

# 1

## Introdução

### 1.1

#### Motivação

Diante da importância da indústria petrolífera na economia mundial, muitos estudos referentes ao aumento da produtividade e eficiência da mesma estão sendo realizados. Muitos trabalhos encontrados na literatura, relativos ao estudo dos fenômenos interfaciais e seus efeitos no deslocamento de fluidos imiscíveis, baseiam-se em sistemas reais encontrados na indústria do petróleo.

Esses fenômenos são muito importantes em diversas aplicações, tais como: invasão de fluido de perfuração em meios porosos (caso que será estudado), recuperação secundária e terciária de petróleo, fraturamento hidráulico, processamento de polímeros, hidrologia e filtração.

A perfuração de poços de petróleo é uma operação de custos elevados, sendo assim a minimização do tempo de perfuração e do dano ao reservatório produtor é fundamental. A perfuração ocorre normalmente através da aplicação de peso e rotação na coluna, cuja extremidade está acoplada a uma broca cortante. Simultaneamente, circula-se fluido de perfuração pelo interior do poço, ou seja, o fluido é injetado pelo interior da coluna e retorna pelo espaço anular formado entre as paredes do poço e a coluna de perfuração (42).

Na medida que a broca penetra na rocha reservatório, o fluido de perfuração invade a formação através dos canais naturais (poros interconectados e/ou fraturas) devido ao diferencial de pressão positivo entre o mesmo e os fluidos do reservatório.

No momento da infiltração apenas a fração líquida do fluido de perfuração penetra nos poros das rochas, enquanto que a porção sólida, gradualmente, adere à parede do poço, formando um reboco. A parte sólida, argilas e/ou produtos químicos como polímeros, não consegue penetrar facilmente, a não ser que tenha tamanho menor que os poros ou que ocorram mecanismos capazes de comprimir, empurrando-a para dentro dos poros.

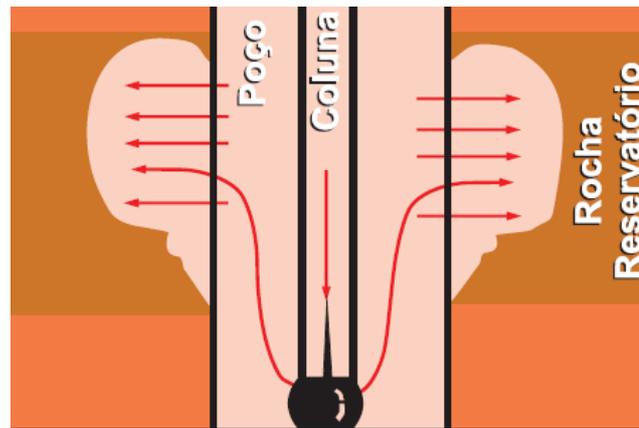


Figura 1.1: Esquema da invasão do fluido de perfuração na rocha reservatório.

No decorrer do processo de filtração, os fluidos da formação, nas proximidades da fratura, são substituídos gradativamente pelo filtrado. Dependendo da composição química do filtrado, sua viscosidade pode eventualmente ser maior que a do fluido presente no reservatório e tal fato pode levar a uma redução adicional na taxa de filtração. Por outro lado, se as viscosidades do filtrado e do fluido existente nos poros forem semelhantes, então a viscosidade dos fluidos não influencia de maneira relevante a taxa de filtração. Já o caso no qual a viscosidade do filtrado seja menor que o presente na rocha reservatório, ocorre o fenômeno de *viscous fingering*, situação indesejável (34).

Um dos principais problemas ocasionados pela presença do filtrado em zonas produtoras é o significativo decréscimo nas suas permeabilidades relativas e a consequente redução da produtividade do poço.

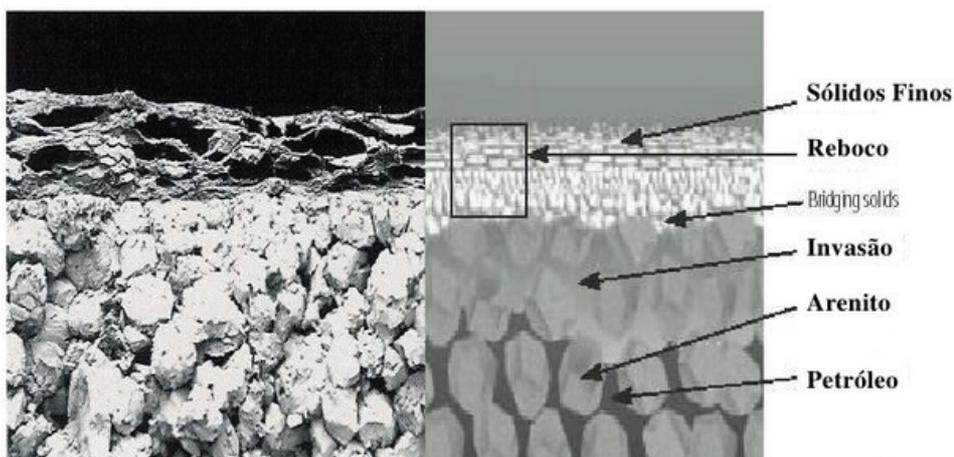


Figura 1.2: Esquema da invasão do fluido de perfuração na rocha reservatório.

O diâmetro de invasão da parte líquida do fluido de perfuração é função das seguintes características:

- Tempo gasto na perfuração do poço;
- Permeabilidade do reboco;
- Viscosidade do infiltrado;
- Diferencial de pressão entre a coluna de fluido de perfuração e a camada rochosa;
- Porosidade e permeabilidade da rocha.

Essa invasão de fluido de perfuração na formação rochosa durante a perfuração e/ou completção de poços geralmente provoca efeitos prejudiciais à produção, concentrados na zona invadida próxima ao poço, resultando na redução da permeabilidade, como já mencionado anteriormente. As principais causas dos danos à formação são: (18).

- Obstrução parcial da zona invadida devido à precipitação de partículas originalmente em suspensão nos fluidos de perfuração e completção;
- Obstrução parcial junto ao poço provocada por migração de partículas oriundas de rochas friáveis;
- Hidratação e inchamento de argilas presentes na rocha reservatório;
- Formação de incrustações salinas devido à precipitação de sais inorgânicos existentes na água de formação;
- Bloqueio de fluxo devido à emulsificação do petróleo.

Adicionalmente, deve-se enfatizar que a invasão do fluido na rocha implica em deslocar os fluidos existentes na mesma, ou seja, hidrocarbonetos na forma líquida ou gasosa e água. Tal problema é conhecido na Engenharia de Reservatórios como deslocamento imiscível ou parcialmente miscível (26).

## 1.2 Objetivos

O objetivo da pesquisa é compreender a estabilidade da interface através das características reológicas de dois fluidos não newtonianos. Através desse estudo é possível entender, em partes, o fenômeno da invasão de fluido de perfuração na formação rochosa, que ocorre devido ao diferencial de pressão entre o mesmo e os fluidos do reservatório. Porções da parte líquida do fluido penetram nas 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 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 danos na formação ao redor do poço.

Para esse estudo foi construída uma bancada experimental a fim de realizar a simulação do deslocamento de um fluido newtoniano por um não newtoniano, e vice-versa, em um meio poroso. Esse meio poroso é representado pela célula de Hele-Shaw, isto ocorre pois escoamentos bidimensionais em meios poroso podem ser representados experimentalmente pela célula de Hele-Shaw, na qual o fluido viscoso escoava entre duas placas planas paralelas separadas por uma distância constante, representando um meio poroso homogêneo (Capítulo 3). Os fluidos usados no experimento foram a goma xantana (Anexo A), um polímero rígido e a poliacrilamida (Anexo B), um polímero flexível, ambos fluidos não newtonianos pseudoplásticos sendo que o último apresenta um comportamento elástico, além do óleo mineral um fluido newtoniano.

Utilizando uma câmera fotográfica observou-se a evolução da forma da interface em função dos parâmetros geométricos, dinâmicos e reológicos. O objetivo da pesquisa consiste em determinar em qual situação ocorre a transição *fingers/plug* e vice-versa.

## 1.3 Revisão bibliográfica

Uma das obras mais influentes na Dinâmica dos Fluidos, no final do século XX, foi um artigo escrito por Henry Selby Hele-Shaw (1854 – 1941). Em 1898, Henry Hele-Shaw, engenheiro naval, criou um dispositivo para investigar o escoamento bidimensional de um fluido viscoso entre duas placas paralelas separadas por uma distância muito pequena (20). Henry Hele-Shaw a projetou com o interesse de estudar o fluxo de água ao redor do casco de navios, e através de seu dispositivo foi possível abordar mais quantitativamente tal problema de mecânica dos fluidos.

Provavelmente a característica mais importante dos escoamentos em tal célula é que quando o número de Reynolds baseado na largura do *gap* é suficientemente pequeno, as equações de Navier-Stokes calculadas sobre o *gap* se reduzem a uma relação linear para a velocidade similar a lei de Darcy e, em seguida, a uma equação de Laplace para a pressão do fluido. Através da similaridade nas equações governantes, os escoamentos em uma célula de Hele-Shaw são particularmente úteis para a visualização de escoamentos saturados em meios porosos, assumindo que eles são lentos o suficiente para serem governados pela Lei de Darcy (19). Esse equacionamento será melhor discutido na Seção 3.

A Figura 1.3 é um esquema de uma célula de Hele-Shaw retangular onde  $W$ ,  $L$  e  $b$  representam respectivamente a largura, o comprimento e o *gap* entre as placas paralelas da célula.

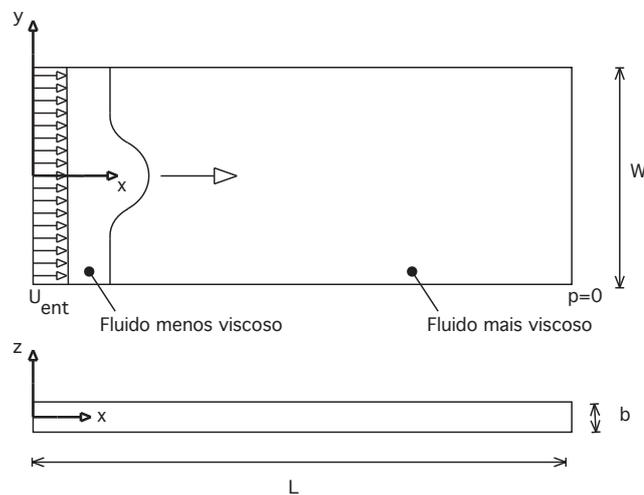


Figura 1.3: Esquema da célula de Hele-Shaw (41).

Atualmente, a célula de Hele-Shaw é usada como uma poderosa ferramenta em diversos campos das ciências naturais e engenharia, em particular, física da matéria, ciência dos materiais, crescimento de cristais e, claro, mecânica dos fluidos.

Em 1958, Saffman e Taylor (38) foram os responsáveis pelas primeiras observações dos fenômenos interfaciais, focados na recuperação secundária de petróleo. Eles estudaram a instabilidade macroscópica, que pode surgir quando um fluido menos viscoso desloca um fluido mais viscoso, que é pelo menos, parcialmente, uma das situações responsáveis pelos problemas em processos de recuperação secundária em campos de petróleo. Também observaram que escoamentos bidimensionais em meios porosos são modelados pelo escoamento na célula de Hele-Shaw (37). Ao realizarem experimentos de ar deslocando glicerina, óleo deslocando glicerina e água deslocando óleo em uma célula de

Hele-Shaw, observaram uma interface instável com formato parecido com dedos (*fingers*). O problema foi também resolvido numericamente e as soluções foram comparadas com os resultados experimentais. Saffman-Taylor observaram que a interface se tornava cada vez mais instável à medida que o escoamento se desenvolvia, um dedo dominante se formava e suprimia o crescimento dos demais, e esse fluxo ao atingir um estado estacionário, propagava-se como um único dedo sem alterar a forma (38).

A instabilidade de Saffman-Taylor ou *viscous fingering* é um fenômeno observado quando um fluido de baixa viscosidade desloca um de maior viscosidade, como mostra a Figura 1.4. Na maioria dos casos, mas não em todos, o mecanismo de instabilidade está ligado às variações de viscosidade entre os fluidos, portanto o termo “*Viscous fingering*”.

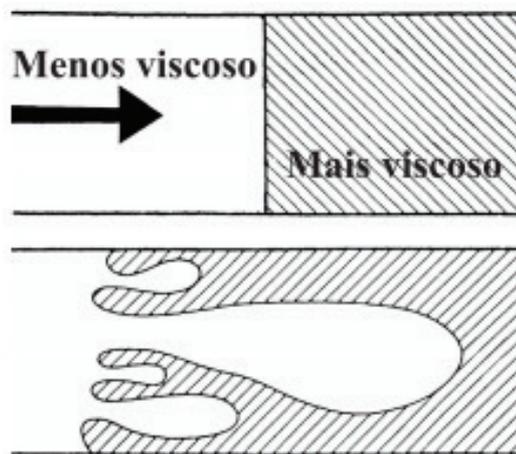


Figura 1.4: Representação da instabilidade de Saffman-Taylor ou *viscous fingering*.

McLean e Saffaman (27), em 1980, publicaram um artigo no qual o objetivo era analisar os resultados de Saffman-Taylor incluindo o efeito da tensão superficial na curvatura lateral da interface. Eles resolveram numericamente o problema de fronteira utilizando a tensão superficial dinâmica de Saffman-Taylor a taxas de perturbações infinitesimais. Eles também investigaram o efeito da tensão superficial sobre as taxas de crescimento das perturbações infinitesimais. Paralelamente, as experiências foram realizadas por Pitts (1980), que confirmaram as experiências originais de Saffman-Taylor e forneceram mais dados sobre perfis afetados pela tensão superficial (37).

Os resultados experimentais de Saffman-Taylor (1958) e Pitts (1980) sobre “*fingering*” em uma célula de Hele Shaw são modelados por um escoamento potencial bidimensional considerando efeitos de tensão superficial na interface. Usando técnicas de simplificação, a forma da superfície livre é expressa como a solução de uma equação diferencial não linear. A equação é resolvida nume-

ricamente e as soluções são comparadas com os resultados experimentais. As formas dos perfis são muito bem previstas, porém a dependência da largura do dedo sobre a ação da tensão superficial não é quantitativamente precisas, embora o comportamento qualitativo esteja correto (27).

Em 1986, Kessler e Levine fizeram uma análise de estabilidade envolvendo um grupo de *fingers* paralelos e periodicamente distribuídos ao longo da interface, concluindo que os *fingers* são instáveis para qualquer modulação. A estabilidade somente é alcançada quando um *finger* dominante anula seus vizinhos e se expande (21), contrariando os resultados de McLean e Saffman (3) que acreditavam que os *fingers* permaneciam instáveis mesmo considerando a presença da tensão superficial. Mesmo que fraca, a tensão interfacial age na expansão do *finger* dominante até que ele atinja uma determinada largura. Casos com número de capilaridade,  $Ca$ , extremamente alto foram tratados teoricamente por Shraiman (1986), Hong e Langer (1986) e Combescot et al. (1986) (21).

Em 1986, Bensimon et al. publicaram um artigo contendo os trabalhos mais importantes sobre a estabilidade dos padrões de fluxo hidrodinâmico em geometrias bidimensionais ou quase bidimensionais. Nos quais o objetivo era compreender a natureza das instabilidades que possam surgir quando um líquido mais viscoso é deslocado por um menos viscoso. Além disso, desejou-se saber como a tensão superficial poderia restaurar a estabilidade dos padrões de fluxo não-trivial, *fingers* (3).

Bensimon et al. (3) reconheceram que uma das dificuldades para esse tipo de escoamento é a previsão do movimento da superfície entre os fluidos. Eles compreenderam que em um ambiente livre de ruído um único dedo estável surgirá sempre que a tensão superficial for diferente de zero. Eles também entenderam que conforme a velocidade do fluido aumenta e conseqüentemente a tensão superficial diminui, os experimentos e simulações mostram a tendência de um padrão instável ou caótico na interface.

Homsy, em 1987 (21), estudou o escoamento em três geometrias simples: escoamento retilíneo, fluxo radial e padrão *Five-spot*. Estudou também a importância da gravidade no escoamento. Para realizar esse estudo foram utilizados dois fluidos diferentes imiscíveis e outros dois miscíveis. Os experimentos foram limitados às forças de gravidade, à viscosidade, e à tensão superficial (no caso de fluidos imiscíveis). No caso dos sistemas miscíveis nos quais as diferenças de forças viscosas são devidas as diferenças na concentração de soluto, considerou-se também a difusão molecular e dispersão mecânica do soluto. Ele observou que dependendo dos sinais do gradiente da densidade ( $\Delta\rho$ ), da velocidade ( $U$ ) e do gradiente da viscosidade ( $\Delta\mu$ ): um em que a gravidade conduz

a instabilidade e viscosidade estabiliza, e dois casos, quando ambas as forças de base quer a estabilizar ou desestabilizar. Quando a força da gravidade está ausente, isto é, em um deslocamento horizontal, a instabilidade sempre ocorre quando um fluido mais viscoso é deslocado por um menos viscoso, uma vez que o fluido menos viscoso tem a maior mobilidade. As duas forças básicas responsáveis pela instabilidade são a gravidade e a viscosidade. Segundo Homsy, Análises mais refinadas mostrariam que a tensão superficial e/ou dispersão podem modificar, mas não estabilizar um fluxo caracterizado como instável.

A Figura 1.5(A) mostra um padrão *fingering* que ocorre quando um material mais viscoso é deslocado por um menos viscoso completamente miscível, através da injeção do mesmo a partir do canto diagonal de um quadrado de Hele-Shaw. Esse caso consiste em água injetada na glicerina. O padrão é guiado pela diferença de viscosidade e da influência da mistura de difusão entre os fluidos. A Figura 1.5(B) mostra um exemplo de padrão que é formado quando um fluido menos denso e menos viscoso penetra em um fluido mais denso e mais viscoso em uma célula de Hele-Shaw na posição vertical, sendo esses imiscíveis. Nesse caso tanto a gravidade como a viscosidade são forças importantes na condução da instabilidade. Já a Figura 1.5(C) representa o padrão que resulta quando um fluido newtoniano de baixa viscosidade injetado a partir de uma origem penetra em uma célula de Hele-Shaw preenchida com um fluido miscível, porém fortemente não newtoniano.

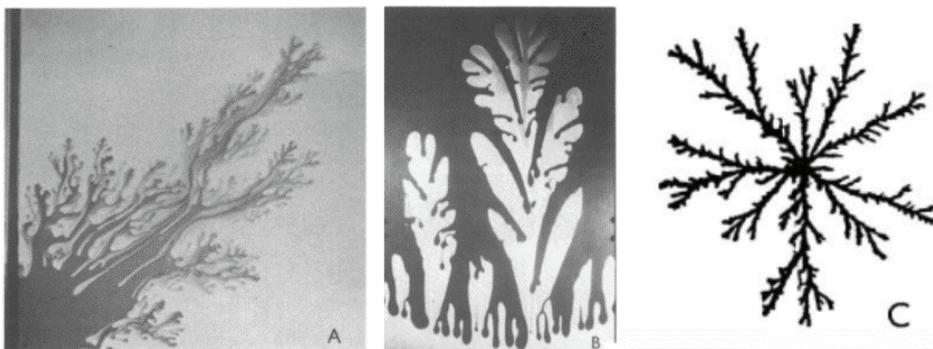


Figura 1.5: Testes Homsy.

O caso de fluxo na Hele-Shaw é de fundamental interesse e permite estabelecer alguns conceitos úteis. Além disso, permite discutir os efeitos de *shielding*, *spreading* e *splitting* que são importantes na determinação da dinâmica do *viscous fingering*. O mecanismo pelo qual esses padrões são formados pode ser entendido da seguinte forma: como a tensão superficial se torna mais fraca, a frente do *finger* fica suscetível a instabilidade *viscous-fingering*, pelo mecanismo básico associado ao fluido menos viscoso deslocar o mais viscoso. Depois da separação, cada um dos novos *fingers* é estável e

mais fino do que o *finger* a partir do qual se separaram. Como resultado da blindagem, *shielding*, um desses *fingers* irá eventualmente superar o outro e, devido à tensão superficial, irá se ramificar em seguida, *spread*, e ocupar a largura da célula. No processo, o *finger* atinge novamente uma largura instável e se divide, *splitting*, e o padrão torna a se repetir. Assim, a tensão superficial desempenha um duplo papel. Ela será suficientemente fraca para a frente do *finger* ser instável, mas é também a força física que faz com que a ramificação se repita e se propague (21).

Trabalhos experimentais conduzidos por Nieemann et al., Park e Homsy e Tabeling et al (21). demonstram a existência de *tip-splitting* em *fingers* dominantes se propagando. Conforme a tensão superficial enfraquece, a frente do *finger* dominante se torna suscetível à instabilidades geradas pelos mesmos mecanismos associados ao fenômeno de um fluido movendo outro com viscosidade maior. Depois da divisão, cada *finger* formado é estável por ser mais fino que o *finger* original (21).

Em 1987, Van Damme et al. (12) apresentaram um estudo experimental das propriedades do *finger* (largura, curvatura e orientação) no canal de Hele-Shaw, focando na influência das propriedades viscoelásticas. A primeira parte do artigo foi dedicada às relações entre a largura do *finger* e três parâmetros: a distância entre as placas "b", a pressão de injeção "P" e a concentração da pasta. Na segunda parte, foram informados alguns dados sobre um aspecto de fractal: o *finger* e o perfil da ponta do *finger*. A utilização de fluidos miscíveis leva a perfis que são fundamentalmente diferentes daqueles observados no fluxo de Saffman-Taylor. Os mesmos concluíram que efeitos viscoelásticos são de primordial importância na instabilidade (*fingers*) entre fluidos miscíveis. As propriedades elásticas do fluido mais viscoso controlaram na maioria das vezes a largura dos *fingers* e o seu perfil, e também, talvez, o seu ângulo de ramificação.

Wilson (44) estudou numericamente a teoria da estabilidade, repetindo as análises de Taylor e Saffman usando um modelo constitutivo mais geral. Dois modelos foram usados: o modelo de Oldroyd "Fluid B", que exibe uma elasticidade, mas não é pseudoplástico; e o modelo de *power-law* de Ostwald-de Waele que possui características opostas ao primeiro. A partir das análises dos resultados obtidos numericamente concluiu-se que a instabilidade ocorre devido a presença ou a ausência da tensão interfacial, e que a pseudoplasticidade não tem grandes efeitos, embora existam modelos que apresentam resultados contrários.

Daniel Bonn e Jacques Meunier (1997) estudaram os *viscous fingering* no movimento de bolhas em dutos para duas soluções de polímeros diferentes. Para fluidos não newtonianos, os resultados são muito diferentes dos newtonianos: polímeros flexíveis alargam os *fingers* viscosos, enquanto que os polímeros rígidos estreitam os *fingers*. O estudo de movimento das bolhas de ar em um tubo cheio com a solução polimérica mostra que a diferença é devida aos efeitos normais de esforço, estes são grandes para polímeros flexíveis e não detectável para polímeros rígidos (6).

Lindner et al. (23) estudaram a estabilidade utilizando um fluido pseudoplástico, a goma xantana. O experimento mostra que para fracos efeitos pseudoplásticos, o resultado para a largura dos *fingers* é em função do número de capilaridade. Já para fortes efeitos pseudoplásticos são encontrados *fingers* mais estreitos. O experimento permitiu estudar também a aplicabilidade da lei de Darcy para fluidos pseudoplásticos. Para fluidos newtonianos, essa lei mostra que a velocidade do *finger* é em função do gradiente de pressão. Para fluidos fracamente pseudoplástico utiliza-se a lei de Darcy original. Já para fortes efeitos as previsões da lei de Darcy não são válidas. A lei de Darcy modificada é muito usada em problemas com fluidos não newtonianos.

Continuando o trabalho, Lindner et al. (22) investigaram como três diferentes fluidos complexos, dois polímeros e uma solução de surfactantes, podem agir na viscosidade ou na tensão superficial e modificar drasticamente a instabilidade em uma célula de Hele-Shaw retangular com uma distância entre os vidros de 0,25 mm. Uma solução de goma xantana, polímero rígido, uma solução de polietilenoglicol, polímero flexível, e uma solução com surfactante aniônico di-octil sulfossuccinato de sódio (AOT). A célula foi preenchida pelas soluções poliméricas e pela solução de surfactante. As soluções poliméricas foram deslocadas pelo ar, fluido de baixa viscosidade, enquanto as soluções de surfactante foram deslocadas por um óleo de baixa viscosidade (hepteno). Observaram que para a solução de polímero rígido os efeitos pseudoplásticos tendem a estreitar os *fingers* para velocidades maiores. Para a solução de polímero flexível os efeitos da tensão normal são presentes e dominantes em relação às forças viscosas, estas são forças complementares, o que leva a *fingers* mais longos. Já para soluções de surfactantes a modificação das forças capilares leva a *fingers* mais largos.

Yamamoto et al. (46) estudaram os *viscous fingering* em uma célula de Hele-Shaw retangular. Os fluidos a serem deslocados foram a glicerina, fluido newtoniano, e soluções aquosas de carboximetilcelulose (CMC) e poliacrilamida (PAA), fluidos não newtonianos viscoelásticos. O ar comprimido foi injetado na célula inicialmente preenchida com um dos fluidos mencionados. Foram

analisados o crescimento e a estrutura dos *viscous fingering*. Eles observaram que os *fingers* em glicerina formaram estruturas densas, enquanto os *fingers* em fluidos não newtonianos formaram estruturas ramificadas. Foi verificado que a viscosidade pseudoplástica intensificou o “efeito de proteção” tornando a forma ramificada. Além disso, o padrão de *fingering* na solução de PAA foi alterado durante o crescimento e esse fenômeno foi exclusivo para os experimentos em alta pressão de injeção. Yamamoto et al. acreditam que a origem deste fenômeno é devida às propriedades pseudoplásticas e elongacionais.

Em 2005, Yamamoto et al. (47) investigaram numericamente os *viscous fingering* em fluidos não newtonianos em uma célula de Hele-Shaw por um método de elementos finitos, em combinação com o método VOF (volume de fluido), e mostraram a relação entre a viscosidade pseudoplástica e os padrões de crescimento típicos dos *fingering*, ou seja, *spreading*, *splitting* e *shielding*.

Yamamoto et al. (48) também estudaram a relação entre a velocidade da ponta do *finger* e o gradiente de pressão nos testes de ar deslocando solução aquosa de CMC. Para isso utilizaram uma lei de Darcy modificada para fluidos viscosos não newtonianos a fim de avaliar a velocidade da ponta do *finger*. Concluiu-se que a lei de Darcy modificada foi capaz de descrever as características da velocidade da ponta do *finger* que cresce com o aumento do gradiente de pressão nas soluções de CMC. A velocidade da ponta aumenta globalmente com o aumento do gradiente de pressão, enquanto o crescimento do *finger* é atrasado em alguns períodos devido ao acréscimo de ramificações que diminuem ou mantêm constante a velocidade do *finger*. Entretanto, a velocidade da ponta do *finger* começa a aumentar após o *finger* se dividir.

Outro estudo de Yamamoto et al. (49) foi a investigação de *viscous fingering* em soluções de surfactante em um célula de Hele-Shaw retangular, agora os fluidos de teste foram soluções aquosas de brometo de cetiltrimetilamônio (CTAB) com salicilato de sódio (NaSal). Os resultados experimentais indicam que existe uma taxa de cisalhamento crítica na qual a mudança estrutural na rede de micelas ocorre e o fenômeno de crescimento do *finger* altera drasticamente. Em outras palavras, o fluxo numa célula de Hele-Shaw é diferente de um canal capilar e, conseqüentemente, a taxa de cisalhamento na parede não pode ser comparada quantitativamente. No entanto, a comparação deu uma sugestão interessante e confirmou a relação entre o movimento do *finger* e a taxa de cisalhamento crítica.

Na literatura não foram encontrados muitos estudos sobre a instabilidade de Saffman-Taylor nos quais os fluidos de trabalho fossem viscoplásticos. Isso ocorre devido a dificuldade de se modelar esse tipo de fluido em razão da sua complexidade.

Coussot (11) estudou os *viscous fingering* em fluidos viscoplásticos em células de Hele-Shaw retangulares e radiais. Para essa análise, em particular, foi estabelecida uma forma detalhada da lei de Darcy para fluidos viscoplásticos, tendo como base a teoria da lubrificação. Coussot observou que o escoamento de um fluido viscoplástico na célula retangular e radial possui as mesmas características de instabilidade dos fluidos newtonianos, exceto pelo comprimento de onda de crescimento máximo que poderá ser pequeno, mesmo com o desaparecimento da velocidade. Os *viscous fingering* em fluidos viscoplásticos tem algumas características peculiares que, no entanto, não são suficientes para explicar o padrão observado em sistemas coloidais.

Em 2000, Lindner et al. (24) estudaram mais uma vez a instabilidade de Saffman-Taylor, porém utilizando géis como fluidos de trabalho, fluidos viscoplásticos. A teoria para fluidos com tensão limite de escoamento mostra que a equação de instabilidade é similar a de fluidos newtonianos, porém o número de capilaridade é que a governa. Eles concluíram que a instabilidade é drasticamente modificada em fluidos que apresentam tensão limite de escoamento,  $\tau_0$ , levando a padrões muito ramificados em baixas velocidades, nos quais o limite de escoamento desempenha um papel importante. Já para velocidades mais altas observa-se apenas um único *finger* estável.

Oltean et al. (33) estudaram numericamente e experimentalmente o fenômeno de transporte de uma solução de sal em uma célula de Hele-Shaw. Tal aparato experimental não foi apenas para visualização, mas também para quantificar as concentrações em qualquer ponto situado dentro da zona de mistura, sem perturbar o fluxo. A partir dos experimentos realizados com diferentes taxas de fluxo e diferentes concentrações de sal, duas formas de pluma foram detectadas: (i) pluma sem *fingers* e (ii) pluma com *fingers*. Uma análise qualitativa mostrou que o aparecimento dos *fingers* está fortemente relacionado com a competição entre a convecção forçada (vazão injetada) e a convecção livre (diferença de densidade). Assim, a fim de prever a configuração da pluma um critério semi-empírico com base na relação entre a gravidade e a velocidade de injeção foi formulado. Quando a convecção forçada é predominante, a distribuição espacial tende a configuração de pluma com *fingers*. No caso contrário, é esperada uma configuração de pluma sem *fingers*.

Chevalier et al. (10) consideram que a inércia do fluido pode tornar-se importante para a instabilidade de Saffman-Taylor para altas velocidades dos *fingers*. Eles investigaram experimentalmente os efeitos da inércia sobre a largura dos *fingers*. Eles concluíram que devido à inércia a largura dos *fingers* pode aumentar com o aumento da velocidade, ao contrário do que acontece em pequenos números de Reynolds(Re). Descobriram também que os efeitos

inerciais devem ser considerados acima de um número de Weber crítico. Neste caso pode-se mostrar que a largura do *finger* é regida por um equilíbrio entre forças de viscosidade e de inércia.

Através da análise da revisão bibliográfica pode-se observar que diversos pesquisadores construíram a célula de Hele-Shaw para estudar os padrões de escoamento nos quais há a presença da instabilidade de Saffman-Taylor. No entanto, cada pesquisador a adaptou para atender suas necessidades, tendo como enfoque seus objetivos e motivações. Por isso existem diversas versões da célula de Hele-Shaw que diferem nas dimensões e formatos.

A maioria dos trabalhos encontrados na literatura é realizada com fluidos newtonianos e não newtonianos sendo deslocados pelo ar. Esses casos tornam-se mais simples devido às diferenças entre as tensões superficiais, as viscosidades e as densidades do ar e dos líquidos serem bastantes diferentes. Não foram encontrados na literatura artigos que descrevam estudos utilizando dois fluidos imiscíveis diferentes, líquidos, sendo um newtoniano e outro não newtoniano em uma célula de Hele-Shaw.