

1

INTRODUÇÃO

1.1

Motivação

O estudo do deslocamento de fluidos encontra aplicações em diversos ramos científicos e tecnológicos. Entre elas podem ser citadas: o revestimento do interior de tubos, processos químicos de separação de fases, o movimento de hemácias por estreitos capilares sangüíneos, o deslocamento de fluidos através das vias aéreas pulmonares, a recuperação de óleo em meios porosos e a cimentação de poços de petróleo.

Em particular, muito do conhecimento em escoamentos multifásicos vem sendo adquirido para analisar e aprimorar processos desempenhados na indústria do petróleo e até mesmo para desenvolver novos procedimentos. Otimizar a perfuração de um poço tem como consequência a diminuição do tempo de operação sonda (“rig time operation”) o que acarreta na redução dos custos de operação.

Segundo (42), a necessidade de perfurar em lâminas d’água cada vez mais profundas vem fazendo surgir novos equipamentos e técnicas especiais, entre as quais a perfuração direcional que consiste no desvio intencional da trajetória de um poço vertical para atingir objetivos que não se encontram diretamente abaixo de sua localização na superfície. Assim, os poços podem ser não somente verticais, mas também inclinados e até mesmo horizontais que permitem uma maior exposição ao reservatório aumentando a produção.

Com a perfuração direcional é possível atingir formações produtoras que estejam abaixo de locais inacessíveis, perfurar poços de alívio, desviar a trajetória do poço de acidentes geológicos e perfurar poços de longo alcance. A figura 1.1 (35) a seguir mostra um esquema da configuração de um poço típico no mar.

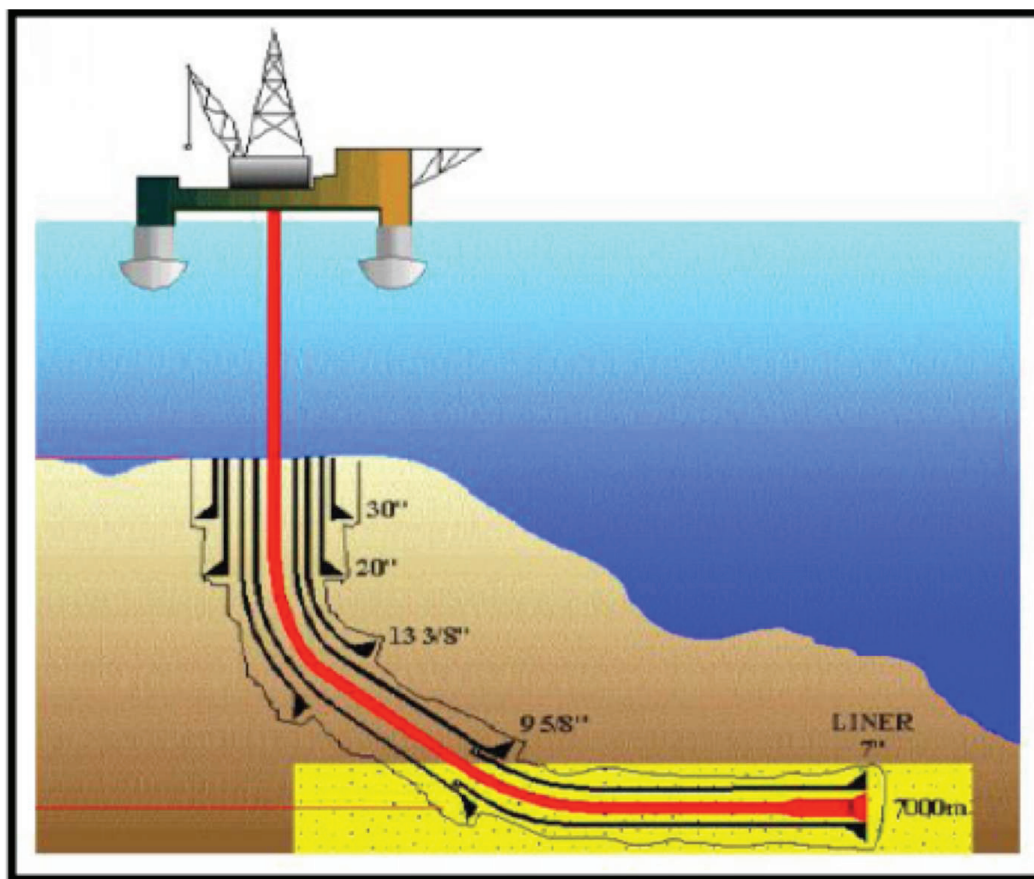


Figura 1.1: Configuração de um poço típico no mar.

O poço é perfurado em fases que dependem das características das zonas a serem perfuradas e da profundidade final prevista. É necessário conhecer as pressões associadas a cada operação executada em uma determinada fase e para os fluidos utilizados, otimizar os parâmetros relacionados com a vazão de injeção, a capacidade de remoção de sólidos e o dimensionamento dos jatos de broca entre outros.

Durante a perfuração de cada fase os fragmentos de rocha são removidos continuamente por um fluido de perfuração que é injetado por bombas para o interior da coluna de perfuração e retorna à superfície através do espaço anular formado pelas paredes do poço e a coluna de perfuração.

Os fluidos de perfuração servem principalmente para limpar o fundo do poço dos cascalhos gerados pela broca e levá-los à superfície, resfriar e lubrificar a coluna de perfuração e a broca e exercer pressão hidrostática sobre as formações de modo a evitar influxo de fluidos indesejáveis e estabilizar as paredes do poço. Para tanto devem ter características conhecidas e controladas, tais como a densidade e os parâmetros reológicos. Além disso, cada fase perfurada tem suas particularidades e requer fluidos com propriedades específicas

para determinadas condições.

Ao atingir a profundidade desejada, a coluna de perfuração é retirada do poço e uma coluna de revestimento de aço, com diâmetro menor do que o da broca, é descida no poço. O espaço anular entre a coluna de revestimento e as paredes do poço é então cimentado com o objetivo de fornecer suporte mecânico para o revestimento, isolar as zonas permeáveis atravessadas pelo poço, evitando que haja migração de fluidos entre as mesmas e prevenir que fluidos de formação, muitas vezes corrosivos, danifiquem a coluna de revestimento. As pastas de cimento, assim como os fluidos de perfuração, precisam ter propriedades conhecidas e controladas para serem adequadas aos tipos de revestimento e formações.

A cimentação principal, realizada logo após a descida da coluna de revestimento é denominada cimentação primária. Sua qualidade é geralmente avaliada através de perfis acústicos corridos por dentro do revestimento, após a pega do cimento. Quando há necessidade, realiza-se a cimentação secundária para corrigir possíveis falhas na cimentação primária. A não ser por pequenas adaptações a situações específicas, o processo de cimentação primária é mostrado esquematicamente na figura 1.2 e descrito a seguir em linhas gerais (8, 2, 24, 42).

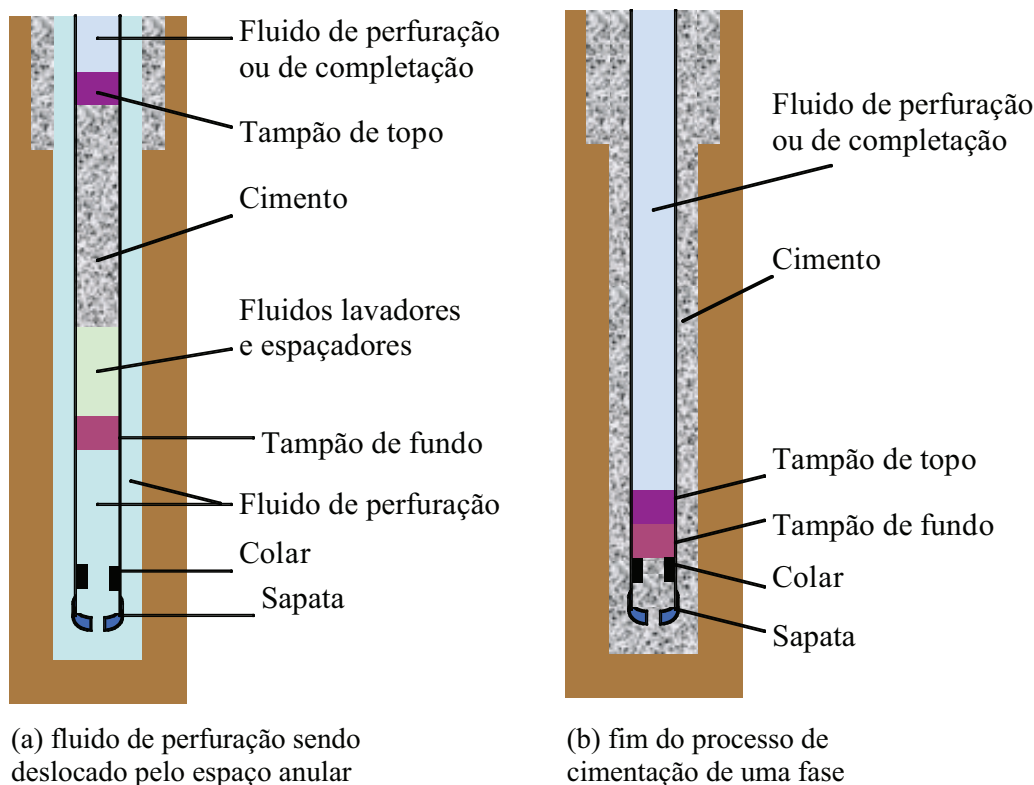


Figura 1.2: Esquema do processo de cimentação primária.

Quando a coluna de revestimento está pronta para ser cimentada, o cimento é misturado com água formando uma pasta. A seguir, um acessório chamado tampão de fundo é lançado na coluna de revestimento. O tampão de fundo contém uma membrana fina de baixa resistência em sua parte central.

Em sequência, fluidos lavadores e espaçadores são bombeados para evitar a contaminação da pasta de cimento pelo fluido de perfuração, auxiliando na sua separação. Além disso, esses fluidos espaçadores e lavadores têm a função de ajudar na remoção do fluido de perfuração das paredes do poço, possibilitando a melhor aderência do cimento. Após os fluidos lavadores e espaçadores, uma ou mais pastas de cimento são bombeadas e uma vez atingido o volume desejado, o tampão de topo é lançado. O tampão de topo é formado por uma borracha rígida.

O tampão de fundo é deslocado pela pasta de cimento através da coluna até encontrar o colar redentor ou flutuante. Nesse momento, a membrana se rompe permitindo a passagem da pasta de cimento que é deslocada através da sapata para o espaço anular. A pasta de cimento é deslocada pelo tubo de revestimento através do bombeio de fluido de perfuração ou fluido de completção atrás do tampão de topo. Quando o tampão de topo encontra o tampão de fundo, a pressão aumenta na superfície indicando o final do processo de deslocamento.

Uma vez terminado o processo, o cimento é encontrado no tubo de revestimento apenas abaixo do colar flutuante e no espaço anular. O restante do tubo de revestimento está cheio de fluido de perfuração ou fluido de completção, dependendo da operação a ser realizada em seguida. Após a pega do cimento, é descida a coluna com broca para cortar as partes internas dos acessórios e condicionar o revestimento. Se houver prosseguimento da perfuração, o cimento residual entre o colar e a sapata também é cortado. A figura 1.3 (34) a seguir mostra o esquema em corte de um poço direcional cimentado.

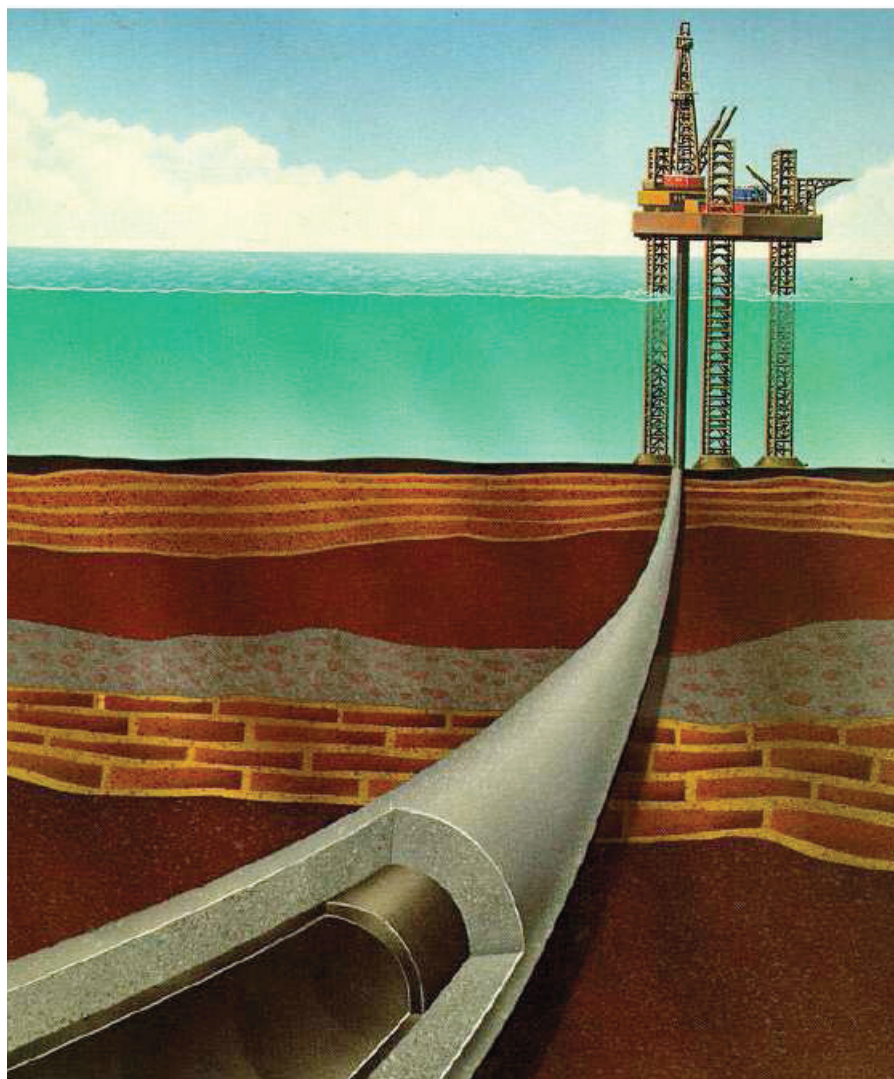


Figura 1.3: Esquema em corte de um poço direcional cimentado.

O processo de cimentação exerce um papel fundamental na vida produtiva do poço (31). Falhas na cimentação podem prejudicar a vedação hidráulica do poço causando sérios danos ambientais. Muitas vezes, a má aderência do cimento à formação ou ao revestimento é resultado de resíduos de fluido de perfuração que não foram devidamente deslocados e substituídos pelos fluidos lavadores e espaçadores. Portanto, é importante estudar o processo de deslocamento de fluidos no espaço anular para poder determinar as condições que proporcionam uma melhor remoção do fluido de perfuração e conseqüentemente um processo de cimentação mais eficiente.

Assim, o objetivo deste trabalho foi desenvolver um método para estudar o processo de deslocamento de fluidos em anulares através da visualização e análise da configuração da interface formada entre o fluido deslocador e o deslocado.

1.2

Revisão Bibliográfica

Em 1935 Fairbrother e Stubbs (19) publicaram um dos primeiros trabalhos em que foi analisado o deslocamento de fluidos. Estes autores estudaram o processo de remoção de fluidos newtonianos em tubos por injeção de gás. Em seu estudo, mediram a fração de massa m deixada nas paredes do tubo durante o escoamento e propuseram uma relação para m em função da velocidade da interface, U , e da velocidade média do escoamento, $\bar{u}$, a saber: $m = \frac{U-\bar{u}}{U}$. Além disso, encontraram uma relação empírica associando m ao número de capilaridade, $m = Ca^{\frac{1}{2}}$, onde $Ca = \frac{\mu U}{\sigma}$ sendo μ a viscosidade do fluido e σ a tensão superficial.

Dando continuidade ao trabalho de Fairbrother e Stubbs (19), Taylor (40) analisou mais a fundo a dependência da massa de fluido depositada na parede do tubo e o número de capilaridade. Seus resultados concordaram com os apresentados por Fairbrother e Stubbs (19) para baixos valores de m , quando $0 < Ca < 0,09$. Ainda, sua análise indicou que a quantidade de líquido depositada na parede aumenta com a velocidade da interface e que m tende assintoticamente ao valor de 0,56 conforme Ca se aproxima de 2.

Seguindo esta mesma linha de estudo, Bretherton (10) analisou teórica e experimentalmente o deslocamento de longas bolhas de ar em tubos preenchidos com um líquido newtoniano viscoso. Ele encontrou uma relação teórica para a fração de massa m depositada na parede do tubo válida para baixos valores de número de Capilaridade e que concorda bem com as medidas experimentais de Fairbrother e Stubbs(19).

Cox (13) então expandiu a faixa do número de Capilaridade estudada até 10. Ele mostrou que o valor assintótico de m é na verdade 0,60 e obteve boa concordância com as previsões de Bretherton(10) na faixa $10^{-3} < Ca < 10^{-2}$.

O trabalho de Goldsmith e Mason (25) em 1963 foi um dos primeiros no qual foi estudado o deslocamento líquido-líquido. Eles reportaram resultados sobre a quantidade de líquido depositada na parede devido ao deslocamento de uma longa gota de líquido viscoso. Os resultados mostraram que a fração mássica aumenta conforme a razão de viscosidade $N_{\mu} = \frac{\mu_2}{\mu_1}$ diminui, sendo μ_1 a viscosidade do fluido deslocador e μ_2 a viscosidade do fluido deslocado. Essa tendência observada nos dados experimentais concordou com as previsões teóricas.

Cachile et al. (11) mediram o perfil de espessura da camada residual do deslocamento de fluidos imiscíveis em tubos capilares. Eles demonstraram experimentalmente que a suposição da existência de uma espessura constante é válida somente para baixas razões de viscosidade e/ou baixos números de capilaridade, em outros casos a espessura diminui quando mais longe da frente da interface.

Olbricht e Kung (33) e Olbricht (32) estudaram a deformação e quebra, bem como o formato de uma gota de líquido atravessando um tubo capilar preenchido com outro líquido imiscível. Em todos os casos o tamanho da gota era comparável ao o diâmetro do tubo. Eles observaram que quando a razão de viscosidades é pequena, isto é, quando o líquido da gota é menos viscoso do que o líquido da fase externa, um filamento de fluido da fase externa penetra pela parte de trás da gota, ao longo do eixo. Quando a viscosidade do líquido da gota é maior do que a do líquido da fase externa, a gota é alongada na direção axial.

Szabo e Hassager (39) utilizaram um método de elementos finitos para simular o deslocamento de dois fluidos newtonianos, imiscíveis e com igual viscosidade em anulares. Os efeitos da diferença de densidades entre o fluido deslocador e o deslocado foram investigados na faixa de baixos à intermediários número de Reynolds. Eles observaram que para anulares concêntricos, um fluido deslocador mais denso resulta em um aplainamento do formato da interface, diminuindo as recirculações perto da mesma. Para anulares excêntricos, a maior densidade do fluido deslocador tem como resultado o transporte azimutal do fluido da parte mais larga para a mais estreita do anular.

A possibilidade de uma camada de líquido residual aparecer nas paredes de um canal plano durante o deslocamento de um líquido viscoplástico por outro foi estudada por Allouche, Frigaard e Sona (1). Eles mostraram que é possível estimar a máxima espessura da camada estática na parede. Eles observaram também que a partir de um valor crítico da espessura da camada residual, o fluido deslocado começa a recircular próximo à frente de deslocamento. Acreditam que a camada residual é melhor caracterizada em escoamentos lentos, nos quais efeitos viscoplásticos predominam sobre efeitos de inércia. Para escoamentos mais rápidos, o aparecimento de instabilidades parece favorecer o processo de deslocamento em geral.

Souza Mendes et al. (15) estudaram o deslocamento de líquidos viscoplásticos por injeção de gás em tubos capilares. Entre os resultados obtidos, os autores observaram que para valores de vazão abaixo de um determinado valor crítico, o líquido viscoplástico é perfeitamente deslocado pelo gás injetado. Segundo eles, uma possível interpretação para este comportamento pode estar

relacionada com a transição que ocorre quando a tensão na parede se aproxima da tensão limite de escoamento do fluido viscoplástico em um escoamento laminar completamente desenvolvido em tubos.

Dimakopoulos e Tsamopoulos (16) analisaram o deslocamento de fluidos newtonianos e viscoplásticos por ar em geometrias complexas (tubos cilíndricos com expansões e contrações). Eles observaram o aparecimento de regiões não escoadas de fluidos viscoplásticos pelo filme de fluido depositado na parede dos tubos. Os autores concluíram que a viscoplasticidade tende a atrasar a penetração de gás e a aplainar a frente da bolha, reduzindo a espessura da camada de fluido deixada para trás.

Gabard e Hulin (23) estudaram experimental e numericamente o deslocamento de fluidos não newtonianos (com tensões limite de escoamento iguais e diferentes de zero) por fluidos menos viscosos, newtonianos e miscíveis, com a mesma densidade em um tubo vertical. Eles observaram que a espessura da camada residual diminui conforme a tensão limite de escoamento aumenta.

Soares, Carvalho e Souza Mendes (38) analisaram através de simulações numéricas e experimentos, o deslocamento de um líquido viscoso por uma longa gota de outro líquido viscoso em um tubo capilar para uma larga faixa de parâmetros governantes. Eles observaram uma fina camada do líquido deslocado deixada para trás nas paredes do tubo. Previsões teóricas mostraram o efeito de diferentes parâmetros na configuração da interface e na espessura da camada de líquido deslocado deixada nas paredes.

Alguns trabalhos que relatam mais especificamente estudos sobre o processo de cimentação de poços são revisados a seguir.

Bittleston et al. (7) estudaram numericamente o processo de cimentação primária e apresentaram resultados para diferentes configurações de poços. As simulações mostraram que para anulares excêntricos um canal de lama pode ser deixado para trás no lado mais estreito do anular. Eles observaram que se o anular for muito excêntrico ou se a lama tiver uma tensão limite de escoamento alta, ela simplesmente não é deslocada na parte mais estreita do anular.

Frigaard, Allouche e Gabard-Cuoq (21) apresentaram resultados experimentais e numéricos do deslocamento de fluidos viscoplásticos através de dutos longos. Segundo eles, a eficiência de deslocamento depende fortemente da reologia dos fluidos. Quando um fluido viscoplástico é deslocado por outro com menor tensão limite de escoamento, é possível que se forme uma camada estática residual de fluido gelificado nas paredes do tubo. O aumento da velocidade média pode aumentar a espessura da camada residual e o aumento da tensão limite de escoamento do fluido deslocado pode resultar em uma menor camada residual. Eles concluíram que conhecendo a velocidade local de

deslocamento e as propriedades do fluido, é possível prever a ocorrência da camada residual. Os resultados mostraram que, embora nem sempre necessária, a condição de que a tensão de cisalhamento gerada na parede do tubo durante o deslocamento seja maior do que a tensão limite de escoamento do fluido deslocado é suficiente para que o fluido seja removido da parede.

Brand, Peixinho e Nouar (9) realizaram experimentos com diferentes fluidos para entender melhor a dinâmica dos fluidos envolvidos no processo de limpeza do fluido de perfuração. Mediram a velocidade axial e flutuações usando diferentes técnicas de medição. Com esses resultados, foram capazes de caracterizar a transição laminar-turbulento e avaliar a queda de pressão causada por fluidos não newtonianos. Assim, puderam ajudar a definir estimativas mais confiáveis da mínima vazão da bomba necessária para garantir a eficiência de limpeza do poço, levando em conta o comportamento não newtoniano dos fluidos.

Frigaard e Pelipenko (22) apresentaram novos resultados para o deslocamento de pastas de cimento pelo anular excêntrico. Eles mostraram que, para certas combinações de propriedades físicas, pode existir uma frente de deslocamento estável e permanente. Ainda, foram capazes de apresentar uma expressão analítica para o formato da interface e indicações de como esse formato varia com os parâmetros chave do processo de cimentação.

Haut e Crook (27) investigaram diversos fatores que influenciam o deslocamento durante o processo de cimentação primária. Os resultados mostraram que a velocidade no anular é um fator importante que afeta o escoamento. Segundo eles, aparentemente existem duas forças opostas principais no deslocamento cimento/lama, a saber: uma força de resistência (a imobilidade do fluido de perfuração) e uma força deslocadora (a energia de escoamento do fluido deslocador). Eles concluíram que o deslocamento pode ser melhorado quer seja pela diminuição da imobilidade do fluido de perfuração melhorando suas propriedades, quer seja pelo aumento da energia de escoamento do cimento. A eficiência de deslocamento é afetada pelas diferenças reológicas, vazão, diferenças de densidades, entre outros fatores. Eles observaram que o processo de deslocamento foi favoravelmente influenciado pela aplicação de uma vazão maior para o cimento.

Sauer (36) discutiu alguns pontos críticos no deslocamento do fluido de perfuração durante a cimentação primária. Entre os quais estão a centralização e velocidade de descida do tubo de revestimento, a circulação para o condicionamento do poço e a seleção de fluidos espaçadores compatíveis. Para este último ponto, ele concluiu que devem ser consideradas a reologia e taxas de bombeamento do fluido espaçador, a compatibilidade fluido de per-

furação/espaçador/cimento, características de suspensão de sólidos e densidade, entre outros fatores.

Couturier, Gulilot, Hendriks e Callet (12) discutiram critérios para melhorar a eficiência de deslocamento do fluido de perfuração. Mostraram a necessidade da utilização de fluidos espaçadores com propriedades controladas e apresentaram exemplos desses fluidos comparando amostras preparadas em laboratório e em campo. O trabalho também mostrou a influência da excentricidade no processo de cimentação.

Théron, Bodin e Fleming (41) apresentaram um novo método para a determinação da composição ótima de fluidos espaçadores. O método é dividido em dois passos: o primeiro baseado nas condições de poço que determinam as propriedades do fluido, incluindo critérios de mobilidade e densidade; o segundo passo é a determinação da composição do fluido que atenda à essas propriedades. Um simulador mostra a performance da remoção do fluido de perfuração para a composição proposta. Dois exemplos da aplicação do método em campo demonstraram a eficiência do mesmo.

Berry (4) estudou em laboratório a remoção do fluido de perfuração por fluidos espaçadores à base de emulsões, determinando a eficiência de remoção de composições reais de fluidos de perfuração tanto de base sintética quanto de base oleosa. Estudos de caso no mar do norte também mostraram o uso desse tipo de fluidos espaçadores. Os resultados sugerem que fluidos espaçadores à base de emulsões têm uma maior capacidade de remoção do fluido de perfuração do que aqueles à base de água e surfactante.

Gulilot, Desroches e Frigaard (26) estudaram a eficiência dos fluidos espaçadores no processo de cimentação. Eles observaram que deslocamentos em regime turbulento normalmente levam a uma boa eficiência. Para escoamentos em regime laminar a possível ocorrência de instabilidades deve ser considerada. Devido às diferenças de viscosidades e densidades, um longo "dedo" avança pelo lado mais largo do anular, espremendo o fluido deslocado para o lado mais estreito. Os autores mostraram que muitos dos fluidos espaçadores utilizados não levam a um deslocamento tipo pistão, ou seja, com uma interface suficientemente plana entre os fluidos, mas sim, tendem a escoar pelo lado mais largo do anular por onde se movem mais rápido e acabam por formar canais pelo fluido de perfuração. Eles sugerem o uso de espaçadores mais viscosos.

Jakobsen, Sterri, Saasen, Aas, Kjosnes e Vigen (28) analisaram o processo de deslocamento em um modelo de poço inclinado de 60° e com um espaço anular 55% excêntrico. Os resultados obtidos mostraram como a viscosidade, o grau de turbulência e as diferenças de densidade afetam o processo de deslocamento na parte mais baixa e estreita do anular. Eles observaram que

a eficiência de deslocamento aumenta quando o fluido deslocador tem uma densidade maior do que o fluido deslocado. Eles concluíram que a turbulência reduz a tendência de canalização na parte mais baixa e estreita do anular e que a reologia do fluido a ser deslocado afeta significativamente a intensidade de turbulência necessária para atingir um bom deslocamento.

Kroken, Sjaholm e Olsen (29) mostraram um novo método para o processo de cimentação baseado na diferença de densidades entre o fluido deslocador e o deslocado. Eles observaram que devido à essa diferença, o fluido de perfuração no lado mais estreito do anular vai em direção à parte mais larga e assim é levado embora. Esse efeito pode ser otimizado utilizando-se baixas vazões de bombeamento, que acarretam em uma maior troca de fluidos. Essa técnica foi utilizada com sucesso em alguns poços reais.

Biezen, van der Werff e Ravi (5) realizaram estudos experimentais e numéricos para investigar o mecanismo de remoção do fluido de perfuração. Na parte experimental, foram testados espaçadores químicos e sua eficiência de remoção do fluido de perfuração. Modelos analíticos e numéricos multifásicos em 3D permitiram estimar perfis do escoamento e o sucesso da remoção do fluido de perfuração em condições de poço. Os autores concluíram que a adição de surfactantes na composição de espaçadores é muito importante para remover resíduos de fluidos de perfuração à base de óleo do lado baixo do revestimento e paredes do poço. Além disso, observaram que a vazão, a reologia e a densidade do fluido espaçador, são fatores importantes que podem ser otimizados para melhorar o deslocamento de fluidos de perfuração gelificados do lado baixo e estreito do anular horizontal.

McPherson (30) discutiu e comparou técnicas de cimentação de poços verticais e horizontais e a composição de pastas de cimento levando em conta diversos fatores. Técnicas e procedimentos de cimentação bem sucedidos de zonas horizontais foram revistas e discutidas. Ele observou que a utilização de múltiplos espaçadores, cada com diferentes condições de escoamento, permitiu melhorar a limpeza do poço. Além disso ele observou que uma pasta de cimento mais fina com pequena perda de fluido é mais fácil de ser misturada e bombeada, e proporciona um excelente isolamento de zonas e suporte de tubos.

Dutra, Martins, Miranda, Aragão, Campos, Souza Mendes e Naccache (17) apresentaram uma simulação numérica estudando as operações relacionadas à substituição de um fluido por outro dentro de um poço. Eles analisaram os efeitos da diferença de densidades e reologia entre os fluidos (newtoniano deslocando não newtoniano e vice-versa) e concluíram que a reologia dos fluidos tem uma grande influência no processo de deslocamento. Os autores observaram

que a razão de viscosidades influencia o processo e portanto o comportamento viscoplástico dos líquidos deve ser bem conhecido, para prever sua viscosidade em uma dada vazão. Eles sugeriram que o uso de espaçadores mais viscosos pode ser uma boa estratégia para aumentar a eficiência de deslocamento em situações críticas.

A partir da revisão bibliográfica fica claro que um grande número de parâmetros influencia o processo de deslocamento durante a cimentação primária. A proposta inicial deste trabalho era estudar o processo de deslocamento envolvendo fluidos não newtonianos entretanto, devido às dificuldades de encontrar fluidos com comportamento não newtoniano e que ainda apresentassem índices de refração compatíveis com a técnica de visualização, foram testados apenas casos com fluidos newtonianos.

O formato da interface entre os fluidos foi investigado experimentalmente pela simulação do deslocamento em um poço com espaço anular concêntrico e vertical. Foram estudados os casos de um fluido newtoniano mais viscoso deslocando um menos viscoso e vice-versa para três diferentes vazões.