

Invasão de fluidos de perfuração em reservatórios através de uma célula de Hele-Shaw

Aluno: Patrícia Emídio de Azevedo
Orientador: Paulo Roberto de Souza Mendes

Introdução

Motivação

O início e a sustentação do processo de busca pelo petróleo datam de 1859, quando foi iniciada a exploração comercial dos Estados Unidos na Pensilvânia, com um poço de apenas 21 metros de profundidade que produziu 2 m³/dia de óleo. Descobriu-se que a destilação do petróleo resultava em produtos que substituíam, com grande margem de lucro, o querosene obtido através do carvão e óleo de baleia. Estes fatores marcaram o início da era do petróleo.

A busca do petróleo levou a importantes descobertas nos EUA, Venezuela, Trinidad, Argentina, Borneu e Oriente Médio. Até 1945 o petróleo produzido provinha dos EUA, maior produtor do mundo, seguido da Venezuela, México, Rússia, Irã e Iraque. Com o fim da Segunda Guerra, um novo quadro geopolítico se traça. Essa década marca também uma interna atividade exploratória, e começam a se intensificar as incursões no mar, com o surgimento de novas técnicas exploratórias.

A década de 60 registra a abundância do petróleo disponível no mundo. O excesso de produção, aliado aos baixos preços estimula o consumo desenfreado. Os anos 70 foram marcados por brutais elevações dos preços do petróleo, tornando econômicas grandes descobertas no Mar do Norte e no México. Outras grandes descobertas ocorreram em territórios do Terceiro mundo e dos países comunistas, enquanto que os Estados Unidos perceberam que suas grandes reservas de petróleo já se encontravam esgotadas. Com esses acontecimentos acontecem, então, os grandes avanços tecnológicos no aprimoramento de dispositivos de aquisição, processamento e interpretação de dados sísmicos. Nos anos 80 e 90, os avanços tecnológicos reduzem os custos de exploração e de produção, criando um novo ciclo econômico para a indústria petrolífera. Assim, ao longo do tempo, o petróleo foi se impondo como fonte de energia.

No Brasil, desde a criação da Petrobras já descobriu-se petróleo nos estados do Amazonas, Pará, Maranhão, Ceará, Rio Grande do Norte, Alagoas, Sergipe, Bahia, Espírito Santo, Rio de Janeiro, Paraná, São Paulo e Santa Catarina. A produção de petróleo no Brasil cresceu de 750 m³/dia na época da criação da Petrobras para mais de 182000 m³/dia (Figura 1). (19)

A perfuração de poços de petróleo, especialmente em ambientes marinhos, é uma operação de custos elevadíssimos, onde a minimização do tempo de perfuração e do dano ao reservatório produtor é fundamental. Na medida em que a broca penetra na rocha reservatório, o fluido de perfuração invade a formação devido ao diferencial de pressão positivo entre o mesmo e os fluidos do reservatório. Porções da parte líquida do fluido são perdidas para as formações adjacentes, enquanto parte dos sólidos presentes no fluido de perfuração, constituída por partículas menores que os poros da formação, penetra na rocha durante a perda do fluido, tamponando rapidamente a região ao redor do poço (Figura 2). Partículas maiores acumulam-se na parede do poço, iniciando a formação do reboco externo. Os sólidos e o fluido introduzidos no reservatório durante esse processo causam dano na formação ao redor do poço. Um dos principais problemas ocasionados pela presença do filtrado em zonas produtoras de óleo e gás é o significativo decréscimo nas suas permeabilidades relativas e a consequente redução da produtividade do poço.

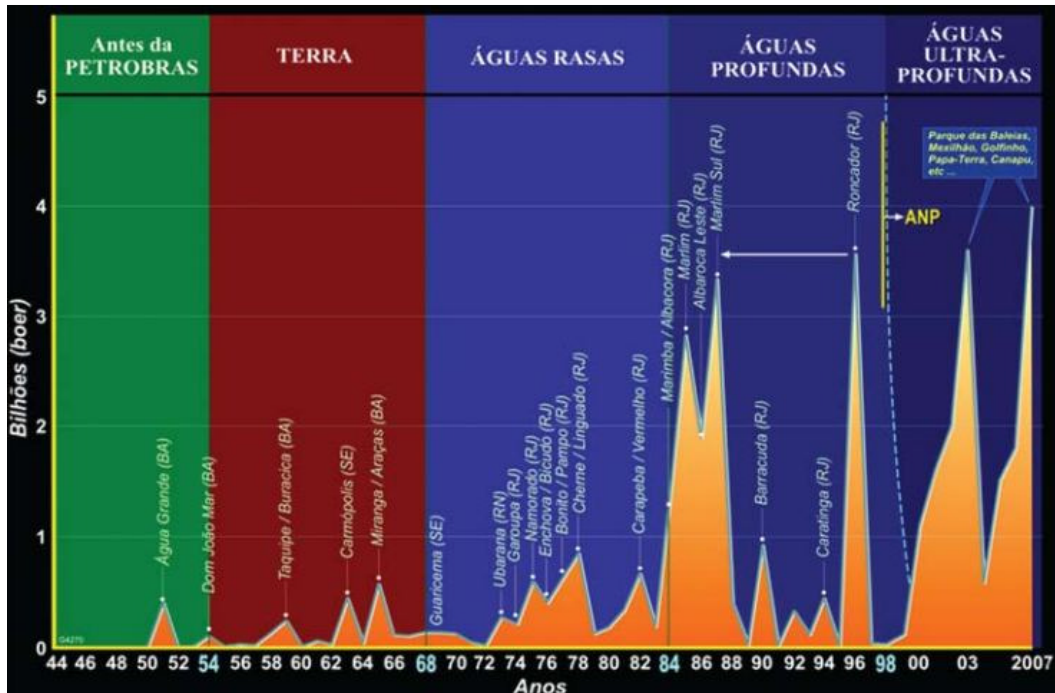


Figura 1: Histórico das principais descobertas realizadas pela Petrobras.

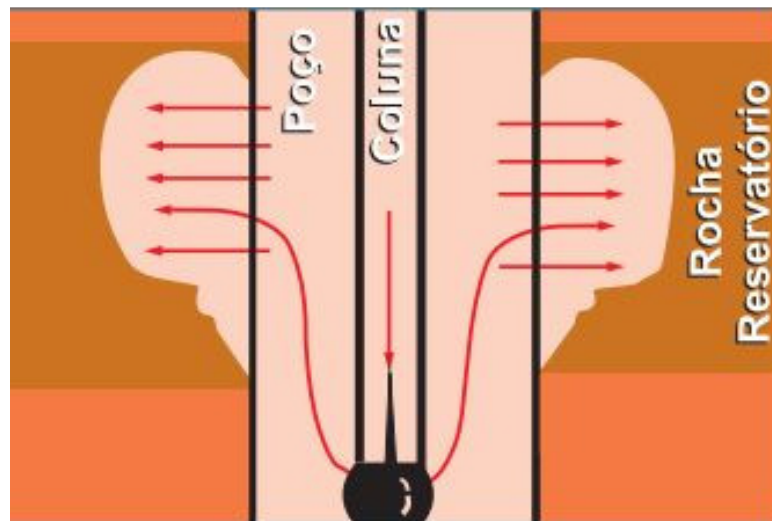


Figura 2: A invasão do fluido de perfuração na rocha reservatório.

Revisão Bibliográfica

Em 1898, Henry Selby Hele-Shaw introduziu um simples sistema com o objetivo de estudar o escoamento potencial de água em torno de objetos a baixos números de Reynolds. Como ficou conhecida, a célula de Hele-Shaw (7) consistia em duas placas planas transparentes separadas por 1 mm de distância e com 300 mm de largura. A Figura 3 exemplifica uma célula retangular de Hele-Shaw. As dimensões W , L e b representam respectivamente a largura, o comprimento e a espessura da célula.

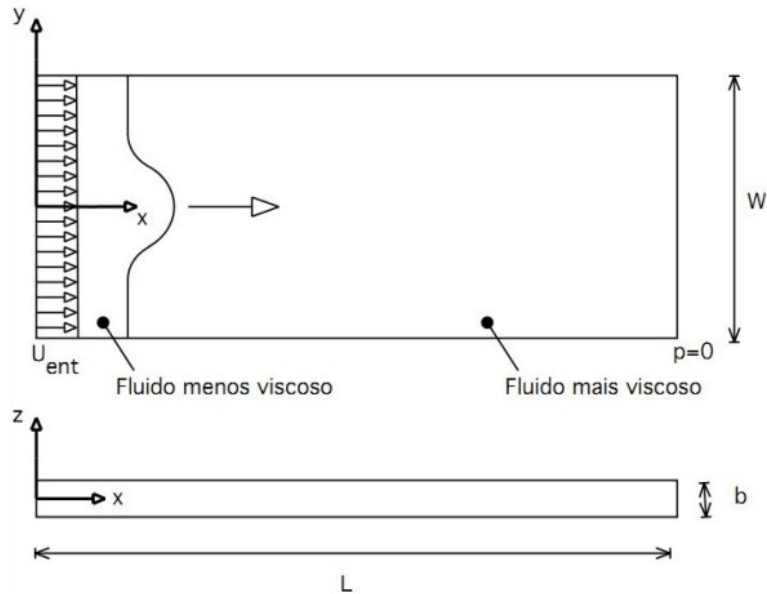


Figura 3: Esquema de uma célula de Hele-Shaw retangular.

Posteriormente, a célula de Hele-Shaw foi utilizada para estudar escoamentos em meios porosos, pois observou-se que a lei de Darcy também tem a mesma forma da equação que rege o escoamento entre as placas. Sir Geoffrey Taylor (17) investigou problemas de escoamento bifásico em meios porosos. Ele observou que escoamentos bidimensionais em meios porosos são modelados pelo escoamento na célula de Hele-Shaw. A velocidade média bidimensional \bar{v} do fluido viscoso newtoniano entre as placas é relacionada com a pressão p pela Lei de Darcy para um meio poroso com permeabilidade k , como pode ser visto nas equações. Essa aproximação é válida apenas quando a distância entre as placas é pequena em comparação com a largura das placas.

$$k = \frac{b^2}{12} \quad (1)$$

$$\bar{v} = \frac{k}{\mu} \nabla p \quad (2)$$

A lei de Darcy é amplamente utilizada para descrever macroscopicamente o escoamento monofásico através de um meio poroso. Convencionou-se que esta lei também pode ser utilizada para descrever escoamentos bifásicos em meios porosos. Devido à complexidade das interações entre os fluidos e dos fluidos com a rocha, essa suposição é muito questionada.

A célula de Hele-Shaw é um dispositivo utilizado para escoamentos bidimensionais e é ideal para análise da instabilidade de Saffman-Taylor. A instabilidade de Saffman-Taylor ou *viscous fingering* é um fenômeno observado quando um fluido de baixa viscosidade substitui um de maior viscosidade na célula de Hele-Shaw.

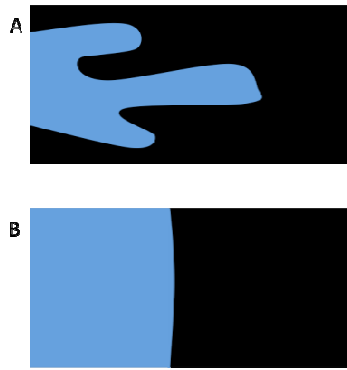


Figura 4: (A) Escoamento com a presença de *viscous fingering*; (B) Escoamento com deslocamento.

A Figura 4 apresenta um desenho esquemático com dois diferentes efeitos que podem ser observados nesse tipo de escoamento. A Figura 4 (A) apresenta um escoamento com a interface instável e com a presença de *viscous fingering* e a Figura 4 (B) apresenta um deslocamento com a interface estável. Pode ser observado que a eficiência de deslocamento é maior quando não há presença de *viscous fingering*.

McLean et al. (14) descreveram os resultados de uma extensão da análise de Saffman-Taylor incluindo os efeitos da tensão superficial devido à curvatura lateral da interface. Investigou-se as soluções em regime permanente na presença de pequenas, mas finitas, tensões superficiais.

McLean e Saffman (14) acreditam que os *fingers* permanecem instáveis mesmo considerando a presença da tensão superficial, o que contradiz simulações numéricas e resultados experimentais. Assim, a partir de suas pesquisas, o problema de instabilidade continuava.

De acordo com Homsy (8), na maioria dos casos, o mecanismo de instabilidade está intimamente relacionado com as variações de viscosidade entre as fases ou dentro de uma única fase contendo um soluto. Homsy (8) estudou o fenômeno de *viscous fingering* em meios porosos homogêneos nas geometrias retangulares, radiais e nos padrões de cinco pontas. Investigou o escoamento bidimensional nos casos em que a orientação da gravidade é colinear com a direção do escoamento. As forças consideradas foram a de gravidade, viscosidade e no caso de fluidos imiscíveis, a tensão superficial.

Homsy (8) determina que são três os parâmetros que regem o escoamento de fluidos viscosos imiscíveis em células de Hele-Shaw: número de capilaridade modificado, contraste de viscosidade entre os fluidos e o número modificado de Darcy-Rayleigh. O primeiro determina a relação entre as forças viscosas e a tensão superficial, o segundo a relação entre viscosidades e o último, a importância relativa entre as forças de empuxo e as forças viscosas.

As equações de Saffman-Taylor são válidas para escoamentos bidimensionais em células de Hele-Shaw. Portanto, é fundamental verificar se há escoamento na terceira dimensão. Caso haja, devem ser feitas alterações nas condições de contorno que regem o problema, como por exemplo, as sugeridas por Park e Homsy (15). Eles observaram que a discrepância entre a teoria e os resultados experimentais em relação às equações de Saffman-Taylor aparentemente ocorre devido à camada de fluido remanescente na célula.

McCloud et al. (12) analisaram a instabilidade no deslocamento de fluidos não newtonianos e observaram vários diferentes padrões de *fingers*. Revisaram experimentos com enfoque na instabilidade de Saffman-Taylor, onde perturbações são adicionadas a *fingers* estáveis para que as mudanças nos padrões de escoamento possam ser compreendidas.

Yamamoto et al. (20) estudaram o fenômeno *viscous fingering* em uma célula retangular de Hele-Shaw. Foram investigados os efeitos dos padrões de formação e de

crescimento dos *fingers*. Ar foi injetado sobre fluidos não newtonianos viscoelásticos, no caso carboximetilcelulose (CMC) e poliacrilamida (PAA), e sobre a glicerina, que representa um fluido newtoniano. Observou-se que os *fingers* da glicerina possuem estruturas densas, enquanto os dos fluidos não newtonianos formam estruturas ramificadas. Os autores explicam esse fenômeno através do "efeito de proteção" em relação às características pseudoplásticas dos fluidos não newtonianos. Ou seja, o "efeito de proteção" ocorre quando um *finger*, que cresce mais que os demais, supre o crescimento dos outros. Devido à viscosidade pseudoplástica, pequenas diferenças no gradiente de pressão perto de duas frentes de *fingers* causam grandes diferenças na viscosidade, assim a viscosidade pseudoplástica aumenta o "efeito de proteção". Observa-se que o número de ramificações aumenta com o acréscimo da pressão do ar injetado. Para elevadas pressões sobre o PAA não foi encontrado um padrão de crescimento dos *viscous fingering*, ao contrário do que foi visto no CMC. Yamamoto et al. acreditam que a mudança nos padrões de crescimento dos *fingers* está relacionada às propriedades elongacionais dos fluidos testados.

Yamamoto et al. (20) também caracterizaram a velocidade da ponta dos *fingers* pelo gradiente de pressão. A relação entre estes foi estabelecida através da Lei de Darcy modificada. Constatou-se que a velocidade da ponta dos *fingers* globalmente aumenta com o acréscimo do gradiente de pressão, enquanto o crescimento dos *fingers* pode ser retardado, em alguns momentos, em função do acréscimo de ramificações que diminuem ou mantém constante a velocidade do *finger*. Entretanto, a velocidade da ponta do *finger* começa a aumentar após o *finger* se dividir. Assim, um *finger* começa a crescer por causa do "efeito de proteção". Segundo a Lei de Darcy modificada, o gradiente efetivo de pressão perto da ponta do *finger* é maior do que a média do gradiente de pressão entre a ponta do *finger* e a saída da célula. Observou-se que a taxa de crescimento depende da altura entre as placas paralelas.

Lindner et al. (9) investigaram a instabilidade de Saffman-Taylor para três diferentes fluidos complexos: uma solução do polímero rígido xanthane, uma solução do polímero flexível PEO e uma solução do surfactante AOT. Para cada uma dessas soluções um mecanismo de seleção clássico é alterado: para soluções de xanthane as forças viscosas são modificadas, as soluções de PEO são afetadas pela tensão normal e a tensão superficial atua sobre os surfactantes.

Soluções poliméricas podem apresentar propriedades de fluidos não newtonianos como efeitos de tensão normal e dependência da viscosidade com a taxa de deformação. Esses efeitos podem ser mais ou menos importantes dependendo da natureza do polímero. Para soluções de polímeros flexíveis, efeitos elásticos como tensão normal e altos valores de viscosidade elongacional são dominantes, enquanto a viscosidade de cisalhamento pode ser praticamente constante. Polímeros rígidos podem apresentar a viscosidade como função da taxa de deformação, entretanto os efeitos elásticos são insignificantes.

Bonn et al. (3) afirmam que polímeros flexíveis alargam os *fingers*, enquanto polímeros rígidos estreitam os *fingers*. Linder et al. (10) realizaram um estudo sobre a instabilidade de Saffman-Taylor em uma célula de Hele-Shaw. O experimento foi realizado com diferentes concentrações de soluções de xantana, com características de viscosidade pseudoplásticas, deslocado por ar. Esse fluido foi escolhido de forma que a viscosidade pseudoplástica possa ser a única propriedade influenciando o experimento. Foi medida a largura do *finger* como função da velocidade.

Assim, Lindner et al. (9) e Lindner et al. (10) concluem que para fluidos pseudoplásticos, a largura do *finger* tende a diminuir com o aumento da velocidade. A largura limite do *finger* para altas velocidades tende a decrescer com o aumento da concentração do polímero.

Chevalier et al. (5) afirmam que para a instabilidade de Saffman-Taylor, a inércia do fluido pode ser importante para altas velocidades dos *fingers*. Investigou-se

experimentalmente os efeitos da inércia sobre a largura dos *fingers* para números de Reynolds acima de 100. Foi utilizada uma célula de Hele-Shaw preenchida com óleo silicone (fluido newtoniano) e ar comprimido foi usado como fluido menos viscoso para direcionar o escoamento.

A importância da inércia é determinada pela acuidade entre as forças de inércia e forças viscosas que é quantificada pelo número de Reynolds, $\rho vb/\eta$, sendo ρ a densidade do fluido e b a distância entre as placas. Para que na modelagem do sistema as forças de inércia possam ser desconsideradas, deve-se ajustar os parâmetros do número de Reynolds de modo que obtenha-se $Re < 1$. O número de Weber representa a razão entre as forças de inércia e as forças capilares e pode ser escrita como $We = \rho v^2 b/\sigma$.

Para regimes onde os efeitos viscosos são importantes, com o aumento da velocidade, a largura do *finger* aumenta devido a inércia, ao contrário do que ocorre para pequenos números de Reynolds. Para altos valores da velocidade do *finger* e do número de capilaridade, conforme já havia sido previsto por Bensimon (22), a influência de uma fina camada de fluido remanescente na célula de Hele-Shaw torna-se importante. A análise experimental mostra que os efeitos inerciais são importantes para fluidos com baixa viscosidade e para grandes espaçamentos entre as placas paralelas.

As equações que regem o escoamento em células de Hele-Shaw são válidas apenas quando a distância entre as placas é pequena em comparação com a sua largura. Não foram encontrados na literatura publicações referentes ao escoamento de fluidos pseudoplásticos deslocados por fluidos newtonianos em células de Hele-Shaw. A maioria dos trabalhos publicados contempla fluidos (newtonianos ou não newtonianos) sendo deslocados por ar.

Objetivo

O objetivo é evitar que o fluido de perfuração invada a formação devido ao diferencial de pressão positivo entre o mesmo e os fluidos do reservatório. Pois porções da parte líquida do fluido são perdidas para as formações adjacentes, enquanto parte dos sólidos presentes no fluido de perfuração, constituída por partículas menores que os poros da formação, penetram na rocha durante a perda do fluido, tamponando rapidamente a região ao redor do poço. Partículas maiores acumulam-se na parede do poço, iniciando a formação do reboco externo. Os sólidos e os fluidos introduzidos no reservatório durante esse processo causam dano na formação ao redor do poço.

Para esse estudo foi construída uma bancada experimental para realizar a simulação do deslocamento de um fluido newtoniano por um não newtoniano em um meio poroso. Esse meio poroso é representado pela célula de Hele-Shaw. Os fluidos usados no experimento foram a goma xantana, um fluido não newtoniano pseudoplástico, e o óleo mineral, o fluido newtoniano.

Utilizando uma câmera fotográfica observou-se a evolução da forma da interface em função dos parâmetros geométricos, dinâmicos e reológicos. Sendo o objetivo determinar as situações em que há formação de *viscous fingering*. Os parâmetros usados foram: Velocidade adimensional e o índice de comportamento da goma xantana.

Metodologia Experimental

Fluidos

Para a realização dos testes foram usados dois fluidos no qual o deslocador é um fluido não newtoniano e o deslocado é um fluido newtoniano. O fluido newtoniano é um óleo mineral da marca União Química e o fluido não newtoniano é uma solução aquosa com 0,86% de goma xantana, da marca Plury Química.

Goma Xantana

Goma Xantana é um polissacarídeo da espécie de bactérias do gênero *Xanthomonas*. Sua utilização como espessante e estabilizante aumentou com o passar dos anos, principalmente no campo petrolífero, onde é utilizada no fluido de perfuração e na recuperação terciária de poços de petróleo.

Os polímeros mais utilizados na formulação do fluido de perfuração à base de água eram a carboximetilcelulose - CMC, celulose polianiónica - PAC e poliácrilamida parcialmente hidrolisada - PHPA. Entretanto, estes polímeros são muito sensíveis às condições de alta salinidade, baixando sua eficiência. Desta forma, a goma xantana passou a ser amplamente utilizada para este propósito, pois suas conclusões são estáveis à variação do pH, força iônica e temperatura. (4)

A goma xantana é altamente estável em ampla faixa de pH, sendo afetada com valores de pH > 11 e < 2,5. Essa estabilidade depende da concentração: quanto maior a concentração, maior a estabilidade da solução. A goma xantana é também estável em ampla faixa de temperatura (10° a 90°) e a viscosidade é pouco afetada na presença de sais. (16)

Apesar do grande mercado consumidor de xantana e de suas diferentes aplicações e potencialidades, poucos são os países que a produzem. A xantana utilizada no Brasil ainda é importada na sua totalidade, entretanto o país possui os insumos básicos utilizados durante o processo, como o açúcar de cana e o etanol, o que o torna um centro potencial para a produção deste polímero. (4)

A goma xantana apresenta um comportamento pseudoplástico, ou seja, a viscosidade diminui com o aumento da taxa de cisalhamento como pode ser visto na Figura 5.

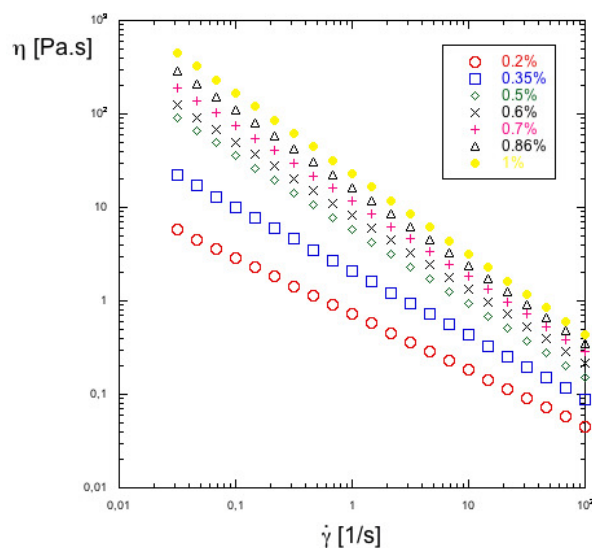


Figura 5: Reologia de diferentes concentrações de goma xantana.

Além das características citadas acima a goma xantana também apresenta:

- Irreversibilidade de ser degradada em altas taxas de cisalhamento;
- Mesmo em baixas concentrações, apresenta um alto valor de viscosidade, sendo usado como um agente espessante efetivo (as concentrações em sistemas de alimentos variam de 0,05% a 0,5%);
- As características pseudoplásticas garantem a facilidade de seu bombeamento;
- Apresenta uma excelente estabilidade durante o congelamento e sua adição não afeta o ponto de congelamento do fluido;

O método de preparo da goma xantana utilizada foi o seguinte:

- Seleciona-se a porcentagem de polímero desejada;
- Coloca-se o volume desejado de água deionizada em um recipiente;
- recipiente é posicionado no agitador mecânico (marca Fisaton, modelo 723) com a pá âncora a 300rpm;
- Acrescenta-se a goma xantana aos poucos, pela lateral, evitando despejar o pó na pá;
- A solução é agitada por 15 minutos;
- A seguir, adicionam-se os seguintes bactericidas para evitar a degradação da goma xantana: Benzoato de Sódio e Sorbato de Potássio. A concentração utilizada foi de 0,5% de cada bactericida;
- Mistura-se a solução por 1 hora;
- Mantém-se a solução em repouso por 24 horas antes dos testes.

Aparato Experimental

A bancada experimental foi composta por uma célula de Hele-Shaw retangular; três bombas, sendo uma peristáltica da marca Coler-Parmer e duas helicoidas da marca Netzsch; uma máquina fotográfica; três reservatórios, um para glicerina (usada para validação da célula), um para água usada para limpeza da mesma e um terceiro para o óleo mineral. Também foi usada uma garrafa de transferência, um banho térmico usado para garantir a temperatura constante nos reservatórios e um negatoscópio tomográfico para iluminação da célula.

Desenvolvimento da bancada experimental

Nesta seção são apresentadas algumas tentativas da construção da bancada experimental, em particular a construção de uma célula de Hele-Shaw que não tenha problemas com vazamento e que tenha uma boa qualidade para visualização.

- **Versão 1 :**

A Figura 6 ilustra a primeira bancada experimental e a Figura 7 apresenta alguns resultados para ilustrar a qualidade das imagens obtidas. Essa bancada era composta por três reservatórios para comportar o fluido deslocador, o fluido deslocado e a água para limpeza, duas bombas de deslocamento positivo, uma câmera fotográfica e uma célula de Hele-Shaw. As dimensões do canal, formado por placas de vidro de 6 mm de espessura, eram: 150 mm de

comprimento, 100 mm de largura e 1 mm de espaçamento (folga). Os fluidos utilizados foram soluções aquosas de Carbopol e óleo mineral.

Válvulas guilhotina foram projetadas com o objetivo de bloquear a passagem dos fluidos. Isso permitiu a lavagem e o preenchimento das células, além de serem essenciais para as condições de início do teste. Em função da diferença de densidades entre o óleo e o Carbopol, a folga entre as placas paralelas de 1 mm não foi suficientemente pequena. Outro problema desse projeto diz respeito a vazamentos na entrada da célula. As guilhotinas não foram bem projetadas, de modo que seu manuseio exigia força.

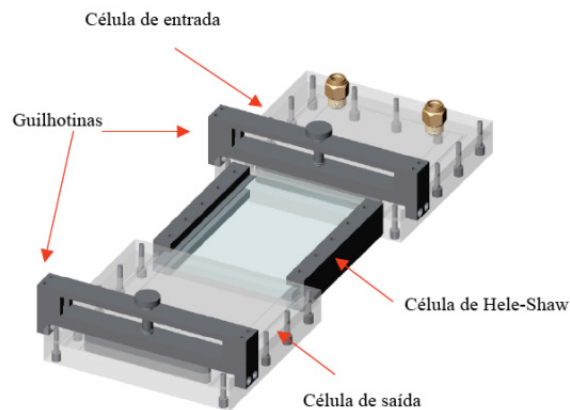


Figura 6: Primeiro projeto de construção de uma célula de Hele-Shaw.

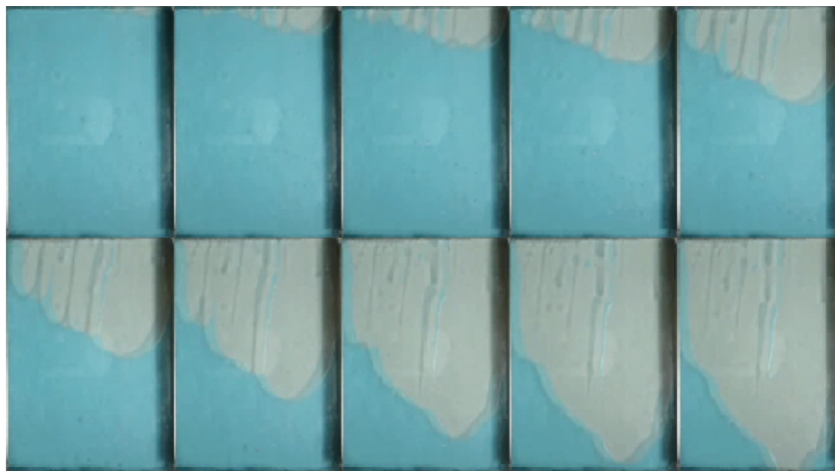


Figura 7: Óleo deslocando Carbopol.

- **Versão 2 :**

Devido as dificuldades da versão anterior, uma nova célula de Hele-Shaw foi projetada e construída. A célula era composta por duas placas planas de vidro, separadas por um espaçador de folga (utilizado em tornos mecânicos) e vedadas nas laterais através de fitas adesivas (modelo *Silver tape*) como pode ser visto na Figura 8. Com o intuito de melhorar a visualização da interface, um negatoscópio foi utilizado sob a seção de testes para minimizar os efeitos de sombra e maximizar o contraste entre os fluidos.

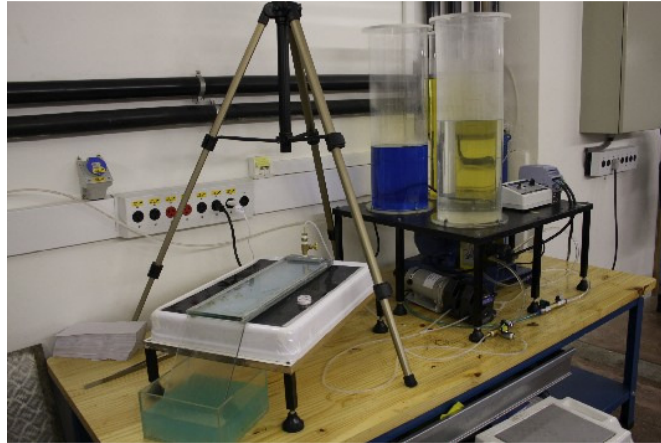


Figura 8: Segundo projeto de construção de uma célula de Hele-Shaw

As dimensões do canal, formado por placas paralelas de vidro, eram 500 mm de comprimento, 100 mm de largura e 0,25 mm de folga.

A Figura 9 ilustra o deslocamento de Carbopol 0,10% por água (com corante preto) em diferentes faixas de vazão mássica.



Figura 9: Água deslocando Carbopol 0,10% nas respectivas vazões em [g/min]: 2, 48, 13, 15, 23, 81 e 50,48.

Entretanto, surgiram algumas dificuldades durante a operação desta célula. As fitas adesivas que vedavam as laterais da célula não foram boas o suficiente para evitar vazamentos. A folga de 0,25 mm não estava uniforme já que o escoamento não era simétrico em razão da variação da resistência ao escoamento. Além disso a qualidade das fotos também não ficaram muito boas, sendo assim foi necessário um aperfeiçoamento.

- **Versão 3 :**

Para corrigir as dificuldades encontradas na versão anterior, foi projetada uma nova seção de testes. A nova célula de Hele-Shaw era composta por duas placas paralelas de vidro separadas por três espaçadores de folga de 0,25 mm cada um. Os espaçadores eram posicionados nas extremidades das placas e, internamente, havia um o-ring para garantir a vedação. Grampos "tipo C" foram utilizados para pressionar o anel de borracha contra o vidro, garantindo assim a vedação do sistema.

O canal, similar ao da versão anterior, possuía 500 mm de comprimento, 100 mm de largura e 0,75 mm de folga. Os fluidos eram injetados através de um furo de 10 mm de

diâmetro na placa de vidro superior. A Figura 10 representa uma foto da bancada experimental.



Figura 10: Terceira versão da bancada experimental.

Foram obtidas algumas imagens do teste realizado com goma xantana 0,86%% deslocando óleo mineral. Entretanto, o resultado não foi bem sucedido para altas vazões e pressões de deslocamento. A Figura 11 ilustra uma sequência de imagens na maior vazão da bomba utilizada (marca Netzsch, modelo NM011BY02S12B). Pode-se observar que houve uma mistura dos fluidos dificultando a análise das imagens.

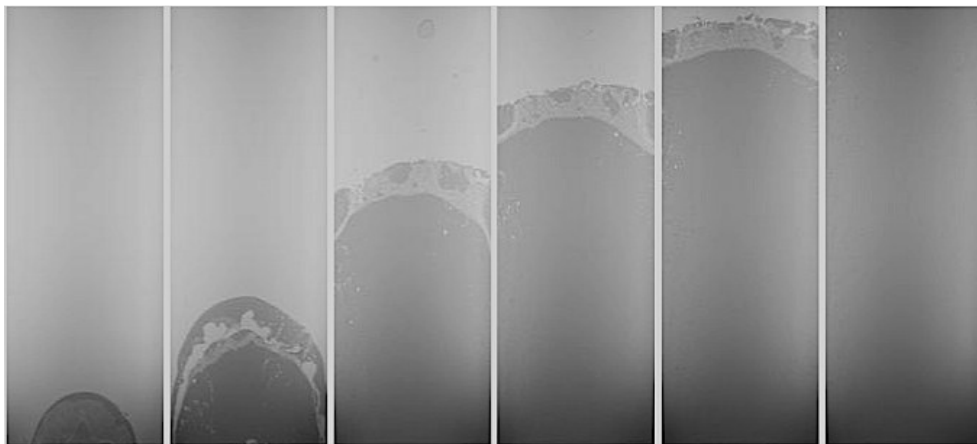


Figura 11: Mistura dos fluidos.

- **Versão 4 :**

Mais uma vez a bancada experimental foi aprimorada. Algumas modificações foram feitas na entrada da célula de Hele-Shaw a fim de evitar a mistura do fluido deslocado com o deslocador. A Figura 12 exemplifica as mudanças realizadas.

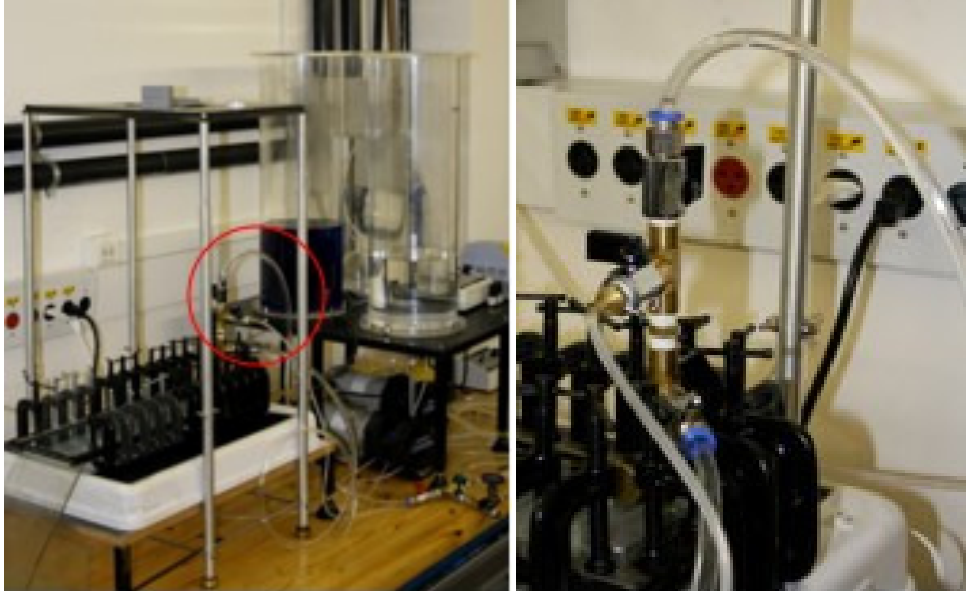


Figura 12: Quarta versão da bancada experimental..

Observou-se que havia influência da gravidade durante a injeção do fluido deslocador e que este deslocava-se inicialmente para trás ocasionando a mistura dos fluidos.

- **Versão 5 :**

Novamente a bancada experimental foi melhorada, como pode ser vista na Figura 12. Em relação à versão anterior, a primeira alteração refere-se a instalação das válvulas de entrada dos fluidos na placa de vidro inferior a fim de minimizar o efeito de gravidade durante o início do escoamento. Foi necessário acrescentar mais dois furos na placa de vidro para que fosse possível separar as entradas dos fluidos na célula. Dessa forma, as entradas nas extremidades servem para o preenchimento da célula de Hele-Shaw e a entrada central serve para injetar o fluido deslocador. Também foi adicionada uma tira de nylon próxima aos furos para evitar que o fluido deslocador escoasse para parte de trás dos furos e se misturasse com o fluido deslocado. Também foi construída uma garrafa de transferência para minimizar os efeitos da bomba, pois percebeu-se que o fluido estava pulsando, dificultando assim o escoamento. Para garantir uma folga de 0,70 mm foram usadas tiras de nylon para assegurar a vedação.

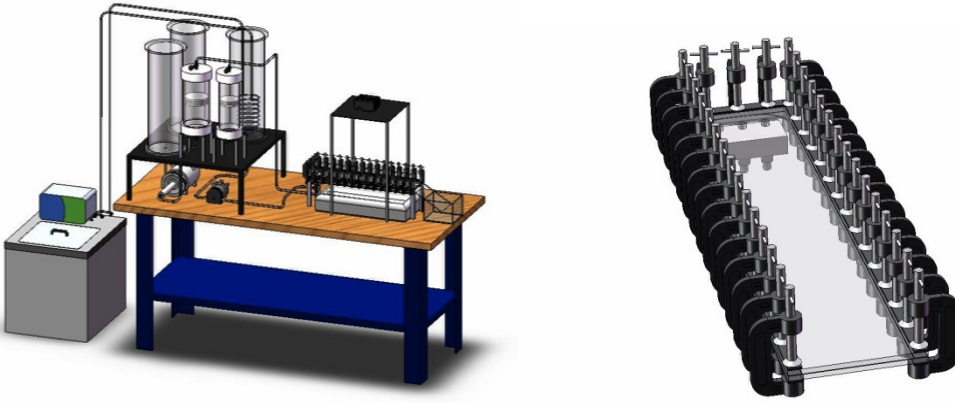


Figura 13: Quinta versão da bancada experimental.

Essa nova versão também teve problemas devido aos furos laterais, pois esses influenciavam no formato do perfil do escoamento. Como pode ser visto na Figura 14.

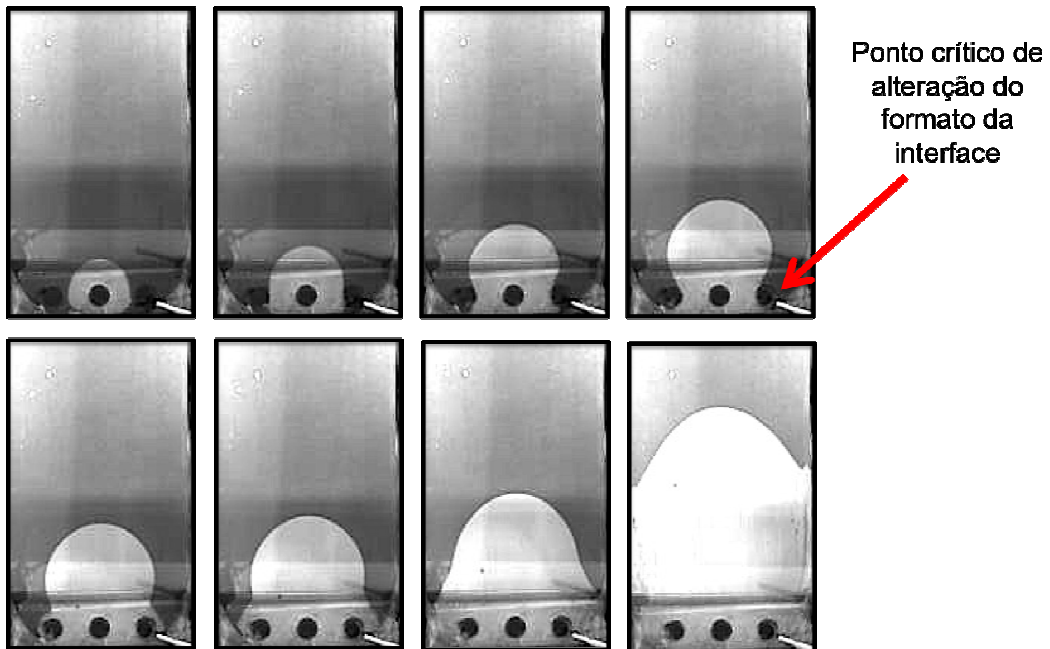


Figura 14: Sexta versão da bancada experimental.

- **Versão 6 :**

Mais uma vez a bancada experimental foi aprimorada. Devido, a influência dos furos laterais como pode ser visto na Figura 14. A principal modificação foi na disposição dos furos. O furo de saída da goma xantana foi deslocado 55 mm em relação aos furos de saída do óleo, como pode ser visto na Figura 15. Assim o perfil do deslocamento não sofria influência dos furos adjacentes.



Figura 15: Sexta versão da bancada experimental.

- **Versão 7 :**

Aprimorando a célula novamente, visto que os resultados não foram os esperados. Foi observado que na sexta versão a bancada experimental funcionava muito bem quando se tinha óleo deslocando goma xantana, porém no inverso, goma xantana deslocando o óleo, era impossível fazer a limpeza da célula para um teste posterior com óleo deslocando a goma xantana. Sendo assim foi necessário adicionar mais dois furos para que se pudesse limpar a célula com água sem que houvesse mistura de fluidos, já que cada fluido tem sua entrada independente. Também foi projetada uma nova garrafa de transferência, objetivando a facilidade de manuseio.

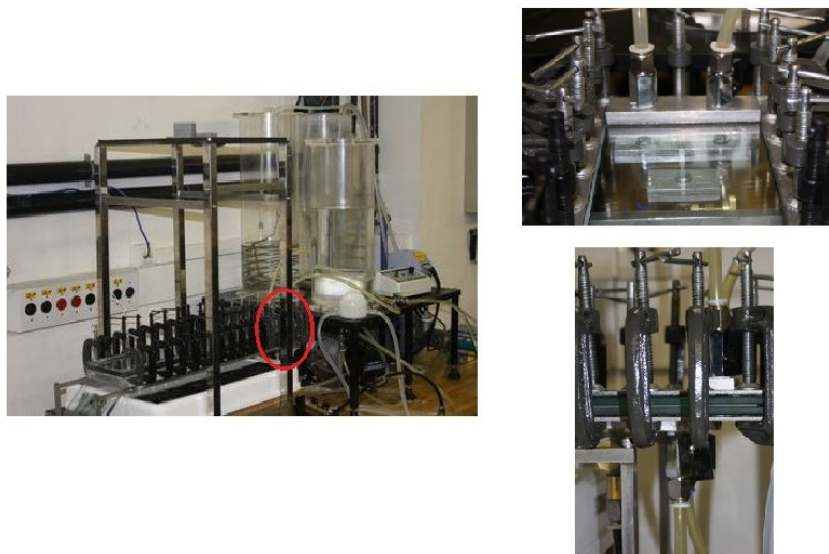


Figura 16: Sétima versão da bancada experimental.

- **Versão 8 :**

Após diversas tentativas de novos projetos, finalmente foi determinado um bom modelo de construção de uma célula de Hele-Shaw. Na qual o furo para a injeção do fluido deslocador se localizou no vidro superior e os furos para o fluido deslocado localizou-se no furo inferior, como pode ser visto na Figura 17. Nessa versão e na anterior, versão seis, tivemos muita dificuldade em encontrar um vidro bom o suficiente para não trincar, teve-se perda de três vidro devido a essa trinca que se propagavam a partir do furo, já que o furo é um concentração de tensões. Senda assim quanto mais furo maior a probabilidade do mesmo trincar. Porém, apesar de todas as dificuldades conseguimos encontrar uma empresa boa o suficiente para minimizar as tensões no furo ao furá-los.

Célula de Hele-Shaw

Para construir a célula alguns aspectos importantes foram levados em consideração, como:

- Garantir que o escoamento não seria afetado pelas paredes;
- Garantir que a folga é pequena o suficiente para poder considerar o regime bi-dimensional;
- Verificar se a folga é pequena o suficiente para que não haja escoamento de um fluido sobre o outro, nem mistura entre os fluidos;
- Verificar a viabilidade de construção.

A Tabela 1 apresenta dimensão de largura e folga de células utilizadas por alguns grupos de pesquisadores. Baseado nesses grupos de pesquisadores, foram definidas as dimensões, como pode ser visto na Figura 17.

Tabela 1: Dimensões características de uma célula de Hele-Shaw

Artigo	Largura W [mm]	Folga b [mm]	Razão de aspecto W/b
Presente trabalho	110	0,7	157
Bonn et al.(3)	40	0,25	160
Chevalier et al.(5)	40	0,25	160
	80	0,75	107
	40	0,75	54
	40	1,43	28
Yamamoto et al.(20,21)	120	0,2	600
Yamamoto et al.(21)	120	0,3	400
Yamamoto et al.(21)	120	0,5	240



Figura 17: Dimensões da célula de Hele-Shaw em milímetros.

Após definidas as dimensões da célula de Hele-Shaw, pode-se calcular a permeabilidade através da Equação 1. Sendo assim, a permeabilidade é de 40833,3 D. Esse valor não corresponde a realidade de um meio poroso, por isso essa pesquisa tem caráter qualitativo.

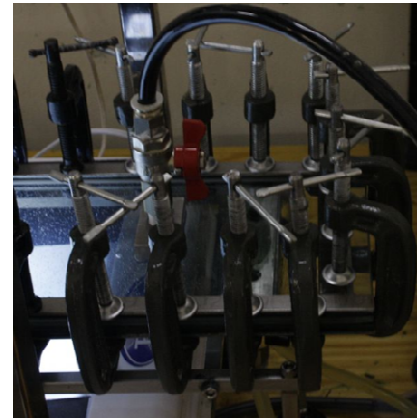
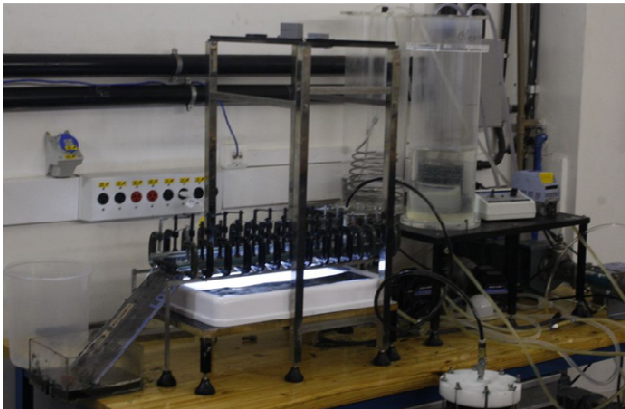


Figura 18: Célula de Hele-Shaw.

Para garantir a vedação e a distância entre as placas, foram utilizados dois pedaços de Mylar em formato de "U", como pode ser visto na Figura 19, cada um de 0,35 mm, para garantir o espaçamento de 0,70 mm. Para facilitar a compressão do vidro foram utilizados 33 grampos de fixação do tipo C (Figura 19) na célula de Hele-Shaw. Para que o vidro não fosse diretamente pressionado pelos grampos e para que a pressão fosse uniformemente distribuída ao longo da célula, foram colocadas tiras de borracha natural sobre as bordas do vidro superior e tiras de calibradores de folga sobre a borracha. Processo análogo foi feito no vidro inferior.



Figura 19 - Grampo de fixação do tipo C.



Figura 20 – Fita de poliéster leitoso - Mylar.

A placa de vidro inferior possui três furos, cada um com 3/8 in de diâmetro. A placa superior possui dois furos, também com 3/8 in de diâmetro. Esses furos (como pode ser visto na Figura 13) foram feitos para permitir a injeção dos fluidos deslocados e deslocadores de forma independente e para a limpeza da célula. Os furos das extremidades são utilizados para preenchimento da célula com o fluido deslocado e o furo central para injeção do fluido deslocador.

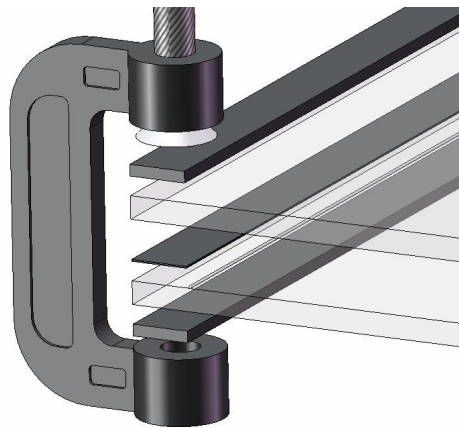


Figura 21 – Vista explodida da fixação das placas de vidro..

Negatoscópio

Foi utilizado um negatoscópio tomográfico, aparelho usado para observação dos negativos ou chapas radiográficas, da marca Blue Equipamentos (Figura 22), sob a célula de Hele-Shaw para iluminar a sessão de testes e facilitar a visualização do escoamento. Como a célula é pesada foi construído um suporte para sustentar a célula. Esse suporte possui pés (marca Vibra-Stop, modelo Micro III) que são fundamentais para o nivelamento da célula, além de atuarem como antiderrapantes.



Figura 22: Negatoscópio tomográfico

Câmera fotográfica

Uma câmera fotográfica (marca Canon, modelo EOS40D) com uma lente EFS 18-55 mm foi utilizada para capturar imagens da interface durante o escoamento. Em função das dimensões da bancada experimental, um suporte foi feito para viabilizar a distância focal necessária e permitir um posicionamento fixo da câmera fotográfica em relação à bancada. Deste modo, as fotos podem ser obtidas sempre com o mesmo posicionamento e o tratamento das imagens torna-se mais fácil.

A Tabela 2 apresenta os parâmetros definidos na câmera fotográfica. As fotos foram obtidas no modo monocromático (fotos em preto e branco) e com as luzes do laboratório apagadas para evitar a presença de sombras e reflexos. Para cada teste, foram capturadas imagens da interface do escoamento desde o início até o final da célula. Foi definido o parâmetro *Al Focus AF* o qual é um controle automático de foco indicado para objetos em movimento.

Tabela 2: Parâmetros da câmera fotográfica.

Parâmetro	Valor
Velocidade Iso	1000
Velocidade do obturador	640
Abertura	5,6

Bombas

Para que o maior número possível de vazões de deslocamento pudessem ser investigados, foram utilizadas três bombas: duas peristálticas e uma helicoidal.

Para os casos investigados de menor vazão foi utilizada uma bomba da marca Cole-Parmer, modelo Masterflex KH 07553-80 (1-100 rpm), com mangueira *double-y* de diâmetro 7,9 mm (modelo L/S 18). A mangueira *double-y* e um *pulse dampener* foram utilizados para minimizar os efeitos de pulsação do escoamento. Vale ressaltar que essas bombas são indicadas para deslocamento de fluidos pouco viscosos.

Pulse dampener é um pequeno reservatório, na forma de um semi-círculo, posicionado após a saída da bomba para armazenar o fluido de trabalho. Como o ar é muito mais compressível que os líquidos, o fluido com pulsação entra no reservatório e o ar preso acima do fluido absorve a pulsação suavizando a saída do fluido.

Para os casos de deslocamento em vazões maiores e com maiores viscosidades, foram utilizadas bombas helicoidais da marca Netzsch nos modelos Nemo NM015BY02S12B e NM011BY02S12B. Para que uma maior faixa de vazões e viscosidades pudessem ser alcançadas, as bombas foram especificadas para bombear água e uma garrafa de transferência

da marca Labconte foi utilizada. Para controlar a vazão dessas bombas, foram utilizados inversores de frequência (marca WEG, modelo CFW-08).

A Figura 23 ilustra uma garrafa de transferência que é um sistema cilindro-pistão vedado por duas tampas sobre pressão e com oito tirantes para garantir a vedação. No centro das tampas há uma válvula agulha para permitir a entrada e saída de fluidos. O pistão possui três *o-rings* para vedação. A garrafa é feita de acrílico e o pistão de acetato para evitar qualquer tipo de corrosão ou deterioração.

Inicialmente, o pistão é posicionado na parte inferior do cilindro e a parte superior é preenchida com o fluido de interesse (nesse caso a goma xantana). Assim, água é injetada pela entrada inferior da garrafa e o pistão se desloca consequentemente deslocando o fluido de interesse. Assim, para cada fluido utilizado uma calibração da bomba deve ser feita em função da variação da perda de carga. Um suporte foi projetado para manter as garrafas na vertical.



Figura 23: Garrafa de transferência

Calibração das Bombas

- Calibração de validação da célula de Hele-Shaw

Para a validação da bancada experimental foram utilizados dois fluidos newtonianos e de fácil manuseio. As Figuras 24 e 25 apresentam a calibração, com glicerina a 25°C, da bomba Cole-Parmer modelo KH 07553-80 com mangueira L/S 18 e rotação de 1-100 rpm. A Figura 26 apresenta a calibração, com óleo mineral a 25°C, da bomba Cole-Parmer modelo KH 07553-80 com mangueira L/S 18 e rotação de 6-600. Assim, para cada marcador da bomba foi determinada uma vazão mássica equivalente. Através de um cronômetro e de uma balança, foi possível determinar a massa do fluido em um determinado intervalo de tempo.

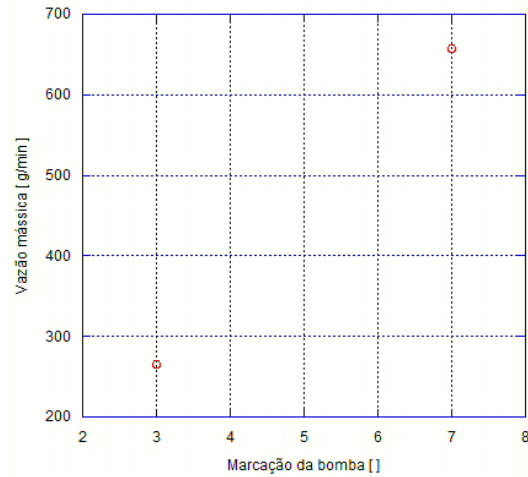


Figura 24: Calibração com glicerina 0,70 da bomba Cole-Parmer modelo KH 07553-80 com mangueira L/S 18 a 25°C.

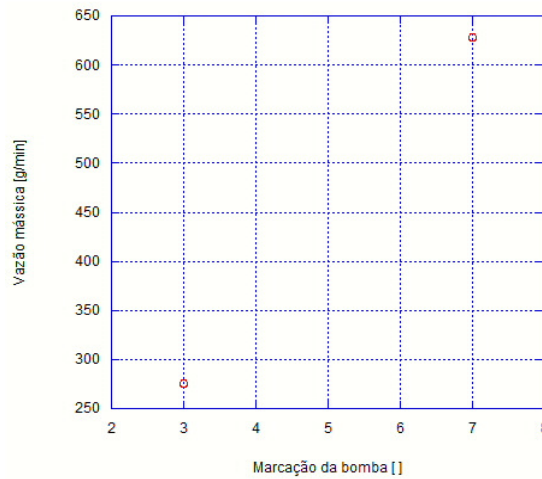


Figura 25: Calibração com glicerina 0,80 da bomba Cole-Parmer modelo KH 07553-80 com mangueira L/S 18 a 25°C.

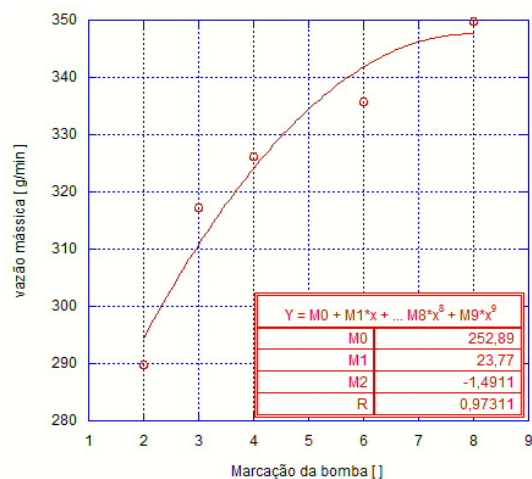


Figura 26: Calibração com óleo mineral da bomba Cole-Parmer modelo KH 07553-80 com mangueira L/S 18 a 25°C

- Calibração dos testes com a goma xantana

Após a validação da célula de Hele-Shaw, calibrou-se também a bomba Netzsch modelo Nemo NM015BY02S12B deslocando o pistão da garrafa de transferência a qual contém a goma xantana 0,86%.

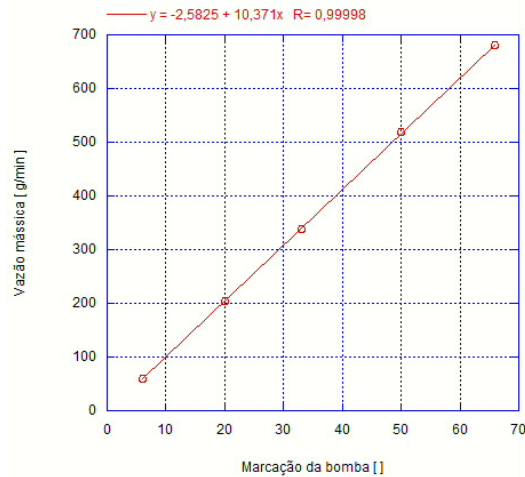


Figura 27: Calibração com goma xantana da bomba Netzsch 196rpm a 25°C.

Controle de temperatura do fluido newtoniano

A goma xantana é um fluido que não é muito sensível à variação de temperatura ao contrário do óleo mineral e da glicerina, fluido utilizado na validação da célula. Inicialmente, para controlar a temperatura do fluido newtoniano tentou-se manter a temperatura da sala constante. Entretanto a variação de 4°C, típica no laboratório, foi o suficiente para não permitir a repetibilidade nos dados da calibração da bomba. Assim, foi desenvolvido um projeto para estabilizar a temperatura do óleo presente no reservatório.

Conforme pode ser visto na Figura 28, foi utilizado um banho térmico (marca Nova ética, modelo 521-3DE) com circulação externa, uma mangueira de silicone de 10 mm de diâmetro e uma serpentina de aço inox com 6,5 mm de diâmetro externo e 4,5 mm de diâmetro interno.



Figura 28: Sistema de controle de temperatura do fluido newtoniano.

A serpentina foi posicionada dentro do reservatório de óleo e da glicerina de modo que ficasse completamente coberta. A mangueira possui 4 m de comprimento. O banho térmico possui uma vazão de 10 l/min para proporcionar estabilidade na temperatura. A temperatura foi ajustada conforme as condições da sala para garantir que a temperatura medida dentro do reservatório fosse de 25°C. Durante a realização dos testes, um termopar foi posicionado dentro do reservatório para verificar se a temperatura estava constante em 25°C.

Procedimento Experimental

Para a execução dos testes, a célula foi primeiramente preenchida com óleo utilizando uma bomba peristáltica. A célula deve ser nivelada para garantir um escoamento uniforme e sem efeitos de gravidade. Após a célula preenchida desloca-se o óleo com o fluido não Newtoniano, a goma xantana. Para isso, foi utilizada uma garrafa de transferência e uma bomba helicoidal para deslocar o óleo na célula de Hele-Shaw. A bomba peristáltica não pôde ser empregada nessa etapa, pois a goma xantana possui viscosidade muito alta a baixas taxas de deformação.

Antes de iniciar o escoamento com a goma xantana, ligou-se o negatoscópio e posicionou-se a câmera fotográfica no suporte. A câmera deve estar perfeitamente alinhada com a célula para que haja concordância entre os testes. Em seguida, define-se a vazão de injeção da goma xantana e abre-se a válvula central para permitir o deslocamento. Simultaneamente, uma sequência de imagens é obtida. É importante capturar imagens da célula preenchida apenas com o fluido deslocado para que o tratamento de imagens torne-se viável.

Após cada teste, a célula é lavada. Para garantir uma repetibilidade qualitativa dos resultados, cada teste em uma determinada vazão é repetido pelo menos três vezes.

Modelo matemático

Equacionamento

Hele-Shaw é definido como um fluido de Stokes (é um tipo de fluido onde as forças de inércia são pequenas comparadas às viscosas, o que resulta em um número de Reynolds baixo. Esta é a situação típica onde as velocidades são lentas e as viscosidades são altas.) entre duas placas planas paralelas separadas por uma distância muito pequena (Figura 29). Vários problemas da mecânica dos fluidos podem ser aproximados aos fluxos de Hele-Shaw e, portanto, a investigação destes fluxos é importante. A aproximação ao fluxo de Hele-Shaw é especialmente para microfluxo, ou seja, fluxos nos quais o número de Reynolds é tipicamente baixo.

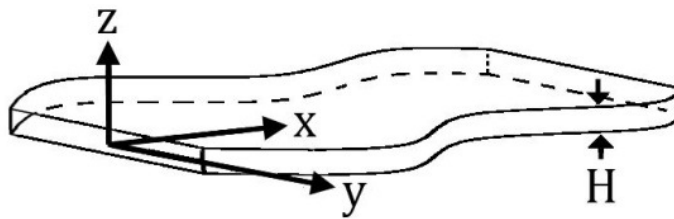


Figura 29: Descrição esquemática de uma célula de Hele-Shaw.

Sendo x e y as direções planares e z a direção perpendicular, com H sendo a distância entre as placas. Quando a distância entre as mesmas é muito pequena diz-se que $H \rightarrow 0$, e conseqüentemente nos permite a visualização desse tipo de fluxo em duas dimensões (bidimensional).

A célula de Hele-Shaw é comumente usada para casos em que o fluido é injetado na geometria, e para estes fluxos as condições de contorno são definidas pela pressão e tensão superficial.

A segunda lei de Newton, para um sistema movendo-se em relação a um sistema de coordenadas inerciais é dada por:

$$\vec{F} = \left. \frac{d\vec{P}}{dt} \right|_{sist} \quad (3)$$

Onde a quantidade de movimento linear do sistema é dada por:

$$\vec{P} = \int_{M(sistema)} \vec{V} dm = \int_{V(sistema)} \vec{V} \rho dV \quad (4)$$

Onde \vec{F} (forças resultantes) = $\vec{F}_S + \vec{F}_B$, sendo \vec{F}_S as forças de superfície e \vec{F}_B as forças de campo.

As formulações para sistema e volume de controle são:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{vc} \eta \rho dV + \int_{sc} \eta \rho \vec{V} dA \quad (5)$$

Para $N = \vec{P}$ (momento de inércia) e $\eta = \vec{V}$ tem-se:

$$\frac{d\vec{P}}{dt} \Big|_{sist} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{vc} \vec{V} \rho dV + \int_{sc} \vec{V} \rho \vec{V} dA \quad (6)$$

$$\vec{F} = \vec{F}_S + \vec{F}_B = \frac{\partial}{\partial t} \int_{vc} \vec{V} \rho dV + \int_{sc} \vec{V} \rho \vec{V} dA \quad (7)$$

Para folgas muito pequenas o campo de escoamento pode ser modelado como o que ocorre entre placas paralelas infinitas, considerando o escoamento laminar completamente desenvolvido. As placas estão separadas pela distância a , conforme a Figura 30. O escoamento também é considerado permanente e incompressível. Na condição de não deslizamento na parede, as condições de contorno são:

$$\begin{aligned} \text{em } y = 0 & \quad u = 0 \\ \text{em } y = a & \quad u = 0 \end{aligned}$$

Uma vez que o escoamento é completamente desenvolvido, a velocidade não pode variar com x ; então, depende apenas de y de modo que $u = u(y)$. Além disso não há componentes de velocidade nas direções y e z ($v = \omega = 0$). Para a análise seleciona-se um VC (volume de controle) diferencial de tamanho $dV = dx dy dz$ e aplica-se a componente x da equação da quantidade de movimento.

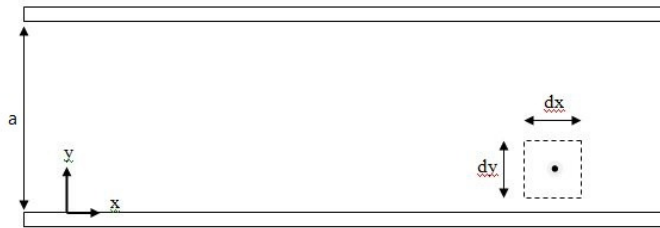


Figura 30: Geometria do Volume de Controle.

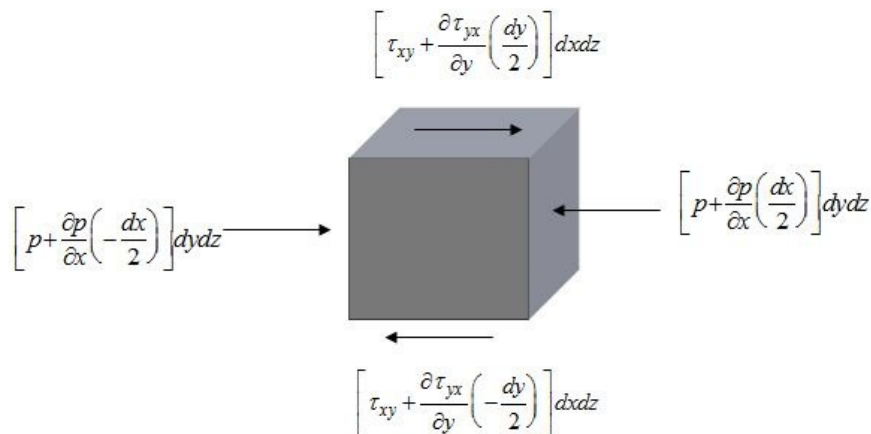


Figura 31: Forças atuando sobre o Volume de Controle.

$$\vec{F}_{S_x} + \vec{F}_{B_x} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{vc} u \rho dV + \int_{sc} u \rho \vec{V} dA \quad (8)$$

Hipóteses:

- Escoamento permanente;
- Escoamento completamente desenvolvido;
- $F_{Bx} = 0$;
- Escoamento incompressível;
- Escoamento laminar.

Assim, a equação 3.6 reduz-se a:

$$FS_x = 0$$

O próximo passo consiste em somar as forças atuando sobre o volume de controle na direção x , como pode ser visto na Figura 31.

$$\left[p + \frac{\partial p}{\partial x} \left(-\frac{dx}{2} \right) \right] dydz - \left[p + \frac{\partial p}{\partial x} \left(\frac{dx}{2} \right) \right] dydz + \left[\tau_{yx} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \left(\frac{dy}{2} \right) \right] dx dz - \left[\tau_{yx} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \left(-\frac{dy}{2} \right) \right] dx dz = 0 \quad (9)$$

Simplificando tem-se:

$$-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} = 0 \quad (10)$$

Onde p é a pressão e τ é a tensão.

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} = \text{constante} \quad (11)$$

Integrando obtém-se:

$$\tau_{yx} = \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) y + c_1 \quad (12)$$

Utilizando as condições de contorno:

$$\tau_{yx}(a) = \frac{\partial p}{\partial x} a = -\tau_w \quad (13)$$

Onde τ_w é a tensão crítica na parede.

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{-\tau_w}{a} \quad (14)$$

Onde a é a folga.

Numa forma geral:

$$\tau_{yx}(y) = \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) y \quad \tau_{yx}(y) = \frac{-\tau_w}{a} y \quad (15)$$

Considerando um fluido pseudoplástico, ou seja, um fluido cuja viscosidade varia de acordo com um grau de deformação aplicado, diminuindo com o aumento da tensão. E utilizando o modelo de *power-law* com $n < 1$, onde n é o índice de comportamento:

$$\eta = k\dot{\gamma}^{n-1} \quad (16)$$

Onde n é o índice de consistência.

Assim,

$$\tau_{yx} = k\dot{\gamma}^{n-1} = -k(-\dot{\gamma}_{yx})^n \quad (17)$$

Igualando as Equações 15 e 17:

$$\frac{-\tau_w}{a} y = -k(-\dot{\gamma}_{yx})^n \quad (18)$$

Considerando $y = a$, ou seja, o escoamento na parede:

$$\dot{\gamma}_{yx}(a) = \left(\frac{\tau_w}{k}\right)^{1/n} \quad (19)$$

Devido a importância de escoamentos entre placas paralelas em aplicações de engenharia, Bird et al. (2) desenvolveram uma tabela com a equação de vazão volumétrica para cinco equações constitutivas diferentes, incluindo o modelo *power-law*. Assim, a taxa de deformação na parede é representada pela Equação 23.

$$Q = \frac{Wa^2}{(2/n)+4} \left(\frac{\tau_w}{k}\right)^{1/n} \quad (20)$$

Onde Q é a vazão volumétrica e W é a largura da célula.

Considerando que a vazão volumétrica é igual a:

$$Q = \bar{u}A \quad (21)$$

Onde, A é a área transversal e \bar{u} a velocidade média

Igualando as Equações 20 e 21,

$$\bar{u} = \frac{a}{(2/n)+4} \left(\frac{\tau_w}{k}\right)^{1/n} \quad (22)$$

Substituindo 19 em 22,

$$\dot{\gamma} = \frac{6\bar{u}}{a} \left(\frac{1+2n}{3n}\right) \quad (23)$$

Adimensionalização

A adimensionalização é uma técnica para se ganhar compreensão sobre o escoamento de fluidos (na verdade, sobre muitos fenômenos científicos e de engenharia) antes de se fazer uma análise teórica ou experimental mais extensa; esta técnica capacita também a extrair tendências de dados que, de outra forma, permaneceriam desorganizados e incoerentes.

Para adimensionalizar os parâmetros reológicos e dinâmicos que regem o escoamento foi desenvolvido um modelo de acordo com o gráfico log-log da Figura 32.

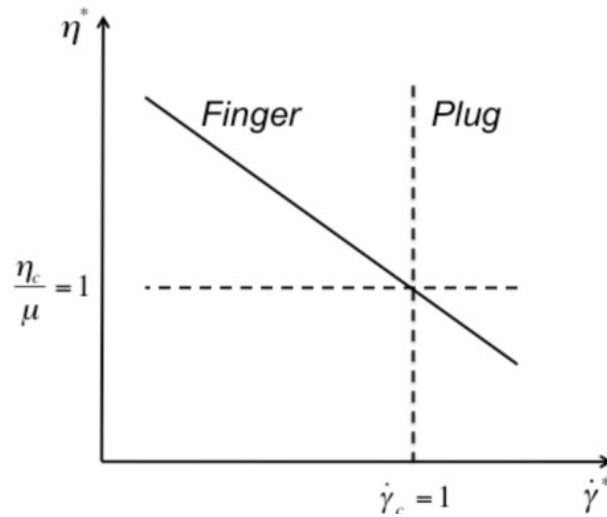


Figura 32: Modelo adimensional.

Foi definida uma taxa de deformação característica $\dot{\gamma}_c = 1$ que é correspondente a taxa de deformação do cruzamento das curvas da Figura 27. Essa taxa é obtida quando a viscosidade do fluido newtoniano é igual a do fluido pseudoplástico, como pode ser visto nas equações abaixo.

$$\begin{aligned}\tau_{newt} &= \mu \dot{\gamma} \\ \tau_{power-law} &= \eta(\dot{\gamma}) \dot{\gamma} = k(\dot{\gamma})^{n-1} \\ \tau_{newt} &= \tau_{power-law} \\ \dot{\gamma}_c &= \left(\frac{\mu}{k}\right)^{1/(n-1)}\end{aligned}\quad (24)$$

A velocidade adimensional \bar{u}^* é definida como a razão entre a taxa de deformação na parede, Equação 23, e a taxa de deformação característica, Equação 24. Este valor equivale a taxa de deformação adimensional, de acordo com a Equação 26.

$$\bar{u}^* \equiv \dot{\gamma}^* \equiv \frac{\dot{\gamma}_w}{\dot{\gamma}_c} \quad (25)$$

$$\bar{u}^* \equiv \dot{\gamma}^* = \left\{ \frac{6}{b} \left(\frac{k}{\mu} \right)^{1/n-1} \frac{2n+1}{3n} \right\} \bar{u} \quad (26)$$

A viscosidade característica η_c equivale a viscosidade em função da taxa de deformação característica, a qual é a mesma do fluido newtoniano, como pode ser visto na Equação 26.

$$\eta_c \equiv \eta(\dot{\gamma}_c) = \mu \quad (27)$$

A viscosidade adimensional $\eta^*(\dot{\gamma}^*)$ (Figura 27) é definida como a razão entre a viscosidade do fluido não newtoniano e a viscosidade característica de acordo com a equação 31.

$$\eta^*(\dot{\gamma}^*) = \frac{\eta(\dot{\gamma})}{\eta_c} \quad (28)$$

Substituindo a Equação 27 na Equação 28,

$$\eta^*(\dot{\gamma}^*) = \frac{k(\dot{\gamma})^{(n-1)}}{\mu} \quad (29)$$

$$\eta^*(\dot{\gamma}^*) = \left(\frac{k}{\mu}\right) \dot{\gamma}_c^{n-1} \dot{\gamma}^{*n-1} \quad (30)$$

Assim obtém-se,

$$\eta^* = \dot{\gamma}^{*n-1} \quad (31)$$

Outro parâmetro adimensional que rege o escoamento é o número de capilaridade reológico, o qual é definido de acordo com a Equação 32, onde σ é a tensão interfacial. Esse número é representado pela razão entre as forças viscosas e as forças capilares.

$$Ca = \frac{\tau_w a}{\sigma} \quad (32)$$

O conjunto definido pelos parâmetros \bar{u}^* , n e Ca definem o espectro de situações em que são observados *fingers* ou *plugs*. Espera-se que haja formação de *viscous fingering* quando $\bar{u}^* < 1$ e $\eta^* > 1$ para fluidos newtonianos. Caso contrário, espera-se observar a formação de uma interface estável gerando um deslocamento do tipo *plug*.

Resultados

Reologia

As figuras 33 e 34 apresentam as curvas da evolução da viscosidade com o tempo com taxas de deformações constantes iguais à 0,01 e 1 [1/s], respectivamente. Pode-se observar que a goma xantana é um fluido com características dependentes do tempo, ou seja, possui características tixotrópicas.

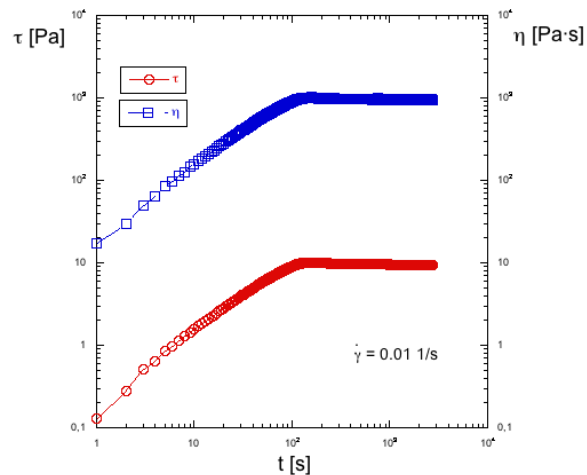


Figura 33: Determinação do regime permanente para $\dot{\gamma} = 0,01$ 1/s

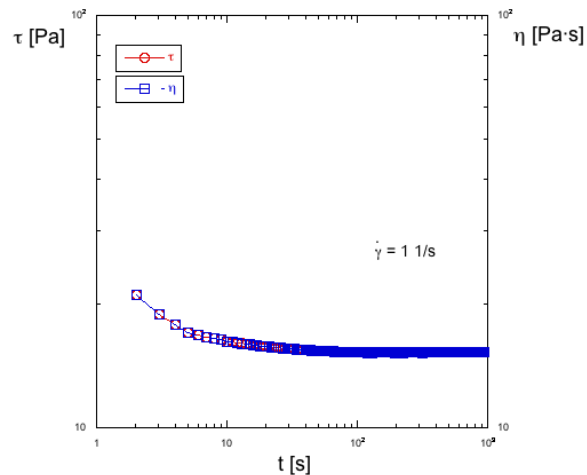


Figura 34: Determinação do regime permanente para $\dot{\gamma} = 1$ 1/s

A função de viscosidade da goma xantana foi obtida no reômetro rotacional AR-G2, da marca TA Instruments, através do uso da geometria placas paralelas ranhuradas (*cross hatched*). Essa geometria foi selecionada para minimizar os efeitos de deslizamento aparente, os quais comprometem a caracterização reológica.

Para obter as curvas de escoamento que representassem o comportamento da goma xantana, foram feitos testes a 20° e 25°C. Observou-se que a goma xantana não é sensível à temperatura, pois as curvas de escoamento obtidas foram iguais entre si. Na Figura 35 pode-se observar um comportamento pseudoplástico, visto que a viscosidade diminui com a taxa de deformação e não foi observada uma tensão limite de escoamento. A função de viscosidade

power-law (Equação 16) foi empregada para fazer um ajuste da curva de tensão e obter os parâmetros reológicos.

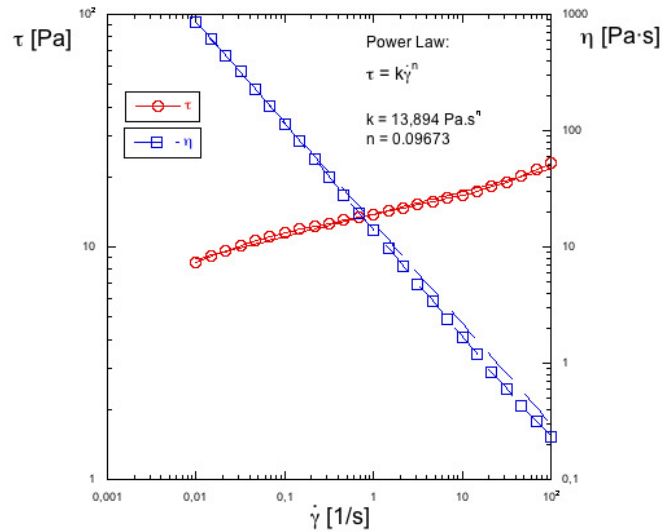


Figura 35: Reologia da goma xantana 0,86%.

A Tabela 3 apresenta os valores do índice de comportamento, n , e do índice de consistência, k . Outras caracterizações importantes da goma xantana 0.86 foram obtidas no Laboratório de Caracterização de Fluidos (LCF) da PUC-Rio, como tensão superficial, σ_{GX} , e densidade, ρ_{GX} . Esses parâmetros também não variaram com a temperatura.

Tabela 3: Parâmetros da goma xantana a 25°C.

Parâmetros	Valor
n []	0,096732
k [Pa.s ⁿ]	13,894
σ [mN/m] – GX	92,4
ρ [kg/m ³] - GX	971,9

A viscosidade newtoniana do óleo mineral foi obtida através de um viscosímetro e de um reômetro rotacional para confirmar os resultados. No reômetro Paar Physica MCR 301, a viscosidade foi determinada com a geometria *Double Couette*, essa geometria foi escolhida, pois a viscosidade do óleo é baixa, sendo assim essa geometria tem mais área de contato com fluido, melhorando assim a precisão dos dados. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 36. No LCF, também foi determinada a tensão superficial e a densidade do óleo, respectivamente, $\sigma_{\text{óleo}}$, e densidade, $\rho_{\text{óleo}}$, como pode ser visto na Tabela 4.

Tabela 4: Parâmetros do óleo a 25°C°.

Parâmetros	Valor
μ [Pa.s]	0,1339
σ [mN/m] – óleo	28,4
ρ [kg/m ³] - óleo	867,6

Óleos newtonianos geralmente possuem viscosidade muito sensível a variações de temperatura e por isso um controle preciso deve ser feito (com o banho e as serpentinas). Essa influência da temperatura pode ser vista na Figura 30, na qual a viscosidade do óleo mineral variou bastante com a temperatura.

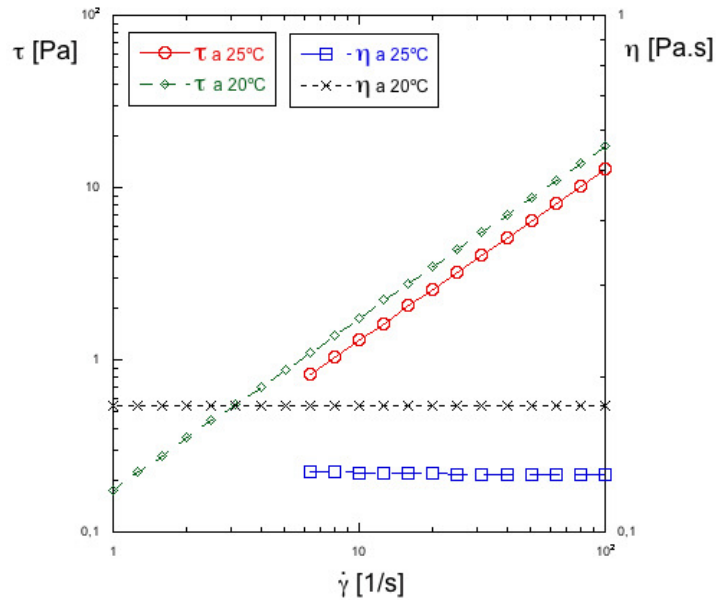


Figura 36: Reologia do óleo em temperaturas diferentes.

Cálculo da adimensionalização

A partir das equações descritas na sessão modelo matemático, pode-se calcular os parâmetro que regem esse experimento (\bar{u}^* , η^* e Ca).

Para avaliar o número de capilaridade reológico, uma estimativa do valor da tensão interfacial, σ_i , entre o óleo mineral e a goma xantana 0.86 foi feita baseado na lei de Antonoff. Assim, $\sigma_{i-\text{óleo/GX}} = 64,0 \text{ mN/m}$.

Tabela 5: Parâmetros geométricos da Célula de Hele-Shaw.

Parâmetros geométricos	
folga b [mm]	0,7
Comprimento L [cm]	70
Largura w [cm]	11
Convesão de unidades e cálculos:	
folga b [m]	0,0007
Comprimento L [m]	0,7
Largura w [m]	0,11
Area transversal [m ²]	0,000077
Volume da célula [m ³]	0,0000539
Permeabilidade k[D]	40833,3

Tabela 6: Resultado da adimensionalização.

Vazão mássica [m3/s]	Velocidade [m/s]	u^*	Ca	We	Re <1	η^*	Perfil esperado
1,18914E-06	0,015443409	3,191	0,2498	2,2632E-06	0,0700	0,351	Plug
2,18009E-06	0,028312916	5,851	0,2498	7,6069E-06	0,1284	0,203	Plug
3,17105E-06	0,041182423	8,510	0,2498	1,6094E-05	0,1868	0,145	Plug
3,96381E-06	0,051478029	10,638	0,2498	2,5147E-05	0,2335	0,118	Plug
4,95476E-06	0,064347536	13,297	0,2498	3,9292E-05	0,2919	0,097	Plug
5,94571E-06	0,077217043	15,956	0,2498	5,658E-05	0,3502	0,082	Plug
6,54028E-06	0,084938747	17,552	0,2498	6,8462E-05	0,3853	0,075	Plug
7,53124E-06	0,097808254	20,212	0,2498	9,078E-05	0,4436	0,066	Plug
8,52219E-06	0,110677762	22,871	0,2498	0,00011624	0,5020	0,059	Plug
9,90952E-06	0,128695072	26,594	0,2498	0,00015717	0,5837	0,052	Plug
1,09005E-05	0,141564579	29,254	0,2498	0,00019017	0,6421	0,047	Plug
1,30806E-05	0,169877495	35,104	0,2498	0,00027385	0,7705	0,040	Plug

Como pode ser observado na Tabela 6, o valor do Ca é muito pequeno o que torna desprezível a influência da inércia no escoamento.

A Figura 31 apresenta um único gráfico de η^* em função de $\dot{\gamma}^*$ para os dois pares de fluidos estudados. Assim, foram determinados os casos em que há formação de *fingers* e os casos em que há um deslocamento do tipo *plug* ..

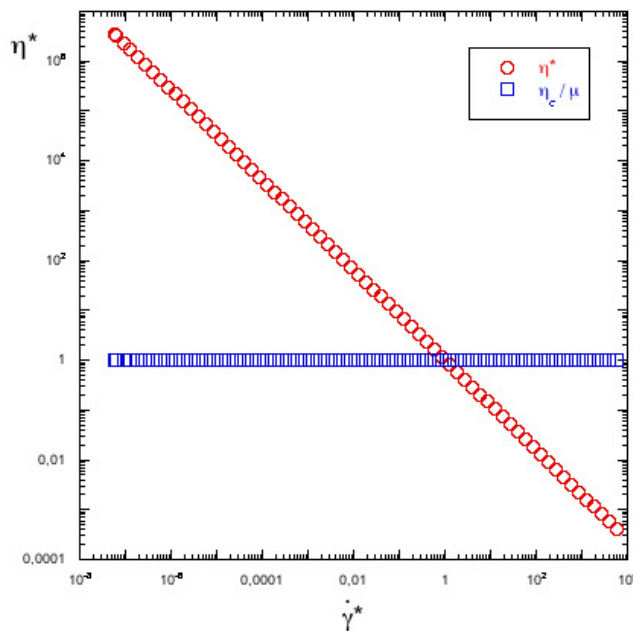


Figura 31: Adimensionalização sugerida.

Validação da Bancada Experimental

Para a validação da bancada experimental foram usados dois fluidos newtonianos que já se sabe o comportamento, podendo assim comparar com a literatura. Foram usados glicerina com diferentes concentrações (60%, 70% e 80%) e óleo mineral. Na Tabela 7 poder ser observar alguns parâmetros importantes das concentrações de glicerina e do óleo.

Tabela 7: Parâmetros dos fluidos da validação.

Parâmetros dos fluidos	
<i>óleo mineral - 25°C</i>	
σ [mN/m] – óleo	28,4
ρ [kg/m ³] - óleo	868
μ [Pa.s] - óleo	0,134
<i>Glicerina 70% - 25°C</i>	
σ [mN/m]	60,4
ρ [kg/m ³]	1178
μ [Pa.s]	0,0181
<i>Glicerina 80% - 25°C</i>	
σ [mN/m]	55,4
ρ [kg/m ³]	1205
μ [Pa.s]	0,0444

Tabela 8: Comportamento esperado.

Fluido deslocador	Fluido deslocado	Razões de viscosidade investigadas (adimensional)	Razões de densidade (adimensional)	Tensão interfacial [mN/m]	Identificação do padrão de escoamento
óleo mineral	Glicerina 70%	0,135	1,36	32,0	plug
óleo mineral	Glicerina 80%	0,331	1,39	27,0	plug
Glicerina 70%	óleo mineral	7,41	0,736	32,0	finger
Glicerina 80%	óleo mineral	3,02	0,720	27,0	finger

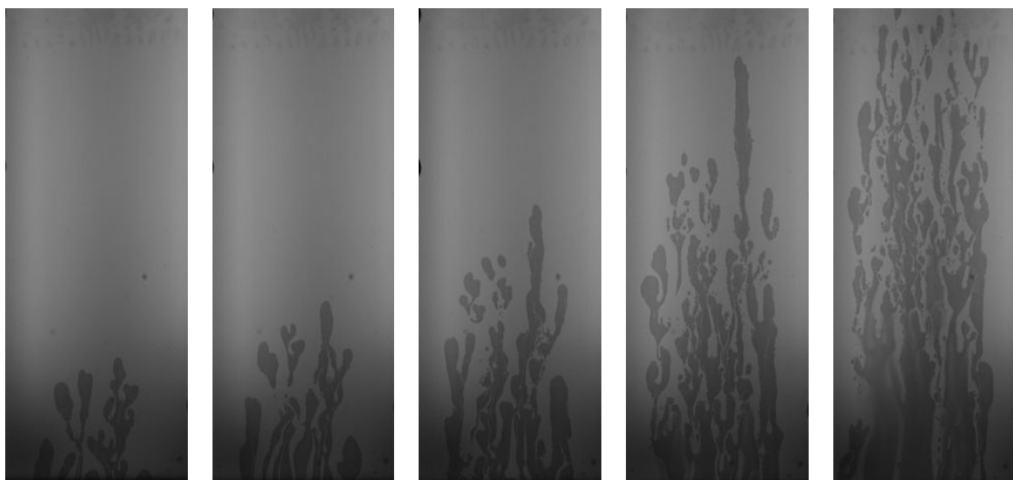


Figura 33: Solução aquosa de glicerina 70% deslocando óleo mineral ($u^* = 24,94$ e $Q=656,76$ g/min)

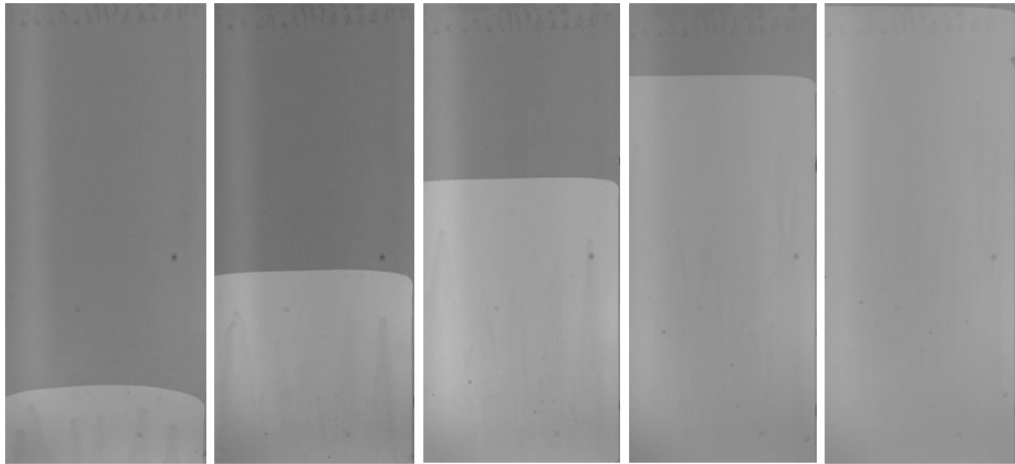


Figura 34: Óleo mineral deslocando Solução aquosa de glicerina 70% ($u^* = 17,84$ e $Q=346,13$ g/min)

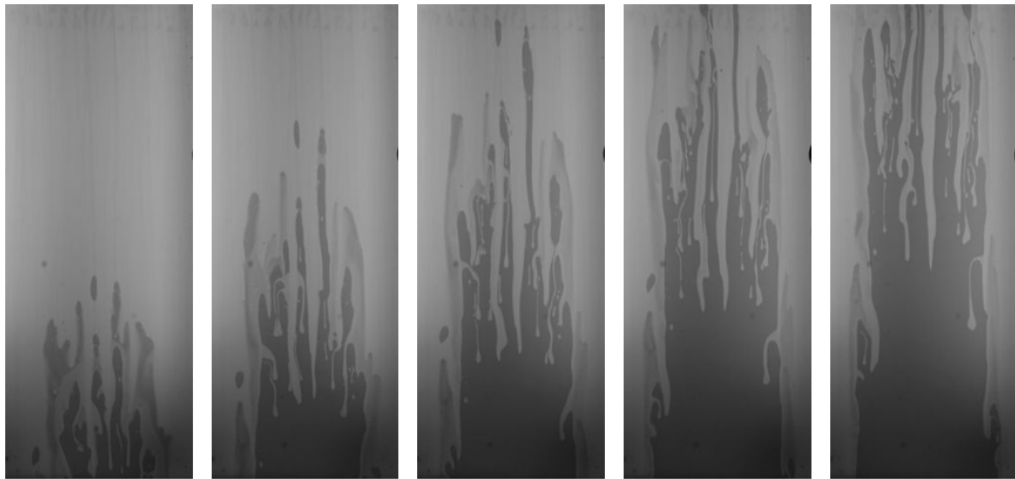


Figura 35: Solução aquosa de glicerina 80% deslocando óleo mineral ($u^* = 23,31$ e $Q=628,08$ g/min)

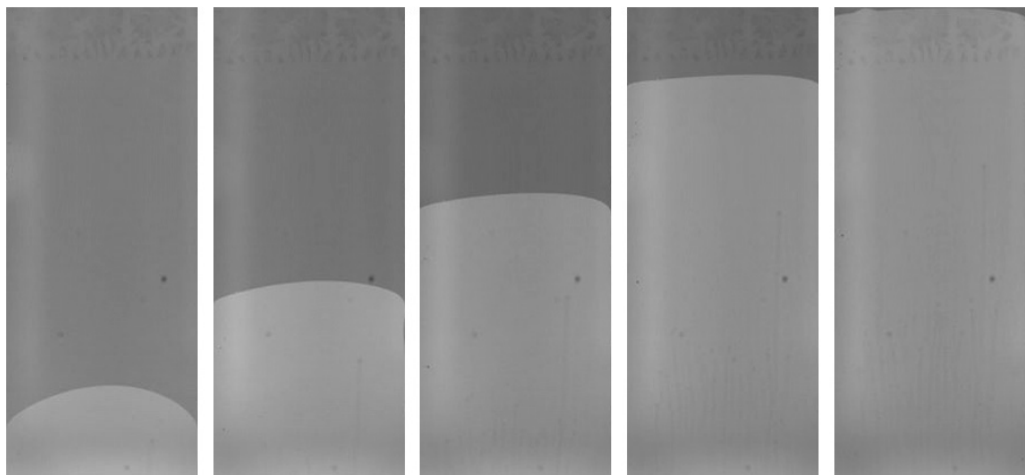


Figura 36: Óleo mineral deslocando Solução aquosa de glicerina 80% ($u^* = 17,84$ e $Q=346,13$ g/min)

As figuras 33 até 36 exemplificam os casos de *fingers* e os casos de *plug* . Como esperado os perfis de interface dos deslocamentos foram segundo a Tabela 8.

Experimento de Visualização

As figuras 37 e 38 apresentam as imagens tratadas do escoamento entre goma xantana e o óleo mineral a 25°C. As Figuras são apresentadas em ordem crescente da velocidade adimensional.

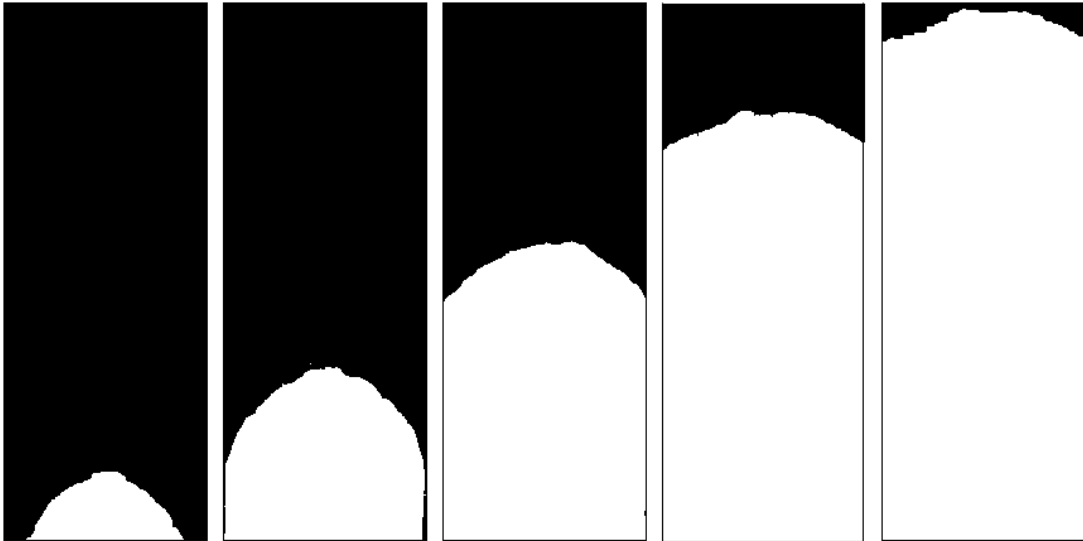


Figura 37: Escoamento para $\bar{u}^*=2,849$ e $\eta^*=0,388$. Goma xantana 0,86% deslocando óleo mineral a 25°C e 61,902 g/min.



Figura 38: Escoamento para $\bar{u}^*=31,337$ e $\eta^*=0,045$. Goma xantana 0,86% deslocando óleo mineral a 25°C e 680,92 g/min.

A partir da análise das fotos dos escoamentos, pode-se observar que quanto maior a velocidade adimensional mais tende ao *finger*, o que já se era esperado. Pois com o aumento da velocidade adimensional a taxa de cisalhamento aumento e conseqüentemente a viscosidade diminui. A Figura 37 é um caso de *plug* no qual um fluido de maior viscosidade desloca um de menor. Já a Figura 38, tem-se um caso de *finger* , observa-se a instabilidade de

Saffman-Taylor ou *viscous fingering* que é um fenômeno observado quando um fluido de baixa viscosidade substitui um de maior viscosidade na célula de Hele-Shaw.

Também é possível observar que na Figura 37 a eficiência é maior que na Figura 38, já que o *finger* é mais estreito que o *plug*.

Conclusão

O presente trabalho abordou experimentalmente o deslocamento de um fluido newtoniano por um não newtoniano pseudoplástico em uma célula retangular de Hele-Shaw. Foi analisada a evolução da forma da interface em função dos parâmetros geométricos, dinâmicos e reológicos que governam o escoamento. Foi determinado o espectro de situações em que há formação de *viscous fingering* e, conseqüentemente, os casos em que há formação de uma interface estável do tipo *plug*, nesse caso melhor estudado nesse trabalho.

Foi um grande desafio projetar e fabricar uma célula de Hele-Shaw simples, de fácil manuseio e a baixo custo, assim, um bom detalhamento do projeto foi apresentado.

Para planos futuros tem-se:

- Uma melhoria quanto à qualidade das válvulas, já que as válvulas encontradas no mercado não são de boas de qualidade, precisando assim, de uma melhor pesquisa para adquirir uma de boa qualidade, que vede bem. Com essa melhoria das válvulas acredita-se que não haverá a mistura presente nos teste da goma xantana 0,86% deslocando óleo mineral.
- Outro ponto muito importante é adquirir um vidro que não fissure com a pressão utilizada nos experimentos, já que o trincamento do vidro devido às concentrações de tensões foi um dos principais problemas.
- Fazer mais teste para analisar vários casos, assim avaliar a transição *plug* para *viscous fingering*. E podendo assim entender melhor o comportamento de cada fluido envolvido nos testes.

Referências Bibliográfica

1. AZEVEDO, R. L. M., TERRA, G. J. S., *A busca do petróleo, o papel da Petrobras e o ensino da Geologia no Brasil*, B. Geoci. Petrobras, Rio de Janeiro - v. 16, n. 2, p. 373-420, maio/nov. 2008.
2. BIRD, R.B., ARMSTRONG, R.C., HASSAGER, O., *Dynamics of polymeric liquids*, John Wiley & Sons, 1987.
3. BONN, D., MEUNIER, J., *Viscoelastic free-boundary problems Non-newtonian viscosity vs normal stress effects. Physical Review Letters*, 79(14):2662-2665, October 1997.
4. BORGES, C. D., VENDRUSCOLO, C. T., MARTINS, A. L., LOMBA, R. F. T., *Comportamento Reológico de Xantana Produzida por Xanthomonas Arboricola pv pruni para Aplicação em fluido de perfuração de poços de petróleo*.
5. CHEN, C. Y., CHEN, C. H., MIRANDA, J. A., *Numerical study of miscible fingering in a time-dependent gap hele-shaw cell*, *Physical Review E*, 71(5):056304-1 - 056304-14, 2005.

6. FOX, R.W., McDONALD, A.T., PRITCHARD, P. J., *Introdução à mecânica dos fluidos*, 6ª edição, LTC, Rio de Janeiro, 2006.
7. GUAN, X., PITCHUMANI, R., *Viscous fingering in a hele-shaw cell with finite viscosity ratio and interfacial tension*, Journal of fluids engineering - Transactions of the ASME, 125(2):354-364, 2003.
8. HOMSY, G., *Viscous fingering in porous media*. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 19:271-311, 1987.
9. LINDNER, A., BONN, D., MEUNIER, J., *Viscous fingering in complex fluids*. *J. of Physics-Condensed Matter*, 12(8A):A477-A482, 2000.
10. LINDNER, A., BONN, D., MEUNIER, J., *Viscous fingering in a shear-thinning fluid*. *Physics of Fluids*, 12(2):256-261, 2000.
11. MARTINS, A. L., WALDMANN, A. T. A., RIBEIRO, D. C., *O Projeto Conceitual de um Fluido de Perfuração não invasivo isento de sólidos*, Boletim técnico da produção de petróleo, Rio de Janeiro - volume 2, nº 1, p. 7 - 27.
12. MCCLOUD, K. V., MAHER, J. V., *Experimental perturbations to saffman-taylor flow*. *Phys. Rep.*, 260:139,185, 1995.
13. MCLEAN, J. W., SAFFMAN, P. G., *The effect of surface tension on the shape of fingers in hele-shaw cell*. *J. Fluid Mech.*, 102:455-469,1981.
14. MCLEAN, J. W., SAFFMAN, P. G., *The effect of surface tension on the shape of fingers in hele-shaw cell*. *J. Fluid Mech.*, 102:455-469,1981.
15. PARK, C. W., HOMSY, G. M., *2-phase displacement in hele-shaw cells - theory*. *J. Fluid Mech.*, 139:291-308, 1984.
16. PETTITT, D. J., *Xanthan gum*. In: M. GLICKSMAN(ed), *Food Hydrocolloids*. Boca Raton, Ed. CRC Press, vol.1, p.127-149, 1982.
17. SAFFMAN, P., *Viscous fingering in hele-shaw cells*. *J. Fluid Mech.*,173:73-94, 1986.
18. SCHRAMM, G., *Reologia e Reometria Fundamentos Teóricos e Práticos*, 2º edição, Artliber editora, Rio de Janeiro, 2006.
19. THOMAS, J. E., *Fundamentos de Engenharia de Petróleo*, 2ª edição, Editora Interciência, Rio de Janeiro, 2001.
20. YAMAMOTO, T., KAMIKAWA, H., TANAKA, H., NAKAMURA, K., MORI, N., *Viscous fingering of non-newtonian fluids in a rectangular hele-shaw cell*. Journal of the Society of Rheology, Japan, 29(2):81-87, 2001.
21. YAMAMOTO, T., KIMOTO, R., MORI, N., *Tip velocity of viscous fingers in shear-thinning fluids in a hele-shaw cell*. JSME International Journal, 48(4):756-762, 2005.

22. BENSIMON, D.; KADANOFF, L. P.; LIANG, S.; SHRAIMAN, B. I. ; TANG, C.
Viscous flows in two dimensions. Rev. Mod. Phys., 58(4):977–999, 1986.