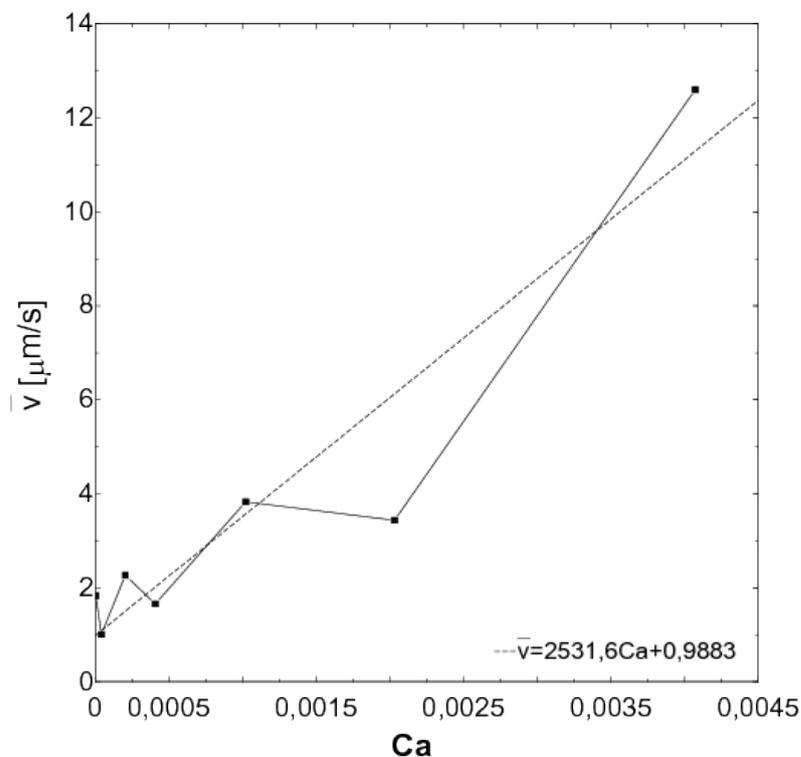
Figura 31 – Evolução do perfil de velocidade v para o caso de poro triangular.



Fonte: Autor

A figura 32 apresenta a velocidade média dentro do volume aprisionado para cada escoamento. Percebe-se uma inconsistência nos resultados de T3, T5 e T7, que decrescem quando espera-se que se mantenham ascendendo quando comparado com os anteriores. O autor acredita que isso se deve a efeitos tridimensionais não avaliados e/ou ao aumento da concentração de partículas no volume aprisionado com a difusão da água, dificultando então a diferenciação das partículas, aumentando assim o erro associado ao processo. Claramente a metodologia abordada não está completamente coerente e precisa ser aprimorada. Como na figura 22, a linha de tendência também é calculada e apresentada.

Figura 32 – Velocidade média no poro triangular em função do número capilar.



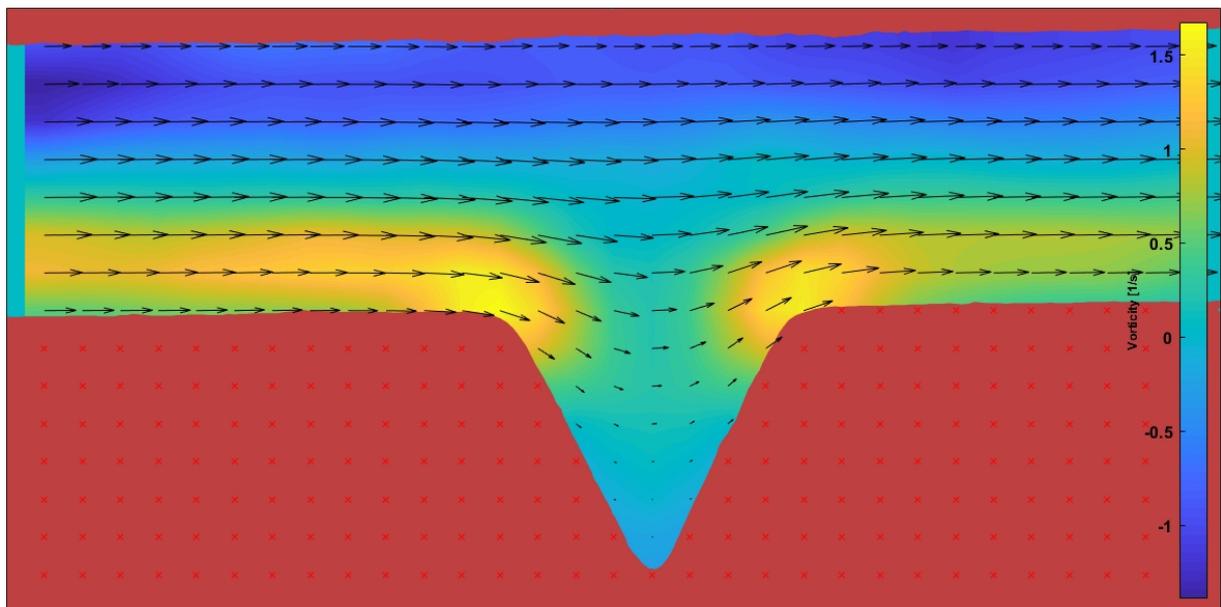
Fonte: Autor

Comparando-se com os resultados para a geometria circular na figura 22 percebe-se que a velocidade média para a geometria triangular é maior. O autor acredita que isso é decorrente do volume menor de fluido, que por consequência necessita menos energia para produzir movimento em seu interior.

4.3.3 Campo de vorticidade

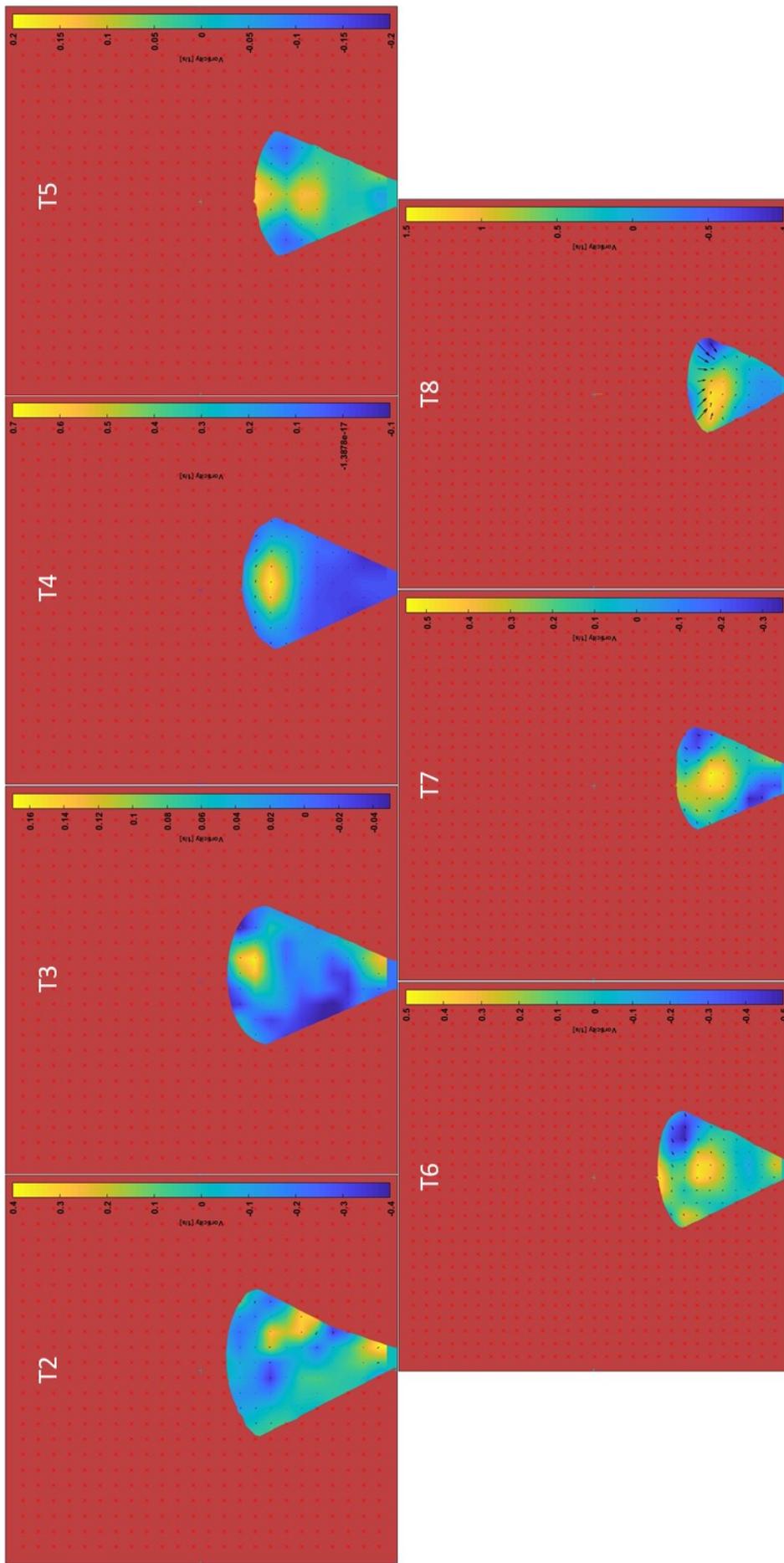
O campo de vorticidade dos escoamentos T1 ao T8 são apresentados nas figuras 33 e 34.

Figura 33 – Campo do módulo de vorticidade para o escoamento T1. Direção do vetor vorticidade entrando na página.



Fonte: Autor

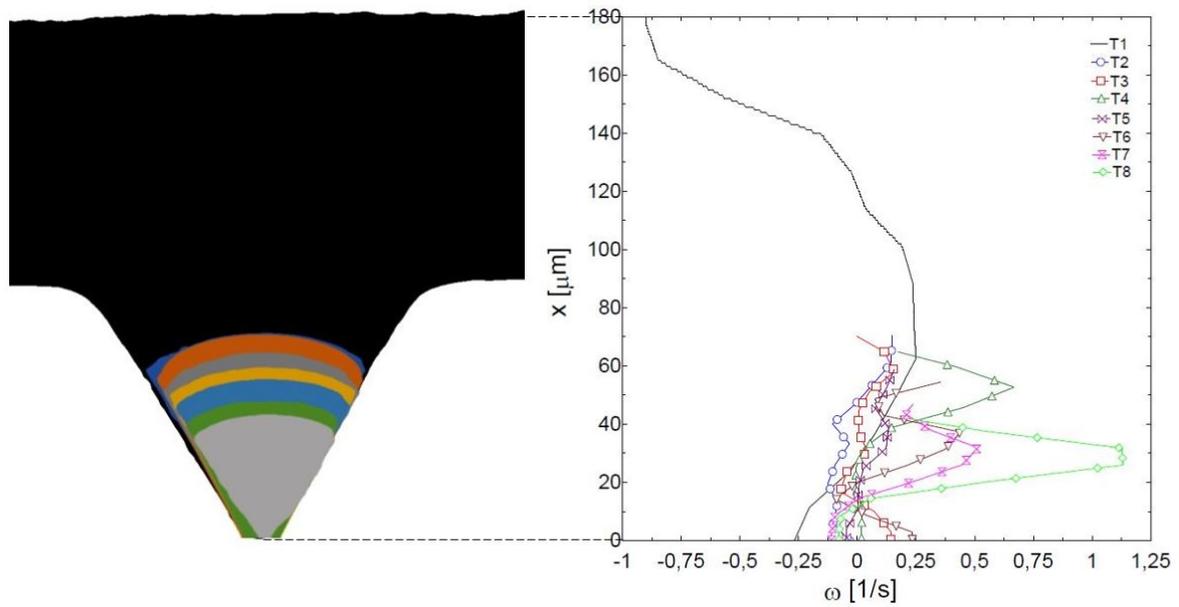
Figura 34 – Campo do módulo de vorticidade para os escoamentos T2 a T8. Direção do vetor vorticidade entrando na página.



Fonte: Autor

A existência do vórtice é bem definida e chega a $1,5 \text{ s}^{-1}$. A evolução do perfil de vorticidade é apresentada na figura 35. Embora a velocidade média no fluido no poro triangular seja maior que no poro circular, o valor do vetor vorticidade não o é. As partículas movem-se, portanto, mais rapidamente, mas de maneira mais caótica. É possível que isso também seja decorrente de movimentos tridimensionais não capturados pela técnica.

Figura 35 – Evolução do perfil de vorticidade para o caso de poro triangular. Rotação no sentido horário é positiva.



Fonte: Autor

5 CONCLUSÕES

Este trabalho alcançou o objetivo proposto de quantificar o campo de velocidades de um escoamento em microporos a partir do método de velocimetria por imagem de partículas, estando agora os dados disponíveis para comparação com métodos numéricos e aprimoramento de processos envolvendo escoamento em meio poroso. Entretanto, avalia-se que os resultados possuem erros associados e que a metodologia experimental deve ser aprimorada. De maneira geral, a metodologia experimental deste trabalho é simples e barata quando comparada com às demais referências, sendo operante numa grande variação da ordem do número capilar.

O procedimento experimental desenvolvido para a técnica de μ -PIV foi validado comparando-se com o resultado analítico de escoamento de Poiseuille em canal retangular. A velocidade do escoamento mostrou-se fortemente dependente das dimensões do canal. O micromodelo utilizado para a análise do microporo circular mostrou variância em sua profundidade ao longo do canal. O caso de escoamento em poro triangular foi adequadamente validado.

Percebeu-se significativa redução no volume aprisionado nos microporos devido a difusão da água no FC-43. Para o caso do microporo triangular o volume final é bastante reduzido e a concentração de partículas torna-se elevada, dificultando o processamento das imagens.

Percebeu-se a formação de um vórtice no sentido horário dentro do volume aprisionado conforme o aumento da vazão de FC-43 no canal para ambos os microporos. O vórtice começa a tornar-se evidente a partir da vazão de 102,37 ml/h. O valor máximo de vorticidade obtido na geometria circular foi de $3,5 \text{ s}^{-1}$, e $1,5 \text{ s}^{-1}$ para a geometria triangular.

Relacionou-se a evolução da velocidade média nos volumes aprisionados com o número capilar. Percebe-se uma relação linear entre os termos. Para o caso do poro triangular obteve-se dados incoerentes nos escoamentos T3, T5 e T7. O autor associa esses erros ao aumento da concentração de partículas no volume aprisionado e a efeitos tridimensionais do escoamento. Tem-se que a velocidade média no fluido no poro triangular é maior que no poro circular. Acredita-se que isso seja decorrente do volume menor de fluido aprisionado no caso triangular. Avaliando-se em conjunto o valor de vorticidade e velocidade média tem-se que as partículas no poro triangular são mais velozes, mas também mais caóticas.

Observou-se que é necessário uma velocidade na ordem de $10^4 \mu\text{m/s}$ para

produzir uma movimentação de fluido aprisionado no poro na ordem de $10^1 \mu\text{m/s}$.

É importante ressaltar que neste trabalho os efeitos tridimensionais do escoamento foram simplificados, entretanto, eles são relevantes e devem ser investigados.

6 TRABALHOS FUTUROS

O autor recomenda para trabalhos futuros:

- Refino dos resultados, calculando-se suas incertezas;
- Melhoria na qualidade do micromodelo;
- Adequada avaliação da altura do plano focal;
- Avaliação da técnica μ -PIV em 3D;
- Comparação de resultados para diferentes concentrações de partículas;
- Análise da quantidade de pares de imagens necessárias para a correta medição de um escoamento;
- Análise do efeito das diversas técnicas de pré-processamento;
- Encontrar um padrão para definição do tamanho da área de interrogação avaliando-se a velocidade do escoamento e a concentração de partículas no fluido;
- Comparar os valores obtidos nesse trabalho com métodos numéricos;
- Reproduzir esse trabalho com geometrias de poros mais complexas;
- Determinar o erro associado a fatores externos não medidos nesse trabalho, como por exemplo, a pressão de saída;
- Desenvolver um sistema em que ambos os fluidos tenham partículas traçadoras.

REFERÊNCIAS

- BILGEN, S. Structure and environmental impact of global energy consumption. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 38, p. 890–902, 2014.
- BOUSSINESQ, J. Sur l'influence des frottements dans les mouvements réguliers des fluides. **Math. Pure Appl**, v. 13, p. 377–438, 1868.
- BROENS, M.; UNSAL, E. Emulsification kinetics during quasi-miscible flow in dead-end pores. **Advances in Water Resources**, v. 113, p. 13–22, 2018.
- CHATZIS, I.; MORROW, N. R. Correlation of capillary number relationships for sandstone. **Society of Petroleum Engineers Journal**, v. 24, n. 05, p. 555–562, 1984.
- COATS, K. H.; SMITH, B. D. Dead-end pore volume and dispersion in porous media. **Society of petroleum engineers journal**, v. 4, n. 1, p. 73–84, 1964.
- CRITTENDEN, J. C. et al. **MWH's water treatment: principles and design**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2012.
- CUNHA, A. R. **Caracterização de sistemas porosos de rochas reservatório de petróleo a partir da extração de redes poro-ligações**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.
- DANGLA, R.; GALLAIRE, F.; BAROUD, C. N. Microchannel deformations due to solvent-induced PDMS swelling. **Lab on a Chip**, v. 10, p. 2972–2978, 2010.
- DRAZIN, P. G.; RILEY, N. **The Navier–Stokes equations: a classification of flows and exact solutions**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2006.
- DULLIEN, F. A. L. **Porous Media: Fluid transport and pore structure**. [S.l.]: Academic Press, Inc., 1992. 2.ed.
- EINSTEIN, A. Über die von der molekularkinetischen theorie der wärme geforderte bewegung von in ruhenden flüssigkeiten suspendierten teilchen. **Annalen der Physik**, v. 322, n. 8, p. 549–560, 1905.
- FLUORINERT. **Electronic Liquid FC-43**: Product informations. 2000. Ficha técnica.
- FOX, R. W.; PRITCHARD, P. J.; MCDONALD, A. T. **Introdução à mecânica dos fluidos**. Rio de janeiro: LTC, 2011. 7.ed.
- GENNES, P.-G. de; BROCHARD-WYART, F.; QUÉRÉ, D. **Capillarity and Wetting Phenomena: Drops, bubbles, pearls, waves**. New York: Springer, 2004.
- GUTIÉRREZ, J. A. F. **Escoamento de gotas de óleo através de micro capilares**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2013.

- HESHMATI, M.; PIRI, M. Interfacial boundary conditions and residual trapping: A pore-scale investigation of the effects of wetting phase flow rate and viscosity using micro-particle image velocimetry. **Fuel**, v. 224, p. 560–578, 2018.
- HOMSY, G. M. Viscous fingering in porous media. **Annual review of fluid mechanics**, v. 19, n. 1, p. 271–311, 1987.
- KREMER, G. M. **An Introduction to the Boltzmann Equation and Transport Processes in Gases**. [S.I.]: Springer, 2010.
- LEJ. **HXP 120V Compact Light Source**: Operating instructions. 2013. Manual técnico.
- LENORMAND, R. Liquids in porous media. **Journal of Physics: Condensed Matter**, v. 2, p. SA79–SA88, 1990.
- LI, Y. et al. Micro-PIV measurements of multiphase flow of water and liquid CO₂ in 2-D heterogeneous porous micromodels. **Water Resources Research**, v. 53, n. 7, p. 6178–6196, 2017.
- LINDKEN, R. et al. Micro-particle image velocimetry (μ PIV): Recent developments, applications, and guidelines. **Lab on a Chip**, v. 9, n. 17, p. 2551–2567, 2009.
- MAALOUF, S. In: World environmental and water resources congress, Sacramento - Estados Unidos. **Effects of Dead-End Pores on Solute Transport Processes**, p. 119–125, 2017.
- MATHWORKS. **MATLAB**. Versão R2017b, 2017. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/products/matlab.html>>. Acesso em: 21/06/2019.
- MONTANARI, T. **Histologia**: texto, atlas e roteiro de aulas práticas. Porto Alegre: Edição do autor, 2016. 3. ed.
- MORTENSEN, N. A.; OKKELS, F.; BRUUS, H. Reexamination of Hagen–Poiseuille flow: shape-dependence of the hydraulic resistance in microchannels. **Physical Review E**, v. 71, n. 5, 2005.
- NILSSON, M. A. et al. Effect of fluid rheology on enhanced oil recovery in a microfluidic sandstone device. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, v. 202, p. 112–119, 2013.
- O'BRIEN, J. **Considerations for Waterflooding in Mature Fields Reservoir Optimization**. 2015. Disponível em: <<https://halliburtonblog.com/considerations-for-waterflooding-in-mature-fields-reservoir-optimization/>>. Acesso em: 08/06/2019.
- PAPANASTASIOU, T. C.; GEORGIU, G. C.; ALEXANDROU, A. N. **Viscous Fluid Flow**. [S.I.]: CRC Press, 1999.
- PIZER, S. M. et al. Adaptive histogram equalization and its variations. **Computer vision, graphics, and image processing**, v. 39, n. 3, p. 355–368, 1987.
- RAFFEL, M. et al. **Particle Image Velocimetry**: A practical guide. [S.I.]: Springer, 2018. 3. ed.

ROMAN, S. et al. Particle velocimetry analysis of immiscible two-phase flow in micromodels. **Advances in Water Resources**, v. 95, p. 199–211, 2016.

SANTIAGO, J. G. et al. A particle image velocimetry system for microfluidics. **Experiments in Fluids**, v. 25, p. 316–319, 1998.

SILVA, G.; LEAL, N.; SEMIAO, V. Micro-PIV and CFD characterization of flows in a microchannel: velocity profiles, surface roughness and Poiseuille numbers. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, v. 29, n. 4, p. 1211–1220, 2008.

SILVA, J. M. de; DAWE, R. A. In: SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference, 2003, Port-of-spain - Trinidad. **Effects of Permeability and Wettability Heterogeneities on Flow in Porous Media**, 2003.

THIELICKE, W. **PIVlab - Digital Particle Image Velocimetry Tool for MATLAB**. Versão 2.02, 2019. Disponível em: <<https://pivlab.blogspot.com/>>. Acesso em: 19/06/2019.

THIELICKE, W.; STAMHUIS, E. J. PIVlab – towards user-friendly, affordable and accurate digital particle image velocimetry in matlab. **Journal of Open Research Software**, v. 2, n. 1, 2014.

United States Energy Information Administration. **International Energy Outlook 2016: With projections to 2040**. 2016. Relatório.

United States Environmental Protection Agency. **Particulate Matter (PM) Pollution: Particulate matter (PM) basics**. 2018. Disponível em: <<https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics>>. Acesso em: 09/06/2019.

United States National Institutes of Health. **ImageJ**. Versão 1.8.0, 2018. Disponível em: <<https://imagej.nih.gov/ij/>>. Acesso em: 21/06/2019.

University of California Santa Cruz. **Nano-and Microscale Fabrication and Characterization: PDMS microfluidics fabrication**. 2019. Disponível em: <<https://cleanroom.soe.ucsc.edu/microfluidics>>. Acesso em: 23/06/2019.

VEGINI, G. L. R. et al. In: ENCIT, Vitória - Brasil. **Visualitzation of immiscible displacement in an oil-wet micromodel**, 2016.

WHITESIDES, G. M. The origins and the future of microfluidics. **Nature**, v. 442, n. 7101, p. 368, 2006.

WOLF, F. G. **Modelagem da Interação Fluido-sólido para Simulação de Molhabilidade e Capilaridade Usando o Modelo Lattice-Boltzmann**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

YAKHSHI-TAFTI, E.; KUMAR, R.; CHO, H. J. Measurement of surface interfacial tension as a function of temperature using pendant drop images. **International Journal of Optomechatronics**, v. 5, n. 4, p. 393–403, 2011.

APÊNDICE A - ALGORITMO PARA O CÁLCULO DA MASCÁRA E MÉDIA DO ESCOAMENTO.

```

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 retirado
15  i_tira_ruído=i_media+intensidade_ruído;
16
17  for k = 1:length(tifFiles)
18      baseFileName = tifFiles(k).name;
19      I=im2double(imread(baseFileName));
20      i_media=i_media+I/length(tifFiles);
21      i_soma=i_soma+I;
22  end
23
24  intensidade_melhora_contraste=5;
25  i_contraste_melhorado=i_media;
26  for k = 1:intensidade_melhora_contraste
27      i_contraste_melhorado=i_contraste_melhorado+i_media;
28  end
29
30  imwrite(i_media, [saveFolder_avg 'media' '.tif']); % Media das imagens
31  imwrite(i_contraste_melhorado, [saveFolder_avg 'media_com_contraste'
32      '.tif']); %Media das imagens com contraste melhorado
33  imwrite(i_soma i_tira_ruído, [saveFolder_avg 'mascara' '.tif']); %Mascara
34  % imshow(i_avg)
35  % imshow(i_contraste_melhorado)
36  % imshow(i_soma-i_tira_ruído)

```

APÊNDICE B - ALGORITMO PARA O CÁLCULO DA SOLUÇÃO ANALÍTICA DE POISEUILLE EM CANAL DE SEÇÃO RETANGULAR.

```

1
2 clc
3 clear all
4 format long
5 %% Inputs
6 NPx=100; %Numero de pontos no eixo x
7 Q=0.00046/(3600*1000*1000); %vazao_volumetrica
8 l=91.81*(1e-6); %largura_do_canal
9 h=33.68*(1e-6); %altura_do_canal
10 n=100; %numero_de_termos
11
12 %% Calculo
13 P=zeros(1,NPx+1);
14 P_norm=P;
15 V=P;
16 V_norm=P;
17 for i=2:NPx+1
18     P(i)=P(i-1)+l/NPx;
19 end
20 for i=2:NPx+1
21     P_norm(i)=P(i)/P(NPx+1);
22 end
23 for i=2:NPx/2
24     V(i)=poiseuille_analitico_retangular(Q,l,h,P(i),h/2.0,n);
25 end
26 for i=2:NPx
27     V_norm(i)=V(i)/max(V);
28 end
29 plot(P,V)
30 function [alpha]=calcula_alpha(altura,largura)
31 gamma=largura/altura;
32 s=0;
33 for i=1:2:100
34     s=s+((i*gamma)/(pi*(i^4)))*(2/((pi^2)*(i^5)))*tanh(i*pi*gamma*.5);
35 end
36 alpha=(1/s)*(1/8)*(pi^3)*(gamma^2);
37 end

```

```
38 %%
39 function [u]=poiseuille_analitico_retangular(vazao_volumetrica,
40                                             largura_do_canal,altura_do_canal,largura_avalizada,
41                                             altura_avalizada,numero_de_termos)
42
43 Q=vazao_volumetrica;
44 l=largura_do_canal;
45 h=altura_do_canal;
46 z=largura_avalizada;
47 y=altura_avalizada;
48 n=numero_de_termos;
49
50 alpha=calcula_alpha(h,l);
51
52
53 s=0;
54 for i=1:2:n
55     s=s+(1/(i^3))*sin((i*pi*y)/h)*(1-cosh(i*pi*z*(1/h))*
56         (1/cosh(i*pi*l*(1/(2*h)))));
57 end
58 u=Q*alpha*(1/(l^2))*4*(1/(pi^3))*s;
59 end
```