

1

Introdução

1.1

Motivação e Descrição do Problema

O deslocamento de fluidos tem sido tema de diversos estudos no mundo científico, quer seja na pesquisa básica ou na aplicada às necessidades da indústria. A tarefa de substituir um fluido por outro encontra, dependendo da área, diferentes propósitos. Por se tratar de escoamento multi-fásico, torna-se necessário saber se os fluidos são ou não miscíveis, o que implica a definição de um mecanismo de difusão ou de uma tensão superficial entre os mesmos, respectivamente. De qualquer forma, a interface de contato entre dois fluidos, em geral tratada como uma superfície livre, se bem compreendida, possibilita o domínio de diversos processos físicos. Particularmente, na categoria de escoamento de fluidos imiscíveis, na indústria de revestimentos, é possível cobrir a superfície interna de geometrias circulares com uma espessura pré-definida. Para isso, preenche-se o interior do tubo com o fluido (e.g. solução polimérica) que se quer revestir e injeta-se um fluido deslocador (e.g. ar) que, numa dada condição de escoamento, deixará somente uma película de revestimento na parede interna do tubo. Dependendo da geometria do tubo, efeitos de capilaridade, e por conseqüência forças de tensão superficial entre os fluidos em contato com a parede, devem ser consideradas. Soluções poliméricas, por terem comportamento mecânico não newtoniano, devem ter suas propriedades reológicas bem caracterizadas.

Na indústria de petróleo, a produção de óleo encontra um de seus gargalos no momento em que a pressão no reservatório se equilibra com a pressão no fundo do poço. Métodos de recuperação envolvem a injeção, em poços alternativos, de fluidos (e.g. soluções poliméricas) capazes de deslocar o petróleo. Tal processo, que ocorre em meios porosos, envolvendo, portanto, efeitos de capilaridade, requer um estudo detalhado dos mecanismos de substituição do petróleo pelo líquido injetado. Outros parâmetros, como número de Reynolds, razão de viscosidades e diferença de densidades entre

o fluido deslocador e deslocado, são igualmente relevantes na compreensão da interação entre um fluido com outro e no processo em si (como e que tipo de interface promove as melhores substituições deve ser investigado.)

Ainda na indústria de petróleo, durante a perfuração de um poço utiliza-se um fluido de perfuração. Escoando por dentro da coluna de perfuração, sua função é lubrificar e resfriar a broca, remover o cascalho produzido e prover, após a perfuração, uma coluna hidrostática capaz de contrabalançar a pressão da formação rochosa, e, com isso, prevenir o colapso do poço e uma produção precipitada de óleo, gás e água. No final deste processo todo o poço encontra-se preenchido com tal fluido. Nesse momento, por poço, entende-se o interior da coluna de perfuração e a região anular entre esta e a formação rochosa. Para que o poço esteja apto para iniciar a produção é necessário revestir a parede da formação com uma pasta de cimento, cuja função é prover estabilidade mecânica (evitar o desmoronamento) e prevenir infiltração, garantindo a qualidade dos cálculos estruturais e de produção. Esse processo de substituir o fluido de perfuração pela pasta de cimento é chamado de cimentação primária. Um esquema desse processo pode ser observado na figura 1.1.

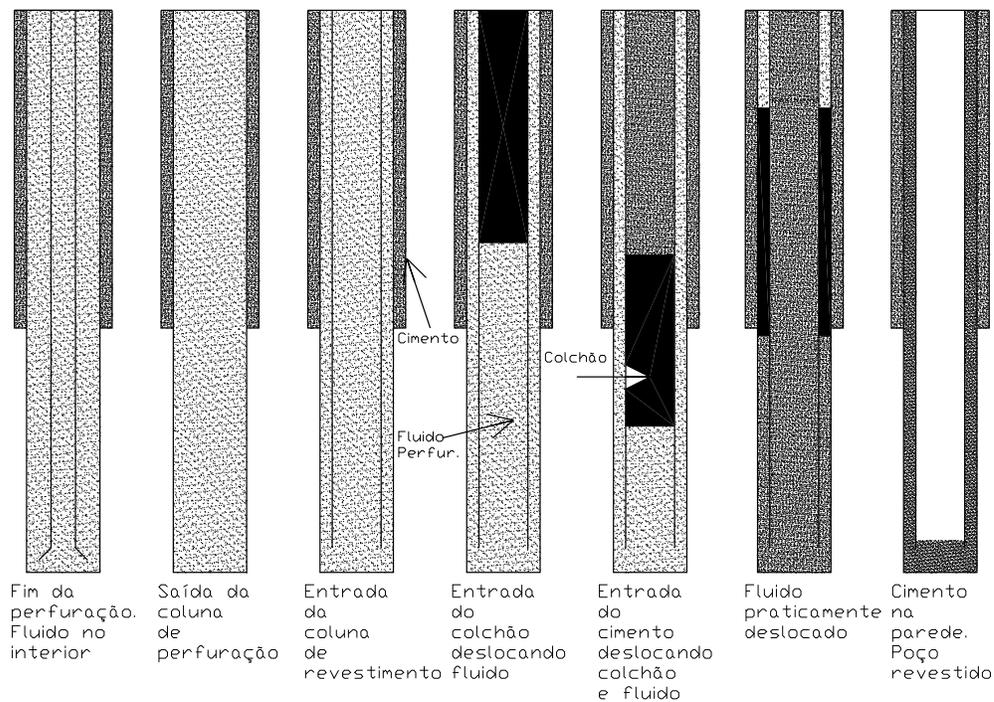


Figura 1.1: Processo de Cimentação de um Poço de Petróleo

Ao término da perfuração, remove-se a coluna de perfuração e se insere a coluna de revestimento. Pelo interior desta, escoará a pasta de cimento. No entanto, fluidos intermediários chamados colchões espaçadores

e/ou lavadores fazem o papel de separar o fluido de perfuração do cimento. Os espaçadores têm como finalidade minimizar o contato entre os fluidos principais, enquanto os lavadores preparam a região de interesse, substituindo o fluido, e "limpando" a região anular. As propriedades químicas devem ser consideradas no momento da seleção para não haver incompatibilidade com o fluido que se quer retirar. A fim de evitar um contato prematuro entre estes, o que acarretaria até perda nas propriedades do cimento, volumes pré-definidos de colchão são bombeados. Outra função dos colchões é limpar a região anular, preenchida com fluido de perfuração, e prepará-la para a deposição do cimento.

Uma outra operação bastante comum em completação de poços é a de tamponamento. Essa operação faz parte de uma cimentação secundária, cuja função é geralmente remediar cimentações primárias mal sucedidas. O tamponamento consiste no bombeamento para o poço de um determinado volume de pasta de cimento, objetivando cimentar (tamponar) um determinado trecho do poço. São usados visando corrigir localmente a cimentação primária, vazamentos no revestimento ou abandono definitivo ou temporário do poço.

Algumas das questões inerentes a esse processo são: qual volume de colchão é capaz de garantir o não contato entre os fluidos principais? Qual a janela operacional, em outras palavras, qual a vazão e características mecânicas dos fluidos envolvidos que promovem um processo mais eficiente? O processo tem sua eficiência plena quando o cimento ocupa perfeitamente a região anular entre a formação rochosa e a coluna de revestimento. Por sua vez, o processo de cimentação enfrenta diversos desafios. A inclinação do poço, por exemplo, é um complicador, dado que os fluidos envolvidos possuem densidades diferentes. Logo, em poços horizontais a estratificação de fluidos é inevitável. A excentricidade da região anular entre a coluna de revestimento e a formação rochosa gera um desbalanceamento e uma assimetria no perfil de velocidades. O escoamento se dá, preferencialmente, pela região mais larga do anular, promovendo um indesejável atravessamento, ou canalização (*channeling*) do fluido deslocador sobre o deslocado, e deixando fluido de perfuração estacionado na região mais estreita. A variação da densidade e a reologia dos fluidos (que em muitos casos apresentam comportamento não newtoniano) torna mais complexa uma previsão analítica do processo. Nesse trabalho estudaremos de que maneira a interface entre dois fluidos pode interferir na eficiência de um processo de deslocamento de um fluido por outro no interior de um espaço anular, dado que interfaces planas implicam um me-lhor deslocamento, deixando menor acúmulo de massa do

fluido deslocado. Na figura 1.2 a situação da esquerda promove um deslocamento que deixa menos massa de fluido deslocado na parede, sendo, portanto, mais eficiente.

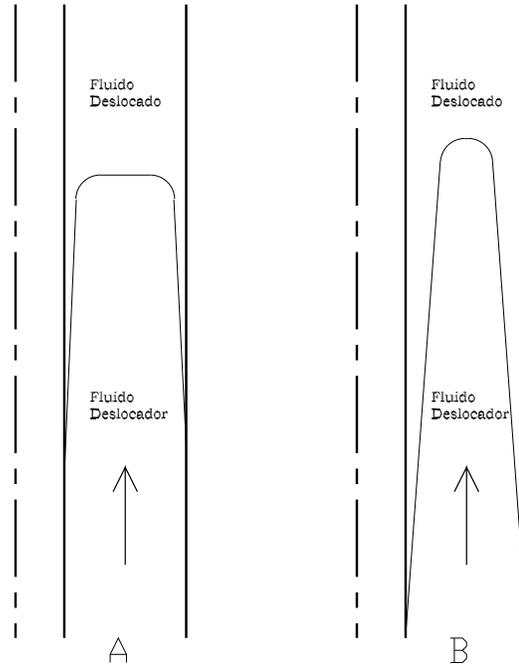


Figura 1.2: Interface entre dois Fluidos

Os fluidos envolvidos nesse processo (fluido de perfuração, colchão espaçador e pasta de cimento) têm comportamento não newtoniano, sendo a viscosidade função da taxa de deformação, ou, em outras palavras, dependente da cinemática do escoamento. Somente o colchão lavador é uma simples mistura de água com detergentes, em concentrações suficientemente baixas para não modificar o comportamento newtoniano do líquido. Dentro da definição de fluido não newtoniano, os fluidos acima citados, com exceção do colchão espaçador, possuem características viscoplásticas. Tais fluidos se comportam como líquidos com altíssima viscosidade (10^6 vezes a água, por exemplo) quando submetidos a pequenas deformações ou tensões. No entanto sua viscosidade tem uma queda brusca no momento em que uma tensão limite é aplicada. Caso essa tensão continue aumentando gradualmente a viscosidade permanece em queda, com um comportamento dado por uma lei de potência. Colchões espaçadores não possuem características viscoplásticas, ou seja não apresentam tal tensão limite para que inicie o escoamento, no entanto, sua viscosidade diminui com o aumento da tensão nele aplicada, também regida por uma lei de potência. Tais fluidos são chamados de pseudoplásticos. Dito isto, torna-se claro que considerar os fluidos como

newtonianos, i.e. viscosidade constante, significa incorrer em erros bastante grosseiros. Sabendo-se que a razão de viscosidades é um parâmetro determinante na qualidade do processo, é preciso que esta seja definida corretamente, utilizando as equações constitutivas que melhor descrevem o comportamento dos fluidos, bem como obtendo corretamente as propriedades reológicas dos materiais, tais como a viscosidade. Fluidos viscoplásticos e pseudoplásticos têm equações constitutivas puramente algébricas, apesar de não lineares, o que de certo modo facilita o seu tratamento e implementação. Diversos modelos podem ser encontrados na literatura [2]. Uma vez que o comportamento mecânico de fluidos não newtonianos é função da cinemática do escoamento, é necessário conhecer *a priori* a natureza do escoamento. Escoamentos se dividem basicamente em extensionais e de cisalhamento. Escoamentos em geometrias anulares, como poços de petróleo, apresentam cinemática eminentemente cisalhante, de modo que o comportamento do fluido em cisalhamento deve ser bem conhecido.

A seguir será apresentada uma relação de trabalhos relacionados com todo o escopo desse estudo, que vai desde trabalhos que tratam de forma básica o fenômeno de deslocamento de diferentes fluidos em diferentes geometrias até aqueles que tratam de forma aplicada o conceito de eficiência de deslocamento, já tendo a indústria de petróleo como foco de estudo. São citados também trabalhos que serviram de referência para a implementação do modelo numérico e análise de resultados, bem como para a construção da planta experimental.

1.2

Revisão Bibliográfica

Fairbrother e Stubbs [7], investigaram experimentalmente uma longa bolha de ar penetrando em um líquido newtoniano num tubo. Como resultado, concluíram que a fração em massa depositada na parede do tubo, m , era função de um parâmetro adimensional $Ca = \frac{\mu v}{\sigma}$ (número de capilaridade) do tipo $m = Ca^{0.5}$. O primeiro estudo analítico sobre deslocamento de fluidos em geometrias capilares foi desenvolvido por Bretherton [4]. Longas bolhas de ar deslocam um líquido viscoso que, no instante inicial, ocupava o interior do tubo. Foram considerados baixos números de capilaridade, esforços tangenciais nulos na interface entre os fluidos e efeitos gravitacionais desprezíveis. Bretherton mostra que a velocidade na ponta da bolha é maior do que a velocidade média do escoamento por um fator, W , que é função do número de Capilaridade, $W = 1,29(3Ca)^{\frac{2}{3}}$. Comparando seus resul-

tados teóricos com os experimentais, obteve concordância razoável, sobretudo para altos números de capilaridade. Ainda no ano de 1960, Taylor [29] publicou um trabalho experimental referente ao deslocamento de um fluido newtoniano por uma bolha de ar em geometrias capilares horizontais. Sua intenção era avaliar, desprezando efeitos gravitacionais, a eficiência de deslocamento do líquido pelo ar em função do número de capilaridade. A variação do número de capilaridade para fluido newtoniano, representa puramente a variação da velocidade média do escoamento. Os resultados apresentados por Taylor mostram o percentual em massa do líquido deslocado remanescente na parede, em relação à massa inicial em função do número de capilaridade Ca . Observou-se um aumento deste percentual até um valor assintótico igual a 0,56 quando Ca atingia o valor máximo de 2. Comparando seus resultados com os de Fairbrother e Stubbs (1935), Taylor verifica que a equação proposta por eles só é válida para números de capilaridade entre 0 e 0,09. No ano de 1960, Cox avança no estudo experimental de Taylor atingindo números de capilaridade iguais a 10. Para esse valor, a fração mássica remanescente na parede do tubo atinge um patamar igual a 0,6.

Carney [6], no ano de 1974, reforçou a idéia da utilização de espaçadores, fluidos intermediários no deslocamento do fluido de perfuração, e definiu critérios para a escolha dos mesmos, a saber:

- Serem compatíveis com todos os tipos de fluido de perfuração (à base de óleo, à base de água, gel químico, poliméricas e emulsões inversas);
- Não afetar a viscosidade da mistura de cimento, principalmente do cimento com alta densidade a elevadas temperaturas;
- Não interferir demasiadamente no tempo de bombeamento das misturas de cimento;
- Permitir aumentos de densidade, remoção de cascalho, a adição de agentes químicos como, redutores de fricção, dispersantes, retardadores e agentes molhantes (“wetting”);
- Ter baixa perda de fluido por infiltração na parede da formação;
- Permitir um regime turbulento a baixas taxas de bombeamento, de modo a promover uma melhor remoção do fluido de perfuração;
- Em escoamentos laminares, a densidade dos espaçadores deve ser maior que a do fluido de perfuração, já no regime turbulento isso não é necessário.

Beirute e Flumerfelt [1], no ano de 1977, publicaram um modelo matemático que descreve o deslocamento miscível do fluido de perfuração

por misturas de cimento sob regimes laminares. A aplicação desse modelo em função de uma série de condições (densidade, viscosidade, tensão de escoamento, taxas de deslocamento,...) indica para qual combinação dessas variáveis é possível obter um nível ótimo de deslocamento. A tensão limite de escoamento é um importante parâmetro no aparecimento do fenômeno de *channeling* do cimento através do fluido de perfuração. É mostrado que tanto o regime laminar quanto o regime turbulento proporcionam bons deslocamentos dependendo das propriedades dos materiais. Os materiais são considerados como sendo não newtonianos e a zona de deslocamento como sendo a região mais estreita do anular. Esta região pode ser modelada equivalentemente por um espaço entre placas. As equações de movimento e continuidade são escritas e suas soluções definem a velocidade e o campo de pressão para cada uma das fases. As equações resultantes são equações diferenciais parciais não lineares, que não têm solução analítica. Algumas hipóteses foram consideradas:

- O fluido deslocante e deslocado são completamente miscíveis, portanto as forças interfaciais são desprezíveis;
- A frente de penetração é bem definida e estável. Os efeitos de difusão serão desprezíveis se $\frac{4B^2V}{DL} \gg 1$ onde B é metade da folga entre as placas, L é o comprimento do campo de escoamento, V é a velocidade média axial e D a difusividade do fluido 1 no fluido 2;
- A vazão volumétrica é constante em cada seção, ou seja, a taxa de deslocamento é constante;
- Apenas o componente de velocidade axial é importante. O gradiente de velocidade na direção axial é desprezível se comparado com o gradiente de velocidade na direção radial, ou seja, o campo de velocidade depende somente da coordenada radial.

Entre outras conclusões o estudo mostrou que a tensão limite de escoamento é crítica no processo de deslocamento. O modelo prevê que haverá o efeito de *channeling* caso a tensão limite de escoamento do fluido de perfuração seja significativamente menor do que a do cimento;

Em 1978, Haut [15] concluiu que existem três tipos de regimes de escoamento no qual um fluido não newtoniano, como o fluido de perfuração ou a pasta de cimento, pode assumir: turbulento, laminar e *plug flow*.

O perfil de velocidade num regime laminar é menos uniforme em torno do anular do que no regime em forma de *plug* ou no turbulento.

Outro ponto importante é não confundir o perfil de velocidade com o perfil da forma de interface num processo de deslocamento de um fluido

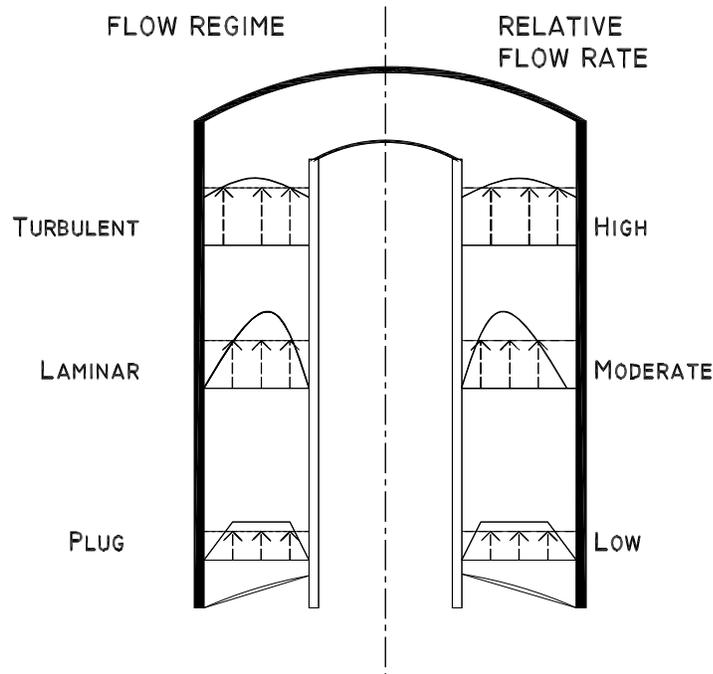


Figura 1.3: Regimes e Perfis de Escoamento

por outro. O primeiro deve ser analisado longe da interface entre os fluidos e admite as formas mostradas na figura 1.3. Próximo ao perfil da interface existe grande instabilidade e recirculações, tornando os perfis diferentes.

Enquanto o perfil de velocidade de um fluido único não varia com o tempo, o perfil na interface entre dois fluidos varia muito. Além disso, o componente da velocidade na direção radial não pode ser desprezada.

Entre outras conclusões, os efeitos da densidade não podem ser descartados. A diferença de densidades entre o fluido de perfuração e o cimento gera instabilidade no perfil da interface. Ela é o parâmetro predominante no controle da formação da interface, tanto que qualquer efeito adverso de diferença de viscosidades aparente pode ser anulado pela seleção correta da densidade do cimento.

Martin, Latil e Vetter [23], no ano de 1978, determinaram a condição ótima para um trabalho de cimentação. Uma aproximação teórica foi adotada resultando num modelo matemático. Esse método foi baseado numa formulação similar ao usado em escoamentos multi-fásicos através de meios porosos. Além disso, leva-se em conta o comportamento tixotrópico dos fluidos.

Luo e Peden [22], no ano de 1987, introduziram um novo método de análise de escoamento em anulares excêntricos tratados como anulares concêntricos infinitos de raio externo variável. A vantagem desse método em relação aos outros já publicados são os resultados mais precisos. Usando esse

método, as soluções analíticas da tensão cisalhante e perfis de velocidade foram obtidas para fluidos regidos pelo modelo de potência (*power-law*) e são válidas ao longo de todo anular excêntrico. Para fluidos regidos pelo modelo do plástico de Bingham, a tensão cisalhante e o perfil de velocidade foram obtidos nas posições de máxima e mínima folga da região anular. Eles são importantes para a análise do transporte de cascalho numa região anular, particularmente no caso dela ser inclinada. Os resultados mostram que a velocidade e a tensão cisalhante têm maior magnitude na região mais larga, e que os respectivos perfis não são simétricos na direção radial.

Jakobsen *et al* [19], no ano de 1991, desenvolveram uma montagem experimental de 4 m de comprimento. Um tubo rígido, com diâmetro externo de 61 mm que simulava a coluna, foi pintado de preto para evitar o reflexo da luz. O tubo externo que simulava a parede da formação era um tubo transparente com 80 mm. O espaço anular pode ser ajustado para qualquer excentricidade e o conjunto aceita inclinações desde 0° a 90° . Para circular os fluidos no espaço anular foi usada uma bomba capaz de promover regimes de escoamento laminares e turbulentos. Antes do experimento se iniciar, o espaço anular foi preenchido por um fluido transparente e fluorescente que simulava o fluido de perfuração. O fluido deslocador (cimento) era também transparente, no entanto não fluorescente. A região de teste que vai do início do escoamento até a seção de medição é de 3,4 m com inclinação de 60° e excentricidade de 55%. A forma de estimar a excentricidade do espaço anular é o parâmetro *standoff* (**STO**). A seção de medição da região anular é iluminada por uma lâmpada de alta intensidade. Os raios de luz devem passar por duas fendas de modo a centralizar os mesmos. As imagens foram gravadas em vídeo e digitalizadas a fim de observar os deslocamentos e as interfaces. Para facilitar comparações entre testes de laboratórios e operações de campo o experimento foi cuidadosamente feito em escala. Os parâmetros adimensionais relevantes que foram mantidos em escala foram as relações de geometria da região anular, a excentricidade, número de Reynolds e as relações entre viscosidade e densidade entre os dois fluidos. Foi estudada a influência dos seguintes parâmetros: Vazão; Viscosidade dos fluidos deslocante e deslocado; Densidade do fluido deslocante. O fluido deslocado foi o mesmo em 34 testes de um total de 44. A densidade dos fluidos foi variada adicionando-se cloreto de sódio. Um tipo de polímero que possui um comportamento pseudoplástico, e que pode ser descrito pelo modelo de potência, foi usado para prover ajustes de viscosidade. Daí pode-se prever que, para um mesmo fluido, é possível obter diferentes viscosidades, para diferentes taxas de cisalhamento. O fenômeno de *channeling*, ocasionado pela excentricidade

do espaço anular, também pôde ser observado. Isso se deve ao perfil de velocidades desbalanceado entre a região mais larga e mais estreita. Devido a esse fenômeno, houve um deslocamento de fluido de perfuração irregular ao longo do espaço anular, sendo que na região mais larga o deslocamento foi bem mais eficiente do que na região mais estreita. É possível ver a eficiência de deslocamento em função dos volume bombeados em cada uma das regiões do anular. As principais conclusões do estudo foram que a turbulência reduz a tendência do cimento ultrapassar o fluido de perfuração na região mais estreita do espaço anular. A reologia do fluido a ser deslocado afeta significativamente a intensidade da turbulência necessária para proporcionar um bom deslocamento. Quando o fluido deslocante foi submetido a uma densidade 5% maior que o fluido deslocado, este escoou da região mais estreita para mais larga. Esse processo induzido pelos efeitos de empuxo aumentou a eficiência do processo.

Kelessidis, Guillot, Rafferty, Borriello e Merlo [20], no ano de 1995, publicaram os resultados de diversos processos de cimentação realizados em campo. Foram estudados 6 poços com colunas de diâmetros $9\ 5/8''$ e $7''$. Todas as variáveis foram monitoradas durante o processo de cimentação, incluindo a taxa de bombeamento, as pressões, as densidades e as propriedades reológicas dos fluidos. As propriedades do fluido de perfuração e do cimento foram obtidas por um ajuste de curva de um modelo do plástico de Bingham. Os espaçadores foram considerados fluidos não newtonianos, e para isso foi utilizado um modelo *power-law*.

Brand, Peixinho e Nouar [3], em 2001, mostraram a estabilidade e, por conseqüência, a eficiência do deslocamento de um fluido não newtoniano por outro. Foram investigadas as propriedades dos mesmos e os regimes de escoamento (laminar, turbulento e a transição). Diferentes técnicas de medição de velocidade foram utilizadas, entre elas: Ultra-som, anemometria e laser. Foram apresentados modelos matemáticos que descrevem o comportamento dos fluidos, dependendo das suas características, para os diferentes regimes de escoamento.

O deslocamento de fluidos não newtonianos em geometrias anulares foi estudado por Graves e Collins (1981) [13] numericamente. Este parece ser o primeiro trabalho a respeito desse tipo de problema e que já tinha como aplicação direta um processo de cimentação de poço. Foi proposta uma nova formulação e a solução foi obtida com o método de diferenças finitas, onde a integração numérica se vale de um novo artifício para representar termos convectivos e transientes nas equações diferenciais. Os fluidos têm natureza viscoplástica, sendo, inclusive, proposta uma nova equação constitutiva,

variante do modelo de Bingham (ver [2]). Nessa equação, que é contínua e diferenciável para toda faixa de taxa de deformação, existe uma tensão limite de escoamento não nula e patamar de alta viscosidade para baixas taxas de deformação. As condições de contorno foram de não deslizamento na parede, velocidade prescrita, não nula, na fronteira de entrada, enquanto em todo o resto do domínio o fluido estava no repouso no instante inicial. Na fronteira de saída foi suposto que o escoamento estava desenvolvido, ou seja, os perfis de velocidade não se alteravam na direção axial. Como resultado foi observada a influência da tensão limite de escoamento aparente na eficiência do deslocamento. São apresentadas figuras de campos de velocidade e de fases em diferentes intervalos do tempo. No caso em que o fluido deslocador tinha a tensão aparente menor que o deslocado foram observadas instabilidades no deslocamento tendo a interface entre os fluidos um formato irregular e ondulado. Além disso, vórtices próximos à parede foram identificados.

Usando elementos finitos, e o método *arbitrary Lagrange-Euler*, Szabo e Hassager (1997) [28] investigaram os efeitos de diferenças de densidades na eficiência no processo de deslocamento de fluidos imiscíveis em anulares (concêntricos e excêntricos) verticais. Ambos os fluidos foram definidos como newtonianos com viscosidades iguais. Os parâmetros que governam esse problema foram agrupados nos adimensionais, Número de Reynolds, $Re = \frac{\rho_m \bar{v} h}{\mu_m}$ onde $m = 1(\text{deslocador}), 2(\text{deslocado})$, número de empuxo (*Buoyancy*) $Bu = \frac{(\rho_1 - \rho_2)gh^2}{\bar{v}\mu_1}$ e na razão entre eles, o número de Froude $Fr = \frac{\rho_1 \bar{v}^2}{(\rho_1 - \rho_2)gh}$. Os resultados mostraram que para bons deslocamentos são necessários altos números de empuxo. Para os casos $Re = 128$ e $Bu = 400$ os resultados mostraram que partículas na frente da interface são transportadas da região da parede para o centro da folga anular, ao passo que partículas atrás da interface se movem do centro da interface para a parede. O campo de velocidade próximo da interface se mostrou complexo e com pequenas zonas de recirculação. A partir da teoria de lubrificação, foi proposta uma simples expressão para a eficiência de deslocamento. Observou-se que a eficiência não se altera a medida que a razão entre o comprimento de deslocamento e a espessura da folga anular aumenta. Em outras palavras, essa teoria se mostra falha nos casos de excentricidade total. Observou-se ainda que nos casos de anular excêntrico e fluido mais denso como deslocador, este é transportado, na direção azimutal, da região mais larga para a mais estreita.

Alguns trabalhos [16] [17] [26] [21] citam como principais parâmetros que governam o processo de deslocamento de fluidos em poços verticais,

a reologia dos fluidos ou a razão de viscosidades, a excentricidade coluna-formação, a vazão, a diferença de densidades entre os fluidos e a inclinação do poço.

A influência da razão de viscosidades, da força de empuxo e do grau de turbulência no deslocamento do fluido de perfuração num anular excêntrico, foi analisada experimentalmente por Jakobsen (1991) *et al* [19]. Os resultados obtidos mostram que o deslocamento na região mais larga é mais eficiente do que na região mais estreita, e que a turbulência reduz a tendência da canalização através do fluido de perfuração na região mais estreita. O efeito positivo da turbulência no deslocamento, com a utilização de colchões espaçadores, também havia sido defendido por Couturier e Guillot em 1990 [14].

Tehrani *et al* [30] construíram um dispositivo experimental que, em escala, permitia uma investigação detalhada do processo de deslocamento. Uma abordagem teórica do problema também foi proposta, e foram obtidas boas concordâncias com os resultados experimentais. Nesse experimento (ver figura 1.4), uma célula capaz de medir condutividade elétrica, estava posicionada a jusante do escoamento. No preparo dos fluidos, sal era adicionado, a fim de aumentar a sua condutividade. Com isso, ao deixar o experimento, conhecendo previamente a condutividade elétrica de cada um dos fluidos, era possível aferir níveis de deslocamento, e por consequência sua eficiência. Foram estudados os efeitos da inclinação, excentricidade, vazão e propriedades mecânicas dos fluidos (reologia e densidade). Como resultado foram feitos gráficos de eficiência $E(t^*)$, definida como $E = \frac{V_1}{V}$, onde V_1 é o volume de fluido deslocador no interior do anular e V é o volume interno do anular, em função de um tempo adimensional, t^* , definido como $t^* = \frac{Qt}{V}$, onde Q é a vazão volumétrica, t é o tempo de bombeio. Pôde-se observar que nas regiões mais estreitas do anular a eficiência de deslocamento é extremamente baixa; e que a eficiência cai com o aumento de excentricidade e com o diminuição da diferença de densidades entre os fluidos, desde que o mais denso seja o deslocador. A inclinação do experimento tem pequena relevância, sendo que a eficiência foi maior no caso vertical. Foram ainda observadas maiores eficiências nos casos de menor vazão e hierarquia positiva na reologia (tensão limite de escoamento do deslocador maior que a do deslocado).

Em 2001 Frigaard *et. al* [9] trataram da importância das propriedades reológicas e químicas dos fluidos envolvidos num processo de cimentação. São apresentados resultados novos e surpreendentes, de uma pesquisa acadêmica e industrial do deslocamento de fluidos viscoplásticos ao longo

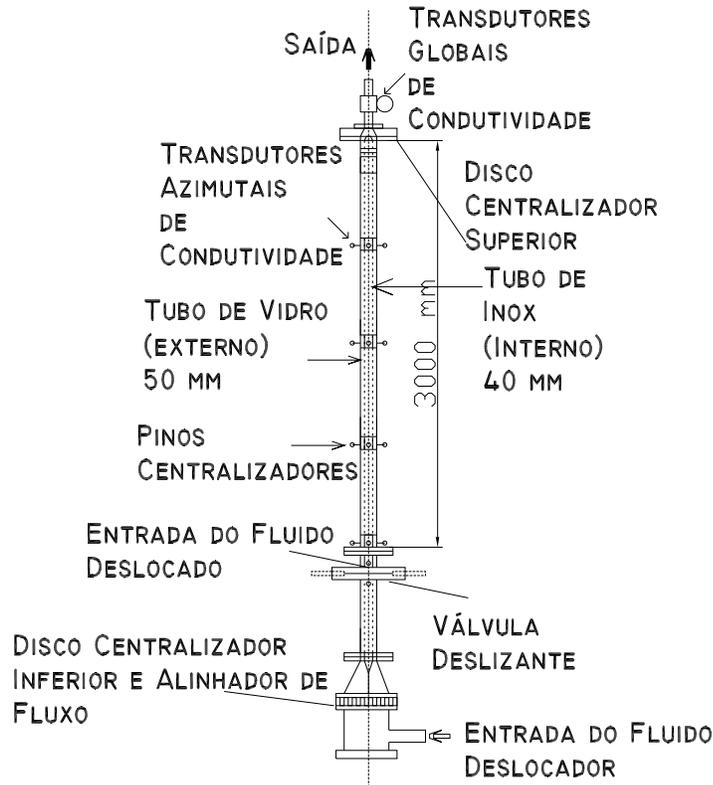


Figura 1.4: Experimento proposto por Tehrani *et al* (1992)

de dutos longos. A pesquisa combina experimentos em laboratório com estudos computacionais, através de uma detalhada análise matemática da mecânica dos fluidos. A aplicação direta desses resultados está no desenvolvimento das propriedades dos espaçadores e da mistura de cimento para uma efetiva remoção do fluido de perfuração durante um processo de cimentação primária. O deslocamento de um fluido viscoplástico por um outro com menor tensão limite de escoamento pode ocasionar uma camada estática residual de um gel nas paredes do espaço anular. Uma vez que esse tipo de estudo não é intuitivo, foi mostrado, experimentalmente e computacionalmente, que é possível evitar essa formação indesejável. Por exemplo, aumentando a velocidade média teremos um aumento da espessura da camada de gel, no entanto aumentando a tensão limite de escoamento do fluido a ser deslocado, essa espessura diminui. Considerando-se que a região anular de menor espessura é desprezível em relação ao comprimento axial, podemos reduzir a complexidade, supondo que o escoamento acontece em um duto longo. Assim foi feita a modelagem matemática e computacional. Já em 2002 e 2003, Frigaard *et al.* [10] [11] apresentaram, numa modelagem 2-D, resultados teóricos do deslocamento de cimento através de anulares excêntricos, mostrando que para certas combinações de propriedades físicas,

excentricidade e inclinação, a frente de deslocamento pode atingir o regime permanente. Nestes casos, é obtida uma expressão analítica para a forma da interface.

1.3 Proposta

À luz do estado da arte relacionado com um problema de deslocamento de um fluido por outro no interior de um espaço anular, esse trabalho propôs a confrontação de um estudo experimental e numérico. Realizamos simulações de deslocamentos de pares de fluidos numa geometria anular vertical, variando-se a excentricidade e a vazão de bombeio do fluido deslocador. Um desenho esquemático da geometria a ser estudada é apresentada na figura 1.5. Na primeira situação, o fluido deslocador tinha propriedades não newtonianas, simulando uma pasta de cimento enquanto o deslocado, newtoniano, simulava um colchão lavador. Na segunda situação, o newtoniano passava a ser o deslocador enquanto o deslocado possuía as características do fluido de perfuração, não newtoniano. Visualizações do formato da interface entre os fluidos serviram como referência de comparação qualitativa a fim de validar a solução numérica. Com o programa computacional foi analisada a influência de diversos parâmetros na eficiência do deslocamento. Dentre estes parâmetros estão a razão de viscosidades, a vazão de bombeamento e a excentricidade do espaço anular.

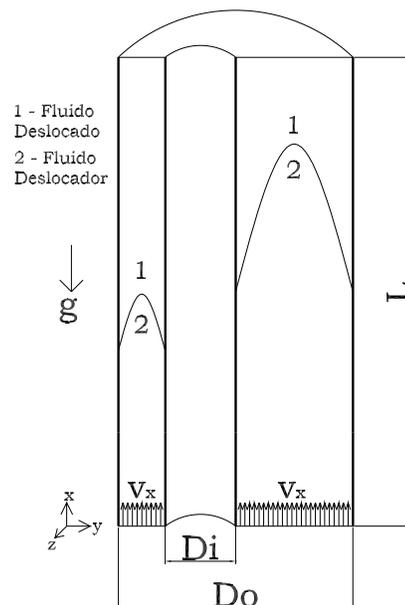


Figura 1.5: Geometria do problema a ser resolvido