



Pedro José Tobar Espinoza

**Estudo experimental da eficiência na varredura
de líquidos viscoplásticos na célula de Hele-Shaw**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-RIO.

Orientador: Prof. Paulo Roberto de Souza Mendes

Rio de Janeiro
Julho de 2016



Pedro José Tobar Espinoza

**Estudo experimental da eficiência na varredura
de líquidos viscoplásticos na célula de Hele-Shaw**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia de Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-RIO. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Paulo Roberto de Souza Mendes

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica PUC-Rio

Prof. Marcio da Silveira Carvalho

Departamento de Engenharia Mecânica PUC-Rio

Prof. André Leibsohn Martins

CENPES/PETROBRAS

Prof. Marcio da Silveira Carvalho

Coordenador Setorial de Pós-Graduação PUC-Rio

Rio de Janeiro, 21 de Julho de 2016

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Pedro José Tobar Espinoza

Graduou-se em Engenharia Mecânica na Universidad Politécnica Salesiana (Cuenca, Ecuador)

Ficha Catalográfica

<p>Tobar Espinoza, Pedro José</p> <p>Estudo experimental da eficiência na varredura de líquidos viscoplásticos na célula de Hele-Shaw/Pedro José Tobar Espinoza ; orientador: Paulo Roberto de Souza Mendes . - 2016.</p> <p>69 f. : il. color.; 30 cm</p> <p>Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2016.</p> <p>Inclui bibliografía</p> <p>1.Engenharia Mecânica - Teses. 2.Eficiência de varredura. 3.Instabilidade de Saffman-Taylor. 4.Fluidos viscoplásticos 5.Célula de Hele-Shaw I. Mendes, Paulo Roberto de Souza. II. Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.</p>
--

CDD:621

Agradecimentos

Ao meu orientador, Paulo Roberto, pela confiança e apoio durante a execução deste trabalho.

Aos meus pais Diana e René, pelo apoio incondicional e confiança, sem vocês não estaria hoje aqui.

Aos meus amigos do Grupo de Reologia da PUC-Rio. Sem vocês, esse projeto não seria possível. Especialmente para Alexandra, Bruna, Carina, Bruno.

Aos meus amigos e colegas Dario, Eric e Marcos pelo apoio e incentivo. A meus amigos Elias, Behbood, Ricardo, Eliana, e Fábio pelas correções e sua valiosa amizade.

A Priscilla por sua pesquisa, considerada de valor inestimável para a realização do presente trabalho, meu respeito e consideração.

Ao Professor Igor Braga de Paula, pela ajuda na análise das incertezas.

Às agências financiadoras CAPES, CNPq e FAPERJ, assim como à Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro (PUC-Rio) pelo apoio financeiro.

Resumo

Tobar Espinoza, Pedro José; Souza Mendes, Paulo Roberto de. **Estudo experimental da eficiência na varredura de líquidos viscoplásticos na célula de Hele-Shaw**. Rio de Janeiro, 2016. 69p. Dissertação de Mestrado-Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Uma abordagem experimental foi utilizada para o estudo da eficiência de varredura de fluidos viscoplásticos na célula de Hele-Shaw, que representa um meio poroso com porosidade constante. A análise baseia-se em um fluido empurrando outro onde, pela razão de viscosidades acima do ponto de referência, manifesta-se a instabilidade de Saffman-Taylor, que desencadeia em uma interface instável com divisões sucessivas conhecidas como *viscous fingers*. A formação da instabilidade é considerada uma condição indesejável, e no caso da indústria petrolífera, torna-se de interesse na invasão da formação pelo fluido de perfuração, pasta de cimento, e no deslocamento de petróleo pesado em reservatórios entre outros. Apesar de que o fenômeno é vastamente estudado utilizando a célula de Hele-Shaw, a maioria dos trabalhos concentram-se no deslocamento de líquidos newtonianos por ar, deixando uma ampla gama de possibilidades de estudo, particularmente no que diz respeito aos fluidos não newtonianos. Utilizando equipamentos que permitem assegurar uma vazão constante de injeção, testou-se três concentrações diferentes de solução aquosa de carbopol em duas configurações diferentes onde o líquido viscoplástico é o deslocador e vice-versa. Fazendo uso do processamento digital de imagens, avaliou-se a forma da interface em função do desvio padrão, além da velocidade e da eficiência de varredura no deslocamento. Determinaram-se parâmetros adimensionais em função da geometria da bancada e dos fatores dinâmicos e reológicos dos fluidos onde se obtiveram duas zonas bem marcadas de varredura. Observou-se que a razão de viscosidades e o número de capilaridade modificada crítica são os indicadores que governam o deslocamento.

Palavras-Chave

Eficiência de varredura; Instabilidade de Saffman-Taylor; Fluidos viscoplásticos; Célula de Hele-Shaw; .

Abstract

Tobar Espinoza, Pedro José; Souza Mendes, Paulo Roberto de (Advisor). **Experimental study of sweep efficiency of viscoplastic fluid in Hele-Shaw cell.** Rio do Janeiro, 2016. 69p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

An experimental approach has been used to study the sweep efficiency of viscoplastic fluid in a Hele-Shaw cell, which represents a porous medium with constant porosity. The analysis is based on a lower viscosity fluid pushing a more viscous through a geometry, which manifests the instability of Saffman-Taylor, that result in an unstable interface with successive divisions known as viscous fingers. The occurrence of instability is considered an undesirable condition, and in the petroleum oil industry, it becomes of interest in the reservoir oil invasion and heavy oil displacement in reservoirs. Despite being widely studied, most studies focus on the displacement of Newtonian liquids by air, leaving the field of study of non-Newtonian fluids without being evaluated where none of viscosities of the fluids involved can be considered negligible. Using equipment that ensures a constant flow rate of injection three different aqueous concentrations of carbopol were tested in two different configurations: carbopol as the displacing fluid and vice-versa. Using digital image processing, the shape interface was evaluated according to their standard deviation, average velocity and efficiency sweep during the displacement. Determined dimensionless parameters was evaluated in function of the experimental geometry, dynamic and rheological factors of the fluids in order to get benchmark that allow separating interfaces zones that tend to 100 % or plugs and the zone where the viscous fingers reveal themselves. It was found that the viscosity ratio and modified critical capillary govern the displacement.

Keywords

Sweep efficiency; Saffman-Taylor instability; Viscoplastic fluid; Hele-Shaw cell.

Sumário

1	Introdução	15
1.1	Motivação	15
1.2	Objetivo da pesquisa	16
1.3	Visão geral da dissertação	16
1.4	Revisão Bibliográfica	17
2	Materiais e Métodos	22
2.1	Características dos fluidos utilizados	22
2.1.1	Óleo	22
2.1.2	Solução de Carbopol	22
2.2	Bancada experimental	23
2.2.1	Célula de Hele-Shaw	24
2.2.2	Iluminação da bancada	26
2.2.3	Câmera Fotográfica	26
2.2.4	Bomba peristáltica	27
2.3	Tensão superficial	27
2.4	Procedimento experimental	28
2.4.1	Deslocamento dos fluidos	28
2.4.2	Procedimento após os testes	29
2.5	Imagem Digital	30
2.6	Processamento digital de imagens	30
2.6.1	Pré-processamento das imagens	31
2.6.2	Segmentação	33
2.6.3	Pós-processamento das imagens	35
2.6.4	Extração de Atributos	36
3	Análise	38
3.1	Teorema de de Buckingham	38
3.1.1	Fatores adimensionais	38
3.1.2	Razão de viscosidade ($R\mu$)	41
3.2	Forma da interface	44
3.3	Forças capilares	46

4	Resultados	47
4.1	Caracterização reológica das fluidos	47
4.1.1	Taxa de cisalhamento constante ($\dot{\gamma}_{const}$)	47
4.1.2	Curva de escoamento (<i>Flow curve</i>)	48
4.1.3	Dependência da viscosidade com respeito à temperatura	49
4.2	Eficiência em função das Razões de viscosidades	50
4.2.1	Concentrações de carbopol deslocando óleo em função de $R\mu_1$ e vice-versa	50
4.2.2	Eficiência como uma função das três fases do desvio padrão adimensional	52
4.3	Interfaces desenvolvidas so longo dos escoamentos	53
4.4	Efeitos da inercia na célula de Hele-Shaw	59
4.5	Efeitos da capilaridade no deslocamento de fluidos imiscíveis	60
5	Conclusões	62
5.1	Conclusões	62
5.2	Recomendações	63
6	Referências bibliográficas	64

Lista de Figuras

1-1	Formação de viscous fingers	15
1-2	Representação esquemática da célula de Hele Shaw	17
2-1	Amostra de carbopol peneirado	23
2-2	Detalhe da bancada experimental	24
2-3	Detalhe da vedação entre as placas	25
2-4	Nivelamento da bancada	25
2-5	Tensiômetro de anel de Du Nouy	28
2-6	Esquema da bancada	29
2-7	Representação esquemática de uma Imagem digital	30
2-8	Sequência de processamento e análise de imagens	31
2-9	Transição de RGB para tons de cinza	32
2-10	Sequência do filtro passa baixa. Primeira imagem na esquerda: Aplicação do filtro. Imagem para baixo : Pixel resultante. A sequência começa na parte superior esquerda e segue até atingir o lado direito	33
2-11	Correção de iluminação irregular. Histograma da imagem sem correção (esquerda). Histograma da imagem corrigida (direita).	33
2-12	Uso do comando <i>Auto threshold</i>	34
2-13	Janela de visualização	35
2-14	Resultado da segmentação da interface entre os fluidos	35
2-15	Uso do comando <i>imfill</i>	36
2-16	Deteção de bordas	36
2-17	Cálculo da área. a) <i>Area</i> b) <i>Area</i>	37
3-1	Representação esquemática do escoamento entre placas planas de um fluido viscoplástico	41
3-2	Desenvolvimento da interface a diferentes velocidades	43
3-3	Esquema do cálculo do desvio padrão	45
4-1	Reômetro rotacional AR-G2	47
4-2	Determinação do regime permanente para suspensão de carbopol (esquerda) e óleo mineral (direita)	48

- 4-3** *Flows curves* a) Carbopol 0.08 % b) Carbopol 0.10 % c) Carbopol 0.12 % d) óleo mineral. 49
- 4-4** Dependência à temperatura do carbopol (esquerda) e óleo mineral (direita) 50
- 4-5** Eficiência em função de $R\mu_1$ quando o fluido deslocador é a) as soluções de carbopol, b) o óleo mineral. 51
- 4-6** Eficiência em função de $R\mu_2$ quando o fluido deslocador é a) soluções de carbopol b) óleo mineral. 51
- 4-7** Desvio padrão adimensional em função de $R\mu_1$ quando o fluido deslocador é a) as suspensão de carbopol, b) óleo mineral. 53
- 4-8** Desenvolvimento da interface de Carbopol deslocando óleo em concentração 0.08%. Imagem esquerda da primeira linha: $R\mu_1 = 0.7404$. Imagem na direita da primeira linha: $R\mu_1 = 0.8024$. Imagem esquerda da segunda linha: $R\mu_1 = 0.8486$. Imagem direita da segunda linha: $R\mu_1 = 0.945$ 54
- 4-9** Desenvolvimento da interface de Carbopol deslocando óleo em concentração 0.1%. Imagem esquerda da primeira linha: $R\mu_1 = 0.19$. Imagem na direita da primeira linha: $R\mu_1 = 0.4915$. Imagem esquerda da segunda linha: $R\mu_1 = 0.5256$. Imagem direita da segunda linha: $R\mu_1 = 0.7045$ 55
- 4-10** Desenvolvimento da interface de Carbopol deslocando óleo em concentração 0.12%. Imagem esquerda da primeira linha: $R\mu_1 = 0.26$. Imagem na direita da primeira linha: $R\mu_1 = 0.3919$. Imagem esquerda da segunda linha: $R\mu_1 = 0.5141$. Imagem direita da segunda linha: $R\mu_1 = 0.7429$ 56
- 4-11** Desenvolvimento da interface do óleo deslocando carbopol em concentração 0.12%. Imagem esquerda da primeira linha: $R\mu_1 = 1.9$. Imagem na direita da primeira linha: $R\mu_1 = 0.8170$. Imagem esquerda da segunda linha: $R\mu_1 = 0.4711$. Imagem direita da segunda linha: $R\mu_1 = 0.0500$ 57
- 4-12** Desenvolvimento da interface do óleo deslocando carbopol em concentração 0.1%. Imagem esquerda da primeira linha: $R\mu_1 = 1.9926$. Imagem na direita da primeira linha: $R\mu_1 = 0.7599$. Imagem esquerda da segunda linha: $R\mu_1 = 0.4802$. Imagem direita da segunda linha: $R\mu_1 = 0.071$ 58
- 4-13** Desenvolvimento da interface do óleo deslocando carbopol em concentração 0.08%. Imagem esquerda da primeira linha: $R\mu_1 = 2.855$. Imagem na direita da primeira linha: $R\mu_1 = 2.2687$. Imagem esquerda da segunda linha: $R\mu_1 = 0.9426$. Imagem direita da segunda linha: $R\mu_1 = 0.6333$ 59
- 4-14** a) Re em função de $R\mu_2$, b) We^* em função de $R\mu_2$. 60

4-15 Eficiência em função de Ca sendo o fluido deslocador a) carbopol e b) óleo mineral.

61

Lista de Tabelas

2-1	Característica do Óleo Mineral	22
2-2	Diferentes razões usadas em trabalhos anteriores e comparação com a razão do trabalho atual	26
2-3	Especificações técnicas do Negatoscopio	26
2-4	Configuração da Câmera Canon DS126251	27
2-5	Especificações da Bomba peristáltica	27
3-1	Parâmetros em função das dimensões primárias	38
4-1	Tensão interfacial	60

Inspiration exists, but it has to find you working.

Pablo Picasso

1 Introdução

1.1 Motivação

O deslocamento de um fluido causado pelo escoamento de outro fluido é muito comum em cavidades estreitas. Portanto é indispensável conhecer os fenômenos influentes na formação da interface entre eles. Duas possíveis configurações de interfaces podem se formar ao longo do deslocamento de fluidos. Quando um fluido de maior viscosidade desloca um fluido de menor viscosidade, uma interface plana e estável se forma entre eles. Porém, se é injetado um fluido mais viscoso a fim de deslocar um menos viscoso, se observa a instabilidade de Saffman-Taylor. A instabilidade é a evolução temporal da interface entre os fluidos marcada por sucessivas bifurcações, resultando ramificações conhecido como *viscous fingers*, que podem ser observadas na figura 1-1.



Figura 1-1: Formação de viscous fingers

Estudos levaram ao desenvolvimento de aproximações bidimensionais para este tipo de problema. Uma das simplificações mais utilizadas é a chamada célula de Hele-Shaw. Esta *célula* é um equipamento composto por duas placas planas paralelas, geralmente de vidro, separadas por uma distância pequena o suficiente para que o escoamento seja considerado quasi-bidimensional.

Em parte majoritária das pesquisas que foram feitas até agora, a partir do trabalho pioneiro em 1898 [29], o fluido deslocado possui comportamento newtoniano e a viscosidade do deslocador é considerada invíscida. Em geral, ar [30] é o fluido utilizado como deslocador. No entanto, apenas nos últimos quarenta anos, estudos com fluidos não newtonianos vêm sendo feitos, e em sua maioria estudos numéricos, o que abre uma ampla gama de possibilidades de estudos.

Apesar da riqueza de aplicações nas quais a instabilidade é considerada benéfico em algumas situações práticas, eficiência na varredura por exemplo, o surgimento de estruturas com divisões consecutivas não é desejável. A eficiência de varredura em células horizontais depende do esquema de injeção, da razão de mobilidade entre os fluidos e o volume de fluido injetado percentualmente até um determinado instante.

Para obter boas varreduras, é necessário que todas as eficiências sejam altas. Quando as eficiências são baixas, o fluido injetado encontrou caminhos preferenciais, o que faz que ele se desloque rapidamente deixando grandes porções de fluido deslocado intacto.

Neste trabalho, explorou-se o comportamento da eficiência de varredura através de uma célula retangular de Hele-Shaw carregada com óleo mineral e deslocada por uma solução de carbopol ou vice-versa. Uma serie de testes experimentais foram feitos a fim de obter as eficiências a diferentes vazões de injeção e conhecer os mecanismos que regem o escoamento.

1.2

Objetivo da pesquisa

A presente pesquisa tem como objetivo, utilizando uma abordagem experimental, estudar a eficiência de deslocamento numa célula retangular de Hele-Shaw, quando um fluido viscoplástico (solução aquosa de carbopol) desloca um fluido newtoniano e vice-versa. O estudo é realizado em função dos parâmetros geométricos, dinâmicos e reológicos que governam o escoamento. Estas situações são de interesse para o estudo da invasão de formação pelo fluido de perfuração e pasta de cimento, e no deslocamento de petróleo pesado em reservatórios.

1.3

Visão geral da dissertação

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos. No capítulo 1, a motivação e objetivos desta pesquisa são brevemente descritos, além da pesquisa bibliográfica. No Capítulo 2 descreve-se os métodos e materiais utilizados, o que compreende a configuração da bancada, o processamento digital de imagens e as características dos fluidos utilizados.

O capítulo 3 detalha o modelo matemático utilizado, no qual baseiam-se as razões de viscosidades propostas e o procedimento de cálculo do desvio padrão adimensional da interface. Além disso, é exposta a metodologia utilizada para avaliar a influência das forças capilares no deslocamento.

Os resultados da pesquisa são apresentados no Capítulo 4: dados da eficiência em função das razões de viscosidade propostas (Secção 4.2.1 e 4.2.3) do desvio padrão adimensional (Secção. 4.2.2), os efeitos da inércia (secção 4.4), das forças capilares (Secção. 4.5).

As principais conclusões da presente pesquisa são destacadas no capítulo 5, além de sugestões para trabalhos futuros.

1.4

Revisão Bibliográfica

Henry Selby Hele-Shaw foi o primeiro a descrever em 1898, o deslocamento de um fluido entre duas placas planas paralelas. O aparelho mencionado será conhecido posteriormente como a célula de Hele-Shaw. O escoamento através do equipamento é análogo com a lei de Darcy [50]. O estudo de deslocamento de fluidos através da célula de Hele-Shaw é investigado há muitas décadas, tanto teórica e experimentalmente [23,39,46]. Hele Shaw, argumentou que durante um escoamento em um tubo ou canal com os lados molhados, a velocidade máxima é atingida no plano simétrico entre as placas e é nula nas paredes, devido à suposição de não deslizamento [29]. A bancada desenvolvida por ele é formada por duas placas horizontais paralelas de comprimento L , e largura W que são espaçadas por um altura b estreita o suficiente para que o escoamento seja considerado bidimensional. Dita célula é representada esquematicamente na figura 1-2.

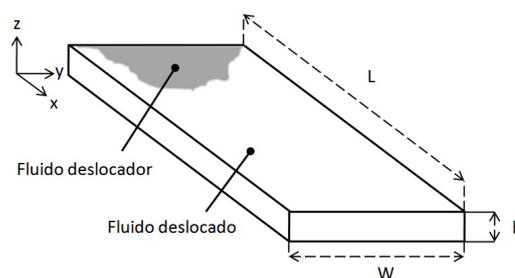


Figura 1-2: Representação esquemática da célula de Hele Shaw

Saffman et al. [55] publicaram resultados sobre a interface que se forma quando um fluido viscoso que preenche os espaços vazios da bancada é deslocado por outro cuja velocidade é perpendicular à interface. Caso o fluido deslocador possua uma viscosidade menor em relação ao deslocado, apresenta-se a instabilidade de Saffman Taylor. Assumindo que o meio poroso é contínuo e que os fluidos são incompressíveis e imiscíveis, a razão adimensional $\lambda \approx 0.5$ se cumpre, sendo

$\lambda = w/W$ onde w é a largura do dedo viscoso e W é a largura do canal. Os pesquisadores obtiveram, em seus experimentos, um único dedo viscoso, localizado entre duas colunas de mesma largura dentro do canal.

McLean e Saffman [44] estudaram a interface em regime permanente fazendo a análise numérica das equações não lineares. Os resultados estiveram próximos do esperado sendo comparados com estudos experimentais anteriores. Encontrou-se dependência entre a largura do dedo viscoso e do canal com base à tensão superficial.

Hormsy et al. [30] fizeram estudos sobre o deslocamento de um fluido viscoso por um menos viscoso na célula de Hele-Shaw, cujo comportamento é semelhante ao de um meio poroso homogêneo com permeabilidade constante. O autor descreveu o fenômeno da instabilidade dos *viscous fingers* como o enfraquecimento da tensão superficial do finger maior, ficando susceptível à formação de novas ramificações. Foram observadas incoerências nas afirmações feitas pelo autor, já que ele supõe que as condições de contorno dinâmicas são independentes da tensão superficial. Essa dependência foi confirmada mais tarde por novos testes, que confirmaram que a largura dos *viscous fingers* é função do número de capilaridade, que depende da tensão superficial. Homsy propôs que a divisão dos fingers ocorre de acordo com as condições físicas do escoamento, as quais tentam explicar o comportamento da interface. Se estabeleceram três parâmetros importantes: número de capilaridade modificado, que determina a relação entre as forças viscosas e a tensão superficial; razão de viscosidade dos fluidos e o número modificado de Darcy-Rayleigh que apresenta a importância relativa entre as forças de empuxo e as viscosas.

A teoria proposta por Homsy [30] tenta explicar o fenômeno do crescimento dos *viscous fingers* e o fato de que, se houver um *finger* maior na frente, ele inibirá o crescimento de outros.

Em um estudo sobre a formação dos *viscous fingers*, Bensimon et al. [6, 7], argumentaram a existência da instabilidade de Saffman-Taylor relacionada com uma não-linearidade do dedo penetrante em tensões superficiais baixas. Modelaram numericamente os *viscous fingers* que se formam no deslocamento de um fluido por outro. Concluíram que a instabilidade não linear decresce exponencialmente com o incremento da velocidade. Ewing et al. [24] fizeram simulações numéricas dos *viscous fingers*, obtendo aproximações precisas das velocidades do fluxo por método de elementos finitos mistos.

Perkins et al. [48] analisaram o escoamento de fluidos imiscíveis numa célula linear de Hele-Shaw com mecanismo de injeção de partículas. Durante o estudo, os autores observaram movimentos das fases em uma direção transversal à do

fluxo da interface, sob condições controladas de injeção de ar. Nessas condições, formaram-se zonas de transição que cresceram afastadas da zona de injeção. A distribuição de saturação da zona de transição é descrita matematicamente pelo coeficiente de dispersão imiscível, obtido a partir da velocidade interfacial, do produto do diâmetro das partículas e do fator de empacotamento. Foi concluído que a célula não é adequada para a modelagem de todos os fenômenos significativos que influenciam a formação dos *viscous fingers* imiscíveis em um reservatório, particularmente a dispersão e os efeitos de permeabilidade relativa.

Ayub et al. [4] perceberam a importância da tensão superficial na dinâmica do deslocamento e fizeram estudos nos quais concluíram que a tensão superficial influencia extremamente e recomendaram a sua incorporação na formulação de Darcy, com o objetivo de prever o comportamento do fenômeno de uma forma mais próxima da realidade.

Toda uma classe diferente de comportamentos e padrões de ramificações foi observada um pouco mais tarde, quando a instabilidade foi estudada para fluidos não newtonianos [9,10,19,33,34,43,58,59]. A maioria dos fluidos estudados nos experimentos mostram várias propriedades não newtonianas, sobressaindo os resultados obtidos nas soluções poliméricas que podem exibir tanto pseudo-elasticidade como diferenças de tensão normal. No caso de fluidos visco-plásticos [5], os mesmos apresentam tensão limite de escoamento; cuja definição refere-se à tensão mínima para iniciar o escoamento. Os mencionados fluidos visco-plásticos, utilizados como fluido deslocador nos experimentos na célula de Hele-Shaw, mostraram um comportamento na qual sua razão de mobilidade não pode ser atribuída a um único valor global. De acordo com Lee [33], depende de uma razão de mobilidade local. Alguns pesquisadores tentaram, com análise numérica, obter os efeitos de elasticidade e pseudoplasticidade [59]. Experiências com soluções poliméricas diluídas e semi-diluídas foram feitas por Smith et al. e Bonn et al. [9,58], concluindo que o início da instabilidade ocorre mais cedo do que com fluidos newtonianos.

Foi estudado também o deslocamento imiscível em uma célula radial de Hele-Shaw usando fluidos não newtoniano de alta viscosidade por um fluido newtoniano de baixa viscosidade [16,42,54,57], concluindo que a tensão interfacial tem pouca influência sobre a formação dos *viscous fingers*.

Autores asseguram que na formação de *viscous fingers* em fluidos miscíveis, as forças viscosas do fluido deslocador têm uma maior incidência do que as forças do fluido deslocado [18,32,47,56].

Bem Amar et al. [3], fizeram estudos teóricos da formação da interface quando um fluido não newtoniano é deslocado numa célula de Hele-Shaw radial. Os resultados

preveem uma redução da largura do dedo λ que vai a zero para grandes valores de velocidade, para fluidos cuja viscosidade ajusta-se ao modelo Power-Law.

Todos os estudos anteriores são baseados no pressuposto de que o deslocamento e seus efeitos na célula de Hele-Shaw podem ser descritos desprezando a inércia. No entanto aquela hipótese não é válida nos casos em que a inércia desempenha um papel relevante, como é o caso para células de Hele-Shaw com um espaçamento entre as placas considerável, fluidos de baixa viscosidade, e em grandes velocidades de deslocamento [28]. A primeira proposta para incluir o efeito da inércia foi feita por Gondret et al. [25]. Os autores estudaram experimentalmente o fluxo paralelo em uma célula de Hele-Shaw de dois fluidos imiscíveis, estabelecendo correções incluindo a inércia.

Casademunt [13] estudou os efeitos da tensão superficial na instabilidade de Saffman Taylor em uma geometria de placas planas, enfatizando a importância da razão de viscosidades entre os fluidos, mostrando que para razões baixas de viscosidade, o efeito de blindagem [30] pode ser considerada desprezível ao contrário do que ocorre com razões altas.

Yamamoto et al. [62] estudaram experimentalmente a estrutura e o crescimento dos *viscous fingers* em uma célula retangular de Hele-Shaw. Foram usados para a experiência fluidos newtonianos e não newtonianos obtendo resultados nos quais os fluidos pseudo-plásticos apresentam efeitos de blindagem, formando estruturas ramificadas [61] previamente descritas por Homsy [30]. Mais uma vez, Yamamoto et al. [60] fizeram estudos de deslocamento de fluidos imiscíveis, mas nesta ocasião foi usado o método de volumes finitos para descrever o comportamento dos *viscous fingers*, supondo o modelo de Carreau para a viscosidade não newtoniana. Os resultados encontraram o efeito de blindagem em fluidos pseudo-plásticos.

Chevalier et al. [17] estudaram experimentalmente o efeito da inércia na largura dos *fingers* a altas velocidades, ou seja, para Reynolds maiores de 100, e concluíram que os efeitos devem ser considerados devido à sua grande influência sobre a dinâmica do escoamento.

Martyushev et al. [40] fizeram análise linear da instabilidade da interface para um fluido radialmente deslocado a uma taxa constante considerando o tamanho finito da célula de Hele-Shaw. Os cálculos foram realizados considerando-se o tamanho do sistema e a viscosidade do fluido deslocador diferente de zero. Verificou-se que a sensibilidade do deslocamento depende da razão de viscosidades e do tamanho da célula. A análise foi feita com e sem a influência da tensão superficial [31].

As influências inerciais sobre deslocamentos imiscíveis foram investigadas por Dias et al. [22]. Os pesquisadores realizaram experimentos de deslocamentos de

fluidos imiscíveis e verificaram que os efeitos inerciais podem alargar os *fingers*. Confirmou-se que a inércia tende a estabilizar o deslocamento na fase linear, ao mesmo tempo que alarga os dedos no regime não linear; portanto a lei de Darcy não é válida nos casos em que a inércia desempenha um papel relevante, como para as células de Hele-Shaw com grandes velocidades de deslocamento [28].

Yuan et al. [63], estudaram numericamente os efeitos de inércia sobre deslocamentos de fluidos miscíveis em uma célula de Hele-Shaw. As simulações mostraram que os efeitos da inércia tendem a atenuar a formação dos *viscous fingers*, e um análise quantitativa mostrou que a zona de mistura pode estender-se até o regime dispersivo.

Uma influência adversa no deslocamento, quando a instabilidade de Saffman-Taylor manifesta-se tanto em fluidos miscíveis e imiscíveis, é observada devido à varredura não uniforme [33]. Sendo um fator limitante na recuperação de petróleo bruto [30, 33, 55].

Uma abordagem diferente tornou-se forte nos últimos tempos, na qual tenta-se desenvolver mecanismos para impedir o desenvolvimento dos *viscous fingers*. A primeira etapa das pesquisas focou-se em conhecer os fatores envolvidos na formação [15, 35], mas posteriormente centrou-se em obter mecanismos que sejam capazes de diminuir a propagação dos *fingers*. A substituição de uma das placas com uma membrana elástica [49], a injeção do fluido deslocador à aceleração constante [21] ou a mudança da geometria da bancada [2] foram alguns dos artifícios utilizados. Os resultados obtidos mostram desenvolvimentos promissores, mas efeitos inesperados na passagem dos líquidos pelos meios porosos reais e a impraticabilidade de se utilizar qualquer um destes métodos podem tornar inviáveis estas soluções.

2

Materiais e Métodos

Neste capítulo são descritos os materiais utilizados e a metodologia que foi aplicada para o estudo da interface e da eficiência de deslocamento dos fluidos imiscíveis e os fatores que incidem na aparição dos *viscous fingers*.

2.1

Características dos fluidos utilizados

No caso da pesquisa atual foram escolhidos dois tipos de fluidos, um óleo de características newtonianas e uma solução de carbopol com características não newtonianas.

2.1.1

Óleo

O óleo mineral é uma substância com base naftênico ou parafínica em quantidades variadas. O óleo mineral utilizado nesta pesquisa é claro, quase inerte e fornecido pela União Farmacêutica. Os testes da bancada serão conduzidos na faixa de temperatura entre 20 ° e 25 ° C. A Tabela **2-1** contém as principais características do fluido a 23°C.

Tabela 2-1: Característica do Óleo Mineral

Fluido	ρ [kg/m ³]	μ [Pa.s]	σ [mN/m]
Óleo Mineral	870	0.12	46.5

2.1.2

Solução de Carbopol

Também chamado de carbômero, é uma suspensão de reticulados de ácido acrílico, utilizado nos laboratórios de pesquisa para simular o comportamento de fluidos de perfuração. O polímero, considerado hidrófilo, aumenta seu volume em presença de água, assim como a viscosidade do líquido, transformando-se em um gel. Para o espessamento do fluido é necessário o uso de neutralizante com base inorgânica, como o hidróxido de sódio. Para este tipo de soluções, a lei de potência modi-



Figura 2-1: Amostra de carbopol peneirado

ficada é a que melhor descreve a função viscosidade, na qual os fluidos só fluem quando são submetidos a uma tensão maior da tensão limite de escoamento, conhecida também como o limite de elasticidade aparente. Suspensões de carbopol são exemplos de fluidos com tensão limite de escoamento quase ideal [45], já que possuem as três principais características: suspensão permanente de ingredientes solúveis, o efeito de espessamento amplia a faixa de suas características reológicas e baixa opacidade.

Neste estudo, o carbopol é considerado um fluido visco-plástico, sendo $\tau = \eta(\dot{\gamma})\dot{\gamma}$. O comportamento da função viscosidade é

$$\eta(\dot{\gamma}) = \begin{cases} \infty & \text{se } \tau_{yx} < \tau_0 \\ \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + k\dot{\gamma}^{n-1} & \text{se } \tau_{yx} > \tau_0 \end{cases} \quad (2-1)$$

no qual $\eta(\dot{\gamma})$ é a função viscosidade do fluido não newtoniano, $\dot{\gamma}$ é a taxa de cisalhamento, τ_0 é a tensão limite de escoamento, k é o índice de consistência e n é o índice de comportamento.

2.2

Bancada experimental

Foi usada uma bancada que se mostra na figura 2-2. Sistema de iluminação, câmera, bomba peristáltica, e reservatórios transparentes e balança são os componentes principais do equipamento.

A bancada experimental deve cumprir certos requisitos:

- A folga entre as placas da célula tem que ser suficientemente pequena para que o escoamento possa ser considerado bi-dimensional, e
- no caso de fluidos imiscíveis, não haja escoamento de um fluido sobre o



Figura 2-2: Detalhe da bancada experimental

outro.

- A largura da célula tem que ser suficientemente grande para que o escoamento não seja perturbado pelas paredes laterais.
- Os vidros devem ser transparentes o suficiente para que a interface possa ser capturada pela câmera.
- A iluminação tem que gerar contraste suficiente para permitir o processamento de imagem subsequente do vídeo capturado.

2.2.1 Célula de Hele-Shaw

É constituída de duas placas planas de vidro de 70 cm de comprimento, 13 cm de largura de 6 mm de espessura. A espessura dos vidros evita que qualquer força externa interfira com a geometria da bancada. A folga de 0.7 mm entre as placas foi conseguida empregando tiras de poliéster leitoso de espessura uniforme com as quais foi possível criar um canal que permitirá o escoamento. Uma estrutura de aço inoxidável em torno dos vidros, junto com dezenove grampos de fixação tipo C colocados em torno da estrutura, mantêm a vedação entre as placas ao longo da zona de teste. A figura 2-3 mostra os componentes do aparelho.

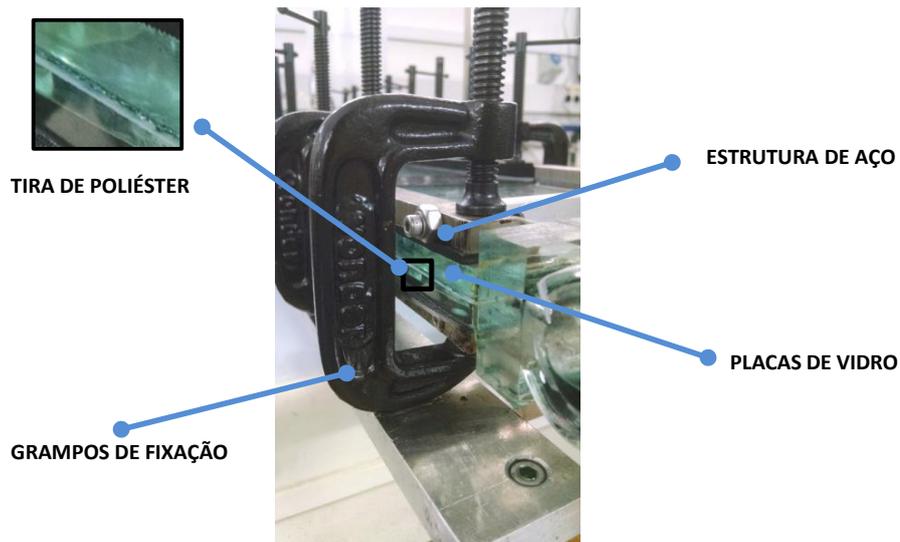


Figura 2-3: Detalhe da vedação entre as placas

Para assegurar que a atuação da gravidade na bancada seja desprezível, no início dos testes é realizado um ajuste com um nível de bolha ilustrado na figura 2-4.

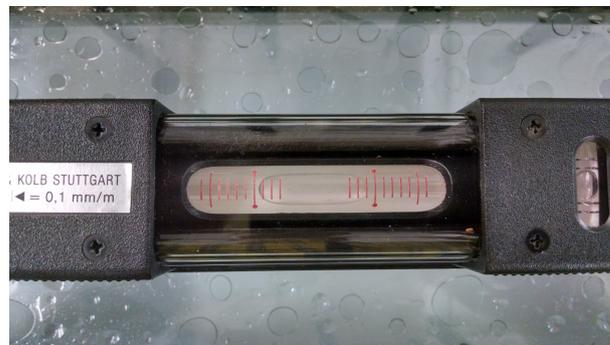


Figura 2-4: Nivelamento da bancada

Apesar de não haver uma padronização sobre a relação da largura com respeito à folga entre as placas que a célula deve ter para que o escoamento seja considerado bidimensional, na pesquisa bibliográfica, verificou-se que Chevalier et al. [17] fizeram testes com várias geometrias, mudando a folga entre as placas e concluíram que com uma razão acima de 28, o escoamento pode ser considerado quase-bidimensional, como é ilustrado na Tabela 2-2.

Tabela 2-2: Diferentes razões usadas em trabalhos anteriores e comparação com a razão do trabalho atual

Trabalho	Razão de aspecto W/b
	160
	107
Trabalho feito por Chevalier et al. [17]	53
	28
Trabalho atual	146

2.2.2

Iluminação da bancada

Em primeira instância, iluminação usando LED (*Light Emitting Diode*) foi testada para assim diminuir a iluminação irregular. O problema foi eliminado, mas apareceu uma saturação não uniforme dos tons de cinza na imagem obtida, que requer um gasto maior no processamento de imagens. Um negatoscópio foi utilizado, que embora produza iluminação irregular, é possível eliminar essas irregularidades utilizando filtros passa baixa no PDI. As características do equipamento são ilustradas na Tabela 2-3.

Tabela 2-3: Especificações técnicas do Negatoscopio

Parâmetro	Valor
Dimensão da tela	347 x 467 mm
Lâmpada Fluorescente	15 Watts
Frequência	50 a 60 Hz

2.2.3

Câmera Fotográfica

Uma câmera Canon, modelo DS126251 com uma lente EFS 18-55mm foi utilizada para obter vídeos do deslocamento dos fluidos na célula. Está fixada num suporte com o objetivo de garantir sempre a mesma distância até a bancada. A Tabela 2-4 mostra os parâmetros utilizados na configuração da câmera.

Tabela 2-4: Configuração da Câmera Canon DS126251

Parâmetro	Valor
Espaço de cor	Adobe RGB
Estilo Imagem	Monocromática
Tam. grav. filme	1280 x 720
Velocidade Iso	1000
Taxa de quadros	30 quadros/s

2.2.4

Bomba peristáltica

Foi utilizada para a injeção dos fluidos, uma bomba peristáltica marca Cole-Parmer modelo KH 07553-80 com faixa de trabalho 1-100 rpm, um controlador Masterflex modelo 7553-71 e duas mangueiras com bifurcações L/S 14 e L/S 16 em y . Tais bombas são usadas em aplicações diversas já que oferecem taxas de fluxo tão baixas quanto $0,0007 \text{ mL}/\text{min}$ até $45 \text{ L}/\text{min}$. Além disso, são confiáveis para gerar pressões constantes de até 8,6 bar (125 psi). As principais características do equipamento são:

- A única parte da bomba que entra em contato com o líquido é a tubulação. Isto mantém a esterilidade do fluido e da bomba para que não haja peças para limpar tais como válvulas, diafragmas, etc.
- Há a possibilidade de trocar o tamanho das tubulações o que oferece excelente compatibilidade com uma ampla variedade de líquidos.
- Possui ação de bombeamento suave.
- Tempos de manutenção reduzidos.

Tabela 2-5: Especificações da Bomba peristáltica

Modelo	rpm	Velocidade de Controle	Tamanho do Motor	Energia (50/60 Hz)
KH 07553-80	1 a 100	$\pm 2 \%$	75 W	190 a 260

2.3

Tensão superficial

No caso de interfaces formadas entre fluidos imiscíveis, a tensão interfacial desempenha um papel muito importante [52]. Pelo que precede, é de vital importância

conhecer a tensão superficial entre líquidos estudados.

A metodologia utilizada para obter a tensão superficial no nosso caso foi o anel de Du Nouy, figura 2-5. O tensiômetro está constituído por um recipiente que se desloca verticalmente, enquanto a posição do anel é mantida fixa. Para uma medida próxima do valor esperado, a superfície de contato do anel deve ser tão paralela como seja possível.



Figura 2-5: Tensiômetro de anel de Du Nouy

2.4

Procedimento experimental

Inicialmente, todos os componentes são limpos com produto desengordurante (sabão) e posteriormente é utilizado um jato de ar. Esta limpeza é feita para retirar os resíduos de fluidos e outras impurezas que possam ficar entre as placas e os recipientes. Uma vez limpa a célula, uma câmera digital é posicionada acima dela enfocando uma seção pré-estabelecida de modo de visualizar o escoamento. Para o início dos testes deve-se desligar a iluminação dos arredores para que a iluminação fornecida pelo negatoscópio da bancada seja a única a aparecer no vídeo.

2.4.1

Deslocamento dos fluidos

Uma representação esquemática mostra-se na figura 2-6. A bancada possui duas garrafas transparentes preenchidas com os fluidos tanto newtoniano e não newtoniano as quais estão ligadas a um circuito de mangueiras bifurcadas que possuem registros para controlar a injeção na célula. Usa-se uma bomba peristáltica para injetar o fluido deslocador num depósito que está acoplado na frente da célula. O depósito vai assegurar que a injeção do fluido sejam constante e sem bolhas

de ar. Uma vez que procedimento anteriormente descrito esteja concluído, o controlador da bomba é posicionado na velocidade necessária para obter a vazão de injeção requerida. Antes de iniciar o escoamento é ligado o negatoscópio, que melhorará a visualização do escoamento e simultaneamente é ligada a câmera que capturará as imagens do deslocamento. No final da bancada é posicionada uma balança, que vai medir a massa de fluido deslocado para corroborar com os dados do processamento de imagens.

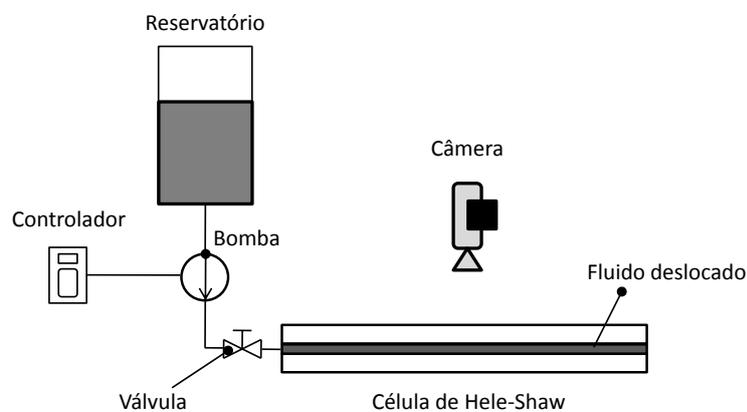


Figura 2-6: Esquema da bancada

Deve-se ter cuidado para que o preenchimento da célula não deixe bolhas presas de ar entre as placas de modo que, no processamento de imagens, não interfira no percentual da eficiência de deslocamento. O processo acima, pode ser realizado de maneira inversa ou seja, preenchendo a célula com óleo para ser deslocado por carbopol.

2.4.2

Procedimento após os testes

Ao final de cada teste, é esvaziada a célula abrindo o registro ao final da bancada e os fluidos são descartados em um recipiente adequado para, posteriormente fazer uma eliminação correta. São injetados água e sabão a fim de remover qualquer vestígio de fluidos que puderam ficar dentro da bancada. As imagens obtidas, que são salvas na memória interna da câmera, são transferidas para um computador

e analisadas para quantificar a taxa de cisalhamento, eficiência do deslocamento e outras magnitudes significativas.

2.5 Imagem Digital

Define-se a imagem digital como o arranjo de elementos, conhecidos como pixels, em forma de uma matriz, na qual cada elemento é associado a um par de coordenadas retangulares (x, y) , conforme mostra esquematicamente a figura. 2-7. O pixel, representado por I , pode ser considerado como o menor elemento de uma imagem digital, e armazena um nível de cinza atribuído a ele [1].

Se uma imagem possui um maior número de *pixels*, a representação digital será mais próxima da original, o que é comumente conhecido como nível de detalhe da imagem.

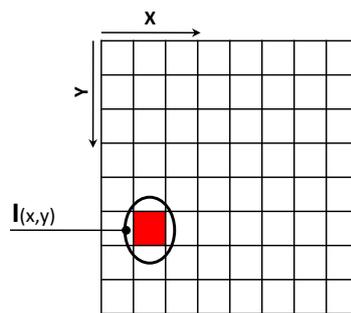


Figura 2-7: Representação esquemática de uma Imagem digital

2.6 Processamento digital de imagens

O processamento de imagens trata-se da manipulação e transformação de informação contida em um sinal da forma analógica para a forma digital, melhorando sua qualidade visual por meio de um computador [26].

A informação pode ser obtida em função das propriedades dos objetos ou padrões que os compõem. Vários tipos de distorções, ruídos, imperfeições ou degradações são adquiridos durante a captura da imagem e para remover essas distorções são aplicados vários pré e pós-processamentos, facilitando a extração de informações das imagens.

O PDI fornece resultados que, sem sua utilização seria impossível conseguir, como a extração de informação quantitativa e qualitativa, fazer medidas semi-automáticas ou obter medidas mais rápidas e fazê-las muito mais acuradas. A figura 2-8 mostra a sequência utilizada em nosso processamento das imagens.

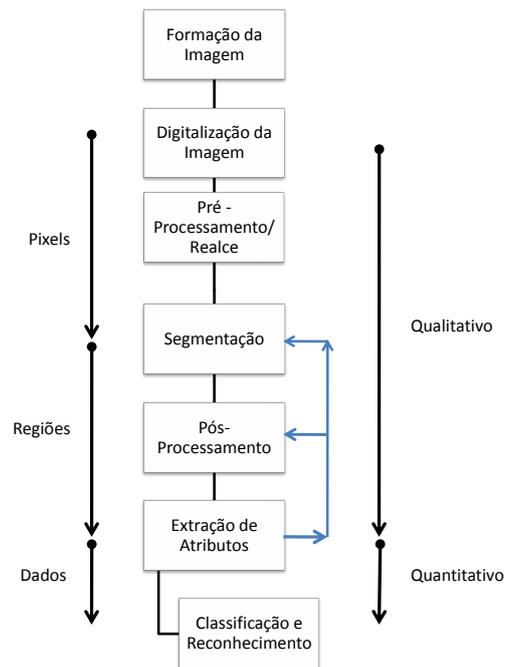


Figura 2-8: Sequência de processamento e análise de imagens

2.6.1 Pré-processamento das imagens

O pré-processamento tenta melhorar a qualidade e corrigir defeitos, que se apresentam durante a aquisição da imagem, por meio da aplicação de filtros. São métodos cujo objetivo é ressaltar ou suprimir, com parâmetros pré-definidos, informações da imagem e formas anômalas. Nesta fase da análise, pretende-se obter resultados qualitativos da imagem de saída.

Devido ao fato de as imagens estarem em formato digital, a primeira etapa do pré-processamento é a conversão da imagem colorida para tons de cinza.

A câmera utilizada captura o espectro visível, fornecendo uma imagem colorida. O formato RGB é o formato que o equipamento utiliza, sendo o mais simples dos modelos de cores. A escala RGB é baseada em um processo no qual são atribuídos valores para a intensidade da cor da imagem com relação a cada uma das cores primárias. Foi desenvolvida uma rotina em MatLab, na qual o primeiro passo é a leitura das imagens fornecidas pela câmera e a conversão da imagem colorida para tons de cinza. A expressão utilizado pelo software para obter o valor do tom de cinza equivalente é:

$$Tom\ de\ Cinza = 0.2989 * Vermelho + 0.5870 * Verde + 0.1140 * Azul$$

Deve-se ressaltar que a conversão muda a distribuição dentro do histograma, como pode ser visto na Fig. 2-9.

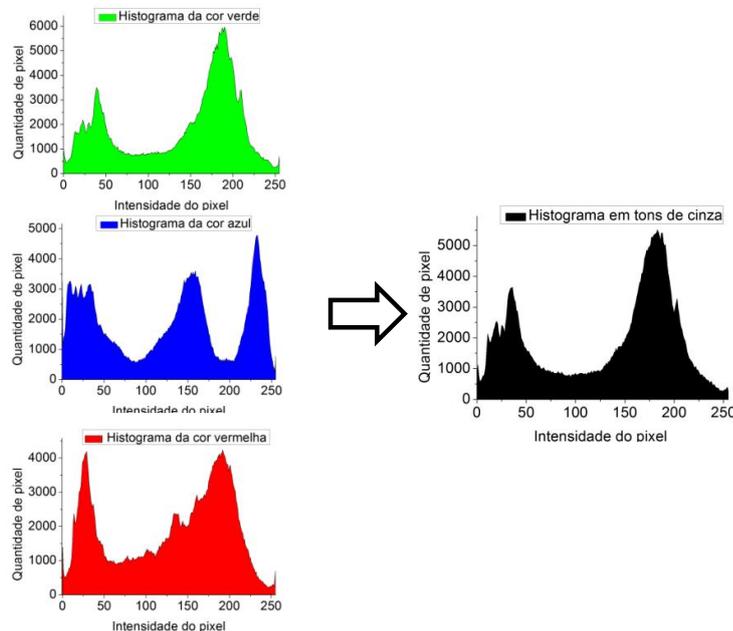


Figura 2-9: Transição de RGB para tons de cinza

Filtro Passa Baixo

O modo de aplicação do filtro é ilustrado na figura 2-10. É usado para remover as altas frequências, que são características das bordas dos objetos, preservando as baixas frequências. Baseia-se na média dos píxeis adjacentes, que para nosso caso são uma vizinhança quadrada ao pixel a ser avaliado. O efeito da operação depende do tamanho da vizinhança e quanto maior ela for, maior será o efeito da operação.

Eliminação de iluminação irregular

Para nosso caso, utilizou-se um filtro passa-baixa para eliminar a iluminação irregular obtida durante as capturas das imagens. Na figura 2-11 mostram-se os resultados dos histogramas antes e depois da eliminação da iluminação irregular do fundo cuja presença causa a ocorrência de um número considerável de pixels distribuídos em baixas intensidades de tons de cinza.

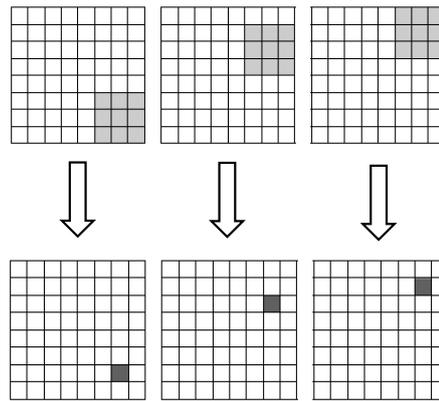


Figura 2-10: Sequência do filtro passa baixa. Primeira imagem na esquerda: Aplicação do filtro. Imagem para baixo : Pixel resultante. A sequência começa na parte superior esquerda e segue até atingir o lado direito

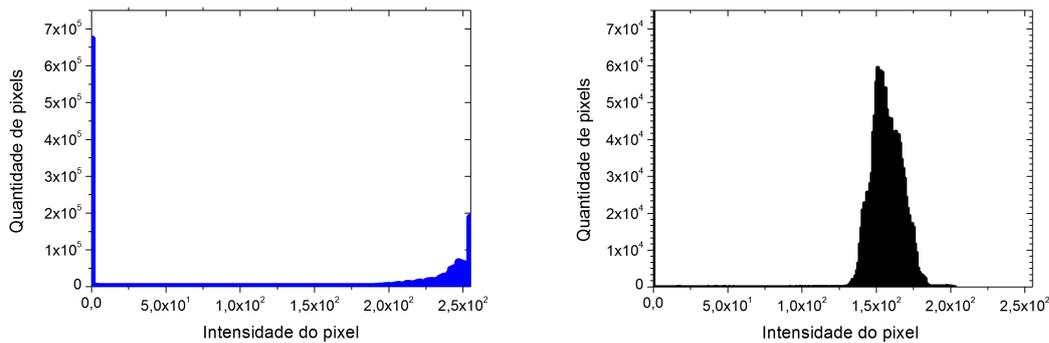


Figura 2-11: Correção de iluminação irregular. Histograma da imagem sem correção (esquerda). Histograma da imagem corrigida (direita).

2.6.2 Segmentação

A segmentação é uma etapa crítica do processamento apresentado no fluxograma da figura 2-8. Procurou-se distinguir as partículas do fundo dos objetos de interesse. Não existe um modelo formal da segmentação, que é essencialmente empírico. Portanto a segmentação deverá ser ajustada de acordo com o histograma de cada imagem.

Segmentação por limiarização

O limiar é o parâmetro mais comumente usado na segmentação de imagens. Utiliza a intensidade dos pixels como ponto de referência para distingui-los. O critério

da segmentação por limiarização é:

$$\begin{cases} \text{O pixel na coordenada } (x, y) \text{ pertence ao objeto} & \text{se } I(x, y) \geq \alpha \\ \text{O pixel na coordenada } (x, y) \text{ não pertence ao objeto} & \text{se } I(x, y) \leq \alpha \end{cases}$$

Sendo α o limiar de segmentação escolhido, e $I(x, y)$ a intensidade do pixel em uma coordenada específica.

O histograma da figura 2-12, na qual já foi feita uma correção da iluminação, é submetido à segmentação por limiarização. Devido à distribuição de intensidades, é possível utilizar um algoritmo próprio do MatLab: *Auto Threshold*.

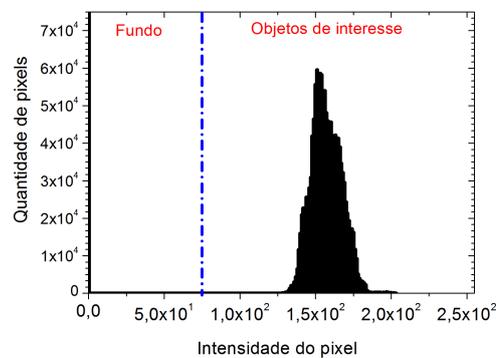


Figura 2-12: Uso do comando *Auto threshold*

Delimitação da janela de visualização

Uma vez que a imagem foi binarizada, é preciso recortar a seção de interesse. Foi desenvolvida uma rotina que consiste em eliminar a área preta da branca, que é a zona de interesse. Um somatório dos valores de uma coluna do meio fornece um valor que corresponde ao número de linhas que têm pixels brancos, já que são os únicos que têm valor diferente de zero e corresponde à altura da janela branca. Partindo do meio, compara-se o valor obtido em cada somatório das colunas adjacentes até que o valor comparado seja menor que o primeiro. Quando isso acontecer, estes serão assumidos como os limites esquerdo e direito. O mesmo procedimento se repete com o somatório da linha do meio para obter o limite superior e inferior. Com a rotina mencionada anteriormente encontram-se os limites que serão a partir de agora a seção onde se fará todas as medições.

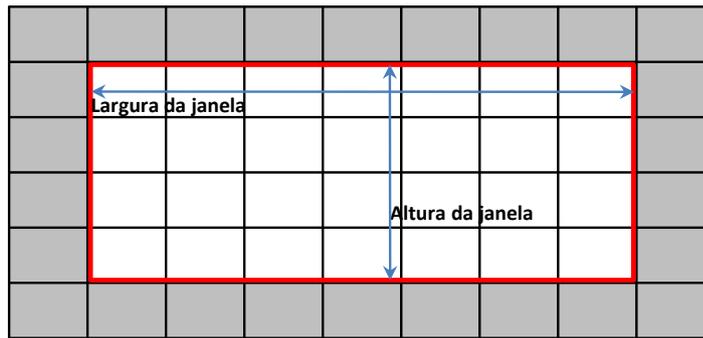


Figura 2-13: Janela de visualização

Segmentação da imagem do fluido deslocado

Mais uma vez utiliza-se a segmentação por limiarização com o fim de distinguir a área ocupada pelo fluido deslocador e pelo deslocado ao longo dos testes. Acrescentou-se um corante base água ao carbopol com o objetivo de ter um contraste na interface suficientemente notório para que o limiar de binarização seja mais evidente. Um exemplo da segmentação ilustra-se na figura 2-14

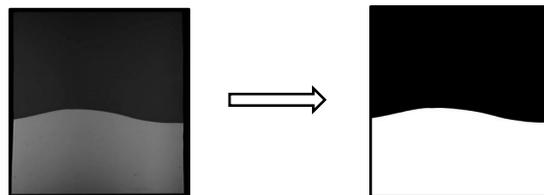


Figura 2-14: Resultado da segmentação da interface entre os fluidos

2.6.3 Pós-processamento das imagens

Na maioria das vezes, o resultado da segmentação não é o adequado para a extração dos atributos, portanto para corrigir os defeitos residuais utilizam-se operações morfológicas. São operações nas quais o pixel de saída se torna função do valor dos pixels da vizinhança a partir do uso de um elemento estruturante pré-estabelecido.

Preencher vazios

A imagem binarizada, mostra que existem objetos pretos dentro da área branca, isto é, fluido deslocado capturado dentro do fluido deslocador. Esse fluido capturado (encapsulado) não deve ser considerado quando o cálculo da eficiência for

feito. O algoritmo *imfill* próprio do MatLab remove os objetos pretos cercados por área branca.

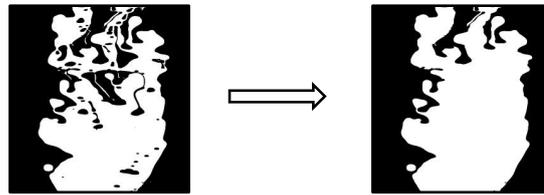


Figura 2-15: Uso do comando *imfill*

Detecção de bordas pelo método Canny

Em processamento digital de imagens (PDI), a borda é o limite entre os objetos de interesse e o fundo [51]. Constitui a informação de alta frequência e propriedades significativas de uma imagem como as discontinuidades geométricas e as características físicas dos objetos. A fim de que as variações dos tons de cinza sejam detectadas, é necessário utilizar uma rotina que filtre a informação. Para nosso caso, utilizou-se o algoritmo desenvolvido por Canny [12], qual obtêm-se as bordas importantes mantendo a posição real dos pixels com o fim de não gerar áreas falsas. Os resultados obtidos pelo uso do filtro se mostram na figura 2-16. Embora o algoritmo seja extremamente eficiente, muitos contornos ficam incompletos o que impede a detecção da interface real. Esta limitação restringe severamente a utilização deste método [51]. Para minorar o problema utilizou-se o algoritmo de Deriche [20], que procura as extremidades dos contornos abertos e segue na direção do gradiente máximo até atingir outra extremidade aberta.

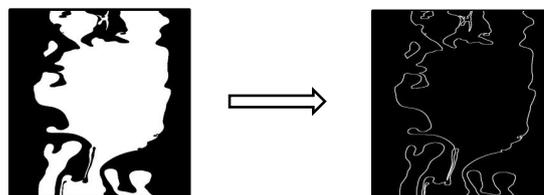


Figura 2-16: Detecção de bordas

2.6.4 Extração de Atributos

Uma vez que o pré e pós-processamento forem finalizados, pode-se realizar medidas na imagem resultante sendo a área total e o desvio padrão da interface os atributos

requeridos.

Área do fluido deslocador

A área, obtida digitalmente, não é tão simples como contar simplesmente o número de pixels no objeto. Ressalta-se que não há nenhuma maneira simples de medir a área manualmente. Para mensurar a área dispõe-se de duas possibilidades. A área convexa *Areac* é a área delimitada por uma corda esticada em torno dos objetos de interesse. Para os objetos convexos, possui o mesmo valor que a área, mas é maior para as formas não-convexas. Este método é útil quando se quer medir a área sem considerar irregularidades no contorno do objeto que podem ter sido causadas por algum efeito espúrio da preparação da amostra ou de processamento de imagem. No entanto, o método conhecido como área preenchida ou *Areaf* [53] é utilizada neste trabalho sendo a área obtida contando os pixels brancos excluindo os buracos internos.



Figura 2-17: Cálculo da área. a) *Areac* b) *Areaf*

3 Análise

3.1 Teorema de Buckingham

Os fatores adimensionais que regem o escoamento podem ser encontrados através da análise dimensional. O teorema II de Buckingham se baseia em reduzir o número e a complexidade das variáveis de tal maneira que permitam caracterizar o fenômeno físico com parâmetros mais simples que regem o problema. No entanto, se enfatiza que os grupos adimensionais encontrados podem variar de acordo com a ordem da escolha dos parâmetros dimensionais [11, 14].

3.1.1 Fatores adimensionais

No caso de deslocamento de fluidos imiscíveis na célula de Hele-Shaw, a eficiência é uma função de:

$$\% = f(Q, b, \eta(\dot{\gamma}), \mu, \sigma, \rho)$$

Para a análise, os fatores precisam ser escritas em suas dimensões primárias:

Tabela 3-1: Parâmetros em função das dimensões primárias

Variáveis	Símbolos	Dimensões primarias
Vazão	$[Q]$	L^3T^{-1}
Viscosidade newtoniana	$[\mu]$	$ML^{-1}T^{-1}$
Viscosidade não newtoniana	$[\eta]$	$ML^{-1}T^{-1}$
Folga	$[b]$	L
Tensão interfacial	$[\sigma]$	MT^{-2}
Massa específica	$[\rho]$	ML^{-3}
Eficiência	$[\%]$	1

Selecionou-se os parâmetros que aparecerão em todos os grupos, neste caso b , μ e ρ . Estes não podem envolver as mesmas dimensões primárias, mesmo que diferindo por um expoente e devem ser conferidos para que a matriz com os

parâmetros escolhidos não seja nula.

$$\begin{vmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -3 \\ 0 & -1 & 0 \end{vmatrix} =$$

$$0 - 1 + 0 = -1 \neq 0$$

Obtenção dos parâmetro Π

$$\Pi_1 = b^a \mu^b \rho^c Q$$

Logo:

$$\begin{array}{l} \text{M:} \quad b + c = 0 \\ \text{L:} \quad a - b - 3c = 0 \\ \text{T:} \quad -b = 0 \end{array}$$

O que implica $a = 0, b=0, c=0$

Portanto,

$$\Pi_1 = Q$$

Analogamente:

$$\Pi_2 = b^a \mu^b \rho^c Q$$

Logo:

$$\begin{array}{l} \text{M:} \quad b + c = 0 \\ \text{L:} \quad a - b - 3c + 3 = 0 \\ \text{T:} \quad -b = 0 \end{array}$$

O que implica $a = -1, b=-1, c=1$

Portanto,

$$\Pi_2 = \frac{Q\rho}{b\mu}$$

Para o terceiro termo:

$$\Pi_3 = b^a \mu^b \rho^c \eta(\dot{\gamma})$$

Logo:

$$\begin{array}{rcll} \text{M:} & & b & +c+1 & =0 \\ \text{L:} & a & -b & -3c-1 & =0 \\ \text{T:} & & -b & -1 & =0 \end{array}$$

O que implica $a = 0$, $b = -1$, $c = 0$

Portanto,

$$\Pi_3 = \frac{\eta(\dot{\gamma})}{\mu} = R\mu$$

Para o quarto termo:

$$\Pi_4 = b^a \mu^b \rho^c \sigma$$

Logo:

$$\begin{array}{rcll} \text{M:} & & b & +c+1 & =0 \\ \text{L:} & a & -b & -3c & =0 \\ \text{T:} & & -b & -2 & =0 \end{array}$$

O que implica $a = 1$, $b = -2$, $c = 1$

Portanto,

$$\Pi_4 = \frac{b\rho\sigma}{\mu^2}$$

É possível combinar dois ou mais fatores da análise dimensional para poder obter um novo. Portanto se obtém:

$$\% = f \left(Re, \frac{\dot{\gamma} b \mu}{\sigma}, \frac{\mu}{\eta(\dot{\gamma})} \right)$$

3.1.2

Razão de viscosidade ($R\mu$)

Para obter a função viscosidade $\eta(\dot{\gamma})$ da razão de viscosidade $R\mu$ encontrada na seção anterior, uma análise de um fluido escoando através de um canal formado entre duas placas paradas de comprimento L , largura W e folga b foi feita. Na figura 3-1 se mostra esquematicamente o escoamento. É assumido que a velocidade do fluido nas paredes é nula devido à hipótese de não deslizamento.

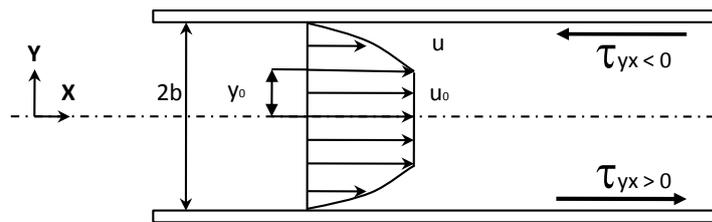


Figura 3-1: Representação esquemática do escoamento entre placas planas de um fluido viscoplástico

Propõe-se uma solução aproximada onde assume-se que as forças viscosas são consideradas maiores que as forças de inércia, ou seja, quando os números de Reynolds são muito pequenos ($Re < 1$). As equações que governam o sistema são a equação de Navier-Stokes

$$0 = -\nabla p + \nabla \cdot T \quad (3-1)$$

e a condição de incompressibilidade dos fluidos:

$$0 = \nabla u \quad (3-2)$$

Na direção x obtemos:

$$0 = \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) - \frac{\partial P}{\partial x} \quad (3-3)$$

Se $\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} = 0$, $\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} = 0$, a equação 3-3 assume a forma de:

$$0 = \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} - \frac{\partial p}{\partial x} \quad (3-4)$$

Por simetria, podemos resolver a metade superior do domínio da figura **3-1**, ou seja $0 \leq y \leq b$. Nesta faixa do domínio se:

$$\tau_{yx} < 0 \quad \text{então} \quad \dot{\gamma} = 0$$

Mas se $\tau_{yx} > 0$:

$$\tau = -\tau_{yx}(y) = -\frac{\partial P}{\partial x} y$$

Além disso, $\dot{\gamma} = -\frac{\partial u}{\partial y}$.

Devido ao comportamento da função viscosidade dos fluidos visco-plásticos, para a análise precisamos dividir o domínio em duas regiões. A primeira sendo $\tau < \tau_0$, e uma segunda se $\tau \geq \tau_0$. A fronteira entre estas duas regiões é dada por:

$$\tau_0 = -\frac{\partial P}{\partial x} y_0 \rightarrow y_0 = \frac{\tau_0}{-\partial P / \partial x} \quad (3-5)$$

A tensão avaliada na parede, $\tau_{yx}(b) = -\tau_w = \frac{\partial P}{\partial x} b$. Logo $\tau(y) = -\frac{\partial P}{\partial x} y$ ou

$$\tau = \tau_w \frac{y}{b}.$$

Portanto

$$\frac{y_0}{b} = \frac{\tau_0}{\tau_w} \quad (3-6)$$

A velocidade da interface é governada pela equação :

$$\tau_w \frac{y}{b} = \tau_0 + k \left(-\frac{\partial u}{\partial y} \right)^n \quad (3-7)$$

Onde para o domínio $0 \leq y \leq y_0$, a velocidade fica:

$$u_0 = \frac{b}{(\tau_w k^{1/n})(1 + 1/n)} \left((\tau_w - \tau_0)^{1/n+1} - \left(\tau_w \frac{y_0}{b} - \tau_0 \right)^{1/n+1} \right) \quad (3-8)$$

Para o domínio $y_0 \leq y \leq b$, a velocidade da interface do fluido é:

$$u = \frac{b}{(\tau_w k^{1/n})(1 + 1/n)} \left((\tau_w - \tau_0)^{1/n+1} - \left(\tau_w \frac{y}{b} - \tau_0 \right)^{1/n+1} \right) \quad (3-9)$$

A figura 3-2 mostra o desenvolvimento da interface de deslocamento a diferentes velocidades. O resultado confirma o comportamento da interface em dois domínios:

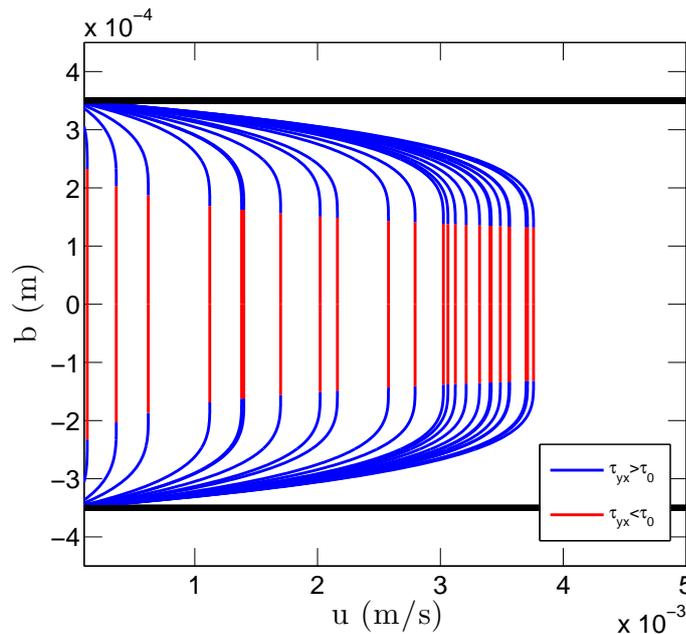


Figura 3-2: Desenvolvimento da interface a diferentes velocidades

Para obter a vazão volumétrica para uma geometria duas placas paralelas separadas por uma distância pequena é necessário integrar a velocidade na área perpendicular ao escoamento:

$$Q = 2W \int_0^b u(y) dy = 2W \left(\int_0^{y_0} u_0 dy + \int_{y_0}^b u(y) dy \right) \quad (3-10)$$

obtem-se:

$$\frac{Q}{W} = 2u_0 y_0 + \frac{2b^2}{\tau_w k^{1/n} \left(1 + \frac{1}{n} \right)} \left((\tau_w - \tau_0)^{1 + \frac{1}{n}} - \dots \right) \dots \left(\frac{1}{\tau_w \left(2 + \frac{1}{n} \right)} \left((\tau_w - \tau_0)^{2 + \frac{1}{n}} - \left(\tau_w \frac{y_0}{b} - \tau_0 \right)^{2 + \frac{1}{n}} \right) \right) \quad (3-11)$$

Para obter o parâmetro adimensional ($R\mu_1$) é preciso conhecer a equação da vazão entre duas placas de um fluido Newtoniano [8]:

$$Q = \frac{Wb^2\tau_w}{12\mu} \quad (3-12)$$

onde μ é a viscosidade Newtoniana

Para a viscosidade equivalente não-newtoniana temos que igualar as tensões na parede (τ_w) das equações 3-11 e 3-12, mantendo constante a vazão volumétrica obtida experimentalmente. O parâmetro adimensional $R\mu_1$ foi introduzido e definido como a razão entre a viscosidade do fluido newtoniano e a viscosidade equivalente do fluido não-newtoniano:

$$R\mu_1 = \frac{\mu}{\mu_{eq}} \quad (3-13)$$

Uma segunda razão de viscosidades $R\mu_2$ foi proposta, sendo substituída na equação 3-11, o termo da tensão cisalhamento na parede τ_w sabendo que:

$$\tau_w = \tau_0 + k\dot{\gamma}_w^n \quad (3-14)$$

Da substituição anterior, a taxa de cisalhamento na parede $\dot{\gamma}_w$ foi obtida, em função dos parâmetros geométricos e de fluxo. Com este parâmetro, se procurou a função viscosidade na parede $\eta(\dot{\gamma}_w)$ na curva de escoamento correspondente para cada concentração de polímero na solução aquosa. Por conseguinte, a razão de viscosidade ($R\mu_2$) fica:

$$R\mu_2 = \frac{\mu}{\eta(\dot{\gamma}_w)} \quad (3-15)$$

3.2

Forma da interface

Uma rotina na qual se realiza uma varredura da imagem foi desenvolvida. Coluna a coluna, linha após linha, os pixels que são os pertencentes à borda da interface obtida no processamento de imagens pelo algoritmo de Canny foram procurados. Para quantificar a forma da interface, o desvio padrão foi utilizado. O desvio representa a dispersão estatística dos dados em relação a um valor estabelecido.

Para nosso caso, o valor referencial é a média das posições dos pixels da interface representada esquematicamente na figura 3-3.

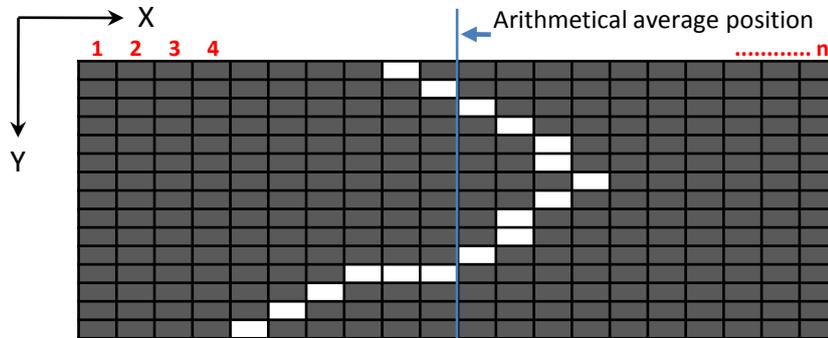


Figura 3-3: Esquema do cálculo do desvio padrão

Para calcular a média aritmética da posição dos pixels da interface, se utilizou a equação a seguir:

$$\bar{x} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_i = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{m} \quad (3-16)$$

Onde x_1, x_2, \dots, x_n são as posições dos pixels da interface e m é o número de pixels.

A seguir, o desvio padrão é calculado como:

$$s = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2} \quad (3-17)$$

Um baixo desvio padrão indica que os dados tendem a estar próximos da média, ou seja, uma interface plana. No caso contrário, um desvio padrão alto indica que os dados estão dispersos representando uma interface de *viscous fingers*. Para adimensionalizar o desvio padrão, se utilizou a folga entre as placas b por ser uma medida representativa da bancada:

$$S^* = \frac{S}{b} = \frac{\sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2}}{b} \quad (3-18)$$

3.3 Forças capilares

Outro parâmetro adimensional que rege o escoamento na célula de Hele-Shaw é o número de capilaridade [17, 27, 30, 41], o qual é definido com relação entre as forças viscosas e a tensão interfacial de acordo com a eq. 3-19.

$$Ca = \frac{(\eta(\dot{\gamma}_w) + \mu)\bar{u}}{2\sigma} * \frac{W}{b} \quad (3-19)$$

sendo b folga entre as placas, μ viscosidade newtoniana, $\eta(\dot{\gamma}_w)$ é a função viscosidade do fluido não newtoniano, W largura da bancada e σ a tensão interfacial entre os fluidos.

4 Resultados

4.1 Caracterização reológica dos fluidos

As características reológicas dos fluidos foram obtidas utilizando o reômetro AR-G2 (figura 4-1). Para garantir que não há o efeito de deslizamento na parede ao longo os testes a geometria placa-placa ranhurada foi utilizada.



Figura 4-1: Reômetro rotacional AR-G2

4.1.1 Taxa de cisalhamento constante ($\dot{\gamma}_{const}$)

O teste conhecido como *constant shear rate* ($\dot{\gamma}_{const}$) faz uma varredura isotérmica ao longo de um tempo pré-estabelecido a uma taxa de cisalhamento fixa a fim de obter o tempo no qual o fluido entra em regime permanente, ou seja, quando a viscosidade não mostra mudanças. Este tempo será usado como ponto de referência na curva de escoamento, ou *flow curve*. Significativamente, a maior taxa

de cisalhamento irá diminuir o tempo em que a viscosidade do fluido entre em regime constante. O resultado de um teste é apresentado na figura 4-2.

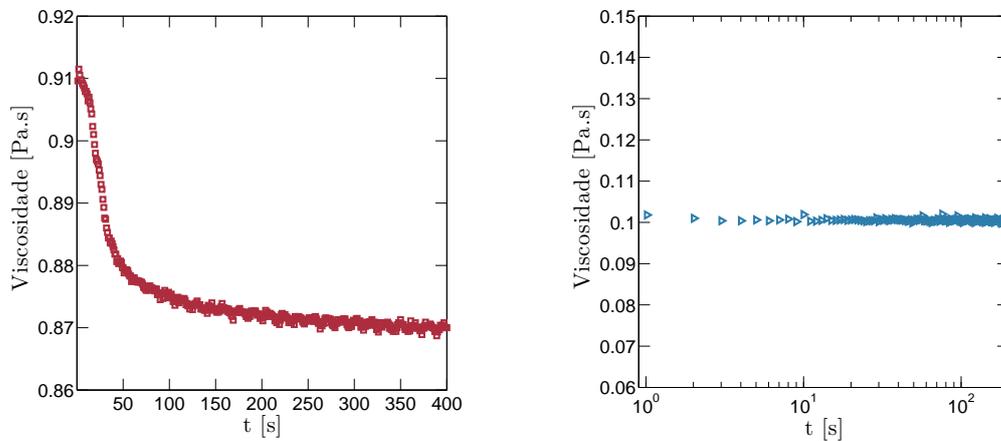


Figura 4-2: Determinação do regime permanente para suspensão de carbopol (esquerda) e óleo mineral (direita)

No caso do óleo mineral, o tempo de estabilização é 10 segundos e do carbopol é 300 segundos a $\dot{\gamma} = 10 \frac{1}{seg}$.

4.1.2 Curva de escoamento (Flow curve)

Na figura 4-3, mostram-se as curvas de escoamento ou *flow curves* na faixa de 0.01 até 250 s^{-1} , que fornecem a relação entre a função viscosidade e a taxa de cisalhamento, as quais são representadas na ordenada e abscissa respectivamente, e a tensão de cisalhamento ou *shear stress* no eixo y do lado direito. Para o presente estudo foi realizada a caracterização de três diferentes concentrações de soluções de carbopol (figura 4-3a, 4-3b, 4-3c). Verificou-se que as soluções são fluidos viscoplásticos, ou seja, fluidos de potência com limite de escoamento ou, segundo Machado et al. [38], uma estrutura semi-sólida de alta viscosidade. O comportamento reológico das suspensões é representado de melhor maneira pelo modelo Herschel-Bulkley. Por outro lado o óleo mineral (figura 4-3d) mantém sua viscosidade constante ao longo da caracterização, portanto assume-se como newtoniano.

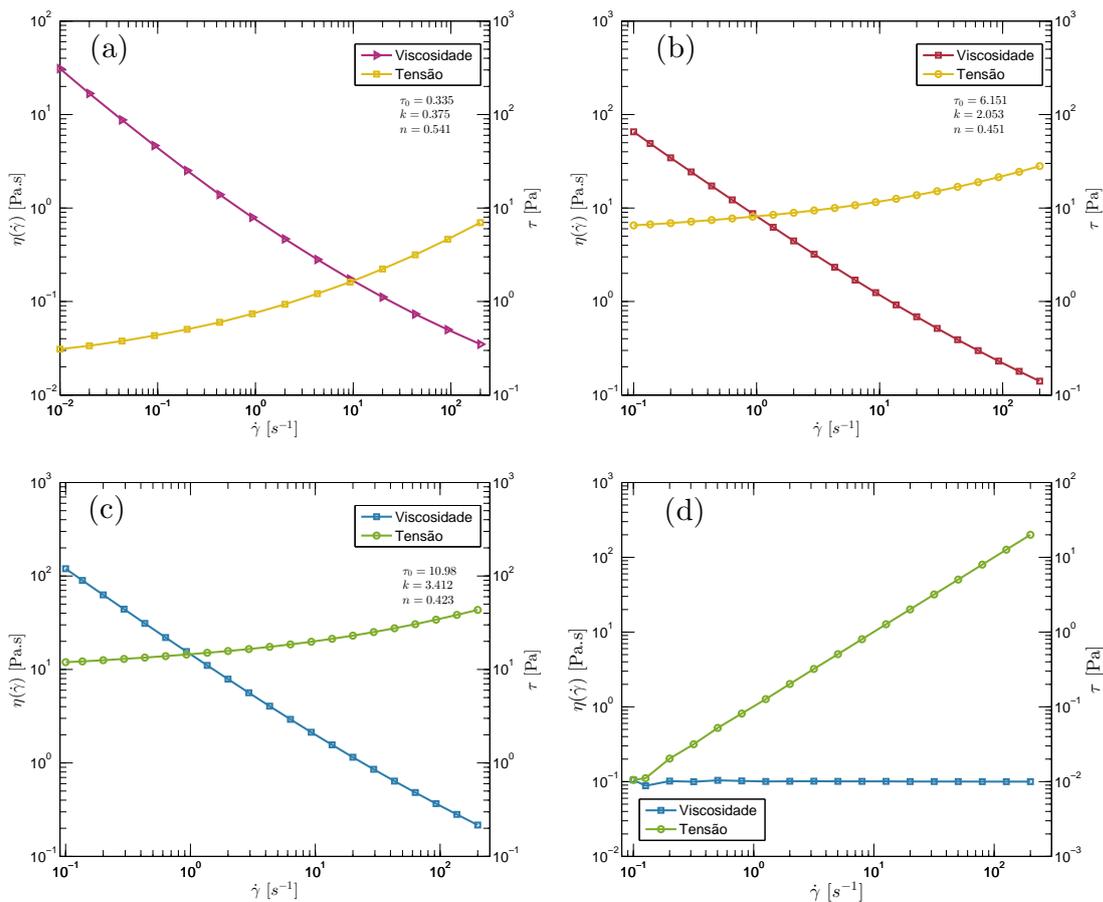


Figura 4-3: *Flows curves* a) Carbopol 0.08 % b) Carbopol 0.10 % c) Carbopol 0.12 % d) óleo mineral.

4.1.3

Dependência da viscosidade com respeito à temperatura

Devido à importância do comportamento da viscosidade para nossa pesquisa, é imperativo determinar seu comportamento com respeito à temperatura. No caso das soluções de carbopol, foram feitas curvas de escoamento a diferentes temperaturas sendo possível concluir que a viscosidade não é influenciável pela temperatura, pelo menos na faixa testada. No caso do óleo, a temperatura é fortemente influente, portanto é imprescindível fazer uma correção ao longo dos testes com respeito à temperatura.

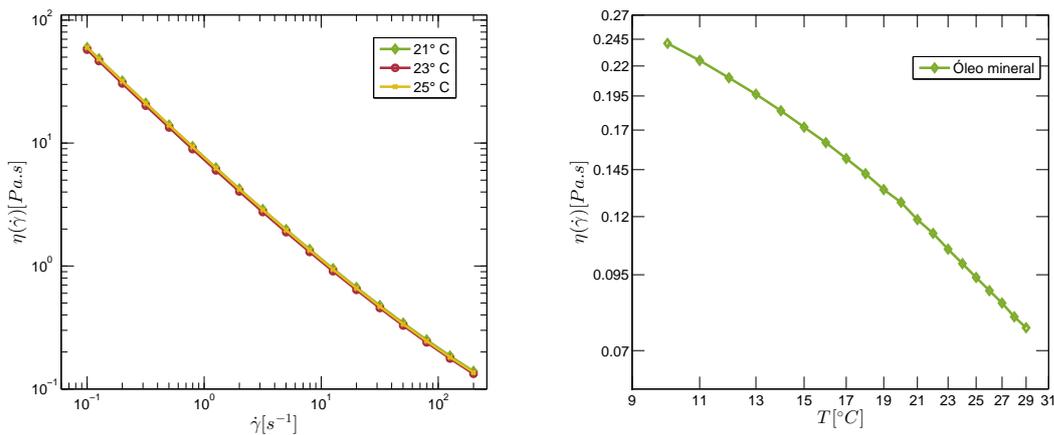


Figura 4-4: Dependência à temperatura do carbopol (esquerda) e óleo mineral (direita)

4.2

Eficiência em função das Razões de viscosidades

4.2.1

Concentrações de carbopol deslocando óleo em função de $R\mu_1$ e vice-versa

As figuras 4-5 e 4-6 ilustram a eficiência de deslocamento em função da razão de viscosidade $R\mu_1$ e $R\mu_2$ quando as suspensões de carbopol deslocam óleo mineral e vice-versa. A eficiência foi calculada baseada na imagem da interface do fluido deslocador que se gerou quando o mesmo volume que contém a janela de visualização na célula de Hele-Shaw foi injetado pela bomba peristáltica. Nas figuras 4-5a e 4-6a, os fluidos deslocadores são as soluções de carbopol. Nas imagens se percebe que existem duas zonas bem delimitadas separadas pelos pontos de referência $R\mu_1=0.5$ e $R\mu_2=0.2$. A primeira zona, situada à esquerda do ponto de referência, é governada por razões de viscosidades baixas devido a funções de viscosidade do fluido não newtoniano altas, característicos de velocidades de deslocamentos baixas e que geram interfaces estáveis o suficiente para obter um plateau de eficiências altas. No caso da zona situada à direita do ponto de referência, o comportamento da eficiência mostra uma notória diminuição quanto maior é a razão de viscosidades. Sendo uma zona regida pela instabilidade de Saffman-Taylor, a interface mostra *viscous fingers* consecutivos e varreduras não uniformes.

Nas figuras 4-5b e 4-6b mostram novamente as duas zonas de varredura descritas anteriormente, mas, neste caso óleo mineral é o fluido que desloca as

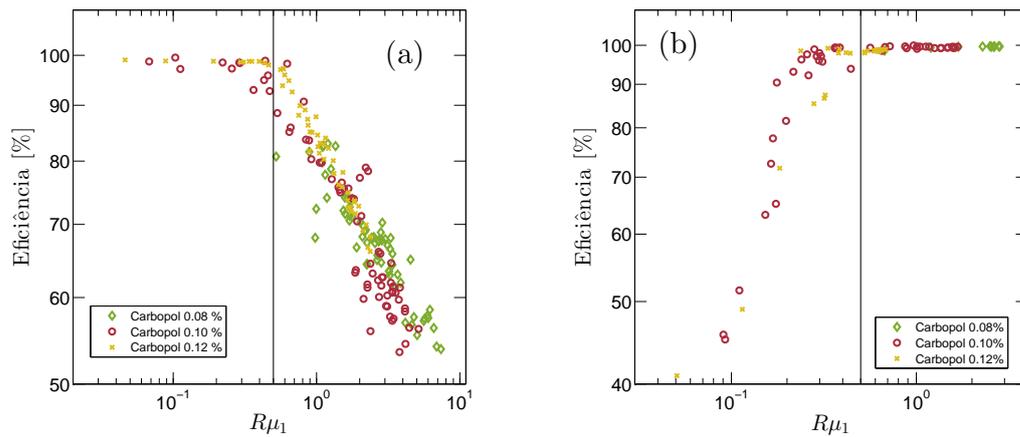


Figura 4-5: Eficiência em função de $R\mu_1$ quando o fluido deslocador é a) as soluções de carbopol, b) o óleo mineral.

suspensões de carbopol. Para esta configuração, a zona do plateau das eficiências altas se encontra à direita do ponto de referência. Essa zona corresponde a valores da função viscosidade do fluido não newtoniano baixos e razões de viscosidade altas devido à velocidades de fluxo altas. Na zona da instabilidade, os valores das razões de viscosidade diminuem, o que pode ser atribuído a velocidades de fluxo baixas, produzindo um incremento da função de viscosidade do fluido não newtoniano, o que faz que os *viscous fingers* se desenvolvam. Mais uma vez os pontos de referência foram $R\mu_1=0.5$ e $R\mu_2=0.2$. Nas duas configurações, tanto sendo a solução de carbopol o fluido deslocador ou óleo mineral, com a concentração de 0.08 % não se atingiu o ponto de referência entre as duas zonas de varredura. Isto pode ser atribuído a uma tensão limite de escoamento τ_0 e um índice de consistência k baixos.

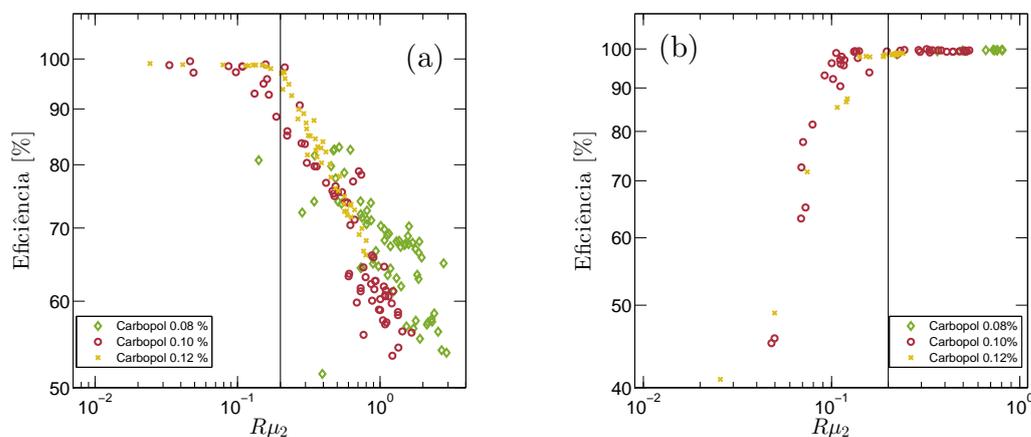


Figura 4-6: Eficiência em função de $R\mu_2$ quando o fluido deslocador é a) soluções de carbopol b) óleo mineral.

4.2.2

Eficiência como uma função das três fases do desvio padrão adimensional

A figura 4-7, ilustra o desvio padrão adimensional (S^*) em função da razão de viscosidade ($R\mu_1$) sendo óleo mineral o fluido deslocador ou vice-versa. O comportamento das interfaces mostra qualitativamente três fases bem definidas que são explicadas a seguir.

Interface plana: ($0 < S^* < 10$)

Na figura 4-7a, as vazões são baixas, o que faz com que a função viscosidade $\eta(\dot{\gamma}_w)$ possua um valor suficientemente elevado para manter uma interface estável, o que leva a uma varredura completa. Esta etapa está longe do ponto de transição, portanto as perturbações na frente da interface são mínimas. Para a figura 4-7b o comportamento é o mesmo, sendo o fluido newtoniano o deslocador. A varredura completa é obtida com altas vazões na qual a viscosidade da suspensão de carbopol é menor que a do óleo mineral.

Interface com perturbações: ($10 < S^* < 100$)

Quando se ultrapassa a etapa de $S^* < 10$ (figura 4-7a), através do aumento gradual da vazão, a função viscosidade diminui o suficiente para mostrar perturbações na frente da interface. Mostra inserções que produzem um único *viscous finger* sem divisões consecutivas, o que aumenta significativamente o desvio padrão adimensional, mas mantém um alto valor da eficiência. Para a Figura 4-7b, através da redução da vazão, a função viscosidade do fluido deslocado aumenta, o que faz surgir uma configuração triangular na frente da interface, que torna-se cada vez mais acentuada quanto menor seja a vazão.

***Viscous fingers* desenvolvidos ($S^* > 100$)**

Na figura 4-7a, é observada a instabilidade Saffman-Taylor desenvolvida, mostrando interfaces instáveis com *viscous fingers* de divisões consecutivas. Após $S^* = 100$, todas as interfaces de deslocamento, geram desvios padrões adimensionais que atingem um plateau. A figura 4-7b apresenta o mesmo comportamento. Deve-se destacar que $S^* > 100$ é o ponto de transição entre a zona de varredura completa ou eficiências altas e os *viscous fingers* desenvolvidos.

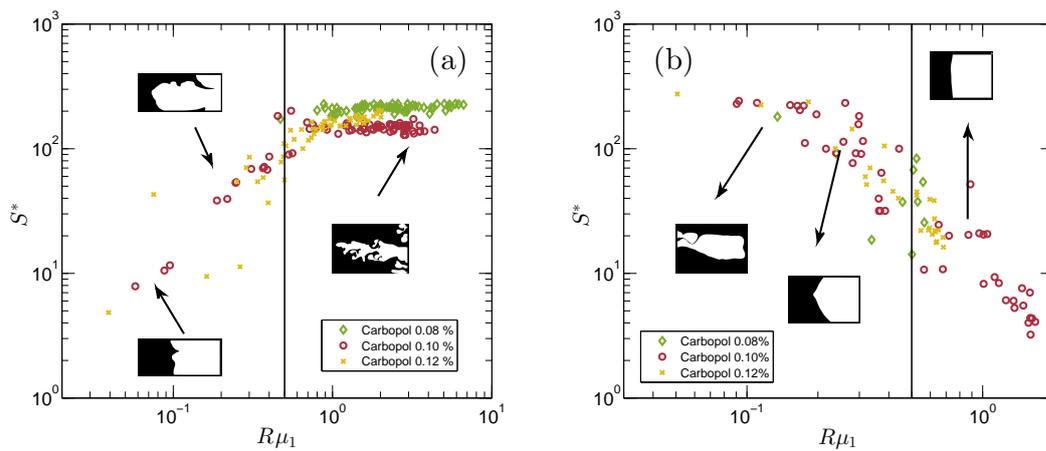


Figura 4-7: Desvio padrão adimensional em função de $R\mu_1$ quando o fluido deslocador é a) as suspensão de carbopol, b) óleo mineral.

4.3

Interfaces desenvolvidas so longo dos escoamentos

As Figuras 4-8, 4-9 e 4-10 apresentam as imagens binarizadas das suspensões de carbopol deslocando óleo mineral. O caso contrário ilustra-se nas figuras 4-11, 4-12 e 4-13. As imagens mostram o fluido deslocador como a área branca e a área preta como o fluido deslocado. Foram escolhidas quatro razões de viscosidade para cada concentração e configuração, de tal forma que mostra-se graficamente as mudanças que as interfaces vão tendo ao longo dos testes. Das quatro razões escolhidas, a primeira e a quarta são as velocidades mais baixa e mais alta atingida respectivamente, e os outros dois pontos são as razões mais próximas ao ponto de transição.

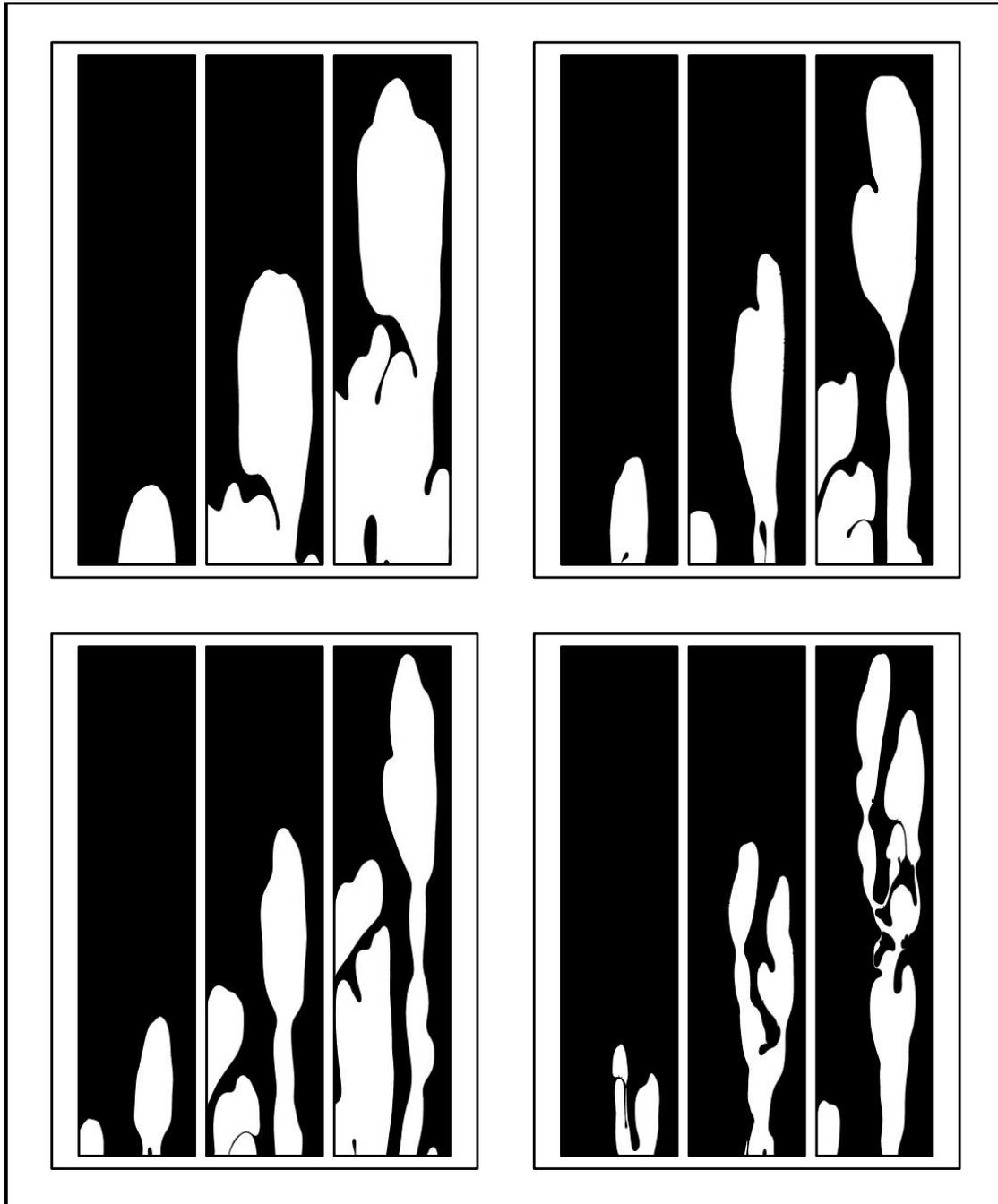


Figura 4-8: Desenvolvimento da interface de Carbopol deslocando óleo em concentração 0.08%. Imagem esquerda da primeira linha: $R\mu_1 = 0.7404$. Imagem na direita da primeira linha: $R\mu_1 = 0.8024$. Imagem esquerda da segunda linha: $R\mu_1 = 0.8486$. Imagem direita da segunda linha: $R\mu_1 = 0.945$

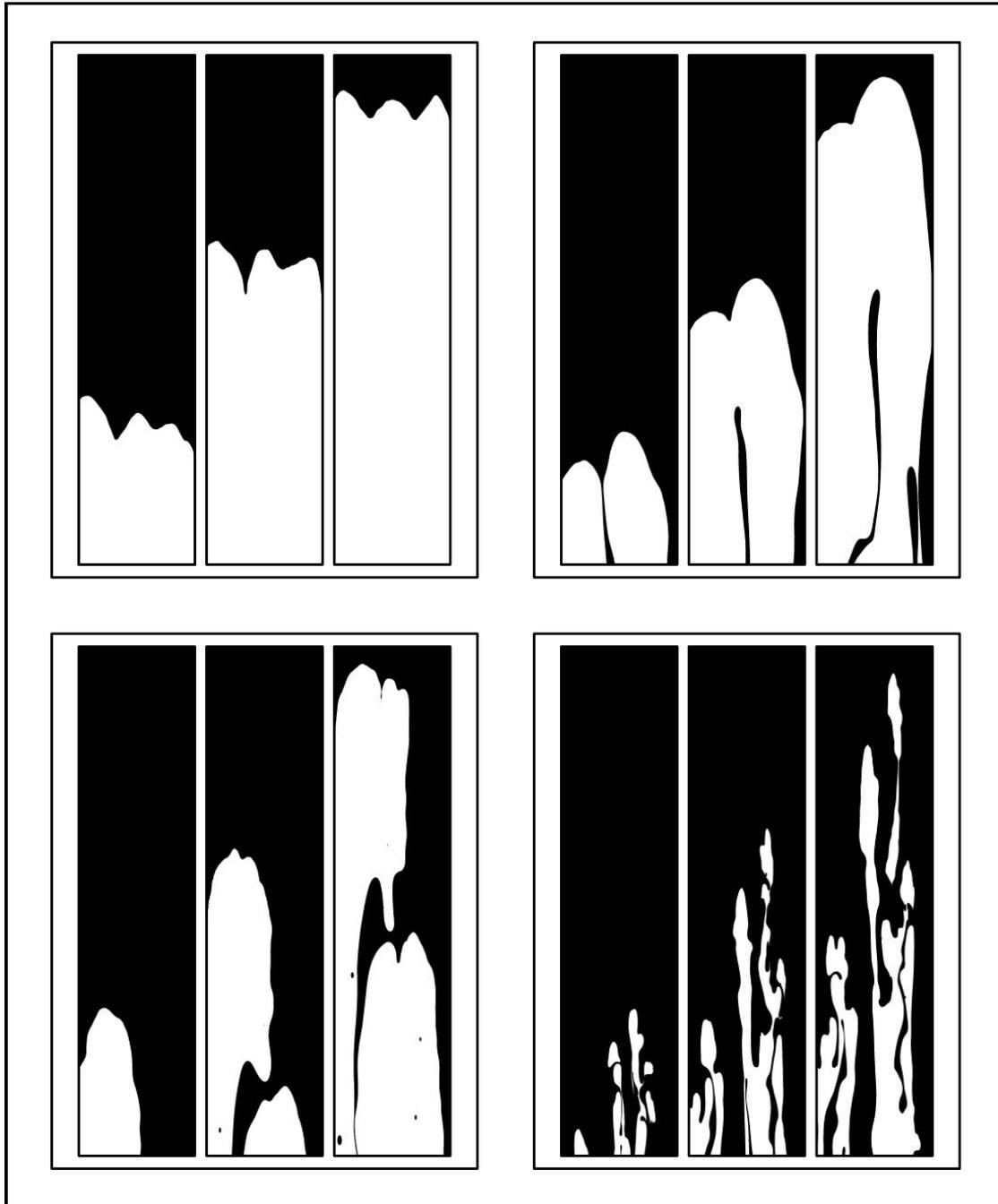


Figura 4-9: Desenvolvimento da interface de Carbopol deslocando óleo em concentração 0.1%. Imagem esquerda da primeira linha: $R\mu_1 = 0.19$. Imagem na direita da primeira linha: $R\mu_1 = 0.4915$. Imagem esquerda da segunda linha: $R\mu_1 = 0.5256$. Imagem direita da segunda linha: $R\mu_1 = 0.7045$

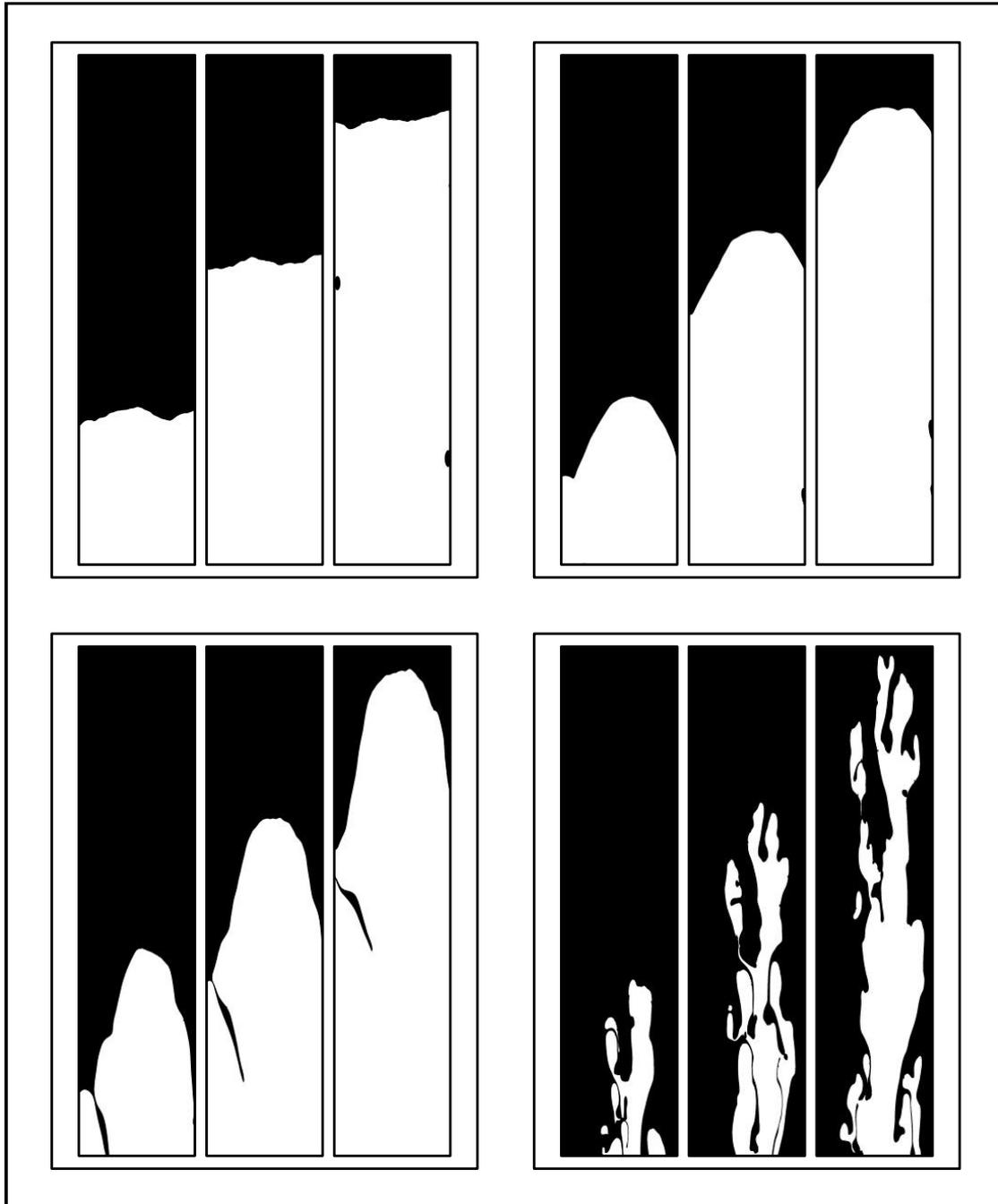


Figura 4-10: Desenvolvimento da interface de Carbopol deslocando óleo em concentração 0.12%. Imagem esquerda da primeira linha: $R\mu_1 = 0.26$. Imagem na direita da primeira linha: $R\mu_1 = 0.3919$. Imagem esquerda da segunda linha: $R\mu_1 = 0.5141$. Imagem direita da segunda linha: $R\mu_1 = 0.7429$

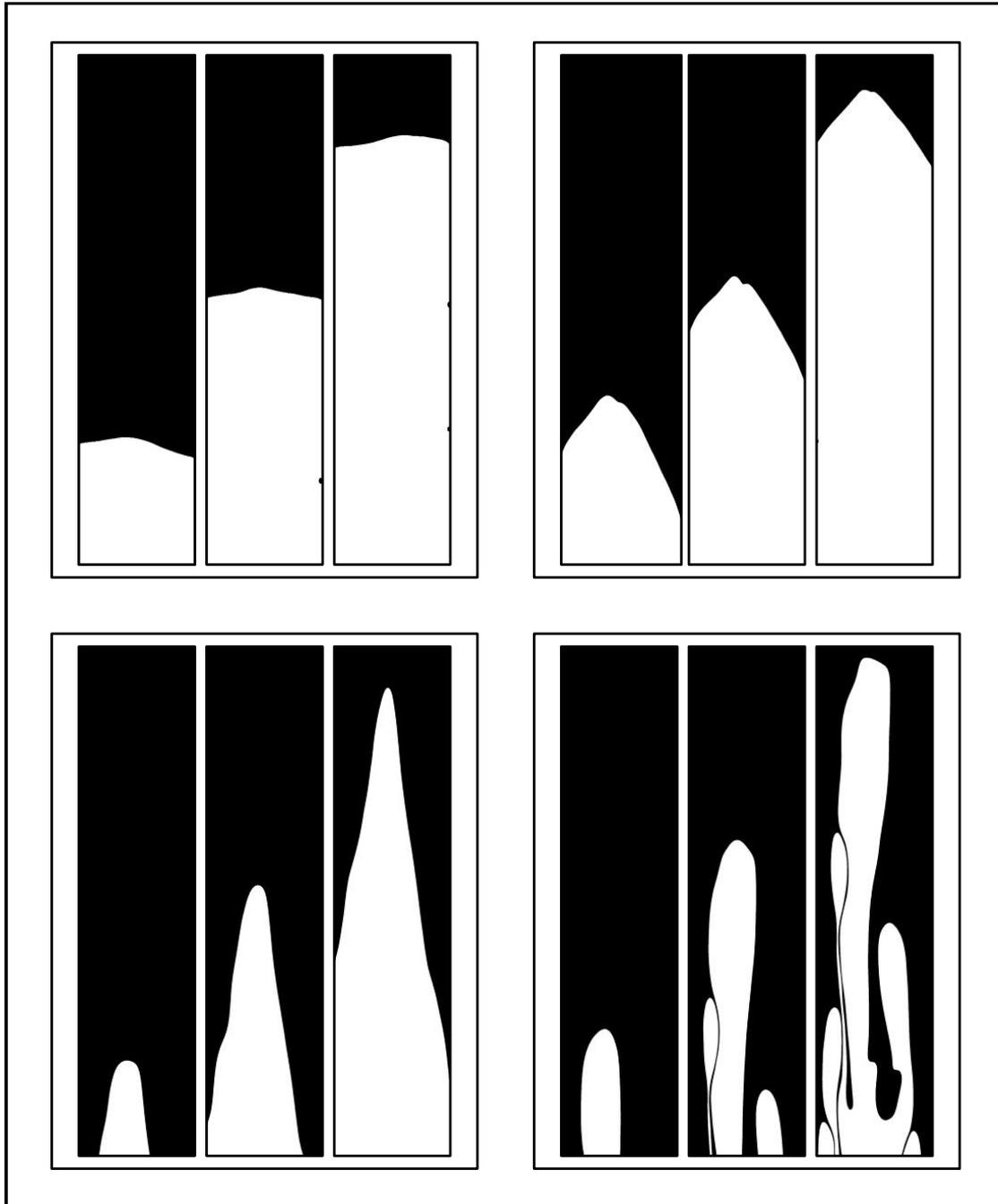


Figura 4-11: Desenvolvimento da interface do óleo deslocando carbopol em concentração 0.12%. Imagem esquerda da primeira linha: $R\mu_1 = 1.9$. Imagem na direita da primeira linha: $R\mu_1 = 0.8170$. Imagem esquerda da segunda linha: $R\mu_1 = 0.4711$. Imagem direita da segunda linha: $R\mu_1 = 0.0500$

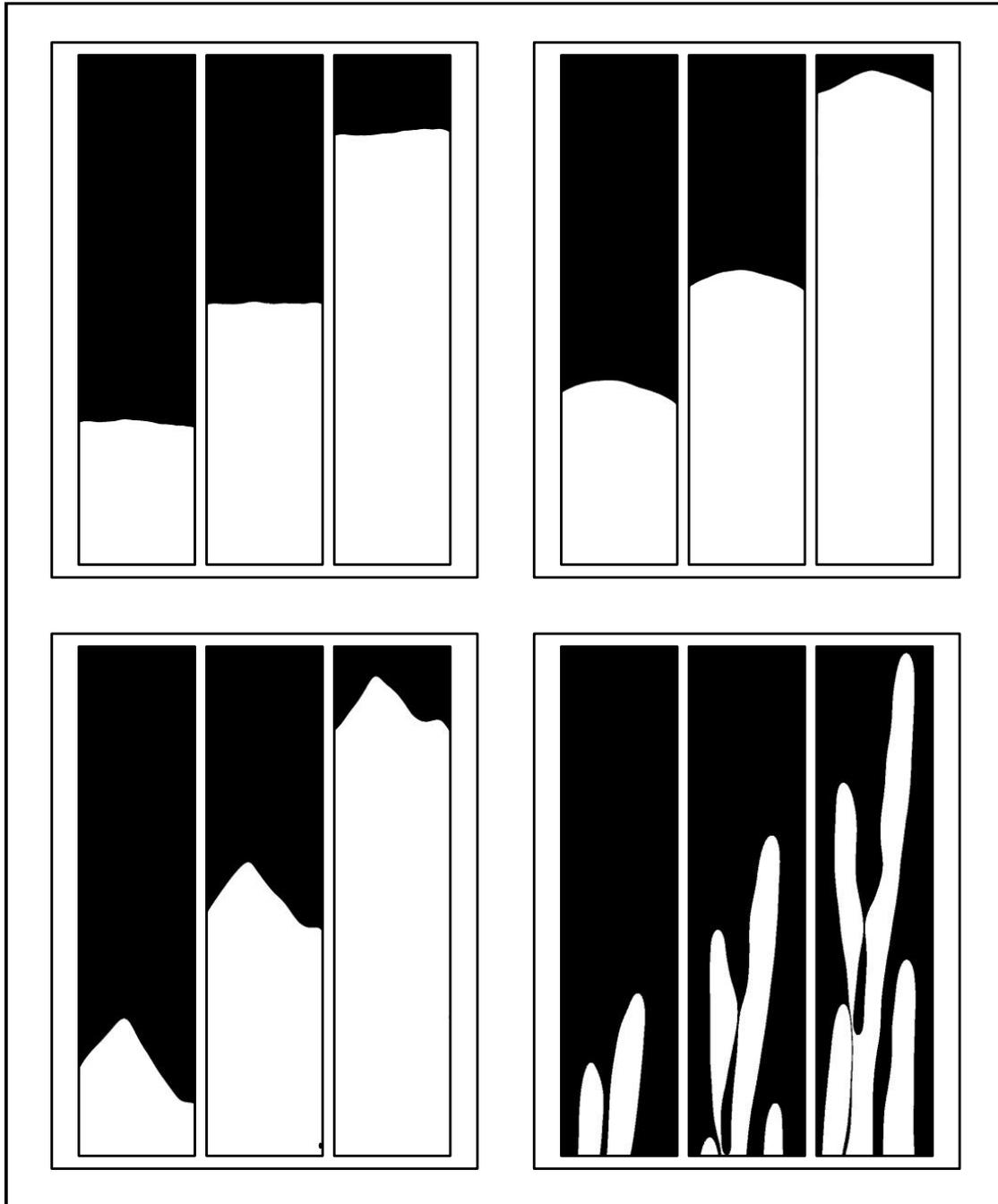


Figura 4-12: Desenvolvimento da interface do óleo deslocando carbopol em concentração 0.1%. Imagem esquerda da primeira linha: $R\mu_1 = 1.9926$. Imagem na direita da primeira linha: $R\mu_1 = 0.7599$. Imagem esquerda da segunda linha: $R\mu_1 = 0.4802$. Imagem direita da segunda linha: $R\mu_1 = 0.071$

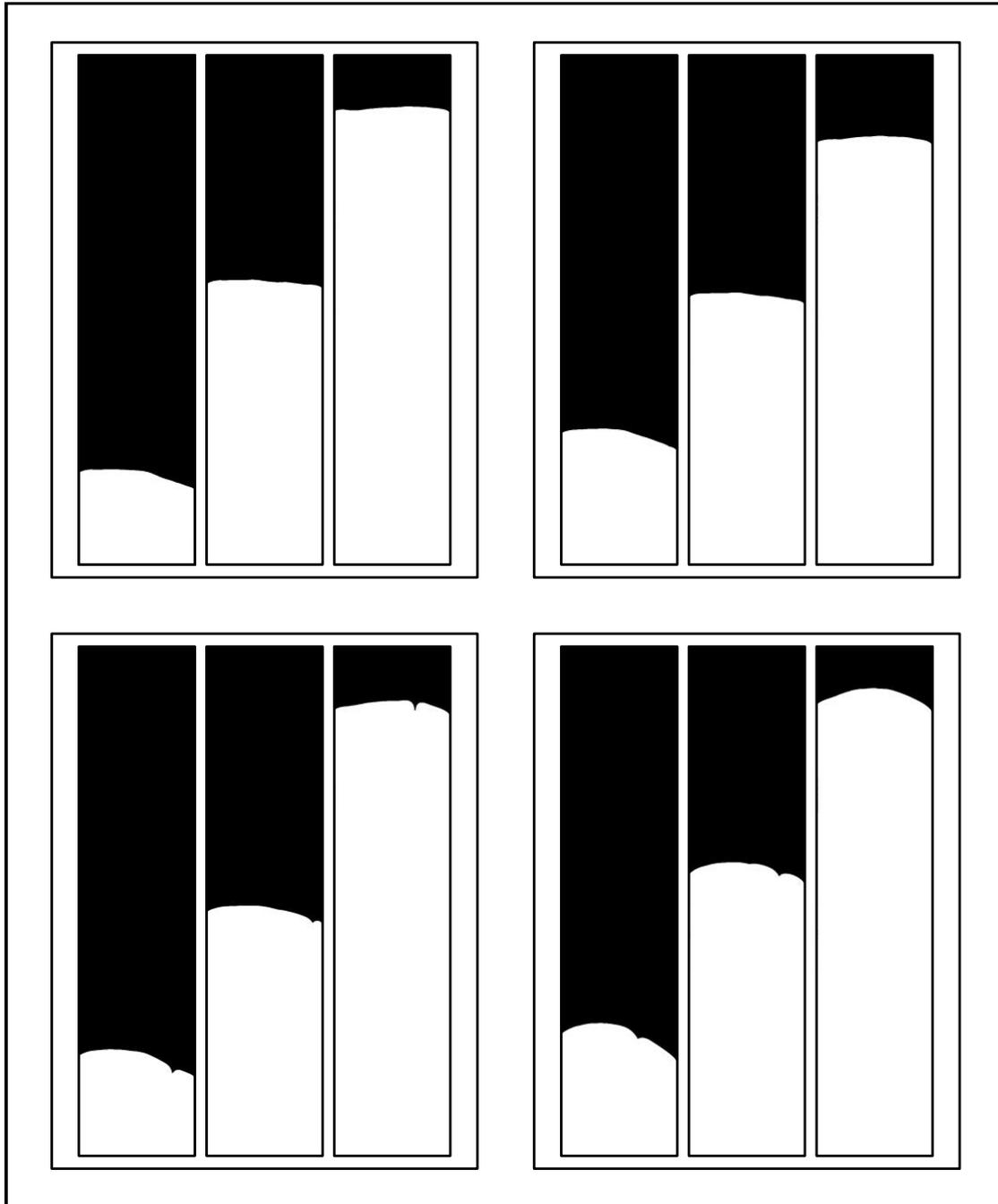


Figura 4-13: Desenvolvimento da interface do óleo deslocando carbopol em concentração 0.08%. Imagem esquerda da primeira linha: $R\mu_1 = 2.855$. Imagem na direita da primeira linha: $R\mu_1 = 2.2687$. Imagem esquerda da segunda linha: $R\mu_1 = 0.9426$. Imagem direita da segunda linha: $R\mu_1 = 0.6333$

4.4

Efeitos da inércia na célula de Hele-Shaw

Segundo Chevalier et al. [17], a influência da inércia em estudos na células de Hele-Shaw retangulares são significativos ao ultrapassar os limites de $Re > 1$ e $We^* \approx 15$, sendo $Re = \rho Ub/\eta$ e $We^* = \rho U^2 W/\sigma$ com ρ sendo a densidade

do fluido, a velocidade U e σ a tensão superficial. Para nosso estudo, como foi confirmado pela figura 4-14, os efeitos da inércia são considerados desprezíveis.

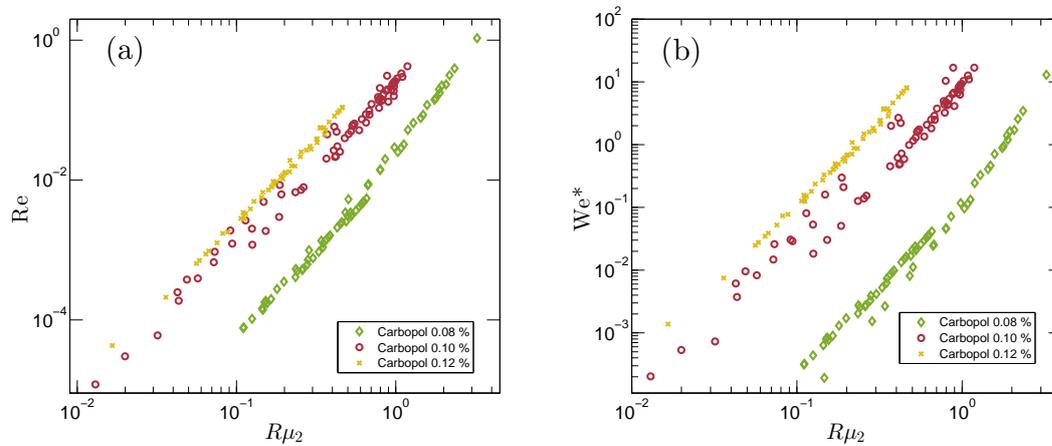


Figura 4-14: a) Re em função de $R\mu_2$, b) We^* em função de $R\mu_2$.

4.5

Efeitos da capilaridade no deslocamento de fluidos imiscíveis

Conhecendo as tensões interfaciais mostradas na tabela 4-1 para o par de fluidos (suspensão de carbopol e óleo mineral), é possível determinar a influência das forças capilares no deslocamento.

Tabela 4-1: Tensão interfacial

Concentração da suspensão	Tensão interfacial entre fluidos (σ) [mN/m]
0.08 %	43
0.10 %	45
0.12 %	48

A partir das referências bibliográficas, se a inércia é considerada insignificante no deslocamento de fluidos na célula de Hele-Shaw, as forças viscosas e capilares são consideradas predominantes [17]. Embora seja obtido o ponto de transição da eficiência em função da razão de viscosidades, é imperativo obter a influência da capilaridade para nosso trabalho.

Mantendo a razão de viscosidade fixa, gráficos nos quais a eficiência é função da capilaridade foram feitos, sendo que as soluções de carbopol deslocam óleo mineral e vice-versa.

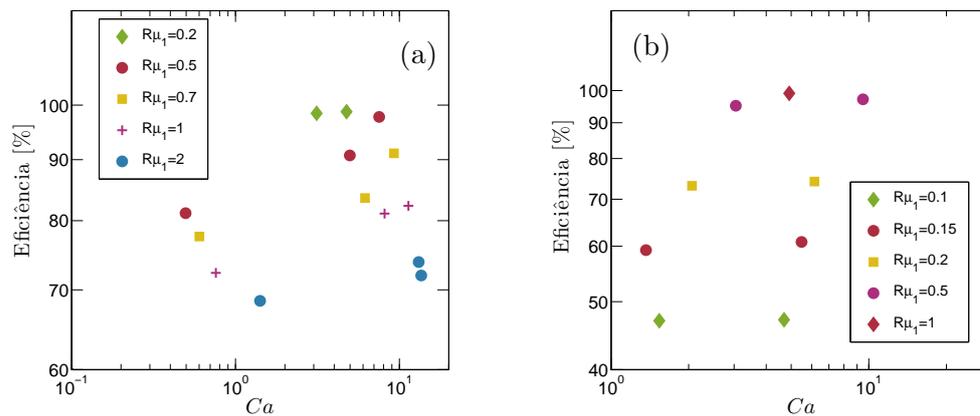


Figura 4-15: Eficiência em função de Ca sendo o fluido deslocador a) carbopol e b) óleo mineral.

A partir da figura 4-15a, se pode deduzir que quanto maior é a razão de viscosidade, as forças capilares são menos influentes do que as forças viscosas na eficiência de deslocamento. Este comportamento pode ser visto quando $R\mu_1 = 2$ sendo que, apesar da variação do número de capilaridade (Ca), a eficiência não sofre mudanças abruptas.

Um comportamento diferente se apresenta quando a razão de viscosidade é menor, pois as forças capilares se tornam influentes. Neste caso, quanto menor é o número de capilaridade, menor é a eficiência de deslocamento. Este comportamento pode ser atribuído à pressão capilar agindo na interface formada entre os dois fluidos. O fenômeno mencionado é resultado da diferença de pressão entre as duas fases devido à molhabilidade (tendência de um determinado fluido a se espalhar ou aderir sobre uma superfície sólida em presença de outra imiscível) da solução aquosa e do óleo mineral.

Devido ao fato de o fluido com maior molhabilidade ser aquele que desloca, a facilidade de avançar através da folga entre as placas da célula é maior em relação ao fluido deslocado, o que provoca instabilidade, que se manifesta com eficiências menores.

Sendo óleo mineral o fluido deslocador (figura 4-15b), a pressão capilar age em sentido contrário ao deslocamento, o que tende a estabilizá-la. Apesar de serem forças presentes no deslocamento, não existe incidência na eficiência em nenhuma das razões de viscosidade estudadas.

5 Conclusões

5.1 Conclusões

Analisou-se, mediante um abordagem experimental, a eficiência resultante da varredura de um fluido não newtoniano viscoplástico em três concentrações diferentes deslocando óleo mineral e vice-versa, em uma célula de Hele-Shaw retangular.

Nos resultados citados nas referências bibliográficas [6, 7, 17, 29, 30, 36, 37, 41, 55], o fluido deslocador é considerado invíscido, e fornece como resultado o clássico *finger* único. No presente estudo foi utilizado óleo mineral cuja viscosidade não pode ser considerado desprezível. Portanto nosso estudo é baseado em função tanto dos parâmetros geométricos da bancada como dos dinâmicos e reológicos dos dois fluidos envolvidos.

As interfaces resultantes da injeção, a uma vazão constante são regidas pelas forças capilares e viscosas, sendo a influência da inércia considerada desprezível.

Indagou-se a possibilidade de obter dois fatores adimensionais em função da razão de viscosidade entre os fluidos involucrados, que forneça o ponto de transição entre a zona de deslocamento que gera eficiências altas, e a zona regida pelos *viscous fingers* e eficiências menores, obtendo $R\mu_1 = 0.5$ e $R\mu_2 = 0.2$ para as duas configurações.

Usando a solução aquosa de carbopol com concentração de 0.08 %, não foi possível obter o ponto de transição entre as duas zonas, devido ao fato de que ainda com a menor vazão, a função viscosidade da solução é menor que do óleo mineral, atribuível a uma tensão limite de escoamento (τ_0) e um índice de consistência (k) baixos.

As interfaces geradas ao longo dos testes mostraram formas diferentes, as quais foram classificadas em relação ao desvio padrão adimensional S^* .

As forças capilares são influentes quando as forças viscosas são fracas, criando instabilidade na interface. Este comportamento se mostra quando a o fluido deslocador possui uma molhabilidade maior que o deslocado.

5.2 Recomendações

Pode-se avaliar o efeito na inércia na formação dos *viscous fingers* utilizando velocidades maiores do que as foram testadas nesta dissertação.

Sugere-se a construção de uma célula de Hele-Shaw radial a fim de estudar os efeitos viscosos e capilares em circunstâncias onde nem a área, e nem a vazão sejam constantes. Ao mesmo tempo, propõe-se melhorar a iluminação da bancada atual e utilizar um sistema de aquisição de dados que forneça resultados em tempo real com o fim de fazer alterações no ato se for preciso.

Preconiza-se em usar fluidos miscíveis não-newtonianos a fim de expandir as possibilidades de pesquisa.

6

Referências bibliográficas

- [1] T. ACHARYA AND A. K. RAY, *Image processing: principles and applications*, John Wiley & Sons, 2005.
- [2] T. T. AL-HOUSSEINY, P. A. TSAI, AND H. A. STONE, *Control of interfacial instabilities using flow geometry*, *Nature Physics*, 8 (2012), pp. 747–750.
- [3] M. B. AMAR AND E. C. POIRÉ, *Pushing a non-newtonian fluid in a hele-shaw cell: From fingers to needles*, *Physics of Fluids* (1994-present), 11 (1999), pp. 1757–1767.
- [4] M. AYUB AND R. G. BENTSEN, *Interfacial viscous coupling: a myth or reality?*, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 23 (1999), pp. 13–26.
- [5] H. A. BARNES, *The yield stress review*, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 81 (1999), pp. 133–178.
- [6] D. BENSIMON, *Stability of viscous fingering*, *Physical Review A*, 33 (1986).
- [7] D. BENSIMON, L. P. KADANOFF, S. LIANG, B. I. SHRAIMAN, AND C. TANG, *Viscous flows in two dimensions*, *Reviews of Modern Physics*, 58 (1986), p. 977.
- [8] R. B. BIRD, R. C. ARMSTRONG, O. HASSAGER, AND C. F. CURTISS, *Dynamics of polymeric liquids*, vol. 1, Wiley New York, 1977.
- [9] D. BONN, H. KELLAY, M. B. AMAR, AND J. MEUNIER, *Viscous finger widening with surfactants and polymers*, *Physical review letters*, 75 (1995), p. 2132.
- [10] D. BONN AND J. MEUNIER, *Viscoelastic free-boundary problems: Non-newtonian viscosity vs normal stress effects*, *Physical Review Letters*, 79 (1997), p. 2662.
- [11] E. BUCKINGHAM, *On physically similar systems; illustrations of the use of dimensional equations*, *Physical Review*, 4 (1914), pp. 345–376.

- [12] J. CANNY, *A computational approach to edge detection*, Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, (1986), pp. 679–698.
- [13] J. CASADEMUNT, *Viscous fingering as a paradigm of interfacial pattern formation: Recent results and new challenges*, Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science, 14 (2004), pp. 809–824.
- [14] R. CASTILLA AND P. GAMEZ-MONTERO, *Análisis dimensional*.
- [15] C.-Y. CHEN, C.-W. HUANG, L.-C. WANG, AND J. A. MIRANDA, *Controlling radial fingering patterns in miscible confined flows*, Physical Review E, 82 (2010), p. 056308.
- [16] J.-D. CHEN, *Growth of radial viscous fingers in a hele-shaw cell*, Journal of Fluid Mechanics, 201 (1989), pp. 223–242.
- [17] C. CHEVALIER, M. BEN AMAR, D. BONN, AND A. LINDNER, *Inertial effects on saffman–taylor viscous fingering*, Journal of fluid mechanics, 552 (2006), pp. 83–97.
- [18] M. CHRISTIE, A. MUGGERIDGE, J. BARLEY, ET AL., *3d simulation of viscous fingering and wag schemes*, SPE reservoir engineering, 8 (1993), pp. 19–26.
- [19] G. DACCORD, J. NITTMANN, AND H. E. STANLEY, *Radial viscous fingers and diffusion-limited aggregation: Fractal dimension and growth sites*, Physical review letters, 56 (1986), p. 336.
- [20] R. DERICHE, *Using canny’s criteria to derive a recursively implemented optimal edge detector*, International journal of computer vision, 1 (1987), pp. 167–187.
- [21] E. O. DIAS, E. ALVAREZ-LACALLE, M. S. CARVALHO, AND J. A. MIRANDA, *Minimization of viscous fluid fingering: a variational scheme for optimal flow rates*, Physical review letters, 109 (2012), p. 144502.
- [22] E. O. DIAS AND J. A. MIRANDA, *Influence of inertia on viscous fingering patterns: Rectangular and radial flows*, Physical Review E, 83 (2011), p. 066312.
- [23] A. DYES, B. CAUDLE, R. ERICKSON, ET AL., *Oil production after breakthrough as influenced by mobility ratio*, Journal of Petroleum Technology, 6 (1954), pp. 27–32.

- [24] R. E. EWING, *Simulation of multiphase flows in porous media*, Transport in Porous Media, 6 (1991), pp. 479–499.
- [25] P. GONDRET AND M. RABAUD, *Shear instability of two-fluid parallel flow in a hele-shaw cell*, Physics of Fluids (1994-present), 9 (1997), pp. 3267–3274.
- [26] R. C. GONZALEZ AND R. E. WOODS, *Instructor's Manual for Digital Image Processing*, Addison-Wesley, 1992.
- [27] X. GUAN AND R. PITCHUMANI, *Viscous fingering in a hele-shaw cell with finite viscosity ratio and interfacial tension*, Journal of fluids engineering, 125 (2003), pp. 354–364.
- [28] A. HE AND A. BELMONTE, *Inertial effects on viscous fingering in the complex plane*, Journal of Fluid Mechanics, 668 (2011), pp. 436–445.
- [29] H. S. HELE-SHAW, *Flow of water*, Nature, 58 (1898), p. 520.
- [30] G. M. HOMS, *Viscous fingering in porous media*, Annual review of fluid mechanics, 19 (1987), pp. 271–311.
- [31] D. A. KESSLER, J. KOPLIK, AND H. LEVINE, *Pattern selection in fingered growth phenomena*, Advances in Physics, 37 (1988), pp. 255–339.
- [32] E. KOVAL ET AL., *A method for predicting the performance of unstable miscible displacement in heterogeneous media*, Society of Petroleum Engineers Journal, 3 (1963), pp. 145–154.
- [33] K. LEE, E. CLARIDGE, ET AL., *Areal sweep efficiency of pseudoplastic fluids in a five-spot hele-shaw model*, Society of Petroleum Engineers Journal, 8 (1968), pp. 52–62.
- [34] E. LEMAIRE, P. LEVITZ, G. DACCORD, AND H. VAN DAMME, *From viscous fingering to viscoelastic fracturing in colloidal fluids*, Physical review letters, 67 (1991), p. 2009.
- [35] S. LI, J. S. LOWENGRUB, J. FONTANA, AND P. PALFFY-MUHORAY, *Control of viscous fingering patterns in a radial hele-shaw cell*, Physical review letters, 102 (2009), p. 174501.
- [36] A. LINDNER, D. BONN, AND J. MEUNIER, *Viscous fingering in a shear-thinning fluid*, Physics of Fluids (1994-present), 12 (2000), pp. 256–261.

- [37] A. LINDNER, D. BONN, E. C. POIRÉ, M. B. AMAR, AND J. MEUNIER, *Viscous fingering in non-newtonian fluids*, Journal of Fluid Mechanics, 469 (2002), pp. 237–256.
- [38] J. C. V. MACHADO, *Reologia e escoamento dos fluidos: ênfase na indústria do petróleo*, Interciência, 2002.
- [39] J. MAHAFFEY, W. RUTHERFORD, C. MATTHEWS, ET AL., *Sweep efficiency by miscible displacement in a five-spot*, Society of Petroleum Engineers Journal, 6 (1966), pp. 73–80.
- [40] L. MARTYUSHEV AND A. BIRZINA, *Specific features of the loss of stability during radial displacement of fluid in the hele-shaw cell*, Journal of Physics: Condensed Matter, 20 (2008), p. 045201.
- [41] T. MAXWORTHY, *The nonlinear growth of a gravitationally unstable interface in a hele-shaw cell*, Journal of Fluid Mechanics, 177 (1987), pp. 207–232.
- [42] S. MAY AND J. MAHER, *Fractal dimension of radial fingering patterns*, Physical Review A, 40 (1989), p. 1723.
- [43] K. V. MCCLOUD AND J. V. MAHER, *Experimental perturbations to saffman-taylor flow*, Physics Reports, 260 (1995), pp. 139–185.
- [44] J. MCLEAN AND P. SAFFMAN, *The effect of surface tension on the shape of fingers in a hele shaw cell*, Journal of Fluid Mechanics, 102 (1981), pp. 455–469.
- [45] P. MOLLER, A. FALL, V. CHIKKADI, D. DERKS, AND D. BONN, *An attempt to categorize yield stress fluid behaviour*, Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 367 (2009), pp. 5139 – 5155.
- [46] J. NASE, D. DERKS, AND A. LINDNER, *Dynamic evolution of fingering patterns in a lifted hele-shaw cell*, Physics of Fluids (1994-present), 23 (2011), p. 123101.
- [47] D. PEACEMAN, H. RACHFORD JR, ET AL., *Numerical calculation of multi-dimensional miscible displacement*, Society of Petroleum Engineers Journal, 2 (1962), pp. 327–339.
- [48] T. PERKINS AND O. JOHNSTON, *A study of immiscible fingering in linear models*, Society of Petroleum Engineers Journal, 9 (1969), pp. 39–46.

- [49] D. PIHLER-PUZOVIC, P. ILLIEN, M. HEIL, AND A. JUEL, *Suppression of complex fingerlike patterns at the interface between air and a viscous fluid by elastic membranes*, Physical review letters, 108 (2012), p. 074502.
- [50] D. PROKHROV AND A. VASILEV, *Convex dynamics in hele-shaw cells*, INTERNATIONAL JOURNAL OF MATHEMATICS AND MATHEMATICAL SCIENCES, (2002).
- [51] J. V. REBAZA, *Detección de bordes mediante el algoritmo de canny*, 2007.
- [52] R. C. REID, J. M. PRAUSNITZ, AND B. E. POLING, *The properties of gases and liquids*, (1987).
- [53] J. C. RUSS, *Computer-assisted microscopy: the measurement and analysis of images*, Springer Science & Business Media, 2012.
- [54] J. E. SADER, D. Y. CHAN, AND B. D. HUGHES, *Non-newtonian effects on immiscible viscous fingering in a radial hele-shaw cell*, Physical Review E, 49 (1994), p. 420.
- [55] F. SAFFMAN P. G. .; SIR GEOFFREY TAYLOR, *The penetration of a fluid into a porous medium or hele-shaw cell containing a more viscous liquid*, INTERNATIONAL JOURNAL OF MATHEMATICS AND MATHEMATICAL SCIENCES, (1958).
- [56] M. SAGHIR, O. CHAALAL, AND M. ISLAM, *Numerical and experimental modeling of viscous fingering during liquid–liquid miscible displacement*, Journal of Petroleum Science and Engineering, 26 (2000), pp. 253–262.
- [57] S. K. SARKAR AND D. JASNOW, *Viscous fingering in an anisotropic hele-shaw cell*, Physical Review A, 39 (1989), p. 5299.
- [58] D. E. SMITH, X. Z. WU, A. LIBCHABER, E. MOSES, AND T. WITTEN, *Viscous finger narrowing at the coil-stretch transition in a dilute polymer solution*, Physical Review A, 45 (1992), p. R2165.
- [59] S. WILSON, *The taylor-saffman problem for a non-newtonian liquid*, Journal of Fluid Mechanics, 220 (1990), pp. 413–425.
- [60] T. YAMAMOTO, H. KAMIKAWA, N. MORI, AND K. NAKAMURA, *Numerical simulation of viscous fingering in non-newtonian fluids in a hele-shaw cell.*, Journal of the Society of Rheology, Japan, 30 (2002), pp. 121–127.

- [61] T. YAMAMOTO, H. KAMIKAWA, H. TANAKA, K. NAKAMURA, AND N. MORI, *Viscous fingering of non-newtonian fluids in a rectangular hele-shaw cell.*, Journal of the Society of Rheology,, 29 (2001), pp. 81–87.
- [62] T. YAMAMOTO, R. KIMOTO, AND N. MORI, *Tip velocity of viscous fingers in shear-thinning fluids in a hele-shaw cell*, JSME International Journal Series B Fluids and Thermal Engineering, 48 (2005), pp. 756–762.
- [63] Q. YUAN AND J. AZAIEZ, *Inertial effects of miscible viscous fingering in a hele-shaw cell*, Fluid Dynamics Research, 47 (2015), p. 015506.