

1

Introdução

O estudo da mecânica dos fluidos tem sido tema de diversos trabalhos publicados na literatura, sendo que muitas vezes esse estudo é aplicado às necessidades da indústria. A compreensão do escoamento dos fluidos encontrados na indústria do petróleo é de fundamental importância para o perfeito entendimento de alguns processos existentes e para otimização dos custos, por exemplo.

Grande parte dos fluidos envolvidos em tais processos apresenta um comportamento não Newtoniano, sendo a viscosidade uma função da taxa de deformação imposta ao fluido. Com isso a obtenção de solução analítica para o escoamento muitas vezes é impossibilitada. Estudos experimentais e simulações numéricas são realizados com o objetivo de obter correlações ou soluções aproximadas para o escoamento através de modelos simplificados dos processos de interesse.

1.1

Motivação e Descrição do Problema

Na indústria de petróleo, durante a perfuração de um poço, um fluido chamado lama de perfuração é utilizado ao longo de toda essa operação. A lama de perfuração é bombeada a partir da superfície por dentro da coluna de perfuração, saindo por orifícios na broca e chegando ao espaço anular formado entre a coluna de perfuração e a parede do poço por onde ocorre o escoamento de retorno até a superfície.

As principais funções da lama de perfuração são exercer pressão hidrostática sobre as formações (evitando o influxo indesejado de óleo, gás ou

água para dentro do poço), prevenir o colapso da parede do poço, transportar os fragmentos de rochas (cascalhos) gerados pela perfuração até a superfície (limpando o fundo do poço), resfriar e lubrificar a coluna de perfuração e a broca.

Para conseguir cumprir todas as funções, a lama de perfuração deve apresentar algumas características: ser estável quimicamente, facilitar a separação do cascalho na superfície, manter sólidos em suspensão quando houver ausência de escoamento, não provocar danos a formação rochosa, ser bombeável, aceitar tratamento químico e físico, facilitar interpretação geológica e baixo grau de corrosão e abrasão em relação à coluna de perfuração e demais equipamentos de superfície [1].

As lamas de perfuração são misturas complexas de sólidos e líquidos, sendo sua composição química especificada de forma a garantir uma perfuração rápida e segura. A figura 1.1 representa um esquema da perfuração do poço, do escoamento da lama de perfuração dentro da coluna de perfuração e do seu retorno para superfície através do espaço anular.

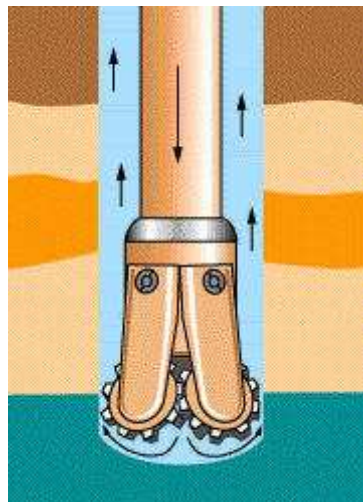


Figura 1.1 - Processo de Perfuração de um Poço de Petróleo [2]

O escoamento da lama de perfuração se torna muito importante, uma vez que a ineficiência na remoção dos cascalhos de dentro do espaço anular pode dificultar o processo de perfuração (diminuindo a taxa de penetração da broca) e até mesmo interrompê-lo, já que pode ocorrer prisão da coluna de perfuração, necessitando operações secundárias de pescaria [3].

Devido aos altos custos envolvidos nas operações de perfuração, é fundamental conseguir prever o comportamento do escoamento da lama de perfuração no espaço anular, a perda de carga ao longo do escoamento, a velocidade e eficiência no transporte dos cascalhos até a superfície a fim de otimizar a operação.

Outro processo na indústria de petróleo de extrema importância, onde ocorre o escoamento em um espaço anular, é a cimentação do poço. Porém nesse processo existe a presença de dois fluidos diferentes, o que dificulta ainda mais a obtenção de solução para o escoamento.

Durante a perfuração de poços de petróleo é necessário revestir o poço com tubos de aço (esses são chamados de revestimentos) para proteger a parede do poço e manter a sua integridade estrutural. O poço é perfurado em diversas fases, cujo número depende das características das formações rochosas que são perfuradas e também da profundidade final prevista. Os revestimentos são cimentados com o objetivo de isolar hidráulicamente as diferentes formações rochosas de uma dada fase, além de fornecer sustentação mecânica para o revestimento [1].

Após a perfuração de uma fase do poço a coluna de perfuração é retirada do interior do poço, sendo que este apresenta todo seu volume preenchido com a lama de perfuração. O revestimento é então posicionado no interior do poço, deixando uma pequena folga radial entre a parede externa do revestimento e a parede do poço. Uma vez que a lama de perfuração se encontra no interior do revestimento e no espaço anular, esta deve ser deslocada pela pasta de cimento (um fluido espaçador pode ser utilizado), permitindo que o cimento ocupe o espaço anular e com isso fixando o revestimento e evitando que haja migração de fluidos entre as diversas zonas permeáveis.

A figura 1.2 ilustra cada passo do processo de cimentação primária de um poço de petróleo após a descida do revestimento no interior do poço. O cimento, que também apresenta comportamento não Newtoniano, é bombeado por dentro do revestimento e sai para o espaço anular através da extremidade inferior do revestimento. A lama de perfuração deve então ser completamente deslocada pelo cimento para que a operação seja bem sucedida.

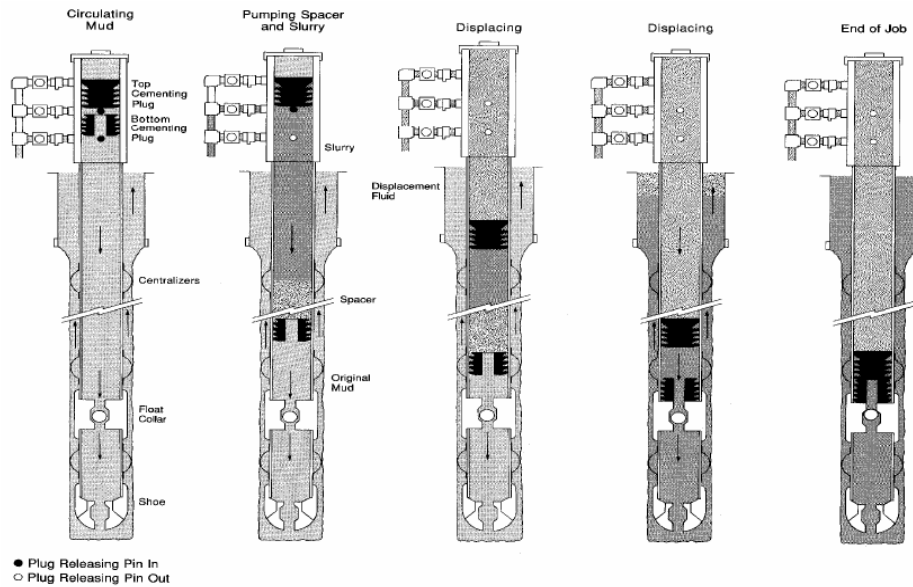


Figura 1.2 - Cimentação Primária de um Poço de Petróleo [4]

O deslocamento da lama de perfuração nem sempre ocorre de forma correta, parte da lama pode permanecer imóvel no interior do espaço anular, não permitindo o avanço da pasta de cimento na direção axial do poço e conseqüentemente que os objetivos da cimentação sejam alcançados. A figura 1.3 representa uma falha no processo de cimentação, para uma situação semelhante seria necessário um processo secundário de correção da cimentação (*squeeze*), levando a perda de tempo efetivo de perfuração.



Figura 1.3 - Falha na Operação de Cimentação [1]

Considerando que a operação de cimentação do revestimento tem reflexos em toda a vida produtiva do poço e envolve altos custos, faz-se necessário um estudo criterioso da situação e uma análise econômica cuidadosa.

Ambos os processos descritos anteriormente mostram que o estudo do escoamento de fluidos não Newtonianos em espaços anulares excêntricos é extremamente relevante, principalmente, quando poços horizontais são estudados. A real compreensão desse escoamento pode trazer grandes benefícios para indústria do petróleo.

A análise do escoamento no anular com excentricidade variável é extremamente complexa e depende de um grande número de parâmetros. A geometria tem grande importância nesse problema, pois a parede do poço pode não apresentar uma geometria cilíndrica perfeita e o revestimento não é concêntrico (o centro do revestimento não coincide com o centro do poço), o que afeta bastante o campo de velocidades. A excentricidade entre o revestimento e a parede do poço gera um escoamento assimétrico e preferencial na região mais larga do anular. Além disso, a excentricidade varia ao longo do poço, resultando em um escoamento não desenvolvido ao longo de todo o comprimento do poço. A razão entre o raio externo do revestimento e o raio da parede do poço também afeta o escoamento no anular excêntrico.

A reologia dos fluidos é um grande complicador, dado que os fluidos não apresentam comportamento Newtoniano na maioria dos casos, tornando o problema não linear e dificultando a procura por soluções. A busca por modelos reológicos adequados que consigam descrever o real comportamento da viscosidade como uma função da taxa de deformação é fundamental para o estudo do problema.

Outros parâmetros que podem afetar o escoamento são: a inclinação do poço (no caso do escoamento com dois fluidos que apresentam diferentes massas específicas), a presença de rotação da coluna de perfuração e a velocidade de rotação, vazão de bombeamento do fluido e a variação da temperatura ao longo do comprimento do poço.

A fim de estudar o escoamento e avaliar a influência dos parâmetros citados acima, é necessário obter a solução para as equações diferenciais de conservação de quantidade de movimento e de massa tridimensionais e transientes. A resolução desse tipo de sistema de equações é bastante cara do ponto de vista

computacional, sendo necessária a utilização de simplificações. Existem diversas análises disponíveis na literatura, com diferentes simplificações e abordagens para esse tipo de problema. Uma revisão das análises encontradas na literatura com o escopo semelhante ao desse trabalho é apresentada na próxima seção.

1.2

Revisão Bibliográfica

Bird e Fredrickson [5], no ano de 1958, analisaram de forma analítica e numérica o escoamento em tubos e anulares concêntricos para diferentes modelos reológicos, já vislumbrando sua aplicação no escoamento de lamelas de perfuração. Foram apresentadas expressões para o cálculo da perda de carga no escoamento em espaços anulares para os modelos *Power-law* e *Bingham*, além de alguns exemplos de aplicação na indústria do petróleo.

No ano de 1990, Hacıislamoglu e Langlinais [6] desenvolveram um modelo numérico para o escoamento de um fluido *Herschel-Bulkley*, considerando o espaço anular excêntrico. O trabalho mostrou que o campo de velocidade previsto é bastante complexo e diferente do caso concêntrico. Foi desenvolvida uma correlação para rápida previsão da queda de pressão no escoamento de um fluido *Power-law* no anular excêntrico.

Já no ano de 1991, Malik e Shenoy [7] estudaram o escoamento em espaços anulares concêntricos considerando a rotação do cilindro interno e um gradiente de pressão ao longo da coordenada axial. O modelo utilizado considerava o escoamento entre placas paralelas (com uma das placas em movimento) para fluido Newtoniano e *Power-law*. Ao final foi desenvolvida uma expressão analítica para a vazão volumétrica em função da razão de raios, índice de comportamento do fluido e gradiente de pressão axial, permitindo estudar a influência dos parâmetros.

Siginer e Bakhtiyarov [8], em 1998, investigaram os efeitos da excentricidade no escoamento de forma analítica e experimental. O modelo considerava a rotação do cilindro interno, sendo que a excentricidade era considerada constante ao longo da coordenada axial. Os campos de velocidade foram medidos para fluido Newtoniano e não Newtoniano no anular excêntrico.

Foi obtida uma expressão para a velocidade azimutal em função da excentricidade e dos parâmetros reológicos do fluido utilizando o modelo *linear fluidity*.

Fang, Manglik e Jog [9], no ano de 1999, analisaram o escoamento laminar e desenvolvido de um fluido *Power-law* escoando em um anular com excentricidade constante e rotação do cilindro interno. A equação de conservação de quantidade de movimento é resolvida utilizando diferenças finitas. Os resultados mostraram que a excentricidade e os parâmetros reológicos apresentam forte influência no escoamento. Por causa da excentricidade ocorre estagnação do fluido na região do anular mais apertada, além de grandes variações azimutais no campo de velocidades.

Em 1996, David e Filip [10] examinaram o escoamento laminar de um fluido *Power-law* em espaço anular concêntrico com objetivo de determinar uma expressão precisa e prática para queda de pressão em função dos outros parâmetros do problema: vazão, razão de raios e parâmetros reológicos. A expressão permitiu avaliar a influência de cada parâmetro, separadamente, na relação entre a queda de pressão e a vazão.

Já no ano de 2007, Wachs [11] realizou uma simulação numérica para o escoamento uniaxial de um fluido viscoplástico (modelo de *Bingham*) através de um anular com excentricidade constante. As dificuldades encontradas na modelagem de um fluido viscoplástico foram superadas utilizando multiplicadores de *Lagrange*. Os resultados reforçam os grandes efeitos da excentricidade no padrão do escoamento, mostrando regiões com ocorrência de *plug flow*.

No ano de 1979, Simmers e Coney [12] estudaram experimentalmente a distribuição de velocidade em um espaço anular concêntrico considerando que o cilindro interno apresenta rotação. No experimento foi possível determinar as três componentes da velocidade (axial, radial e azimutal), mostrando que no regime de vórtices de Taylor as componentes axiais e azimutais da velocidade flutuam em torno de uma média. Já a velocidade radial oscila em torno do zero, sendo que praticamente não há movimentação efetiva nessa direção.

Em 2007, Akgun e Jawad [13] determinaram o fator de atrito para o escoamento turbulento de um fluido não Newtoniano em espaço anular com excentricidade constante. Um novo método foi proposto baseado no cálculo do diâmetro hidráulico turbulento (o escoamento pode não ser turbulento em todo o anular) e no conceito de parâmetros geométricos (que também leva em

consideração o modelo reológico adotado). Os resultados foram comparados com correlações disponíveis na literatura para o modelo Newtoniano, apresentando ótimos resultados.

Pinho e Whitelaw [14], no ano de 1990, mediram a velocidade axial média e as três tensões normais para o escoamento desenvolvido de um fluido *Power-Law* em um tubo. Os resultados descreveram um atraso na transição do regime laminar para o turbulento (transição ocorrendo para maiores Re) quando comparados com o modelo Newtoniano, além da diminuição do fator de atrito para valores elevados de Re e ausência de grandes flutuações (principal característica do regime turbulento) nas tensões na direção azimutal e radial.

Já em 2002, Escudier, Oliveira e Pinho [15] realizaram uma simulação numérica que considerava um modelo bidimensional para o escoamento laminar e completamente desenvolvido de um fluido *Power-law* em anular com excentricidade constante ao longo da coordenada axial. As equações que governam o escoamento foram resolvidas utilizando volumes finitos e a solução obtida foi comparada com resultados disponíveis na literatura. O modelo se mostrou extremamente preciso, possibilitando analisar a influência no campo de velocidades e no produto $f \times Re$ do escoamento para diferentes: razões de raio, parâmetros reológicos, excentricidades, números de Reynolds e de Taylor. Os resultados mostraram que a excentricidade provoca forte distorção no campo de velocidades do anular.

Em 2006, Pina e Carvalho [16] utilizaram a teoria da lubrificação para simplificar as equações de conservação de quantidade de movimento para um fluido Newtoniano no espaço anular com excentricidade variável ao longo da coordenada axial, resultando em um modelo bidimensional de baixo custo computacional. Os resultados mostraram o grande efeito da variação da excentricidade ao longo da coordenada axial no campo de velocidade (ocorrência de escoamento na direção azimutal mesmo na ausência de rotação do cilindro interno) e na perda de carga no espaço anular.

Já no estudo do processo de cimentação em 1981, Graves e Collins [17] investigaram o deslocamento de fluidos não Newtonianos em espaço anular concêntrico utilizando linhas de corrente e diferenças finitas para resolver as equações diferenciais que descrevem o escoamento, sendo a interface entre os dois fluidos avaliada de forma explícita. O trabalho analisou a influência da massa

específica, da vazão volumétrica e dos parâmetros reológicos no deslocamento, mostrando que a interface pode se tornar instável em algumas situações (caso onde o fluido deslocador é menos viscoso do que o fluido deslocado).

Em 1997, Szabo e Hassager [18] estudaram um fluido Newtoniano sendo deslocado por outro fluido Newtoniano em um espaço anular com excentricidade constante ao longo do poço através de elementos finitos e o método *arbitrary Lagrange-Euler*. Os resultados mostraram a influência da diferença de massa específica no processo de deslocamento e a complexidade do campo de velocidade nas proximidades da interface formada pelos dois fluidos, com pequenas zonas de recirculação. Uma expressão para a eficiência do processo de deslocamento foi criada através da utilização da teoria da lubrificação. Porém essa aproximação não se mostrou muito precisa para grandes excentricidades.

Pelipenko e Frigaard [19], no ano de 2004, utilizaram um modelo numérico bidimensional obtido através da teoria da lubrificação para acompanhar o deslocamento da interface formada entre a lama de perfuração e o cimento, porém a curvatura da folga radial foi desprezada (utilizou o modelo de escoamento entre placas paralelas). O modelo considerava um fluido *Herschel-Bulkley* escoando em espaço anular com excentricidade constante e a evolução da interface era realizada de maneira explícita a partir da equação de conservação de concentração de espécie. Os resultados mostraram que a configuração da interface pode atingir o regime permanente, sendo que uma expressão analítica foi apresentada para pequenas excentricidades. Também foi possível avaliar como os diferentes parâmetros do problema competem entre si.

O principal objetivo dos trabalhos publicados na literatura é obter o campo de velocidade ou a perda de carga no espaço anular. Para estudar o processo de cimentação do poço ainda é necessário acompanhar a evolução da interface no tempo de maneira implícita ou explícita a partir do campo de velocidades encontrado (avaliando assim a eficiência do deslocamento da lama de perfuração pelo cimento ou fluido espaçador).

Apesar dos trabalhos encontrados levarem em consideração o comportamento não Newtoniano dos fluídos e a rotação da coluna interna, a maioria não contempla a variação da excentricidade ao longo da coordenada axial e apenas considera uma excentricidade constante ao longo do poço. A partir dessas hipóteses o escoamento é considerado completamente desenvolvido

(bidimensional), com isso o sistema de equações diferenciais parciais que governa o escoamento é simplificado, podendo ser resolvido numericamente. Os efeitos tridimensionais da variação da excentricidade ao longo da coordenada axial no escoamento foram analisados na literatura apenas de forma superficial e podem apresentar grande influência no campo de velocidades do espaço anular.

Além disso, em grande parte dos trabalhos, a curvatura da folga radial é desprezada e o escoamento entre placas paralelas é considerado, levando a um sistema de equações mais simples e de fácil solução. Um trabalho bastante recente aborda o deslocamento de fluidos no espaço anular utilizando a teoria da lubrificação sem considerar a curvatura da folga radial [20]. Essa aproximação pode gerar grandes erros, uma vez que a excentricidade e a razão de raios empregadas no problema podem inviabilizar a aplicação dessa formulação.

1.3

Proposta e Objetivo

O presente trabalho propõe um modelo simplificado obtido a partir da teoria da lubrificação, com uma abordagem um pouco diferente da maioria dos trabalhos disponíveis na literatura, para a solução do campo de velocidade. O modelo proposto analisa o escoamento de um fluido não Newtoniano no espaço anular e considera a variação da excentricidade ao longo da coordenada axial, além de não desprezar a curvatura da folga radial. Pretende-se desta forma um modelo não Newtoniano baseado na teoria da lubrificação em coordenadas cilíndricas.

Esta formulação é validada através de comparações com soluções numéricas existentes, a fim de possibilitar o emprego desse modelo em trabalhos futuros na solução do problema de deslocamento de fluidos no espaço anular (situação encontrada durante a cimentação de poços).

O modelo também é utilizado para estudar a influência da variação da excentricidade ao longo da direção axial no campo de velocidade, uma vez que os efeitos de tal geometria no escoamento parecem ser bastante relevantes. Não é possível encontrar uma análise semelhante na literatura devido à complexidade na solução das equações que governam o problema.