

2

Revisão Bibliográfica

Foi realizada uma pesquisa bibliográfica visando obter informações a respeito do processo de cimentação de poços e o Estado da Arte do problema, observando-se o histórico dos avanços tecnológicos através dos seguintes itens:

- Caracterização dos Fluidos;
- Eficiência da Cimentação;
- Regimes de Escoamento;
- Estudos Numéricos do Processo de Deslocamento.

2.1.

Caracterização dos Fluidos

Para uma análise completa do processo de deslocamento de fluidos, foram caracterizados os fluidos envolvidos neste processo.

2.1.1.

Fluido de Perfuração

Bourgoyne et al. (1991) classifica os fluidos de perfuração de acordo com o constituinte principal da fase contínua (ou dispersante):

- Base água;
- Base sintética;
- Base de ar ou de gás.

Fluidos de Perfuração – Base Água

A principal função da água é prover o meio de dispersão para os materiais coloidais, tais como argila e polímeros, que controlam viscosidade, limite de escoamento, forças géis e filtrado.

Os sólidos dispersos no meio aquoso podem ser ativos (bentonita e atapulgita – materiais argilosos cuja função é aumentar a viscosidade) ou inertes (baritina, calcita e hematita – cascalhos finos).

Fluidos de Perfuração – Base Sintética

A fase contínua é constituída por uma fase sintética, geralmente composta de hidrocarbonetos líquidos. A fase descontínua é formada por pequenas gotículas de água ou de solução aquosa. Alguns sólidos coloidais, de natureza inorgânica e/ou orgânica, podem também compor a fase dispersa.

Estes fluidos podem ser:

- Emulsão água/ óleo (teor de água menor que 10%).
- Emulsão inversa (teor de água de 10% a 45%).

2.1.2. Cimento

Bourgoyne et al. (1991) especificam que os cimentos são utilizados durante a operação de perfuração para:

- Fixar o revestimento na formação rochosa;
- Suportar o revestimento;
- Proteger o revestimento contra corrosão;
- Isolar zonas produtivas x não produtivas;
- Evitar o escoamento de fluidos no espaço anular entre revestimento e poço;
- Abandono de poço.

O cimento é composto por uma mistura de pós de silicatos, aluminatos e gesso, conforme descrito abaixo:

▪ Silicato Tricálcico	$(\text{CaO})_3\text{SiO}_2$	45-75%
▪ Silicato Dicálcico	$(\text{CaO})_2\text{SiO}$	27-35%
▪ Aluminato Tricálcico	$(\text{CaO})_3\text{Al}_2\text{O}_3$	0-13%
▪ Aluminato Tetracálcico	$(\text{CaO})_4\text{Al}_2\text{O}_3$	0-18%
▪ Gesso	$(\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O})$	3%

A pasta de cimento é composta por uma mistura de pó de cimento e água. Esta pasta é colocada na posição desejada do poço, bombeando a mesma desde a superfície. Então, espera-se o tempo de cura da pasta até atingir resistência exigida.

A norma API 10A (2002) especifica os requisitos químicos e físicos, bem como os procedimentos de teste, de oito classes de cimentos, conforme especificado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Classes de cimento, conforme API 10A

Tipo	Densidade (kg/m ³)	Prof. (m)	BHST (°C)	Propriedades especiais
A	1860	0-2000	25-75	Não possui
B	1860	0-2000	25-75	Resistência a sulfato (média ou alta)
C	1765	0-2000	25-75	Resistência inicial alta (normal ou moderada) Resistência a sulfato (alta)
D	1955	2000-4000	75-125	Resistência a moderadas pressões/ temperaturas Resistência a sulfato (moderada ou alta)
E	1955	2000-7000	75-145	Resistência a altas pressões/ temperaturas Resistência a sulfato (moderada ou alta)
F	1930	3000-7000	110-160	Resistência a extremamente altas pressões/ temperaturas Resistência a sulfato (moderada ou alta)
G	1885	0-2500	25-95	Pode receber aditivos * Resistência a sulfato (moderada ou alta)
H	1955	0-2500	25-95	Pode receber aditivos * Resistência a sulfato (moderada)

* Pode receber aditivos para acelerar ou retardar a cura do cimento.

2.1.3. Fluidos Espaçadores/ Lavadores

Durante uma operação de cimentação primária, é desejável ter uma pasta do cimento executando uma função dupla: remover a máxima quantidade de lama e fornecer características adequadas de resistência. Testes preliminares indicaram que uma única pasta não poderia possuir ambas as características. Por este motivo, o uso de um fluido intermediário evoluiu.

Além disso, na maioria das vezes é necessário impedir o contato direto entre a lama de perfuração e a pasta de cimento, pois os fluidos de perfuração contêm aditivos que são contaminantes de cimentos. Desta forma, a remoção eficaz da lama do anular é essencial.

A incompatibilidade entre lama base óleo e espaçador base água geralmente se manifesta com a geração de uma mistura grossa que assemelha-se a uma massa de calafetar.

Para manter separados o fluido de perfuração e a pasta de cimento, são utilizados fluidos de baixa densidade e baixa viscosidade, conhecidos como *pre-flushes* (fluidos espaçadores ou lavadores). Estes fluidos frequentemente são bombeados antes da pasta de cimento.

A remoção incompleta da lama pode se manifestar de maneiras diferentes:

1. Um canal de lama pode se formar na seção estreita do anular excêntrico.
2. A lama pode permanecer estática próxima às paredes internas e externas do anular.
3. A lama ou o fluido espaçador residuais podem contaminar o cimento durante a cimentação.

Nos casos 1 e 2, a lama residual desidrata-se durante a cura do cimento e permite a formação de uma canalização porosa no anular.

Brice & Holmes (1964) realizaram estudos experimentais de deslocamento da lama de perfuração/ cimento em regime turbulento, em 26 poços. Este trabalho se traduziu na prática de bombear um fluido espaçador entre a lama de perfuração e o cimento, para evitar problemas entre estes líquidos incompatíveis. Com lamas base água, um pequeno volume de água foi bombeado como espaçador e resultados satisfatórios foram obtidos. Com outros tipos de lamas, a incompatibilidade tornou a remoção da lama muito difícil e conduziu à invenção de espaçadores lama/ cimento compatíveis.

O controle cuidadoso das vazões e do volume de bombeamento da pasta deve ser observado para fornecer um determinado tempo de contato (período de tempo em que um ponto particular no espaço anular permanece em contato com a pasta do cimento que está sendo deslocada em regime turbulento). Por definição, o regime turbulento é uma exigência para obter um valor finito do tempo do contato. Logo, se o regime turbulento não é obtido, o tempo do contato é igual a zero. Um aumento da eficiência da cimentação primária foi observado em aplicações onde o tempo de contato foi maior do que 10 minutos. O tempo de contato não afeta a eficiência de deslocamento de lamas viscosas em regime laminar.

Carney (1974) executou uma pesquisa sobre os fluidos espaçadores que poderiam ser usados para separar o cimento e o fluido de perfuração. Este trabalho envolveu o desenvolvimento de um líquido compatível com vários fluidos de perfuração e cimentos. O objetivo principal de seu trabalho era desenvolver um líquido que eficazmente separasse e impedisse a mistura entre o fluido de perfuração e o cimento.

Após a avaliação de diversas relações entre óleo e água, foi observado que uma relação de 50/50 forneceu os melhores resultados. O espaçador, com partes iguais de água e óleo, deve ter as forças de tensão interfacial balanceadas.

Uma vez definida a densidade da lama de perfuração e da pasta de cimento a serem usados, determina-se que o fluido espaçador deve ter uma densidade intermediária.

Haut & Crook (1982) verificaram em laboratório que espaçadores de baixa densidade e viscosidade (por exemplo, água) parecem melhorar o processo de remoção da lama, desgastando o filtrado e aumentando a mobilidade do fluido de perfuração.

Guillot et al. (2007) estudaram a eficiência no deslocamento de fluidos espaçadores durante o processo de cimentação, utilizando técnicas de simulação numérica.

Fluidos espaçadores devem ter a densidade e a reologia dimensionadas de forma a assegurar uma boa colocação do cimento. Na maioria dos casos, espaçadores são usados em regime laminar. Entretanto, sua composição pode ser otimizada para diminuir sua viscosidade sem comprometimento da estabilidade, permitindo a colocação em regime turbulento em pequenos anulares.

Fluidos lavadores possuem viscosidade e densidade muito próxima da água ou óleo. Lavadores base água podem ser adensados usando sais solúveis em água, quando requerido pelo processo. Sua característica comum é que podem facilmente ser bombeados no regime turbulento com elevados números de Reynolds.

2.1.4. Gravel Pack

O fluido utilizado para o deslocamento do *gravel pack* deve ter excelentes propriedades para suspensão de areia ou do cascalho sob condições estáticas. Este fluido deve possuir comportamento pseudoplástico, com baixa viscosidade à elevadas taxas de deformação e a elevada viscosidade à baixas taxas de deformação, conforme catálogo da Halliburton/ AquaLinear® (2005).

2.2. Eficiência da Cimentação – Principais Parâmetros

A cimentação eficaz do revestimento de produção para isolar zonas produtivas é essencial para a completação bem sucedida de poços de óleo ou gás. Em muitas áreas, a

obtenção de uma adequada cimentação primária apresenta dificuldades. Embora os métodos de cimentação corretivos estejam disponíveis, este procedimento aumenta enormemente os custos de completação.

No passado, houve uma tendência de conviver com o problema de cimentação primária e utilizar técnicas corretivas tais como cimentação secundária (*block squeezing*) para realizar o isolamento. O aumento dos custos ditou a necessidade de se utilizar técnicas melhoradas de cimentação primária.

2.2.1. Formação de Filtrado

Uma das funções preliminares de um fluido de perfuração é selar formações permeáveis. Esta selagem é obtida através da deposição de sólidos contidos da lama (filtrado) na parede de formações permeáveis, retardando desse modo o escoamento do líquido. Enquanto ocorre o adensamento desta camada, a vazão na formação diminui, selando a formação. Manter uma fina camada impermeável é essencial para a prevenção de diversos problemas, tais como colagem por diferencial de pressão, dificuldades de registro, problemas de perda de circulação e problemas de cimentação primária.

Haut & Crook (1978) realizaram testes experimentais, considerando as condições do fundo do poço, para verificar o grau de selagem das formações. Nas seções de teste, o deslocamento completo nunca foi atingido, pois parte da lama de perfuração não circulável não foi deslocada.

As propriedades e características tixotrópicas da lama de perfuração, bem como a permeabilidade da formação, são fatores dominantes na formação do filtrado.

2.2.2. Compatibilidade dos Fluidos

A principal razão de cimentação primária deficiente ocorria devido à contaminação do cimento por aditivos da lama de perfuração. Desta forma, foram dirigidos esforços para uma remoção eficaz da lama do espaço anular, durante a operação de cimentação.

Haut & Crook (1981) verificaram que as incompatibilidades destes fluidos poderiam ser tratadas com o uso de um fluido espaçador capaz de entrar no regime turbulento em razoáveis vazões de bombeamento. Estes espaçadores são geralmente soluções de água/ polímero capazes de suspender os sólidos.

Na seleção dos fluidos espaçadores devem ser testados diversos candidatos de fluidos até encontrar um que seja compatível com o revestimento e a formação do poço, de forma a promover a “molhabilidade” da superfície, facilitando a ligação do cimento.

2.2.3. Colagem do Cimento - Superfície de Contato

A eficácia da colagem do cimento depende do tipo de superfície à qual o cimento é colado. Antes que o revestimento seja instalado no poço perfurado, uma inspeção completa e uma preparação de superfície devem ser realizadas.

Brice & Holmes (1964) estudaram várias alternativas, entre pinturas, jateamento de areia, enferrujamento e aplicações de resinas. A alternativa mais utilizada é o jateamento, permitindo que a superfície oxidasse com o tempo, obtendo-se desta forma, uma razoável melhoria na colagem do cimento, a custo baixo.

2.2.4. Variação do Diâmetro (*Wash-outs*)

Brice & Holmes (1964) e Haut & Crook (1978) estudaram variações no diâmetro do poço durante a perfuração, chamados de *wash-outs*. Nestas regiões, a velocidade anular é menor, porque o diâmetro é menor do que o diâmetro da broca. Se esta velocidade for suficientemente baixa, os cascalhos poderão ser deixados nesta região, tornando a remoção da lama e, conseqüentemente, a colocação do cimento um processo muito difícil. Outro fator a ser considerado nesta situação é subestimar o volume do cimento, sendo necessário realizar uma operação corretiva cara. Para evitar estes problemas, geralmente utiliza-se um calibre de diâmetro para determinar o volume de cimento bombeado.

2.2.5. Efeito da Movimentação da Tubulação

O movimento da tubulação, durante a circulação e a cimentação, tem sido aceito pela indústria como benéfico às operações de cimentação primária. Há dois tipos de movimentação da tubulação, rotação e reciprocação.

Mover a tubulação melhora a remoção de cascalhos e do filtrado, e ajuda a quebrar a força gel da lama. Estas vantagens continuam verdadeiras em poços horizontais ou altamente afastados. Entretanto, devido à natureza do poço, a tubulação

tende a permanecer na parte inferior, introduzindo torque e forças de arraste adicionais, que devem ser ultrapassados.

Clark & Carter (1973) observaram um aumento da eficiência de deslocamento quando a tubulação esteve em movimento. A rotação forneceu uma melhor eficiência do que a reciprocção, entretanto esta diferença é cerca de 4 a 7%, somente. Entretanto, a eficiência de deslocamento é maior em grandes *wash-outs* quando se utiliza a reciprocção, ao invés da rotação.

Haut & Crook (1978) relataram que durante a rotação, as forças de arraste entre o cimento e o revestimento tendem a “puxar” o cimento em direção à coluna, mantendo a lama estática. Entretanto, a rotação não “puxará” a água para a coluna de lama, e a reciprocção parece ser a mais desejável.

McPherson (2000) observou que a reciprocção apresenta os seguintes riscos:

- Forças de arrastes, impedindo que o revestimento retorne à parte inferior do poço, ou conduzindo o *liner* para uma posição diferente da projetada;
- Excesso de pressão, gerada pela descida da coluna (*surge pressure*) durante a instalação do revestimento deve ser considerada.

Por estas razões a maioria dos *liners* são instalados/ liberados antes de bombear a pasta de cimento e, sempre que possível, são rotacionados.

Brice & Holmes (1964) recomendaram o uso de raspadores (*scratchers*), quando a tubulação não pudesse ser rotacionada ou reciprocada.

2.2.6. Temperatura

Ravi et al (1999) realizaram testes experimentais simulando as condições de temperatura no fundo do poço. Estes testes tiveram o objetivo de determinar o tempo ótimo para liberação do revestimento, minimizando os custos de utilização dos equipamentos de perfuração em lâminas d'água profundas. Se o revestimento for liberado muito cedo, quando a resistência do cimento é insuficiente para suportar o revestimento, este pode se curvar.

De outro lado, se o período do WOC (*wait-on-cement*, tempo de cura do cimento, necessário para a pasta atingir 500 psi de resistência à compressão) é mais longo do que o estritamente necessário, gasta-se desnecessariamente com equipamentos de águas profundas. Por este motivo, os testes de compressão devem ser realizados usando o perfil de temperatura do WOC obtido a partir de testes e simulações em grande escala.

Um procedimento foi desenvolvido para estimar temperaturas realísticas durante a colocação do cimento e o WOC (mínimo de 12 horas). O perfil de temperatura depende principalmente da profundidade e a temperatura de água, do calor de hidratação do cimento e do volume de pasta.

2.2.7. Excentricidade do Anular

Quando a tubulação interna de um anular está descentralizada, a consequência principal é que a distribuição da velocidade está distorcida, favorecendo o escoamento pelo caminho de menor resistência, isto é, a seção larga do anular.

A velocidade da interface entre os dois fluidos na região anular deve ser a mesma na região larga e na estreita. Se a velocidade interfacial da seção larga for substancialmente maior do que na seção estreita, uma canalização severa deve ocorrer.

Deve ser observado que, se a tubulação está muito próxima da parede, é impossível a colocação do cimento entre o revestimento e a parede.

Lockyear et al. (1990) estudaram os efeitos da canalização. A canalização pode ser minimizada pelo mecanismo de fluatibilidade (empuxo) e controlando o *stand-off* (descentralização) do revestimento.

Guillot et al. (1990) utilizaram a teoria de lubrificação para verificar que a tendência de canalização do cimento através do fluido de perfuração é reduzida utilizando colchões espaçadores, em regime turbulento. Em anulares excêntricos o regime do escoamento pode ser completamente laminar, completamente turbulento ou pode consistir em uma mistura de regimes de escoamento, isto é, laminar na seção estreita e turbulento na seção larga.

Para os deslocamentos em regime laminar, a densidade do fluido deslocador é maior do que a do fluido deslocado. Isto é verdadeiro na maioria dos casos. Esta hierarquia da densidade estabiliza a interface entre os fluidos, tornando plano o perfil da interface.

A principal limitação da técnica do deslocamento do regime turbulento é que as vazões devem ser mantidas dentro dos limites aceitáveis no campo. Esta condição implica no uso dos fluidos com baixa viscosidade aparente. Entretanto, para fluidos espaçadores, que devem poder carregar cascalhos, a baixa viscosidade aparente pode conduzir à migração da partícula sob forças de gravidade.

McPherson (2000) recomenda um *stand-off* de no mínimo 67%, para obter uma boa cimentação. Este valor permite uma boa remoção da lama e a correta colocação do cimento. Ao cimentar *liners*, recomenda-se um *stand-off* mais elevado, por volta de 80%, para assegurar uma cimentação da alta qualidade. Para poços altamente afastados/ horizontais exige-se um maior número de centralizadores, para obter o *stand-off* especificado.

Centralizadores compressíveis (tipo arco) têm que superar o peso da tubulação quando se encontram no lado baixo do poço. Esta tensão extra na força resultante de restauração contribui menos para manter a tubulação centralizada.

Centralizadores contínuos (que não são limitados por forças de restauração) são usados em poços altamente afastados/ horizontais, para garantir a especificação do *stand-off*. Entretanto, um número excessivo de centralizadores aumenta as forças de fricção rotatórias entre o centralizador e a parede do poço.

Centralizadores com lâmina em espiral são utilizados para evitar um número excessivo de centralizadores. O projeto da lâmina promove a turbulência dos fluidos na região anular e melhora a remoção de sólidos do filtrado.

Centralizadores de baixo torque têm os rolos montados no exterior e no interior do centralizador. Os rolos na parte externa possuem um ângulo ao longo do comprimento da tubulação para reduzir as forças durante a instalação da tubulação. Os rolos internos permitem que a tubulação mova-se dentro do centralizador, reduzindo a fricção verificada durante a rotação. O uso deste tipo de centralizador permite girar o *liner* durante toda a cimentação.

2.2.8. Diferença de Densidade

Clark & Carter (1973) e Haut & Crook (1978) verificaram que os efeitos da diferença de densidade (força de empuxo) entre lama/ cimento têm pouco efeito no deslocamento. Para estes efeitos serem efetivos, a lama deve estar em movimento, para compensar sua característica pseudoplástica.

O cimento deve ser mais denso do que a lama deslocada, mas não necessariamente deve ter a maior diferença de densidades possível. Uma maior remoção de lama é obtida em reduzidas diferenças de densidade, deslocando o cimento a elevadas vazões. Esta abordagem permite a realização das duas principais forças atuantes: perda de carga por fricção e tensão de arraste na interface lama/ cimento.

Jakobsen et al. (1991) analisaram o deslocamento do fluido de perfuração em anular excêntrico. Foram utilizados polímeros, descritos pelo modelo *power-law*, para um experimento em escala reduzida.

Observou-se que quando o fluido deslocador era 5% mais pesado do que o fluido deslocado, a lama fluíu da parte estreita do anular para a parte mais larga do anular. Neste processo, uma componente atua ao longo do eixo do poço (aumentando a perda de carga e a velocidade na seção estreita) e uma componente atua perpendicular ao eixo do poço (mudando a característica do processo de deslocamento). Este processo de fluviabilidade induzida melhorou fortemente a eficiência do deslocamento. Além disso, a eficiência do deslocamento aumenta com o decréscimo da razão de viscosidade. Esta dependência é válida somente quando o escoamento é laminar em toda a seção do anular.

Mukhalalaty et al. (1999) foram bem sucedidos na execução da cimentação primária em um único estágio, testando pastas de cimento de baixa densidade, em cinco poços. Foram usadas pastas com redução de água (RWS, *Reduced Water Slurry*), visando diminuir a pressão hidrostática.

O sistema RWS é uma pasta de cimento desenvolvida para aplicações de baixa densidade, controlando o tipo e o tamanho das partículas, mantendo a resistência mecânica requerida.

Outro método para diminuir a densidade do cimento consiste em incorporar esferas de cerâmica ocas como aditivos de pouco peso, permitindo o uso de ar encapsulado, mantendo a resistência apropriada da pasta.

2.2.9. Tensão Limite de Escoamento dos Fluidos

Lockyear et al. (1990) estudaram as condições que devem ser satisfeitas para a correta disposição do cimento em torno do anular:

Deslocamento da lama. Deve ser superada a força gel da lama, para que a lama se mova para a seção larga do anular. Este procedimento deve ser concluído antes da cimentação.

Tensão limite de escoamento (força gel). A tensão limite de escoamento de cada fluido (lama, espaçador e cimento) deve ser superada para permitir que o fluido entre ou saia da seção estreita do anular. Duas forças são importantes: a perda de carga por fricção e a perda de carga hidráulica devido a diferença de densidade entre os fluidos.

Canalização. A velocidade da interface entre os dois fluidos no anular deve ser a mesma na região larga e na estreita. Se a velocidade da interface da seção larga for substancialmente maior do que na seção estreita, uma canalização severa deve ocorrer. A canalização pode ser minimizada pelos mecanismos de fluatibilidade e controlando o *stand-off* do revestimento.

2.2.10. Modelos Reológicos

Silva et al. (1989) realizaram um estudo experimental (em escala real) para determinação do modelo que melhor descreve as características reológicas dos fluidos de perfuração. Foram estudados os modelos de Bingham, *power-law*, Casson e Herschel-Bulkley, no escoamento anular de fluidos base água e base óleo. Foi realizada a medição da vazão volumétrica e a queda de pressão, para verificação do modelo reológico de sete fluidos de perfuração.

Foi analisado o comportamento destes modelos reológicos em um amplo intervalo de taxas de deformação:

- Taxas de deformação baixas (tanques de lama);
- Taxas de deformação intermediárias (interior da coluna, anular do poço);
- Taxas de deformação elevadas (jatos da broca).

O modelo de Bingham possui uma limitação para altas taxas de deformação, onde os fluidos de perfuração tendem a apresentar caráter pseudoplástico bem definido, afastando-se do comportamento linear proposto.

O modelo *power-law* tende a apresentar valores de tensão cisalhante inferiores aos esperados na região de baixas taxas de deformação, devido à ausência de um termo para representar o limite de escoamento na equação matemática.

O modelo de Herschel-Bulkley mostrou-se o mais adequado, pois apresentou uma tensão limite de escoamento a baixas taxas de deformação e um comportamento pseudoplástico a altas taxas de deformação.

2.3. Regimes de Escoamento

2.3.1. Regime Turbulento

Clark & Carter (1973) estudaram que para uma mesma perda de carga no anular, a lama que escoar em regime turbulento em parte da seção do anular fornece uma melhor eficiência de deslocamento do que a lama em regime laminar.

Haut & Crook (1978) concluíram que existe três tipos de regime de escoamento que um fluido não newtoniano, como o fluido de perfuração ou a pasta de cimento, pode assumir: turbulento, laminar e *plug-flow*.

Um ponto importante é não confundir o perfil de velocidade com o perfil da forma de interface em um processo de deslocamento de um fluido por outro. Próximo ao perfil da interface existe grande instabilidade e recirculações, tornando os perfis diferentes. Enquanto o perfil de velocidade de um único fluido 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 desprezado.

O perfil laminar de velocidade é menos uniforme em torno do anular do que os regimes *plugflow* ou turbulento. Além disso, este perfil sugere que o fluido deslocador poderia “canalizar” na direção do centro do fluido deslocado quando o fluido deslocador se apresenta em regime laminar.

Vazões elevadas influenciam favoravelmente o processo de deslocamento da lama. Durante a investigação em laboratório, o cimento foi bombeado na maior vazão possível. Mesmo nos casos em que o regime turbulento não foi obtido, o deslocamento em uma vazão máxima era mais eficaz do que o deslocamento em regime *plugflow*.

Lockyear et al. (1990) descrevem experimentos de escoamentos em escala real. Para tanto, foi monitorada a velocidade da interface entre dois fluidos, variando a densidade e a reologia, para quantificar o comportamento entre as interfaces cimento/espaciador e espaciador/lama.

Foi observado que o aumento da vazão diminui o grau de canalização, através do mecanismo de aumento da perda de carga por fricção. Logo, devido à facilidade de entrar em regime turbulento, os fluidos menos viscosos são mais eficazes no deslocamento de fluidos mais viscosos.

2.3.2. Regime Laminar

Beirute & Flumerfelt (1977) publicaram um modelo matemático que descreve o deslocamento miscível de lamas de perfuração por pastas de cimento sob regime laminar, pressupondo que a mistura por difusão molecular entre os fluidos na região da interface é mínima. Os fluidos considerados são não newtonianos, escoando pela região anular entre cilindros concêntricos ou, equivalentemente, pela região entre duas placas paralelas (utilizando a teoria de lubrificação).

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.

Kroken et al. (1996) desenvolveram uma técnica chamada de *tide flow* para deslocamentos em anulares horizontais excêntricos. Em um anular horizontal excêntrico os fluidos tendem a mover-se ao longo do trajeto de menor resistência. As técnicas de deslocamento laminares eficazes são baseadas atualmente em quatro critérios:

1. Hierarquia de densidade entre o fluido de perfuração, espaçador e cimento.
2. A perda de carga do fluido deslocador deve ser mais elevada do que a do fluido deslocado.
3. Gradiente de pressão mínimo, ou seja, o esforço cisalhante na seção estreita deve exceder a tensão limite de escoamento do fluido para assegurar que haja escoamento.
4. Limite de velocidade do líquido na seção larga a fim de evitar a sobreposição excessiva de fluido na seção inferior.

A técnica *tide flow* considera que a energia potencial (E_p) em cada evento deve ser maior do que a energia cinética (E_k) do fluido no anular do poço. Considerando um poço horizontal, essa condição permite que o fluido se mova verticalmente mais rápido do que horizontalmente, deslocando o fluido na seção estreita.

Em um cenário *tide flow*, a razão entre as densidades dos fluidos deslocado e deslocador são explicadas pelo mecanismo de empuxo, onde $\rho_{\text{CIMENTO}} > \rho_{\text{LAMA}}$. O número de Froude (Fr) deve ser usado para avaliar projetos de *tide flow*, pois fornece a relação entre força de inércia e força da gravidade, conforme eq. 2-1. Como o número

de Froude não incorpora parâmetros reológicos dos fluidos, o método *tide flow* é eficaz para fluidos com baixa viscosidade onde os efeitos reológicos não são importantes.

$$Fr = \sqrt{\frac{\rho_{LAMA} u^2}{(\rho_{CIMENTO} - \rho_{LAMA}) g L}} \quad (2-1)$$

onde $\rho_{CIMENTO}$ é a densidade do cimento, ρ_{LAMA} é a densidade da lama de perfuração, u é a velocidade, L_c é o comprimento característico e g é a aceleração da gravidade.

A técnica *tide flow* não substitui as eficazes técnicas laminar e turbulenta, apresentando uma alternativa quando estas técnicas não são operacionalmente possíveis.

2.3.3. Regime de transição

A determinação do regime de escoamento é um fator crítico para otimização hidráulica das operações de perfuração e planejamento das cimentações de poços de petróleo. O regime laminar tem como vantagem principal o menor gasto de energia, entretanto não propicia a mesma capacidade de carreamento de cascalhos que é obtida em regime turbulento. Portanto, é necessário o conhecimento da zona de transição com a finalidade de se processar a perfuração na maior vazão possível para se obter a máxima limpeza do poço.

Biezen et al. (2000) e Brand et al. (2001) estudaram a transição entre os regimes de regime laminar e turbulento para uma eficiente remoção da lama de perfuração, utilizando testes experimentais. O regime turbulento é o preferido para a remoção eficiente da lama no anular. Consequentemente, é necessário um critério confiável para determinar o número de Reynolds crítico para o regime turbulento.

Este estudo experimental permitiu que fosse identificada a transição laminar-turbulento de cinco fluidos diferentes, usando três técnicas de medição diferentes. Verificou-se que os fluidos espaçadores são bem descritos pelo modelo reológico de Herschel-Bulkley. O valor de Reynolds crítico obtido segundo o critério de Mishra e Tripathi parece ser o mais apropriado para descrever os resultados experimentais.

Silva (1988) apresenta a zona de transição expressa pelos números de Reynolds críticos de vários fluidos de perfuração, baseado em resultados experimentais.

O escoamento turbulento domina quando as forças inerciais tornam-se superiores às forças viscosas. Evidentemente, a sobreposição de uma força sobre a outra não se dá instantaneamente.

Para fluidos newtonianos escoando em tubos a expressão matemática do número de Reynolds é mostrada na eq. 2-2. De maneira geral, espera-se que para os fluidos newtonianos a turbulência deva ser iniciada para número de Reynolds igual a 2100.

$$Re = \frac{\rho u L_C}{\mu} \quad (2-2)$$

onde ρ é a densidade, u é a velocidade, L_C é o comprimento característico e μ é a viscosidade newtoniana.

Para os fluidos não newtonianos o número de Reynolds crítico irá depender da natureza reológica do fluido, sendo uma consequência do grau de afastamento do comportamento de um fluido newtoniano.

Os números de Reynolds críticos determinados experimentalmente no escoamento anular dos fluidos de perfuração foram significativamente superiores ao clássico 3000 sugerido na literatura, conforme observado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Modelos reológicos estudados

Modelo Reológico	Equação de viscosidade	Número de Reynolds	Transição do Número de Reynolds	
			Laminar – Transiente	Transiente – Turbulento
Bingham	$\eta = \eta_p + \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}}$	$Re = \frac{\rho u L_C}{\eta_p}$	5000	8000
Potência	$\eta = k \dot{\gamma}^{n-1}$	$Re = \frac{\rho u^{2-n} L_C^n}{k \eta_p^{n-1}}$	4000	7000
Casson	$\eta = \left[\left(\frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} \right)^{1/2} + \eta_p^{1/2} \right]^2$	$Re = \frac{\rho u L_C}{\eta_p}$	15000	30000
Herschel-Bulkley	$\eta = \frac{\tau_0 + k [\dot{\gamma}^n - (\tau_0/\eta_0)^n]}{\dot{\gamma}}$	$Re = \frac{\rho u^{2-n} L_C^n}{k \eta_p^{n-1}}$	5500	8500

onde $\dot{\gamma}$ é a taxa de deformação, τ_0 é a tensão limite de escoamento, η_0 é a viscosidade a baixas taxas de deformação, η_p é a viscosidade plástica, k é o índice de consistência, n é o índice de comportamento, ρ é a densidade, u é a velocidade e L_C é o comprimento característico.

2.3.4. Teste do Regime de Escoamento

Kelessidis et al. (1995) publicaram resultados de seis poços com colunas de diâmetros 9 5/8" e 7". Todas as variáveis foram monitoradas durante o processo de cimentação, incluindo: vazão de bombeamento, pressões, densidades e propriedades reológicas dos fluidos (lama de perfuração/ cimento - modelo de Bingham; espaçador - modelo *power-law*). Foram utilizadas duas técnicas de cimentação: regime laminar e regime turbulento (prática convencional).

Para os revestimentos de 9 5/8", utilizando a técnica de regime laminar, foi obtida uma excelente ligação do cimento. A ligação do cimento não foi boa nas zonas de *wash-out*, onde os critérios para a interface lisa, na interface lama de perfuração/ fluido espaçador, não foram satisfeitos.

Para os revestimentos de 7", utilizando a prática convencional (regime turbulento) conduziram a uma cimentação ineficiente. Isto ocorreu porque o volume de *pre-flush* utilizado não foi suficiente para conseguir o tempo do contato mínimo de 10 minutos. Uma excelente ligação do cimento foi obtida quando o tempo do contato foi maior que 10 minutos.

2.3.5. Escoamentos Horizontais

McPherson (2000) especificou uma metodologia de projeto para cimentação de poços horizontais, baseada no campo de Wytch Farm, Inglaterra. Nesse estudo, verifica-se que um cuidado especial deve ser tomado no projeto da pasta de cimento. Pastas de cimento com elevados tempos de engrossamento tomam um longo tempo para cura no anular, podendo conduzir à geração da água livre e à segregação de sólidos. A geração de água livre em seções horizontais é mais prejudicial ao isolamento do anular do que a mesma perda percentual em poços verticais.

Em poços verticais, toda a água livre migrará para a parte superior da coluna do cimento, resultando na potencial formação de canais de fluidos e em um pobre isolamento do poço. A menos que a geração de água livre seja muito elevada, este efeito não é prejudicial ao poço.

Em poços horizontais, a água livre gerada poderá conduzir a uma pobre ligação do cimento e a uma possível comunicação ao longo do poço, na parte superior da coluna.

Para se resguardar deste fato, são realizados testes de estabilidade em laboratório (teste de água livre API e teste de segregação em tubo).

Em poços horizontais os fluidos estão distribuídos ao longo do comprimento do revestimento/ *liner*. Durante o processo de deslocamento com pastas de alta densidade, o gradiente de fratura pode ser atingido devido ao pequeno acréscimo de pressão decorrente da ECD. *Equivalent Circulating Density* (ECD) corresponde ao aumento da pressão (perda de carga) decorrente da circulação da lama, em densidade equivalente. Desta forma, esta operação deve ser executada sob condições controladas.

2.4. Estudos Numéricos do Processo de Deslocamento

Graves & Collins (1981) estudaram o deslocamento de fluidos não newtonianos em geometrias anulares, através de um método de diferenças finitas. Este parece ser o primeiro trabalho numérico de cimentação de poço. Para descrever o comportamento viscoplástico dos fluidos foi proposta uma equação constitutiva, variante do modelo de Bingham (contínua e diferenciável para toda faixa de taxa de deformação).

Como resultado verificou-se a influência da tensão limite de escoamento na eficiência do deslocamento. No caso em que o fluido deslocador tinha a tensão menor que o deslocado foram observadas instabilidades na interface entre os fluidos. Além disso, foram identificados vórtices próximos à parede.

Lockyear & Hibbert (1989) estudaram o processo de deslocamento de fluidos em uma seção anular, utilizando modelos matemáticos e experimentais. Em virtude da complexidade do escoamento foi utilizada uma escala realística para eliminar efeitos de escala. Os problemas da cimentação primária foram analisados pela primeira vez nos termos de deslocamento da lama (remoção da lama gelificada) e de colocação do cimento (escoamento uniforme do cimento sem canalizar).

O deslocamento da lama é auxiliado por lamas com baixa força-gel, bom *stand-off* e por vazões elevadas de deslocamento. A colocação do cimento é auxiliada pelo bom *stand-off*, espaçadores menos viscosos do que o cimento e pastas com tensão limite de escoamento. A vazão é importante para o deslocamento da lama, mas não parece ser importante para a colocação do cimento.

Tehrani et al. (1992) realizaram uma análise experimental e teórica para investigar o processo de deslocamento. No experimento instalou-se uma célula a jusante do escoamento, capaz de medir a condutividade elétrica dos fluidos. Cada fluido teve sua

condutividade alterada, através da adição de sal. Conhecendo a condutividade elétrica de cada fluido, foi possível verificar a eficiência do deslocamento.

O experimento foi realizado em escala reduzida, com similaridade dinâmica nas condições de campo: similaridade geométrica e parâmetros adimensionais que governam o escoamento. A eficiência decresce com o aumento de excentricidade e com o decréscimo da diferença de densidades entre os fluidos, desde que o mais denso seja o deslocador. A inclinação reduz a eficiência de deslocamento diminuindo os efeitos gravitacionais, entretanto, esta redução pode ser compensada otimizando a vazão de bombeamento e a reologia do fluido. Foram ainda observadas maiores eficiências nos casos de menor vazão e hierarquia positiva na reologia (tensão limite de escoamento). Há uma forte interação entre ΔP e a vazão de bombeamento que podem induzir a instabilidades azimutais. Estas instabilidades geralmente melhoram o deslocamento, porém pequenos bolsões de fluido deslocado podem ficar presos na seção estreita do anular.

Dutra et al. (1995) apresentaram um estudo com simulação numérica das operações relativas ao deslocamento de um fluido por outro dentro do poço. Foram analisados os efeitos da diferença de densidade e da reologia entre os fluidos, onde fluidos newtonianos deslocaram fluidos não newtonianos (modelo Herschel-Bulkley), e vice-versa. A solução numérica do escoamento foi obtida através da técnica de volumes finitos, método VOF (*Volume of Fluid*) do *software* comercial FLUENT. A eficiência do deslocamento foi avaliada através do percentual de fluido deslocado que permanece dentro do volume anular versus um tempo adimensional.

Ao deslocar um fluido não newtoniano, o processo é mais eficiente em elevadas vazões de bombeamento, devido ao decréscimo da viscosidade deste fluido pseudoplástico. Logo, pequena variação na vazão de bombeamento pode conduzir a eficiências diferentes. A excentricidade contribui para uma pobre eficiência de deslocamento, especialmente em geometrias horizontais, onde uma camada do fluido deslocado permanece praticamente estacionária na parede do tubo interno. O uso de elevadas viscosidades para o fluido espaçador pode ser uma boa estratégia para melhorar a eficiência de deslocamento em situações críticas.

Bakhtiyarov & Siginer (1996) estudaram o processo de deslocamento (teórico e experimental) de um fluido por outro, em regime laminar, para um tubo cilíndrico horizontal. Os parâmetros mais comuns para definir a habilidade de um dado fluido ser deslocado por outro são a eficiência do deslocamento e o tempo de deslocamento

(*breakthrough time*). O tempo de deslocamento é definido como o tempo necessário para que o líquido deslocador apareça na saída do tubo. As expressões para o tempo de deslocamento foram desenvolvidas supondo-se que os fluidos deslocados fossem viscoinelásticos ou viscoelásticos, e o fluido deslocador, newtoniano. Os efeitos da tensão superficial foram negligenciados. Entre outras observações, o tempo de deslocamento aumenta com o decréscimo da razão de viscosidades (na taxa de cisalhamento zero).

Szabo & Hassager (1997) investigaram a eficiência no deslocamento de fluidos newtonianos em anulares verticais, baseada na teoria da lubrificação, utilizando o método *arbitrary Lagrange-Euler* (ALE), em escoamento tridimensional. Foi estudada a diferença de densidades entre o fluido deslocador (cimento) e o fluido deslocado (fluido de perfuração). A fim de reduzir o número de parâmetros adimensionais na análise, foram utilizados fluidos newtonianos com igual viscosidade.

Neste estudo foi considerado um sistema com dois líquidos imiscíveis, com a deformação do domínio computacional através do mapeamento da interface líquido-líquido. A vantagem é o conhecimento da posição precisa da interface em qualquer instante de tempo durante o deslocamento.

Os resultados mostraram que para bons deslocamentos são necessários altos números de empuxo (Bu), conforme eq. 2-3. Partículas na frente da interface são transportadas da parede para o centro, ao passo que partículas atrás da interface se movem do centro para a parede. O campo de velocidade próximo da interface se mostrou complexo e com pequenas zonas de recirculação. 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.

$$Bu = \frac{\Delta \rho g L_c^2}{\mu u} \quad (2-3)$$

onde ρ é a densidade, L_c é o comprimento característico, μ é a viscosidade newtoniana e u é a velocidade.

Schleizer & Bonnecaze (1999) estudaram numericamente o comportamento dinâmico e a estabilidade de uma gota bidimensional imiscível. Esta gota foi submetida ao escoamento de cisalhamento, induzido por pressão entre placas paralelas. A gota foi presa à placa inferior, formando duas linhas de contato que podiam ser fixas ou móveis. Foi utilizado o método da integral de contorno para determinar numericamente o

escoamento e a dinâmica ao longo da superfície livre. Verifica-se que, com o aumento do número de capilaridade ou da razão de viscosidade, o tamanho da gota e a deformação da interface aumentam.

Frigaard et al. (2001) estudaram os efeitos reológicos do fluido de perfuração durante o processo de cimentação primária, através de estudo experimental e computacional. As simulações para o deslocamento bidimensional foram realizadas em regime transiente, utilizando o método VOF (*Volume of Fluid*). Considerou-se que os fluidos possuem a mesma densidade, base-água (efeitos de tensão superficial não são importantes). Este estudo abordou métodos com caráter preditivo para as camadas de lama residual nas paredes do anular durante o deslocamento. O deslocamento de um fluido viscoplástico por outro com menor tensão limite de escoamento (modelo de Bingham) pode ocasionar uma camada estática residual (gel) nas paredes do espaço anular. É possível evitar essa formação aumentando a velocidade média, e consequentemente, aumentando a espessura da camada de gel. No entanto, ao aumentar a tensão limite de escoamento do fluido a ser deslocado, essa espessura diminui.

Lee et al. (2002) estudaram os efeitos de viscoelasticidade em escoamentos de superfície livres utilizando o método de elementos finitos DEVSS. Dois tipos distintos do escoamento são analisados: o escoamento induzido por uma bolha de ar longa que desloca um líquido polimérico confinado entre duas placas paralelas (escoamento de Hele-Shaw); e o escoamento de um filme de fluido viscoelástico de baixa vazão. Foi obtida excelente correspondência computacional e experimental entre os escoamentos.

Bittleston et al. (2002) e Frigaard & Pelipenko (2003) estudaram o processo de cimentação, através de escoamentos em regime laminar para anulares excêntricos. Foi utilizada a analogia com o deslocamento de Hele-Shaw, para analisar o fenômeno de *fingering*. O escoamento analisado difere-se dos demais estudos de deslocamento Hele-Shaw, por três motivos:

- O deslocamento ocorre através de meios anisotrópicos, devido à excentricidade do anular;
- São utilizados fluidos não newtonianos (modelo de Herschel-Bulkley);
- Foram considerados deslocamentos miscíveis;

A análise de um escoamento bidimensional foi realizada utilizando-se o modelo VOF. Confirma-se que o deslocamento em regime permanente pode ocorrer, para determinadas combinações de propriedades físicas, excentricidade e inclinação. Para estes casos, foi obtida uma solução analítica para a forma da interface.

Pelipenko & Frigaard (2004) descrevem a aplicação de um algoritmo lagrangeano para solução de escoamento de fluidos não newtonianos na seção anular, simulando o deslocamento bidimensional de cimentações primárias.

Foi demonstrado que o algoritmo pode reproduzir exatamente soluções analíticas para anular concêntrico. Nas simulações não foi observada evidência de instabilidade local da interface. Foi estudado o uso de um fluido deslocador mais viscoso e mais denso do que o fluido deslocado. Na cimentação de poços verticais é vantajoso manter uma diferença positiva de densidade e de viscosidade entre os sucessivos estágios bombeados, de forma a minimizar os efeitos de desestabilização da excentricidade do anular.

Soares et al. (2005; 2006) analisaram o deslocamento em tubos capilares, através de testes numéricos e experimentais. Foram estudados os deslocamentos líquido-líquido (2005) e gás-líquido (2006). Foi utilizado um modelo de escoamento axissimétrico, com uma longa gota penetrando no líquido. O objetivo foi determinar a quantidade de fluido deslocado que permanecia unido à parede do tubo e a configuração da interface para diferentes parâmetros de operação. O método de elementos finitos de Galerkin foi usado para resolver as equações de governo.

Para o deslocamento gás-líquido, o comportamento não newtoniano do líquido deslocado foi modelado por duas equações constitutivas diferentes. As predições teóricas foram comparadas com os alguns dos dados experimentais para os fluidos não newtonianos disponíveis na literatura. Entre outros resultados, as predições sugerem que o aumento da película de líquido na parede do tubo esteja relacionado à viscosidade extensional puramente elástica ao invés das diferenças de tensão normal.

Para o deslocamento líquido-líquido, experiências foram executadas para validar o modelo numérico, capturando imagens da interface. Os resultados numéricos foram obtidos com a suposição de inércia insignificante, investigando os efeitos da razão de viscosidade e do número de capilaridade.

Moyers-González et al. (2007) analisaram a operação de cimentação primária utilizando um modelo de Hele-Shaw, simulando o deslocamento líquido-líquido de fluidos não newtonianos utilizando o modelo de Herschel-Bulkley. Foi investigado, através de simulação numérica, se a pulsação do escoamento (em ondas progressivas) pode reduzir a formação da canaleta de lama. Foi estudada a pulsação da vazão, como sendo a pulsação da pressão na bomba. Após o início da pulsação, a canaleta de lama começa lentamente a escoar até que se mova inteiramente. Este processo continua enquanto ocorre a pulsação. Após cessar a pulsação, a lama volta a ser estática. Assim, a

cada pulsação a canaleta da lama escoará, movendo-se acima da seção estreita por um curto período de tempo, parando logo em seguida.

Carrasco-Teja et al. (2008) estudaram o deslocamento horizontal entre dois fluidos não newtonianos (modelo Herschel-Bulkley) em regime laminar através de um anular excêntrico. Foi utilizado o modelo de Hele-Shaw e a teoria de lubrificação para desenvolver o modelo numérico unidimensional, variando a reologia e a excentricidade. O efeito previsto da diferença da densidade é promover a estratificação, com o fluido menos denso movendo-se a frente. Foram apresentados resultados para fluidos newtonianos e *power-law*, baseados na razão de consistência dos fluidos (k_1/k_2).