4
RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1
Planta Experimental Antiga

Na tabela 4.1 a seguir podem ser encontradas as propriedades reológicas dos fluidos originais e das soluções aquosas de carbopol com valores mais próximos. Os valores de τ_0, a tensão limite de escoamento, dos fluidos originais não foram fornecidos.

Fluido	**K**	**n**	τ_0
Fluido de Perfuração	1,5705	0,4369	-
Sol. Aq. Carbopol 0,08%	1,0443	0,48811	1,995
Fluido Espaçador	4,788	0,25	-
Sol. Aq. Carbopol 0,10%	4,9064	0,41741	12,444

Tabela 4.1: Propriedades do fluido de perfuração, do fluido espaador e das soluções de carbopol.

Dessa forma, a solução aquosa de carbopol utilizada para representar o fluido de perfuração tinha concentração de 0,08% em massa e para representar o fluido espaçador a solução aquosa de carbopol utilizada tinha concentração de 0,10% em massa. Como ambas as soluções eram incolores, foi adicionado um corante à solução com concentração de 0,10% para facilitar a visualização da interface entre os fluidos.

A solução aquosa de carbopol com o corante foi testada no reômetro para certificação de que o corante não influenciava as propriedades reológicas da solução. Na figura 4.1 a seguir pode ser observado um gráfico dos testes realizados com as três soluções (com concentração de 0,08%, 0,10% sem corante e 0,10% com corante).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621122/CA

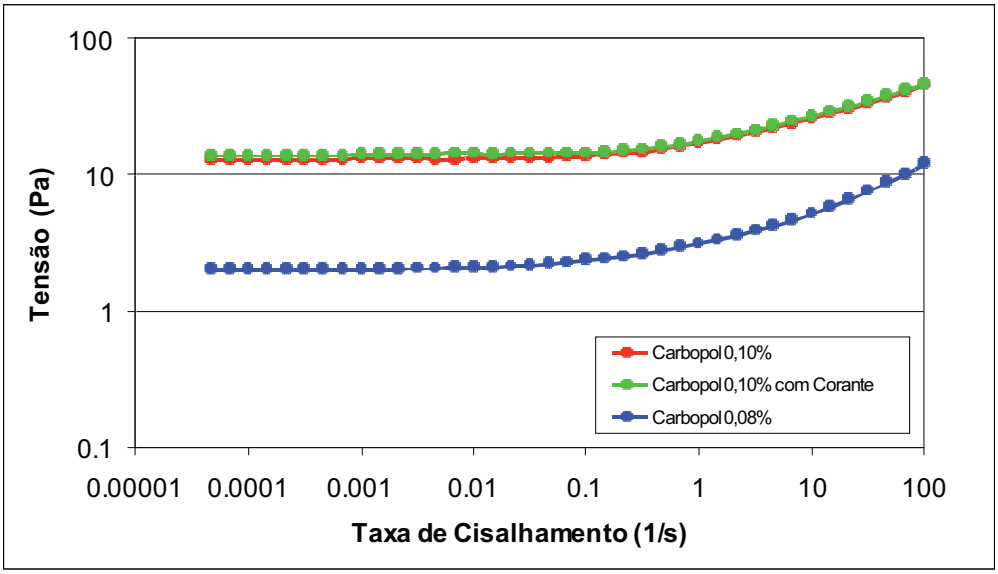

Figura 4.1: Gráfico dos testes reológicos das soluções de carbopol.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621122/CA

4.1.1 Vertical – 0^o

A figura 4.2 a seguir mostra as fotos obtidas para o caso dos tubos concêntricos, na posição vertical, ou seja, 0^o em relação à gravidade e deslocamento da solução aquosa de carbopol com concentração de 0,08% pela solução com concentração de 0,10% com corante. Analisando essas imagens pode ser observado que o formato da interface entre os dois fluidos é constante por toda a seção de testes. Além disso, a forma da interface é quase plana, o que indica um processo de deslocamento eficiente.

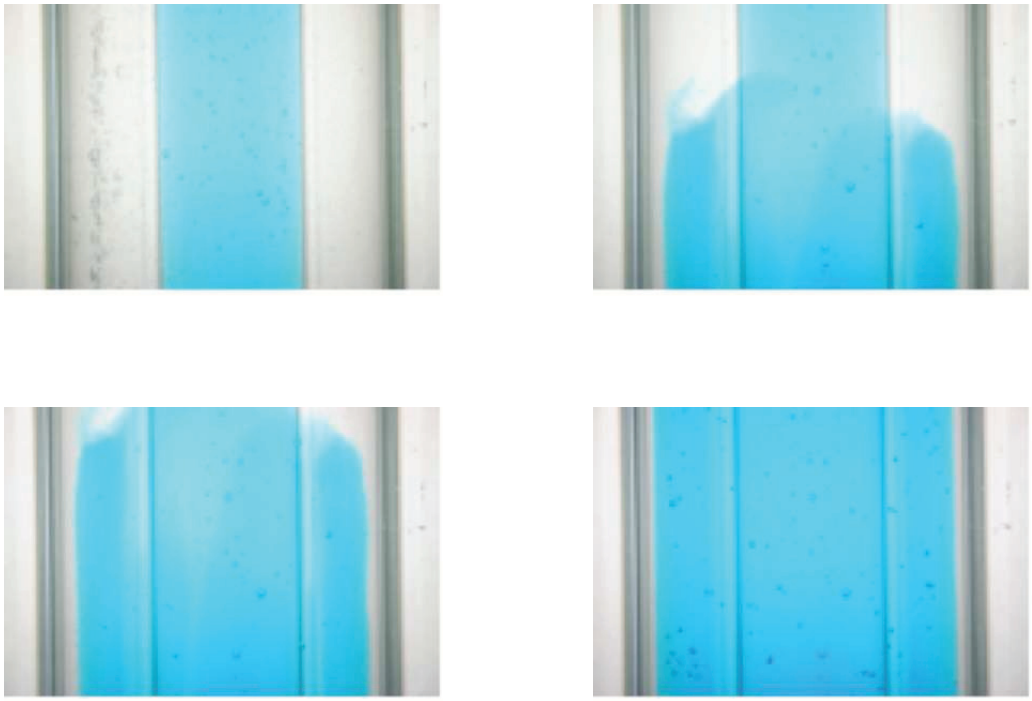

Figura 4.2: Fotos da solução de carbopol 0,10% com corante azul deslocando a solução 0,08% pelo espaço anular com os tubos concêntricos na vertical.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621122/CA

4.1.2 Inclinado – 45^o

A figura 4.3 a seguir mostra as fotos obtidas para o caso dos tubos concêntricos, na posição inclinada de 45^o em relação à gravidade e deslocamento da solução aquosa de carbopol com concentração de 0,08% pela solução com concentração de 0,10% com corante.

Analisando essas imagens pode ser observado que o escoamento ocorreu preferencialmente pelo lado mais baixo do espaço anular. Esse fato não pode ser atribuído às diferenças de densidades entre os fluidos uma vez que as duas soluções tinham a mesma densidade. É possível que esta preferência tenha ocorrido devido à dificuldade de formar uma interface plana no início do processo de deslocamento. De qualquer maneira, pelas imagens pode ser observado que o fluido representando o fluido espaçador substituiu completamente o que estava representando o fluido de perfuração.

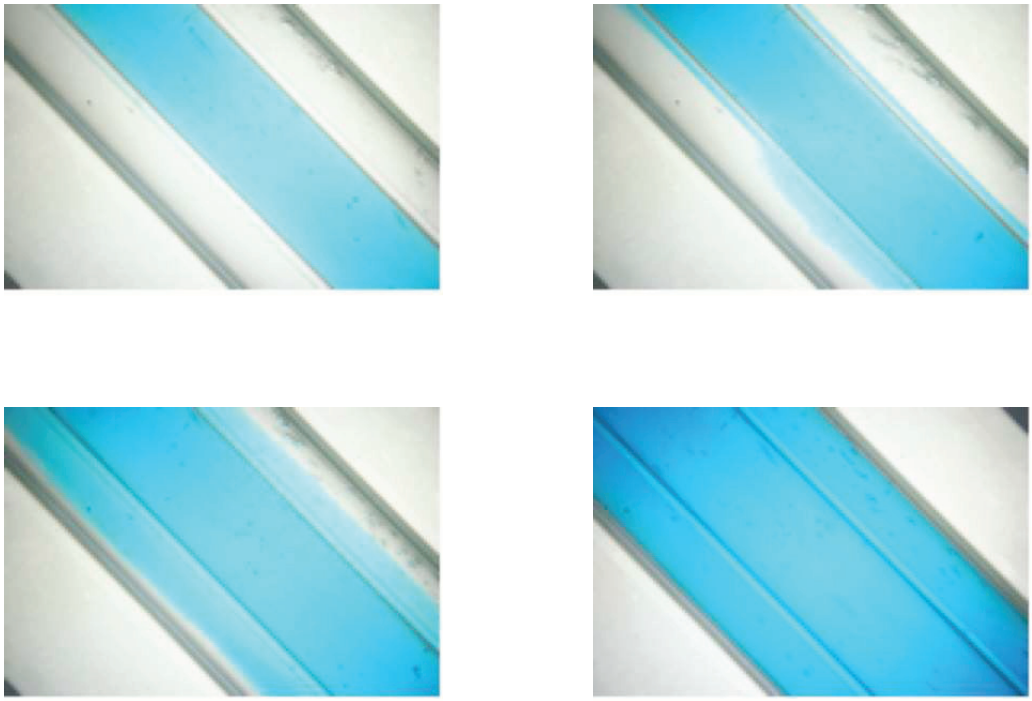

Figura 4.3: Fotos da solução de carbopol 0,10% com corante azul deslocando a solução 0,08% pelo espaço anular com os tubos concêntricos inclinados 45^o.

4.1.3 Horizontal – 90^o

A figura 4.4 a seguir mostra as fotos obtidas para o caso dos tubos concêntricos, na posição horizontal, ou seja, 90^o em relação à gravidade e deslocamento da solução aquosa de carbopol com concentração de 0,08% pela solução com concentração de 0,10% com corante.

Analisando essas imagens, pode ser observado que o escoamento ocorreu preferencialmente pela parte superior do espaço anular. Isso provavelmente aconteceu pois o tubo interno envergou devido ao seu peso próprio quando o experimento foi colocado na posição horizontal. Assim, o espaço anular que antes era concêntrico ficou com a excentricidade variável, e o processo de deslocamento foi facilitado na parte mais larga do espaço anular. Mas apesar disso pode ser observado que o fluido representando o fluido espaçador substituiu completamente a solução representando o fluido de perfuração.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621122/CA

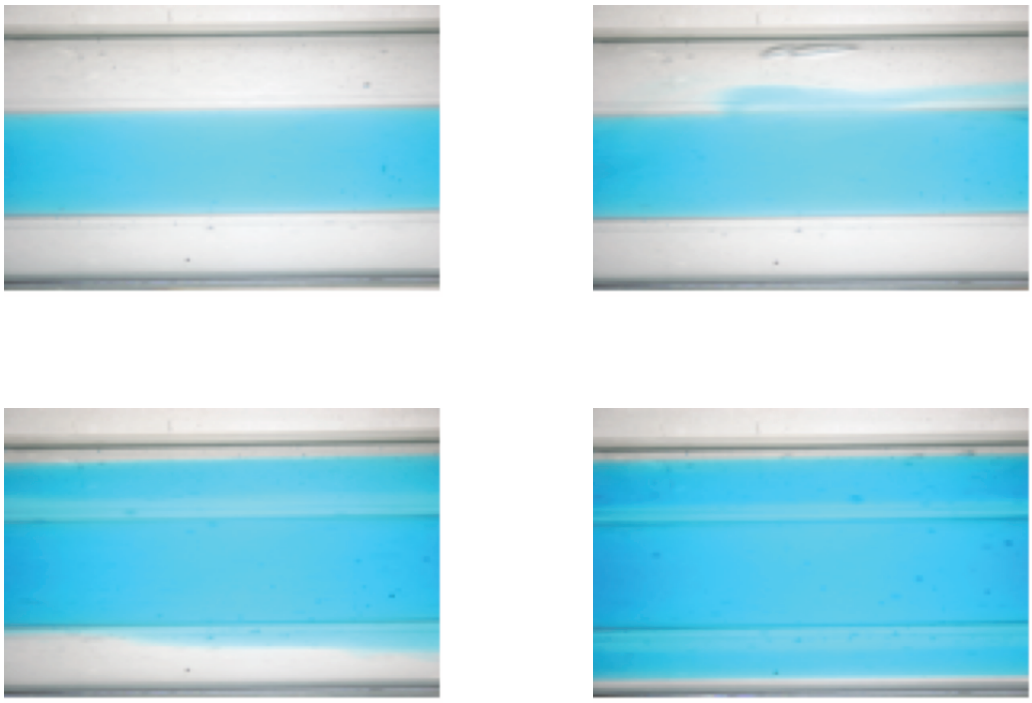

Figura 4.4: Fotos da solução de carbopol 0,10% com corante azul deslocando a solução 0,08% pelo espaço anular com os tubos concêntricos na horizontal.

É importante destacar que os resultados obtidos nos testes acima são fotos frontais do escoamento. Para avaliar melhor o formato da interface e associá-lo à eficiência de deslocamento é interessante obter um plano de visualização.

4.2 Planta Experimental Nova

4.2.1 Testes preliminares

A partir desse momento foram iniciados testes para verificar a possibilidade de utilizar micropartículas traçadoras em um dos fluidos e um laser que emite um feixe de luz formando um plano de visualização.

Na figura 4.5 a seguir, podem ser vistas fotos da interface formada por um fluido newtoniano, glicerina, com corante azul e micropartículas e uma solução aquosa de carbopol 0,15% antes de ser iniciado o processo de deslocamento dos fluidos. A foto colorida do lado esquerdo é simplesmente uma foto frontal da seção de testes enquanto a foto em preto e branco do lado direito foi obtida com um feixe de laser iluminando as micropartículas e formando um plano de visualização.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621122/CA

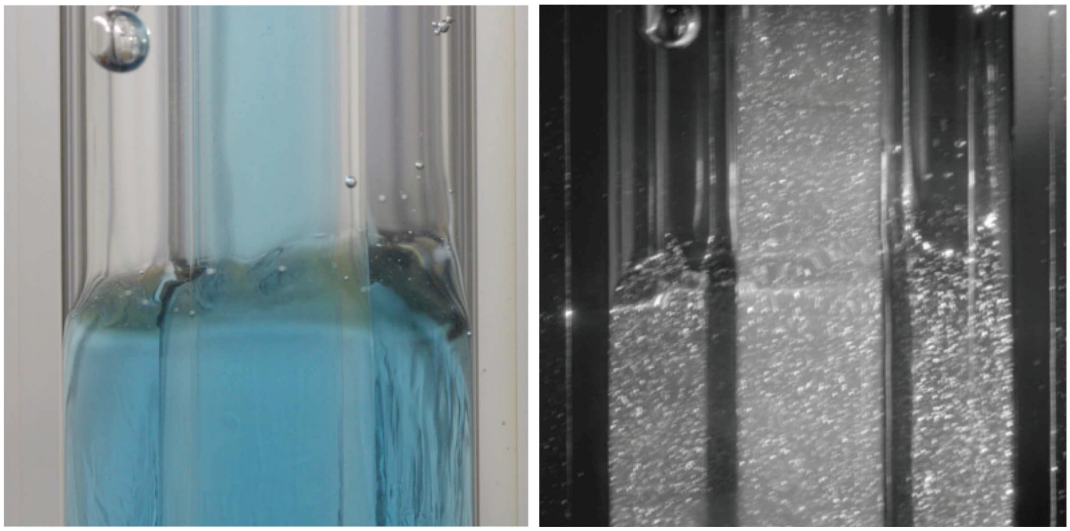

Figura 4.5: Fotos da interface entre glicerina e solução de carbopol.

Observando essas imagens é possível perceber que o índice de refração da solução aquosa de carbopol não é favorável ao método de visualização. Foram realizados inúmeros testes com glicerina deslocando soluções aquosas de carbopol mas não foram obtidas imagens com qualidade satisfatória.

A luz do laser deve atravessar diversos meios, com diferentes índices de refração, até atingir a interface entre o fluido com micropartículas e o sem. Quando muda de meio, devido à diferença de índices de refração, parte da luz é refletida, o que atrapalha a visualização de um plano de laser na interface. Por isso, o ideal é que os fluidos tenham o índice de refração o mais próximo possível.

Para tentar melhorar a qualidade das imagens foram testadas diversas lentes e modificadas algumas configurações da câmera. Foi observado também que o posicionamento do laser é de extrema importância para se obter uma visualização adequada.

Além disso, o escoamento de fluidos não newtonianos é mais complexo do que o de fluidos newtonianos. Por isso, foi decidido recomeçar o estudo, analisando um problema um pouco menos complexo, que é o deslocamento somente de fluidos newtonianos e depois de contornados os problemas de posicionamento do laser, configurações da câmera etc, a idéia é voltar ao caso mais complexo.

4.2.2
Fluido newtoniano deslocando outro fluido newtoniano

Os fluidos utilizados para estudar o caso de um fluido newtoniano deslocando outro foram: glicerina misturada com micropartículas e corante

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621122/CA

sendo o fluido deslocador e óleo vegetal (menos viscoso e menos denso) sendo o fluido deslocado. Os índices de refração desses fluidos são muito próximos entre si e com o do vidro, e isso contribui para a boa qualidade das imagens.

Foi observada a formação de uma sombra na interface. Para tentar eliminar essa sombra, o laser foi inclinado, mas mesmo assim foi observado que a sombra poderia influenciar na visualização. Foi colocado então um segundo laser, posicionado opostamente ao primeiro em relação à caixa de visualização, inclinado na mesma direção, em sentido contrário. Assim, foi observado que dois lasers posicionados dessa maneira reduziam consideravelmente a sombra na interface.

Na figura 4.6 a seguir pode ser observada a sombra criada a partir da interface com um laser inclinado (a) e a compensação dessa sombra ao serem utilizados dois lasers inclinados (b) e (c).

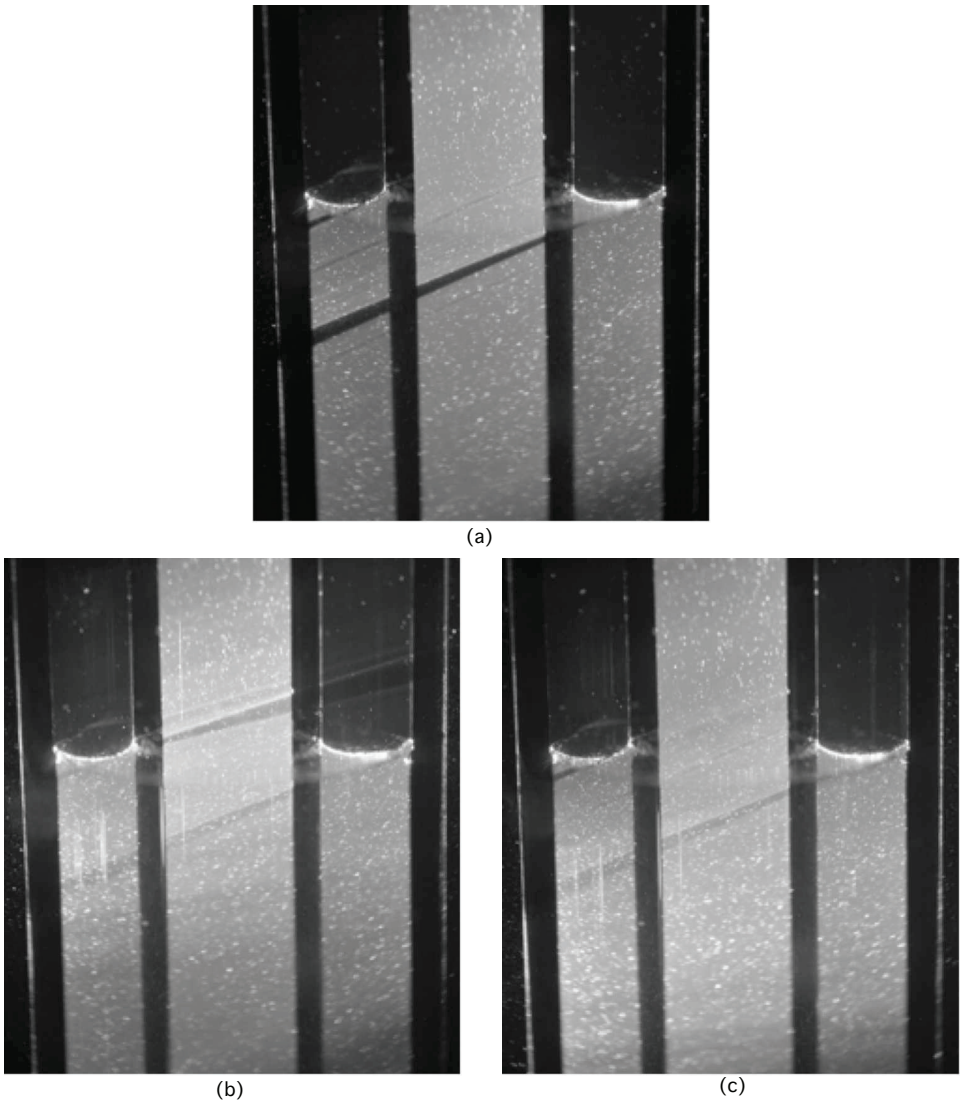

Figura 4.6: Fotos da compensação da sombra na interface com lasers inclinados.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621122/CA

Foram realizados então testes da glicerina com corante e micropartículas deslocando óleo com dois lasers formando um plano de visualização. Foram testadas também diversas configurações da câmera e as imagens foram obtidas com os seguintes parâmetros: velocidade ISO de 1600 e obturador com valor de 1/80.

O reservatório onde se encontrava a glicerina foi pressurizado provocando assim o escoamento. A figura 4.7 a seguir mostra as fotos do deslocamento do óleo vegetal pela glicerina com corante e micropartículas. Com os resultados obtidos neste teste foi possível perceber que com esta configuração de lasers e câmera, é possível obter imagens de um plano do escoamento com boa qualidade.

Além disso, pode ser observado que o perfil da interface se manteve constante durante o escoamento por toda a seção de testes e que o formato da interface é quase plano, o que indica um processo de deslocamento eficiente.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621122/CA

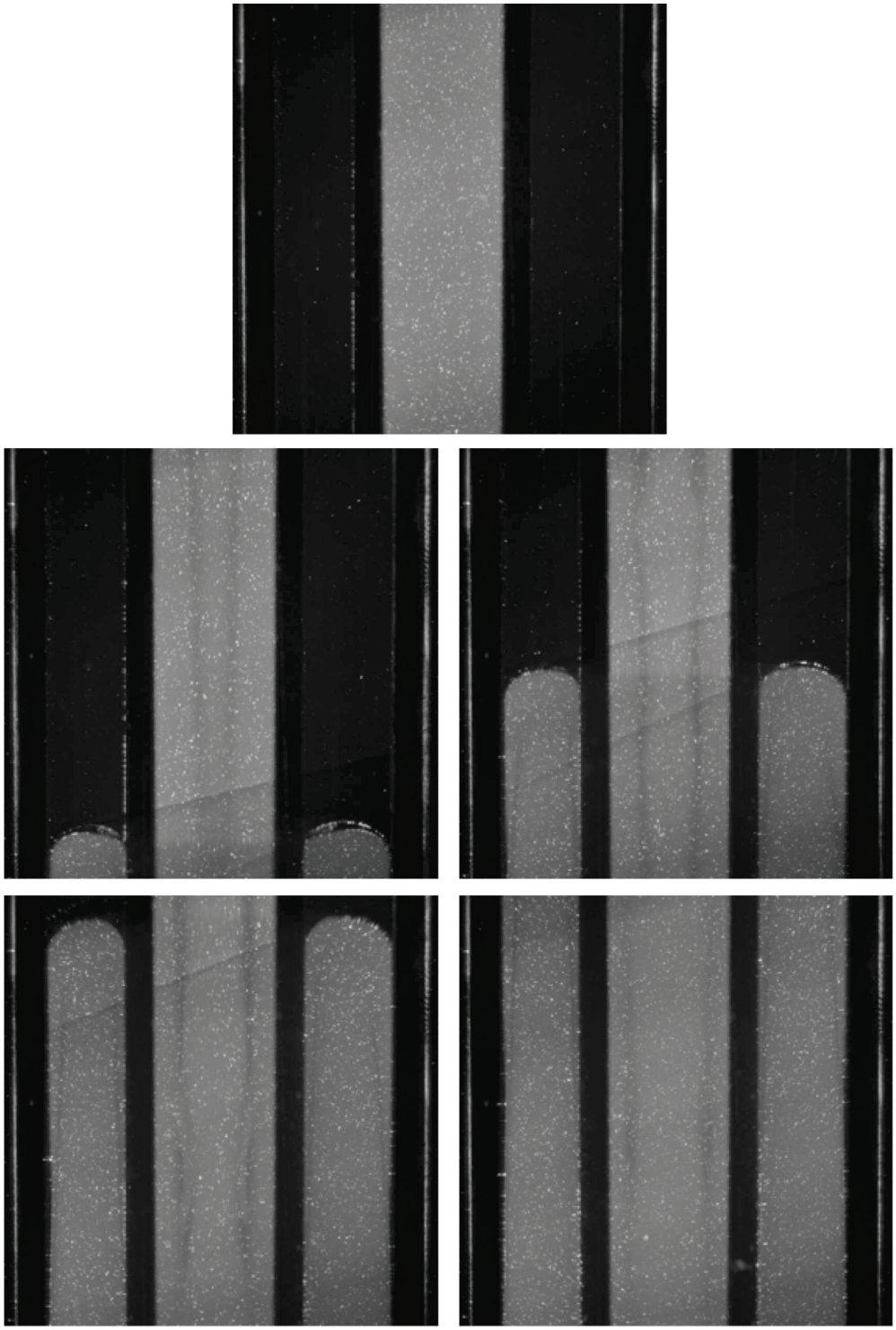

Figura 4.7: Fotos do deslocamento de óleo vegetal por glicerina.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621122/CA

Os excelentes resultados obtidos com os dois fluidos newtonianos mostram ser possível analisar o problema do deslocamento de fluidos em anulares com o procedimento utilizado e então, voltaram a ser investigadas situações mais complicadas envolvendo fluidos não newtonianos.

Como foi observado que o posicionamento e o alinhamento dos lasers é fundamental para obter boas imagens, foram projetadas e construídas fendas para auxiliar no alinhamento dos feixes de luz. Foram realizados diversos testes com soluções aquosas de carbopol sendo deslocadas por glicerina e soluções aquosas de carbopol deslocando óleo mas ainda não foi possível obter imagens com boa qualidade.

Um dos motivos foi o fato das fendas diminuírem a intensidade da luz, prejudicando a qualidade das imagens, outro motivo é a diferença entre o índice de refração das soluções de carbopol à base de água e os índices de refração do vidro, glicerina e óleo. Mesmo depois de determinadas as melhores configurações da câmera e a utilização de dois lasers inclinados, não foi possível obter boas imagens.

Então foi decidido estudar o formato da interface variando-se a vazão (velocidade) para o deslocamento de óleo por glicerina. Como a bomba tinha sido projetada para um fluido com viscosidade mais baixa que a viscosidade da glicerina pura, o fluido deslocador utilizado foi uma solução de glicerina e água deionizada com concentração de 90% de glicerina em peso.

É também interessante analisar os efeitos da variação da viscosidade no formato da interface. O problema é encontrar fluidos com diferentes valores de viscosidade, mas com índices de refração parecidos. Foram utilizadas novamente soluções de glicerina e foi observado que para concentrações abaixo de 75% de glicerina em peso o índice de refração já fica suficientemente diferente para interferir na qualidade das imagens.

Assim, foi decidido estudar a variação no formato da interface para soluções de glicerina com concentrações de 90% e de 75% em peso. Mesmo essas concentrações sendo próximas, a viscosidade varia bastante e a solução de glicerina com concentração de 90% tem viscosidade 2 vezes maior do que a do óleo e a solução de glicerina com concentração de 75% tem viscosidade 2 vezes menor do que a do óleo. Assim, serão estudados o caso de um fluido newtoniano mais viscoso deslocando um menos viscoso e vice-versa.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621122/CA

Fluido newtoniano mais viscoso deslocando outro fluido newtoniano menos viscoso

O fluido deslocador nesse caso foi uma solução aquosa de glicerina com concentração de 90% e o fluido deslocado foi um óleo vegetal menos viscoso do que a solução de glicerina. As viscosidades dos fluidos foram medidas em um viscosímetro Cannon-Fenske no Laboratório de Caracterização de Fluidos do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio e as densidades foram medidas nesse mesmo laboratório com um picnômetro . Os valores de densidade e viscosidade dos respectivos fluidos encontram-se na tabela 4.3 a seguir:

	densidade (kg/m^3)	viscosidade ($Pa{\cdot}s$)
Óleo vegetal	919,3	0,05
Solução de glicerina 90%	1,2364	0,12

Tabela 4.2: Densidade e viscosidade do óleo e da solução de glicerina 90%.

Foram realizados testes para as vazões $4,7 \cdot 10^{-7} m^3/s$, $4,5 \cdot 10^{-6} m^3/s$ e $8,9 \cdot 10^{-6} m^3/s$.

A figura 4.8 a seguir mostra as imagens obtidas para os testes da solução de glicerina 90% deslocando óleo com vazão de $4,7 \cdot 10^{-7} m^3/s$. Pode ser observado que o formato da interface é praticamente plano, o que indica um processo de deslocamento eficiente. Além disso, pode ser observado que o formato da interface se manteve constante por toda a seção de teste e que ao final do deslocamento, todo o óleo havia sido deslocado pela solução de glicerina.

A figura 4.9 a seguir mostra as imagens obtidas para os testes da solução de glicerina 90% deslocando óleo com vazão de $4,5 \cdot 10^{-6} m^3/s$. Pode ser observado que o formato da interface é ligeriamente menos plano do que para o caso com vazão de $4,7 \cdot 10^{-7} m^3/s$, mas que é ainda plano o suficiente para indicar um processo de deslocamento eficiente. Além disso, pode ser observado que o formato da interface se manteve constante por toda a seção de teste e que ao final do deslocamento, todo o óleo havia sido deslocado pela solução de glicerina.

A figura 4.10 a seguir mostra as imagens obtidas para os testes da solução de glicerina 90% deslocando óleo com vazão de $8,9 \cdot 10^{-6} m^3/s$. Pode ser observado que o formato da interface é ligeriamente mais pontiagudo do que para os casos anteriores com vazões de $4,7 \cdot 10^{-7} m^3/s$ e de $4,5 \cdot 10^{-6} m^3/s$, mas que ainda assim, ao final do teste todo o óleo havia sido deslocado pela solução de glicerina. Além disso, pode ser observado que o formato da interface se manteve constante por toda a seção de teste.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621122/CA

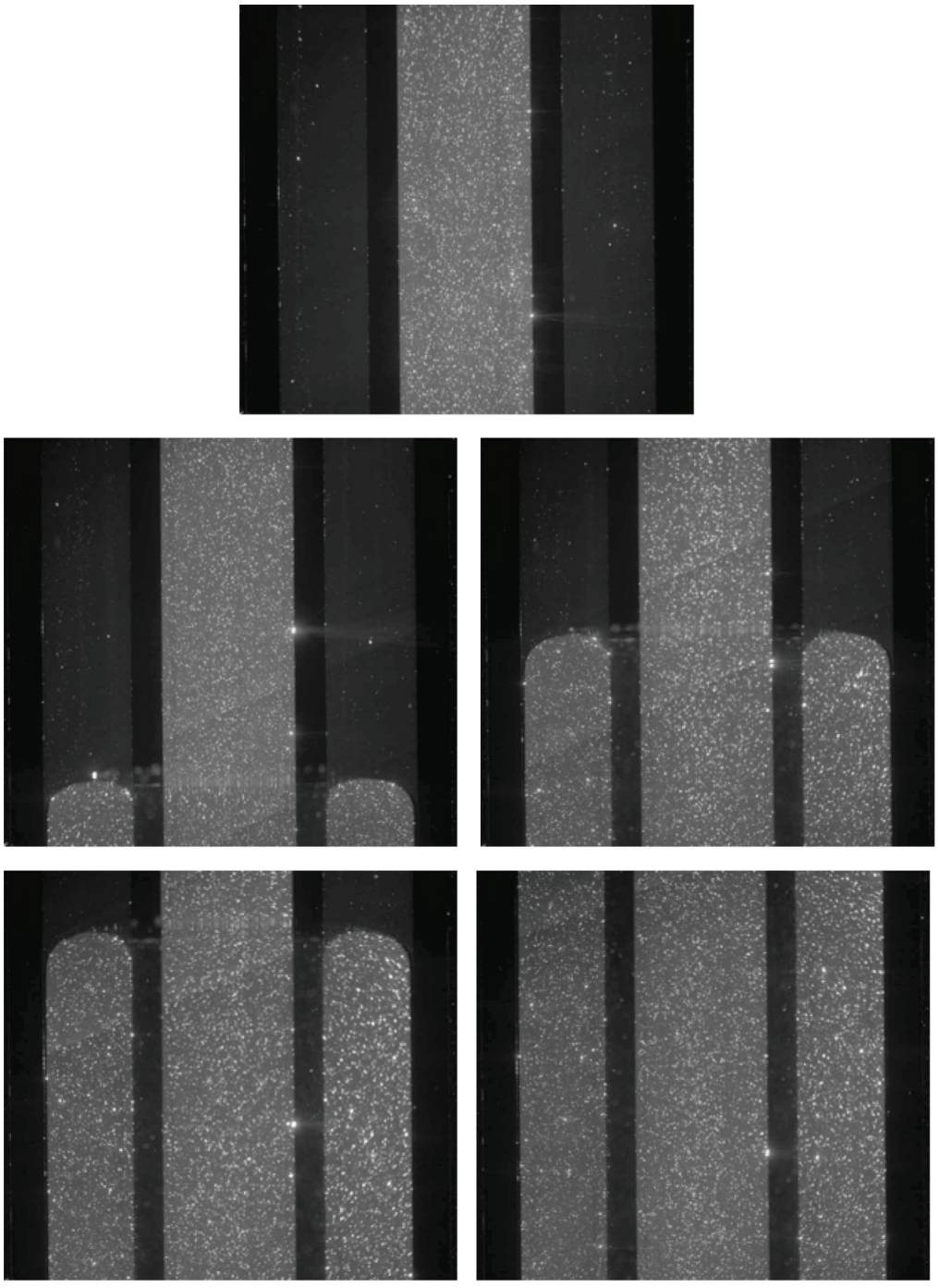

Figura 4.8: Deslocamento do óleo vegetal pela solução de glicerina 90% com vazão de $4,7 \cdot 10^{-7} m^3/s$.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621122/CA

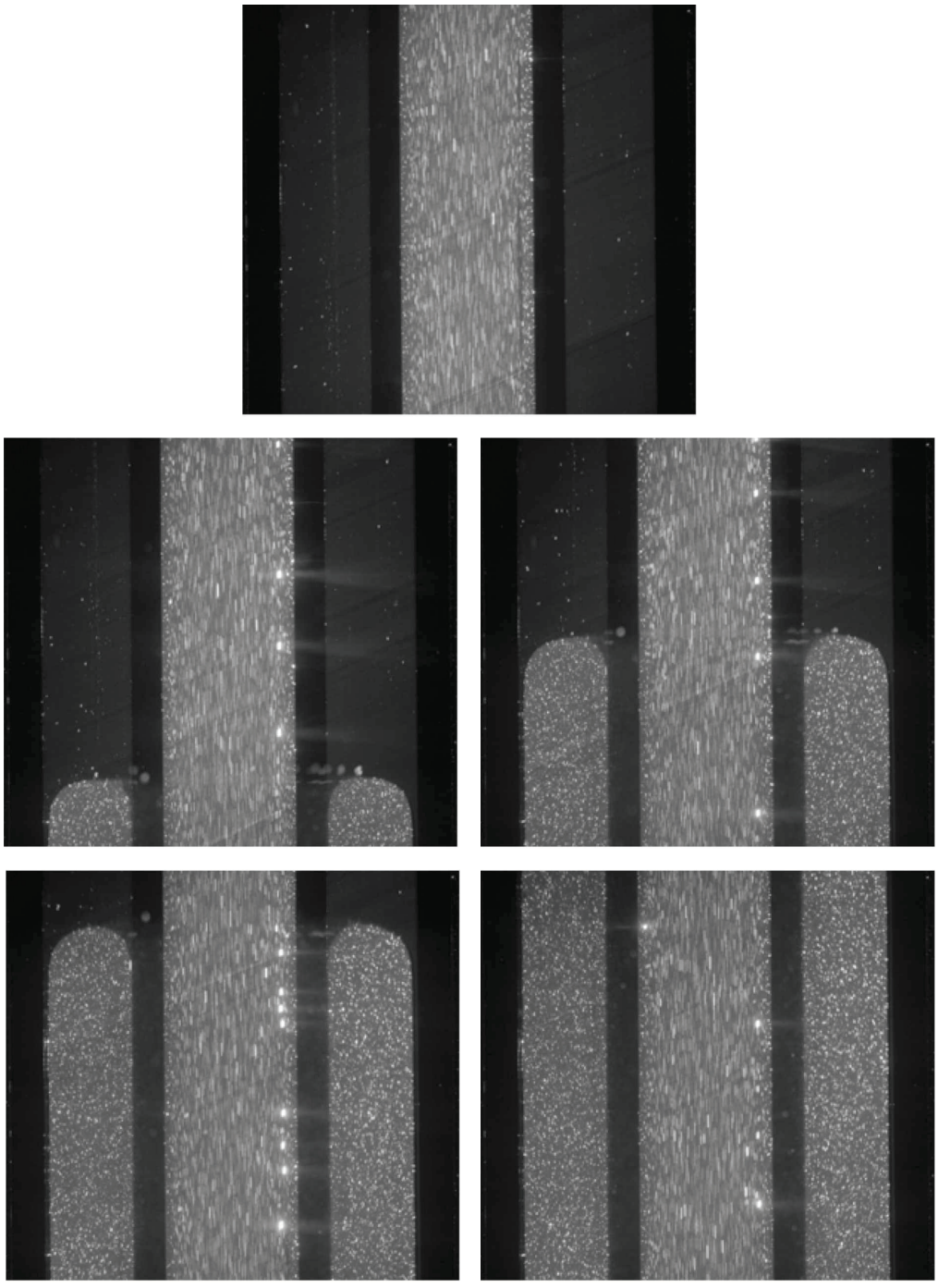

Figura 4.9: Deslocamento do óleo vegetal pela solução de glicerina 90% com vazão de $4,5 \cdot 10^{-6} m^3/s$.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621122/CA

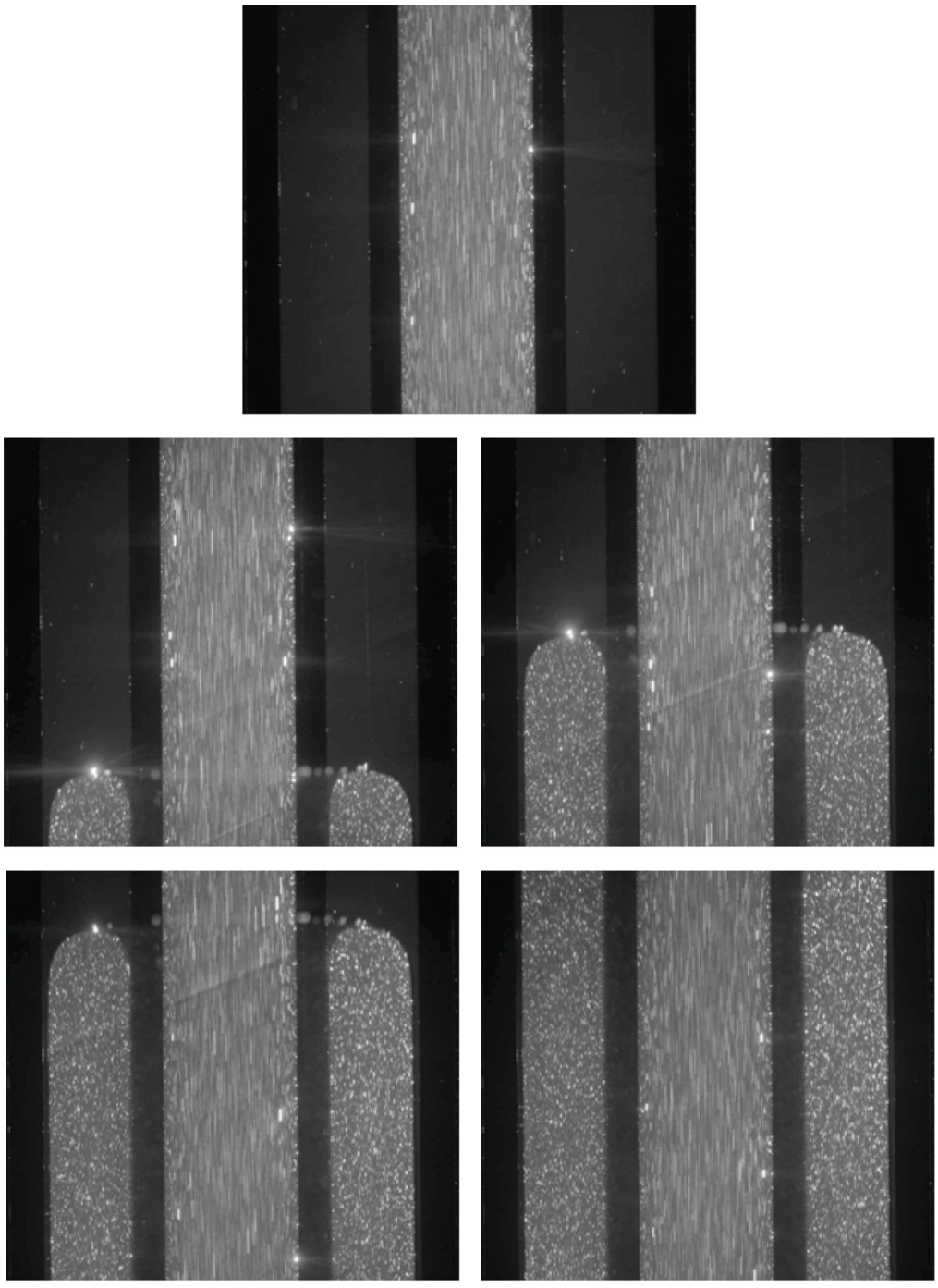

Figura 4.10: Deslocamento do óleo vegetal pela solução de glicerina 90% com vazão de $8,9 \cdot 10^{-6} m^3/s$.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621122/CA

Fluido newtoniano menos viscoso deslocando outro fluido newtoniano mais viscoso

O fluido deslocador nesse caso foi uma solução aquosa de glicerina com concentração de 75% e o fluido deslocado foi um óleo newtoniano mais viscoso do que a solução de glicerina. As viscosidades dos fluidos foram medidas em um viscosímetro Cannon-Fenske no Laboratório de Caracterização de Fluidos do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio e as densidades foram medidas nesse mesmo laboratório com um picnômetro. Os valores de densidade e viscosidade dos respectivos fluidos encontram-se na tabela a seguir:

	densidade (kg/m^3)	viscosidade ($Pa{\cdot}s$)
Óleo vegetal	919,3	0,05
Solução de glicerina 75%	1,1959	0,026

Tabela 4.3: Densidade e viscosidade do óleo e da solução de glicerina 75%.

Foram realizados testes para as vazões $4,7 \cdot 10^{-7} m^3/s$, $4,5 \cdot 10^{-6} m^3/s$ e $8,9 \cdot 10^{-6} m^3/s$.

A figura 4.11 mostra as imagens obtidas para os testes da solução de glicerina 75% deslocando óleo com vazão de $4,7{\cdot}10^{-7} m^3/s$. Pode ser observado, assim como no caso da solução 90% deslocando o óleo nessa mesma vazão, que o formato da interface é praticamente plano, o que indica um processo de deslocamento eficiente. Além disso, pode ser observado que o formato da interface se manteve constante por toda a seção de teste e que ao final do deslocamento, todo o óleo havia sido deslocado pela solução de glicerina.

A figura 4.12 mostra as imagens obtidas para os testes da solução de glicerina 75% deslocando óleo com vazão de $4,5{\cdot}10^{-6} m^3/s$. Pode ser observado, assim como no caso da solução 90% deslocando o óleo nessa mesma vazão, que o formato da interface é ligeiramente menos plano do que para o caso com vazão de $4,7 \cdot 10^{-7} m^3/s$, mas que é ainda plano o suficiente para indicar um processo de deslocamento eficiente. Além disso, pode ser observado que o formato da interface se manteve constante por toda a seção de teste e que ao final do deslocamento, todo o óleo havia sido deslocado pela solução de glicerina.

A figura 4.13 a seguir mostra as imagens obtidas para os testes da solução de glicerina 75% deslocando óleo com vazão de $8,9 \cdot 10^{-6} m^3/s$. Pode ser observado, assim como no caso da solução 90% deslocando o óleo nessa mesma vazão, que o formato da interface é ligeiramente mais pontiagudo do que para os casos anteriores com vazões de $4,7 \cdot 10^{-7} m^3/s$ e de $4,5 \cdot 10^{-6} m^3/s$, mas que ainda assim, ao final do teste todo o óleo havia sido deslocado pela solução de glicerina. Além disso, pode ser observado que o formato da interface se manteve constante por toda a seção de teste.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621122/CA

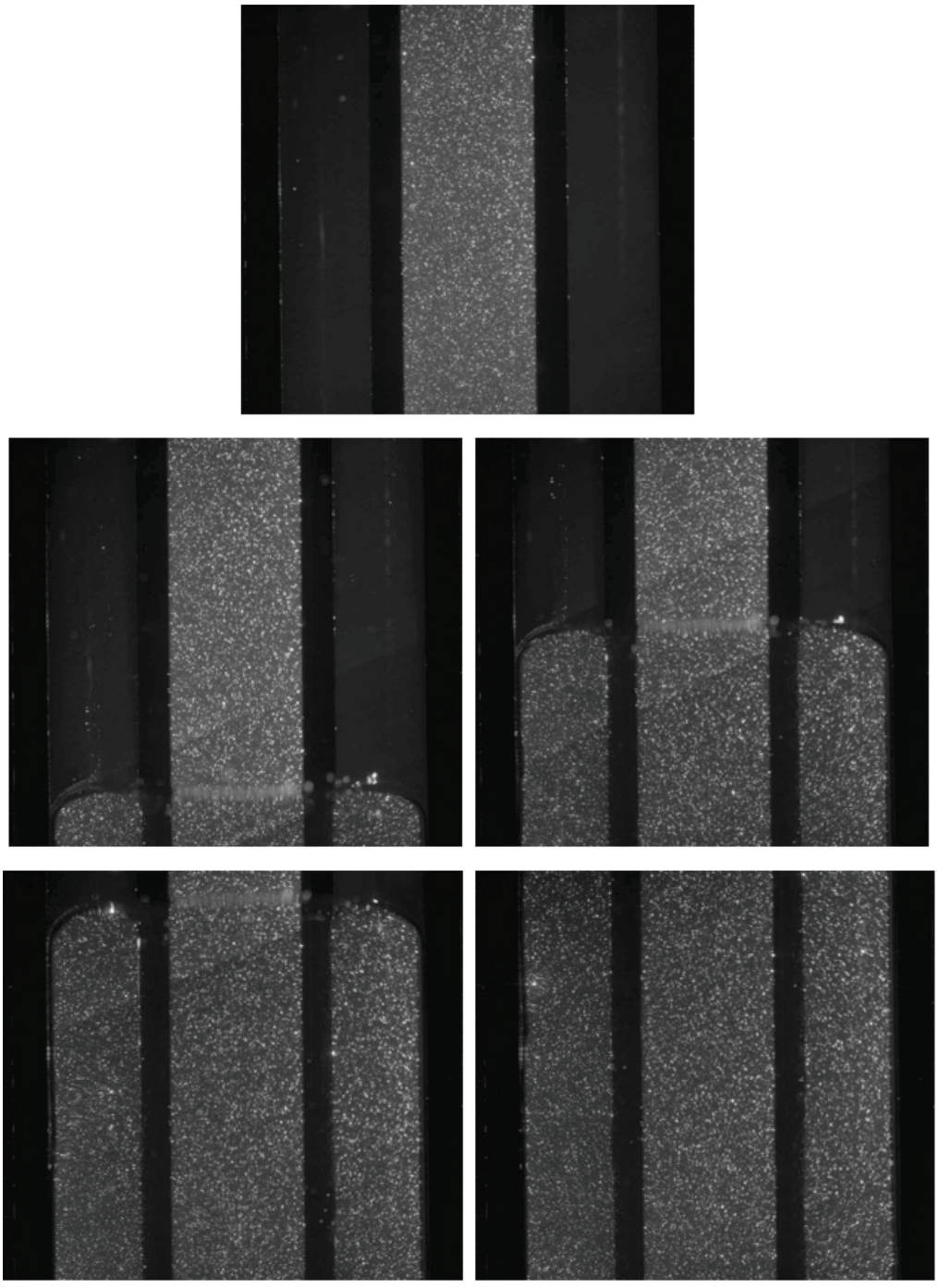

Figura 4.11: Deslocamento do óleo vegetal pela solução de glicerina 75% com vazão de $4,7 \cdot 10^{-7} m^3/s$.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621122/CA

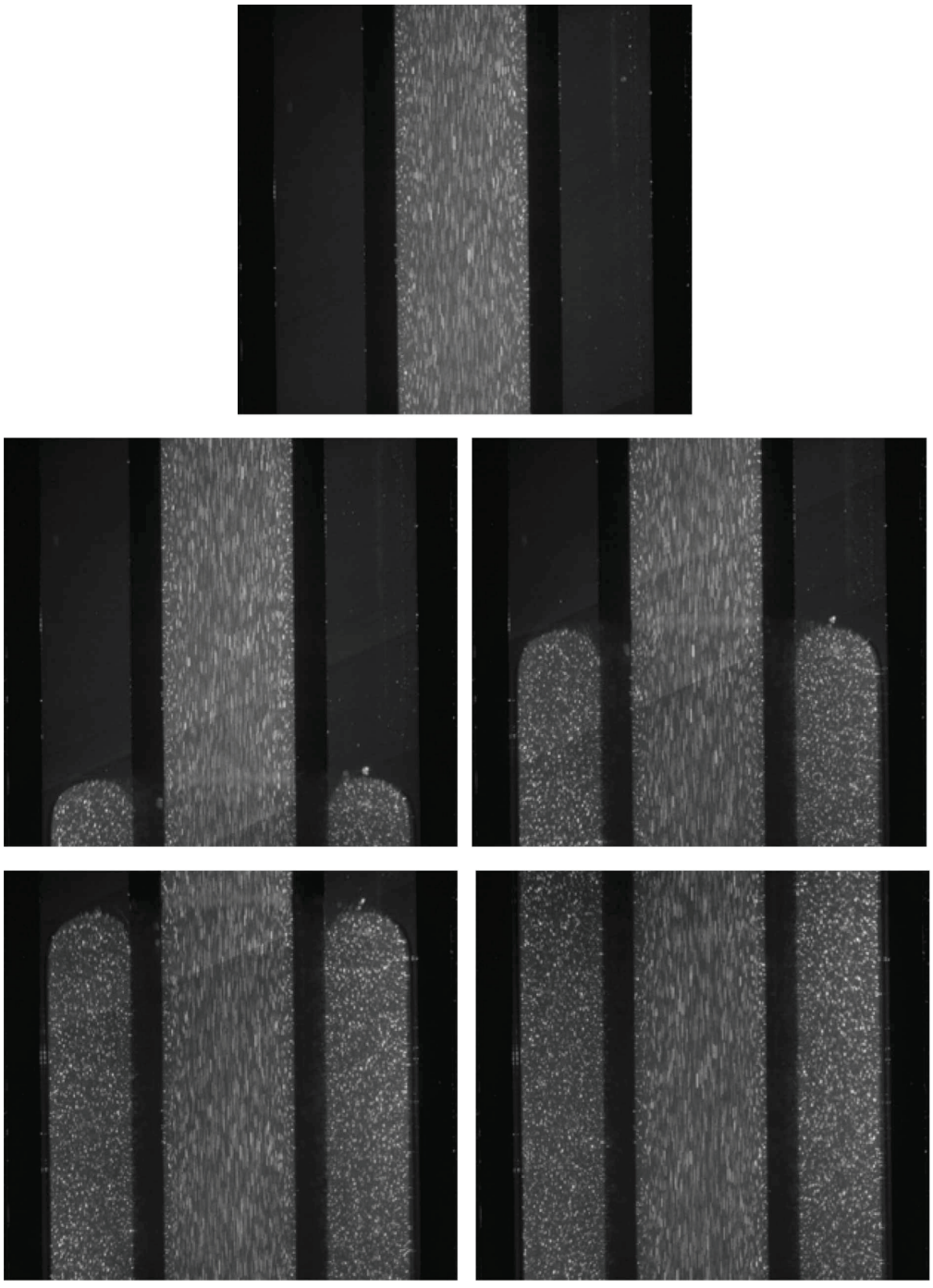

Figura 4.12: Deslocamento do óleo vegetal pela solução de glicerina 75% com vazão de $4,5 \cdot 10^{-6} m^3/s$.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621122/CA

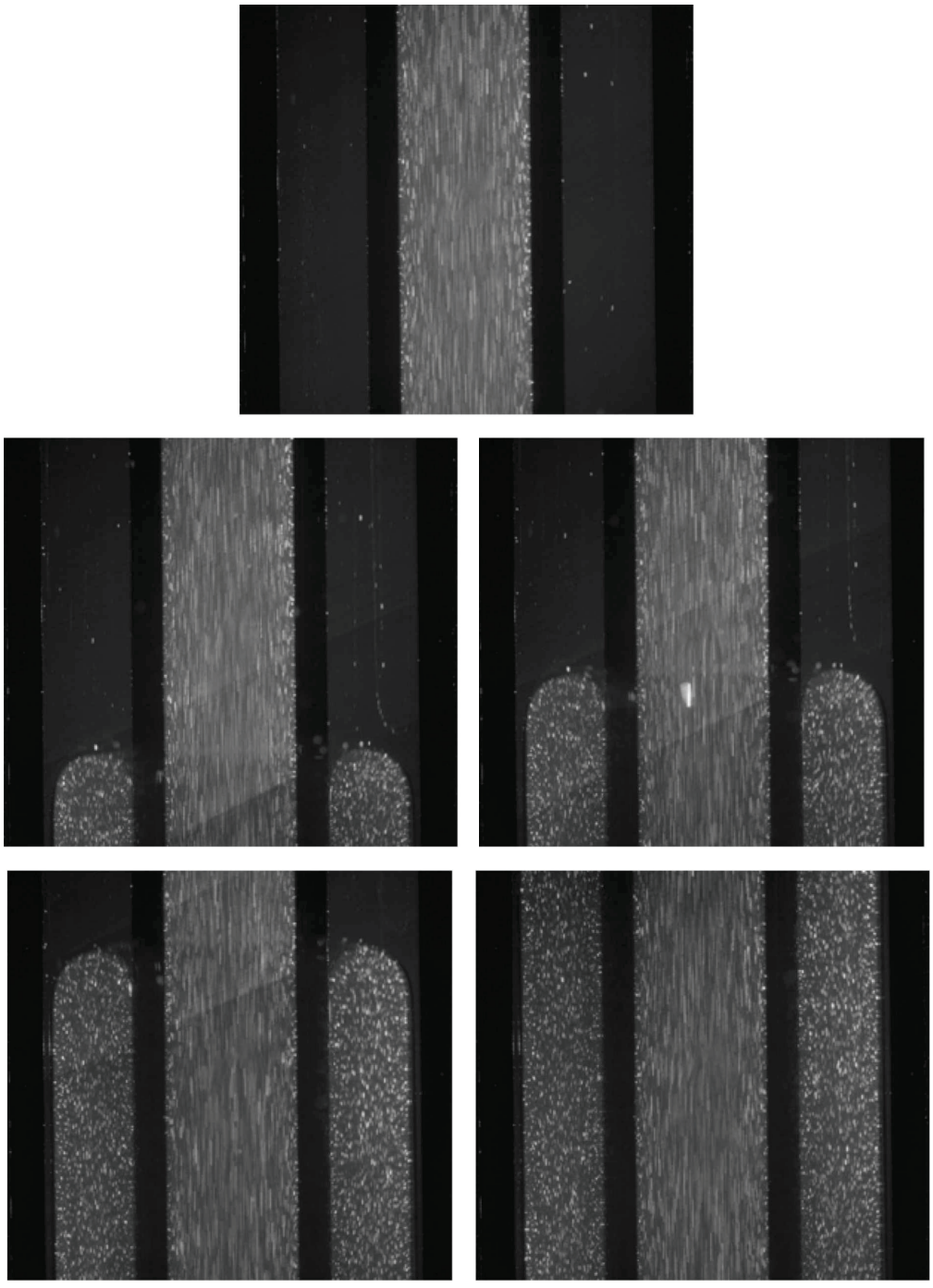

Figura 4.13: Deslocamento do óleo vegetal pela solução de glicerina 75% com vazão de $8,9 \cdot 10^{-6} m^3/s$.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621122/CA

As figuras 4.14, 4.15 e 4.16 a seguir mostram fotos da interface para os dois casos nas vazões de $4,7 \cdot 10^{-7} m^3/s$, $4,5 \cdot 10^{-6} m^3/s$ e $8,9 \cdot 10^{-6} m^3/s$ respectivamente. Foi possível observar que para uma dada vazão, o formato da interface entre os fluidos é aproximadamente o mesmo para o caso do fluido newtoniano mais viscoso (solução de glicerina 90%) deslocando um fluido newtoniano menos viscoso (óleo vegetal) e para o caso de um fluido newtoniano menos viscoso(solução de glicerina 75%) deslocando um fluido newtoniano mais viscoso (óleo vegetal).

Uma possível explicação pode ser que as razões de viscosidade estudadas não foram altas o suficiente para que fosse possível observar uma variação no formato da interface devido á diferença da viscosidade. Provavelmente a razão de densidades foi o parâmetro de maior influência neste experimento.

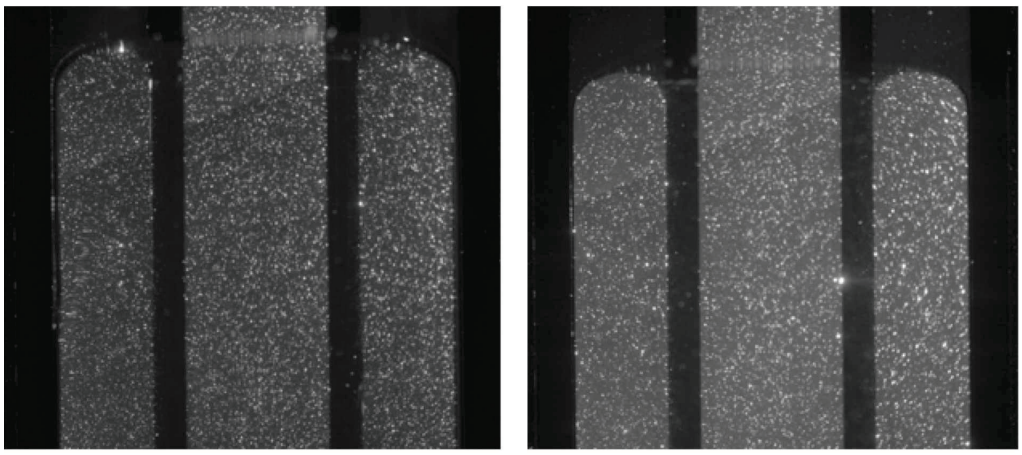

Figura 4.14: Comparação do deslocamento de óleo por soluções de glicerina 75%(esquerda) e 90%(direita) com vazão de $4,7 \cdot 10^{-7} m^3/s$.

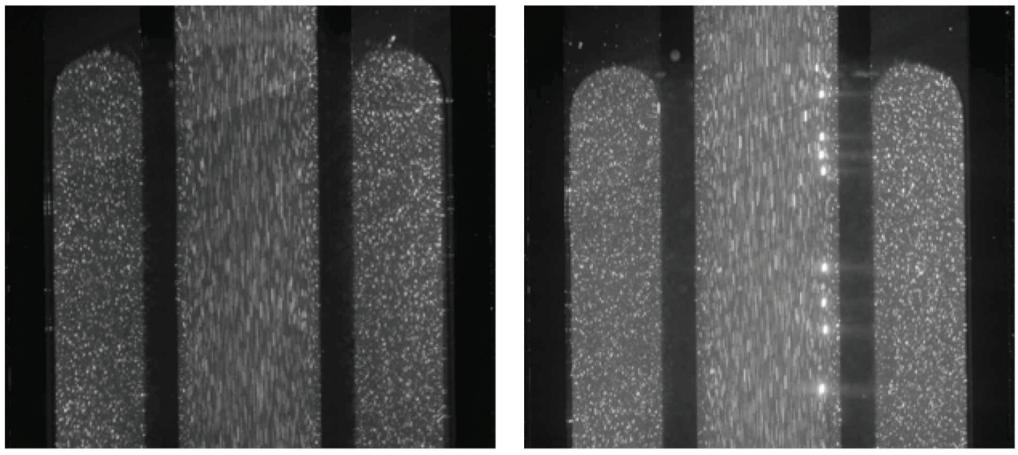

Figura 4.15: Comparação do deslocamento de óleo por soluções de glicerina 75%(esquerda) e 90%(direita) com vazão de $4,5 \cdot 10^{-6} m^3/s$.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621122/CA

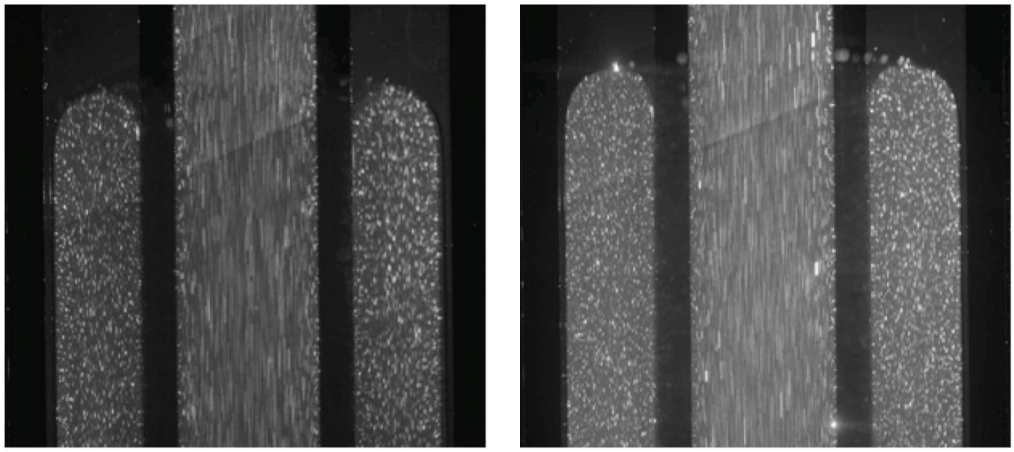

Figura 4.16: Comparação do deslocamento de óleo por soluções de glicerina 75%(esquerda) e 90%(direita) com vazão de $8,9 \cdot 10^{-6} m^3/s$.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0621122/CA