

1 Introdução

1.1 Motivação

O estudo do escoamento no espaço anular tem sido motivado pela necessidade de entender o escoamento de diferentes líquidos durante o processo de perfuração de poços. Na atualidade, a crescente procura pelo desenvolvimento de modelos matemáticos para descrever o escoamento no espaço anular é foco da atenção de vários pesquisadores: na indústria do petróleo, esta análise tem sido muito aproveitada no processo de perfuração [2] com o objetivo de avaliar o efeito das diferentes variáveis de operação no desempenho e custo do processo, assim como para dimensionamento de equipamentos.

O escoamento do fluido de perfuração (lama de perfuração), que é injetado por uma bateria de bombas (chamadas de bombas de perfuração) pelo interior da coluna de perfuração, saindo pelo interior da broca e retornando até a superfície pelo espaço anular existente entre o poço e a coluna como mostra a Figura 1-1, que ilustra esta operação.

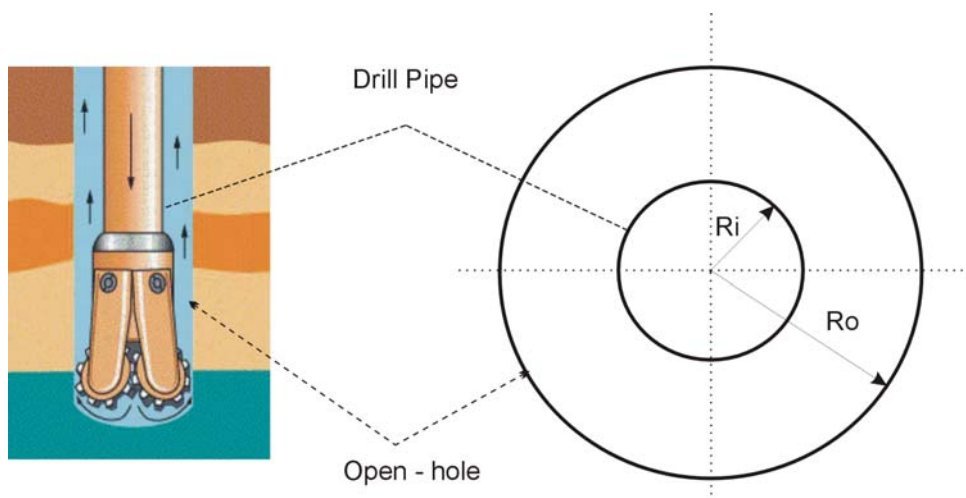


Figura 1-1 – Escoamento do fluido de perfuração percorrendo pelo interior da coluna de perfuração e retornando até a superfície pelo espaço anular.

1.2 Descrição do Processo de Perfuração

Após a descoberta da jazida de petróleo (utilizando métodos geológicos, potenciais ou sísmicos), as informações dos alvos mais favoráveis para obtenção do petróleo, são passadas para uma equipe de perfuração.

Passa-se então à perfuração de um poço, realizada através de uma sonda (denominada mastro ou torre), que é responsável pela sustentação da coluna de perfuração. Esta, por sua vez, consiste basicamente em uma série de comandos (tubos de paredes espessas) agregados a uma série de tubos de perfuração (tubos de paredes finas) sendo que numa extremidade é colocada uma broca, que irá, em movimentos circulares (em seu eixo) e de impacto, perfurar as rochas até atingir o alvo estabelecido.

Os fragmentos de rocha, por sua vez, resultantes deste processo de perfuração, são removidos através de fluidos especiais, chamamos de lama de perfuração: a lama é injetada por bombas para o interior da coluna de perfuração através da cabeça de injeção (“swivel”). Assim os cascalhos serão arrastados até a superfície por meio do espaço anular existente entre a coluna de perfuração e a parede do poço. Posteriormente, este resíduo passa a ser analisado pelos geólogos: busca-se, nesta etapa, de uma forma imediata, identificar as formações geológicas atravessadas pela broca e com isto identificar a existência de petróleo - além disso e, de forma indireta, pode-se dizer que os fragmentos analisados fornecem maiores informações sobre a região explorada, viabilizando novas interpretações geológicas da área.

Escolhido o ponto a ser perfurado e inserida a coluna de perfuração, a perfuração prossegue até uma determinada profundidade, quando então a coluna de perfuração é removida e a coluna de revestimento, com diâmetro inferior ao da broca, é inserida no poço. O espaço anular existente entre a coluna de revestimento e a parede do poço é cimentado, com o objetivo de isolar as formações rochosas e prosseguir a perfuração com segurança (evita-se, pois, o risco de desabamento das paredes). Logo após da cimentação das paredes

rochosas, a coluna de revestimento é removida e o processo continua com uma coluna de perfuração com broca de diâmetro inferior ao da coluna de revestimento. O poço é perfurado em várias etapas com brocas de diâmetros diferentes.

Basicamente, os equipamentos de uma sonda de perfuração são divididos em:

- a) Sistema de Sustentação de Cargas (bloco de coroamento, catarina, gancho, cabeça de injeção, gancho, compensador de movimentos);
- b) Sistema de Circulação (bombas de lama, tanques e extração de sólidos) - como mostrados na Figura 1-2;
- c) Sistema de Rotação, que se subdivide em sistema convencional, composto de mesa rotativa, kelly (ou haste quadrada) e kelly bushing (ou bucha de haste quadrada) e sistema top drive que, por perfurar por seção, permite menor número de conexões, sendo imprescindível para perfuração horizontal com grande afastamento;
- d) Sistema de Segurança e cabeça de poço (BOP, gavetas, choke manifold, acumuladores, linhas de válvulas);
- e) Sistema de Monitoração (painel que controla variação do volume de lama, volume total de lama, CPM da bomba de lama, retorno da lama, pressão de bombeio, assim como outros);
- f) Sistema Sub-superfície (coluna de perfuração e acessórios, brocas, motor de fundo, martelo, sistema de monitoramento).

Em nosso estudo o enfoque será preferencialmente voltado para a análise do sistema de circulação, tal como veremos no tópico a seguir.

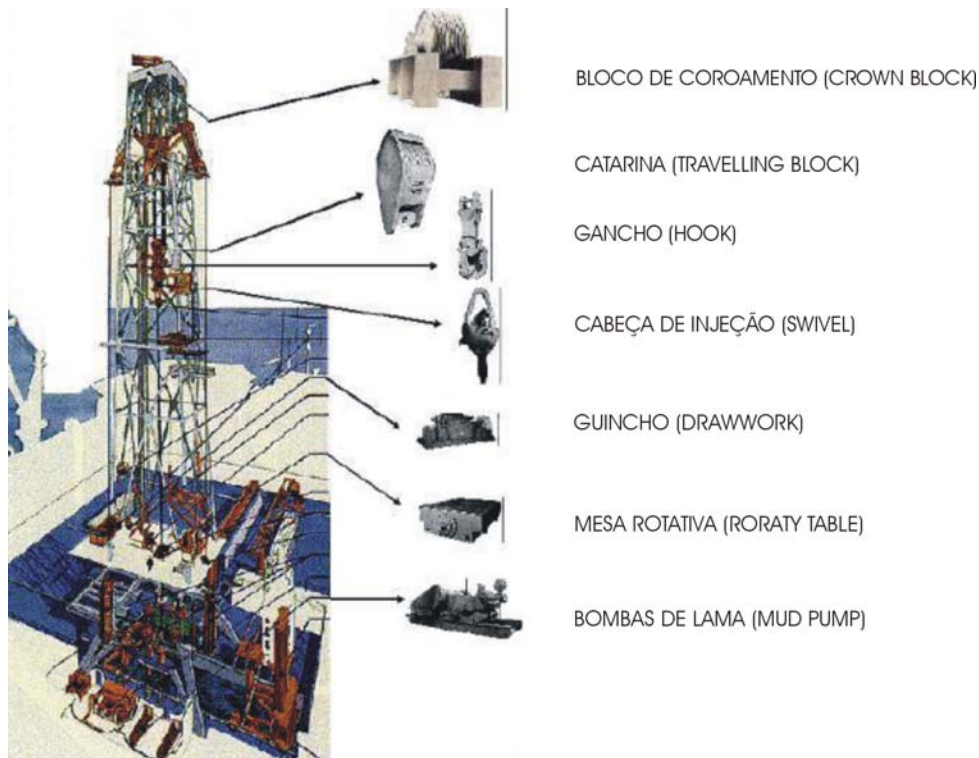


Figura 1-2 – Componentes básicos do sistema de Movimentação de Cargas e Circulação de uma sonda de perfuração.

1.2.1 Sistema de Circulação

Na etapa de perfuração, a lama de perfuração, injetada desde o tanque ao interior da coluna de perfuração, percorre o ⁽¹⁾ tubo bengala, ⁽²⁾ mangueiras, ⁽³⁾ “swivel”, ⁽⁴⁾ “Kelly”, ⁽⁵⁾ coluna de perfuração até chegar ⁽⁶⁾ na broca, retornando pela seção anular existente entre a coluna de perfuração e a parede do poço, com os cascalhos até a superfície.

A maior parte da lama utilizada retorna para o tanque de lama, como mostra a Figura 1-3, completando o ciclo.

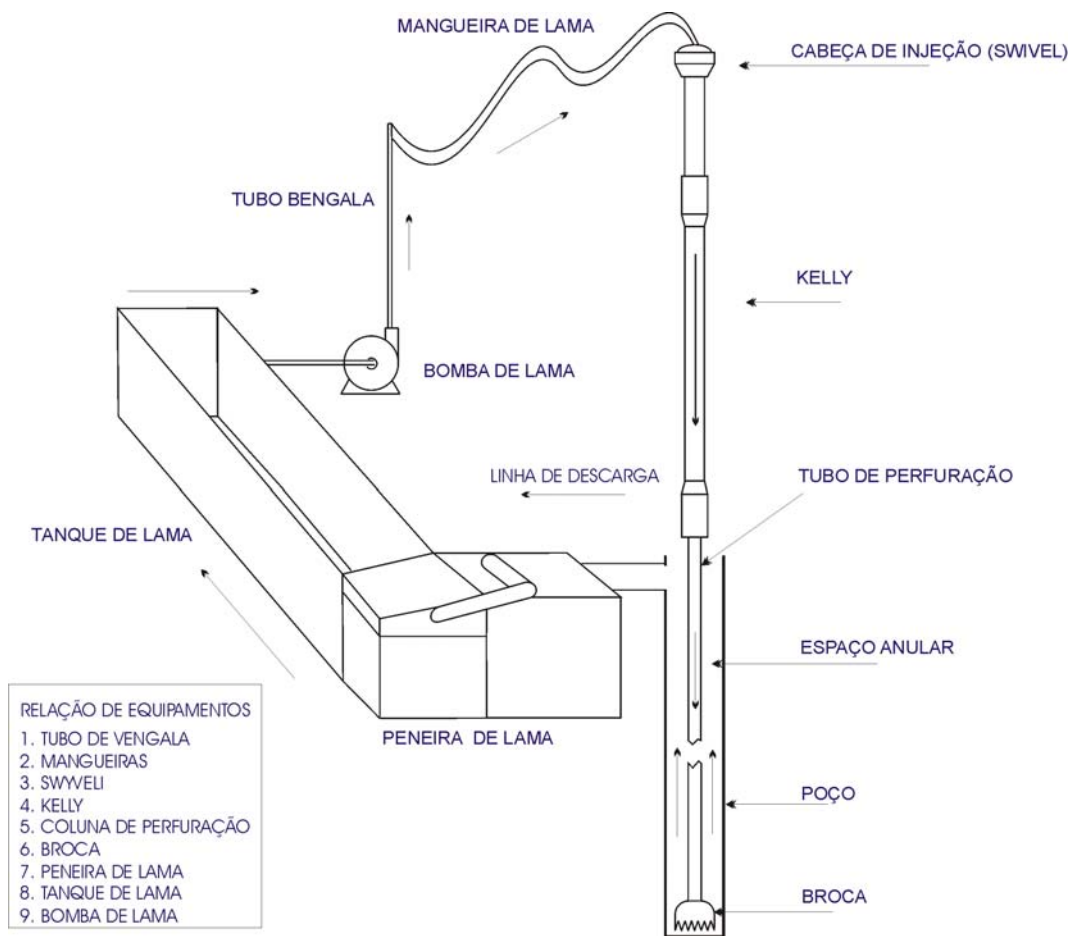


Figura 1-3 – Sistema de Circulação da lama de perfuração.

1.2.1.1 Lama de Perfuração

A lama de perfuração (ou fluido de perfuração) é uma ferramenta essencial no processo de perfuração. Este fluido deve possuir propriedades reológicas e termofísicas tais que garantam um bom desempenho no carregamento de cascalho e outras funções da forma rápida e segura.

É imprescindível que o fluido de perfuração possua as seguintes características: ser estável quimicamente; estabilizar as paredes do poço: mecânica e quimicamente; facilitar a separação dos cascalhos na superfície; possuir viscosidade e densidade suficientes para manter os cascalhos contidos na lama durante manobras (isto é durante a paralisação da perfuração, enquanto fazem as conexões dos tubos); ser inerte em relação a danos às rochas produtoras; ser bombeável; apresentar baixo grau de corrosão (evitando, assim, danos à parede do

poço e prevenindo a corrosão da coluna e equipamentos de superfície); ser facilmente separado dos cascalhos na superfície (isto facilita o análise e interpretação das formações rochosas).

Basicamente os fluidos de perfuração possuem as seguintes funções: Ter peso suficiente para manter a pressão hidrostática da lama equivalente à pressão das formações atravessadas, evitando o influxo de fluídos indesejáveis (*kick*) / erupções (*blowouts*) assim como estabilizar as paredes do poço evitando o seu desmoronamento; lubrificar e resfriar a broca; limpar o fundo do poço e carrear os cascalhos até a superfície.

As principais propriedades de controle dos fluidos de perfuração, são as físicas e químicas. Dentre as propriedades físicas pode-se citar: densidade, parâmetros reológicos, os parâmetros de filtração, o teor de sólidos, o coeficiente de lubricidade e a estabilidade elétrica.

- A densidade pode ser determinada mediante a pressão de poro (pressão do fluído atuante diretamente no espaço poroso da rocha), e pressão de fratura da rocha (pressão na qual a rocha se rompe).
- Os parâmetros reológicos determinam o comportamento mecânico do fluído, influenciam diretamente na perda de carga dentro da tubulação e no espaço anular (este é uns dos assuntos a serem abordados neste trabalho) e no carregamento de cascalhos até a superfície. Os principais parâmetros medidos são: a viscosidade aparente, viscosidade plástica e tensão limite de escoamento. Outro parâmetro reológico é a força gel que indica o grau de tixotropia do fluido. Os fluidos tixotrópicos são aqueles que quando estão em repouso possuem o estado semi-rígido, e adquirem fluidez quando são submetidos a uma taxa de deformação. A força gel inicial é a resistência do fluido ao iniciar o movimento e a força gel final é a resistência do fluido ao reiniciar o movimento quando este fica por um certo tempo em repouso. Esta diferença das forças indica o grau de tixotropia do fluido.
- O parâmetro de filtração caracteriza a capacidade do fluido de obstruir os poros quando a broca esta perfurando a rocha, evitando assim o fluxo de líquido para a formação rochosa. Para isto o fluído deverá conter

substâncias sólidas de tamanho ligeiramente inferior aos poros da rocha exposta, como mostra a Figura 1-4 abaixo:



Figura 1-4 – Fluido Selante, representando a capacidade de filtração do fluido de perfuração[20].

- A concentração de sólidos é uma propriedade que deve ser muito bem controlada. O aumento da concentração deve ser evitado, visto que a concentração de sólidos influencia fortemente outras propriedades como a densidade, viscosidade e forças géis. Além disso, uma concentração de sólidos elevada pode causar danos aos equipamentos (desgaste aos equipamentos de circulação) e problemas na operação (fratura nas formações devido ao aumento da pressão hidrostática e de bombeio, redução à taxa de penetração e prisão da coluna). Existem duas possibilidades de controle do processo: a preventiva e corretiva. A preventiva é realizada mediante inibidores de fluidos, evitando a dispersão dos sólidos perfurados, e a corretiva mediante equipamentos como peneiras, centrifugas, ciclones etc.

As propriedades químicas que são determinadas com mais frequência são: Concentração Hidrogeniônica - pH, teor de cloretos e bentonita e alcalinidade.

Os fluidos de perfuração são classificados segundo as seguintes características: tipo de formação a ser perfurada; intervalo de temperatura; permeabilidade e pressão de poro da formação; da qualidade da água disponível; de considerações ecológicas e ambientais. As características mencionadas acima levaram a uma classificação dos fluidos de perfuração em dois grandes blocos. A Figura 1-5 mostra o esquema de classificação dos fluidos de perfuração:

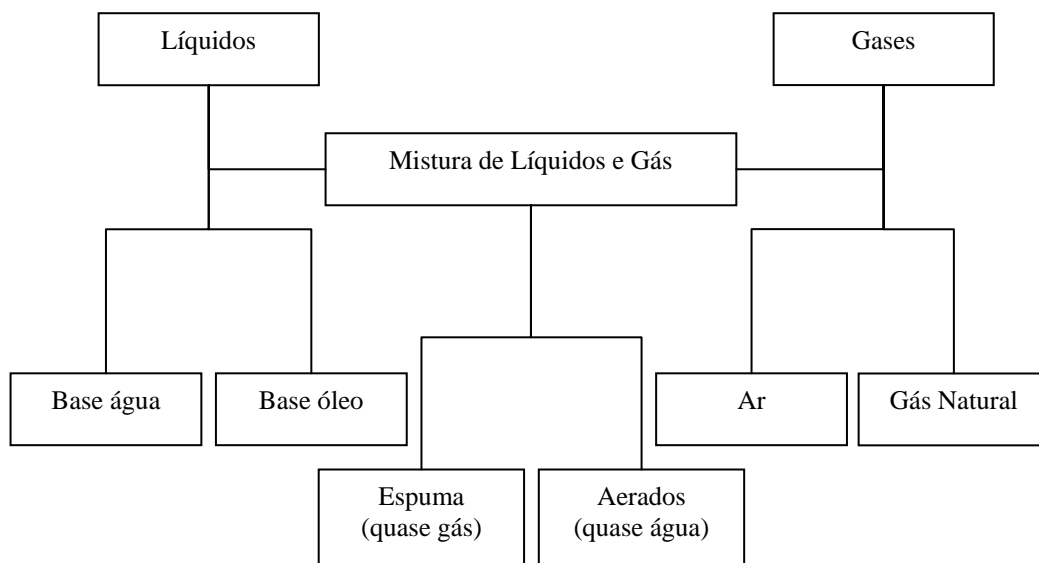


Figura 1-5 – Classificação dos fluidos de perfuração.

Os fluidos à base de água são os mais utilizados nas perfurações. A definição deste fluido considera principalmente a natureza da água e aditivos químicos. Três tipos de água podem ser utilizados:

- Água doce – Não necessita pré-tratamento químico. Possui salinidade inferior a 1000 ppm de NaCl (cloreto de sódio), e isto basicamente não afeta o desempenho dos aditivos empregados;
- Água dura – Composta basicamente de cálcio e magnésio dissolvidos que alteram o desempenho dos aditivos químicos.
- Água salgada – Possui salinidade superior a 1000 ppm de NaCl, podendo ser água do mar, ou água doce com adição de sais como NaCl, KCl ou CaCl₂.

A título de ilustração a figura 1.6 apresenta a grande variedade de fluidos a base de água utilizados:

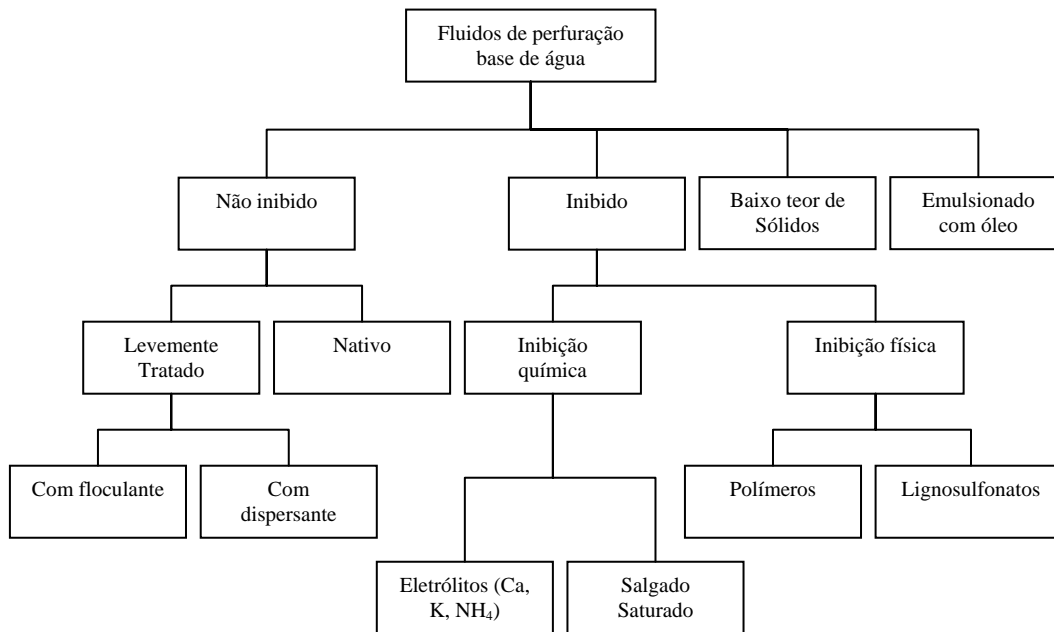


Figura 1-6 – Esquema de Classificação dos fluidos de perfuração a base de água.

A principal função dos fluidos à base de água é prover um meio de dispersão dos materiais coloidais (argilas e polímeros) que controlam algumas propriedades físicas do fluido (densidade, forças géis, limites de escoamento e parâmetros de filtração).

Os fluidos à base de óleo são compostos por duas fases: Contínua e dispersa. A fase contínua é geralmente composta por hidrocarbonetos líquidos (fase oleosa) e alguns sólidos coloidais de natureza inorgânica e/ou orgânica. A fase dispersa é formada por pequenas gotículas de água ou de solução aquosa. Estes fluidos a base de óleo são pouco utilizados por serem muito caros e poluentes.

Os fluidos a base de ar comprimido ou gás (N_2) são utilizados em perfurações onde existem perdas de circulação severas, formações produtoras com pressão muito baixa e em rochas muito duras como basalto ou diabásio. Outros fatores que influem na utilização de fluido à base de ar é a região a ser explorada

(ou seja regiões onde existe escassez de água ou regiões glaciais com espessas camadas de gelo).

A perfuração mediante ar puro, é utilizada em formações que não produzam quantidades elevadas de água e que não contenham hidrocarbonetos.

Os fluidos com espuma são utilizados em casos onde é necessária uma elevada eficiência no carregamento de cascalhos, uma vez que estes fluídos apresentam alta viscosidade à baixa taxa de cisalhamento. As espumas são uma dispersão de gás em líquido, na qual a fase contínua é constituída por um filme delgado de uma fase líquida, estabilizada por um tensoativo (espumante).

A perfuração com fluidos aerados é utilizada em regiões onde é necessário um gradiente de pressão intermediário entre os fluidos convencionais e as espumas.

Em geral como foi descrito por Tao e Donovam [3], os fluidos de perfuração são misturas complexas de sólidos, líquidos, produtos químicos e, por vezes até gases. Do ponto de vista químico, eles podem assumir aspectos de suspensão, dispersão coloidal ou emulsão, dependendo do estado físico dos componentes.

1.3 Revisão Bibliográfica

Iyoho [2] desenvolveu um estudo acerca da análise do escoamento não newtoniano através de uma excentricidade anular, utilizando-se o método de diferenças finitas e o modelo Power Law de Ostwald de Waele (este artigo será comentado posteriormente). Neste trabalho o autor faz uma pequena revisão bibliográfica que, por apresentar um breve resumo dos estudos feitos até a época, inclusive com uma boa introdução das ferramentas utilizadas para este trabalho, merece ser descrita.

Heyda [4] apresentou um desenvolvimento analítico da distribuição de velocidades numa excentricidade anular. Utilizando a função de Green e coordenadas bipolares, ele resolveu a equação de Poisson para um escoamento laminar incompressível, representando estes resultados em forma de uma série infinita.

Redberger e Charles [5] utilizaram os resultados de Heyda para resolver numericamente a equação diferencial de segunda ordem para o campo de velocidade de um escoamento Newtoniano em um espaço anular para vários diâmetros (interno / externo) e excentricidades.

Vaughn [6] tratou o anular excêntrico como um fenda de altura variável e o anular concêntrico como um fenda de altura constante, como mostra a Figura 1.4. Apesar de ter realizado o estudo para os casos de fluido newtoniano e não newtoniano, ele utilizou uma aproximação simples e várias considerações não realistas, o que comprometeu as conclusões apresentadas.

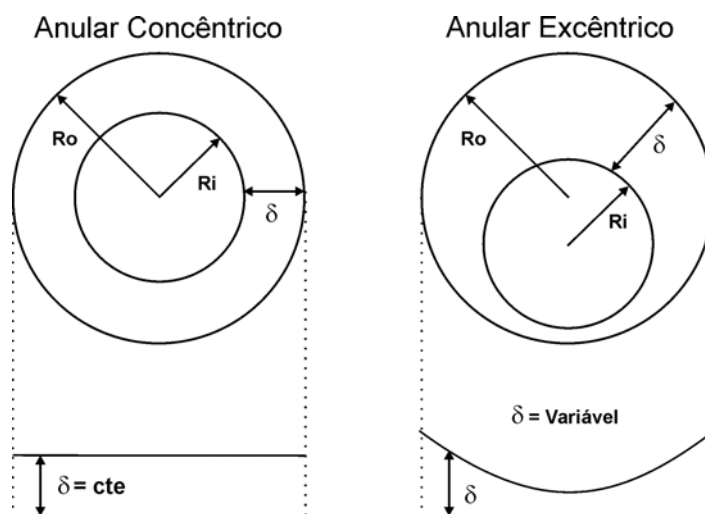


Figura 1-7 – Definição de comprimentos equivalentes para anulares concêntricos e excêntricos

Mitsubishi e Aoyagi [7] apresentaram um estudo experimental apresentando os perfis de velocidades em anulares excêntricos e confirmaram os resultados de Redberger e Charles. O perfil de velocidade do escoamento de uma solução polimérica (Carboxymethylcellulose – CMC) foi medido utilizando bolhas de

hidrogênio. Os resultados mostram que a velocidade é mais baixa na região de menor distância entre as paredes dos cilindros de um espaço anular excêntrico. A razão entre a maior e menor velocidade em uma seção é função da excentricidade e da razão de raios. Os resultados obtidos também demonstraram que o gradiente de pressão diminui nas zonas em que a excentricidade aumenta, e quando o escoamento tem características altamente não-Newtonianas o gradiente de pressão diminui nas zonas em que a excentricidade diminui.

Guckes [8] investigou o escoamento permanente de fluidos viscosos e viscoelásticos num espaço anular excêntricos. Guckes combinou a aproximação analítica de Heyda e a aproximação numérica de Redberger e Charles, e desenvolveu um cálculo numérico iterativo utilizando o método de diferenças finitas (este método será descrito no capítulo 3).

Iyoho [9] apresentou uma solução analítica para o escoamento Não-Newtoniano (modelo Power-Law) unidimensional numa excentricidade anular, utilizando a aproximação de Vaughn. Ele obteve vários resultados práticos, como a distribuição de velocidade no anular.

Luo e Peden [9] apresentaram um estudo do escoamento numa excentricidade anular para fluidos de perfuração, utilizando a geometria de dois cilindros excêntricos, como mostrado na Figura 1-8. O comportamento mecânico do fluido foi descrito pelos modelos Power-law e Plástico de Bingham. Para o escoamento Power-Law foram encontrados soluções analíticas para o campo de velocidades e a tensão cisalhante que abrange todo o espaço anular excêntrico, e para o caso do escoamento Plástico de Bingham obteve-se resultados analíticos para os valores máximos e mínimos do campo de velocidade assim como da tensão cisalhante, conforme mostrado na Figura 1-9, Figura 1-10, Figura 1-11, Figura 1-12.

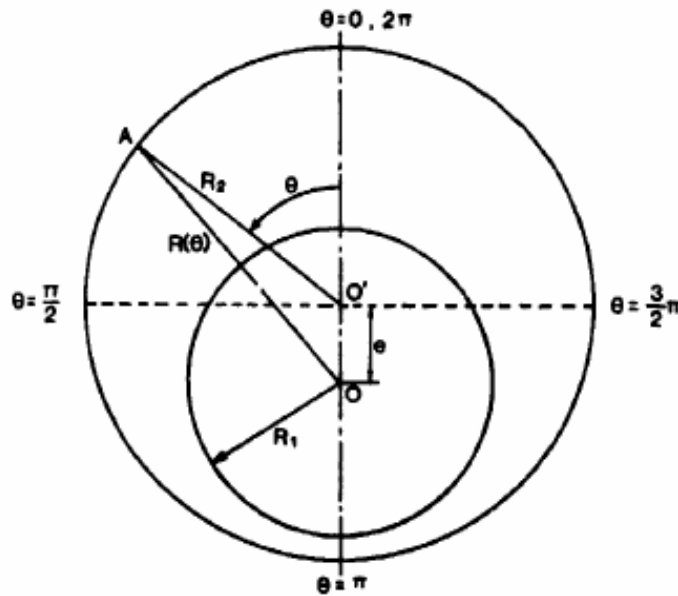


Figura 1-8 – Configuração geométrica de Luo e Pedem para o estudo do anular excêntrico

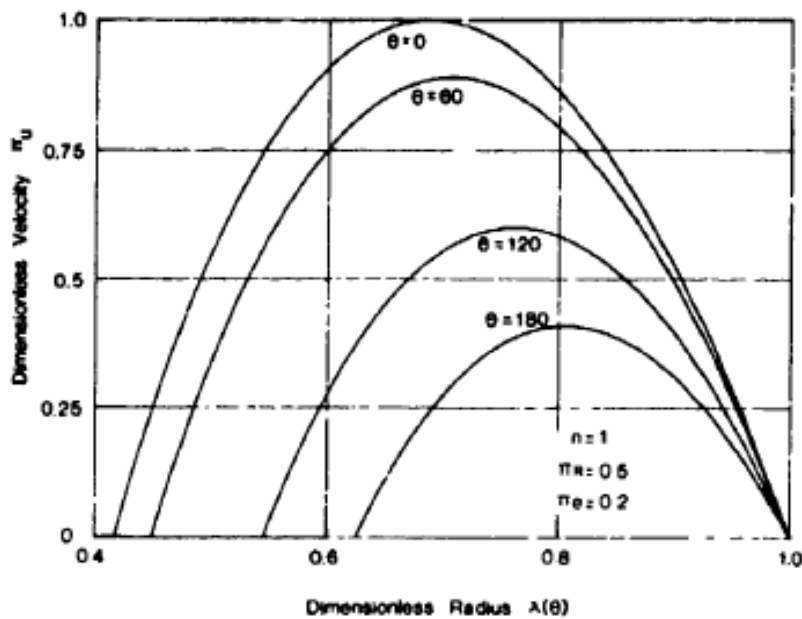


Figura 1-9 – Perfil de velocidade no anular excêntrico para o escoamento Newtoniano modelo Power-Law $n = 1$. Sendo: $\pi_r = R_1/R_2$, R_1 - Raio da coluna de perfuração, R_2 - Raio do poço, $\pi_e = e/R_2$ - Excentricidade adimensional, $\pi_u = u(\theta)/u_{\max/\theta=0}$, $u(\theta)$ - Velocidade local para o anular excêntrico, $u_{\max/\theta=0}$ - Velocidade máxima para $\theta = 0$, $\lambda_\theta = r(\theta)/R(\theta)$, $r(\theta)$ - Posição radial para o anular excêntrico, $R(\theta)$ - Raio onde a velocidade é máxima no anular excêntrico.

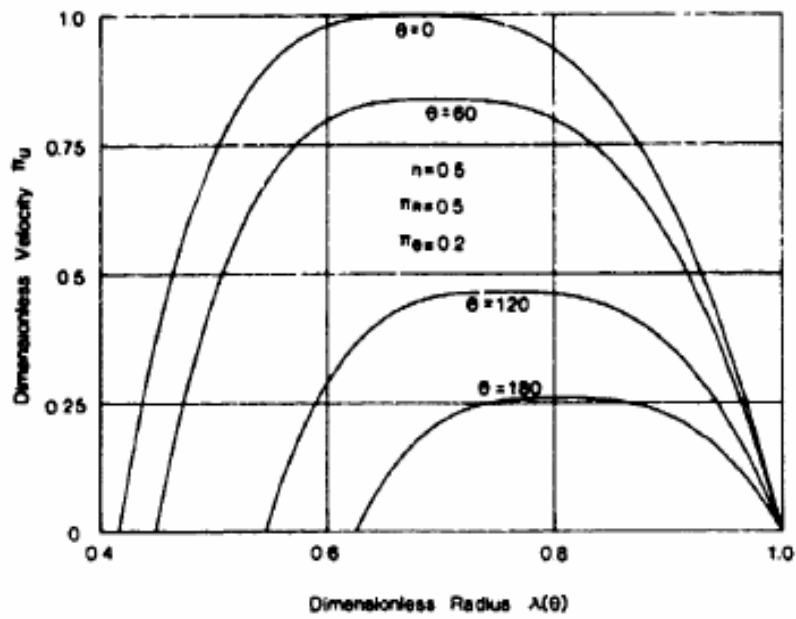


Figura 1-10 – Perfil de Velocidade no anular excêntrico para o escoamento Não-Newtoniano Power Law $n = 0,5$. Sendo π_r (razão de raios adimensional) = 0,5, π_θ (excentricidade adimensional) = 0,2

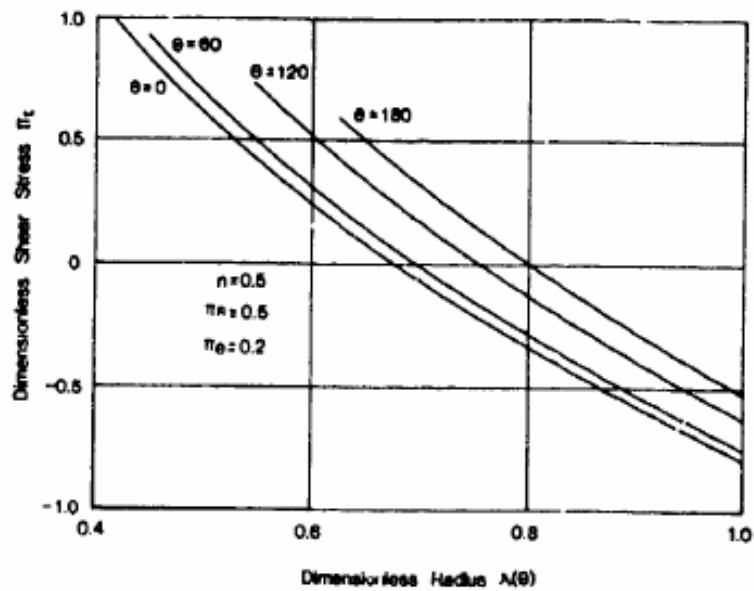


Figura 1-11– Perfil da Tensão Cisalhante em anular excêntrico para o escoamento Não-Newtoniano Power Law $n = 0.5$. Sendo: $\pi_\tau = \tau_{xr(\theta)} / \tau_{\max/\theta=0}$, $\tau_{xr(\theta)}$ - Tensão cisalhante sobre o plano θ na direção x , $\tau_{\max/\theta=0}$ - Tensão cisalhante máxima para $\theta = 0$.

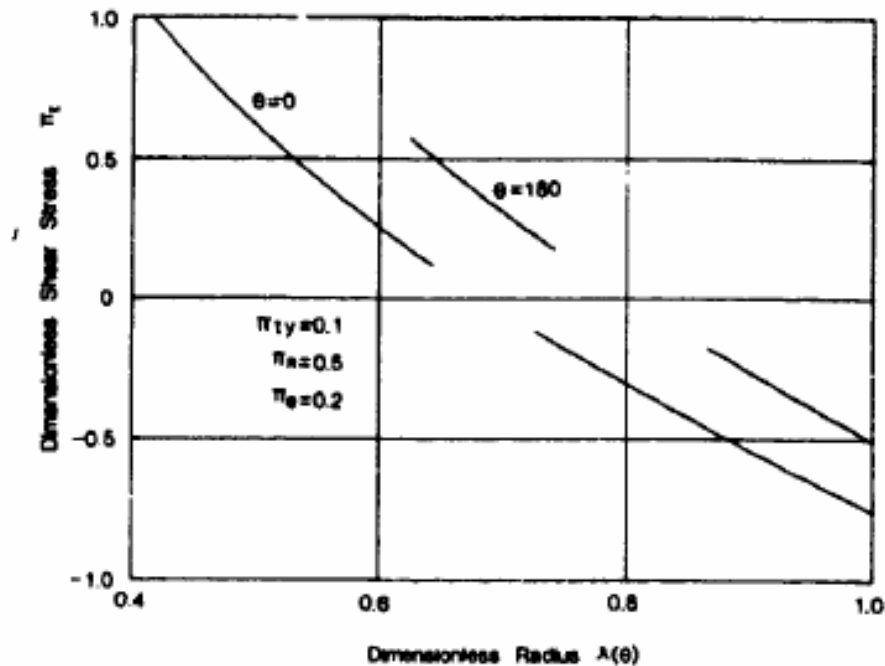


Figura 1-12 - Perfil da Tensão Cisalhante em anular excêntrico para o escoamento Não-Newtoniano Plástico de Bingham.

Escudier [10] apresentou um artigo fazendo um estudo dos efeitos de rotação de cilindro interno em escoamento laminar desenvolvido de um fluido Newtoniano através de um anular excêntrico, apresentando o perfil de velocidade radial, tangencial e axial em função da razão dos raios. Ele também apresentou o fator de atrito (fRe) em função da razão de raios, sem e com rotação do cilindro interno. Os mesmos resultados foram obtidos por Pina [12] utilizando teoria de lubrificação.

O mesmo Escudier [11] desenvolveu outra análise do escoamento laminar completamente desenvolvido de um líquido viscoso não-Newtoniano através de um anular, incluindo os efeitos da excentricidade e da rotação do cilindro interno, utilizando método de volumes finitos. Desta vez, Escudier apresentou resultados similares aos do trabalho anterior, mas desta vez para uma função viscosidade descrita pelo modelo Power-Law. Os resultados apresentados por Escudier em 2002 serão comentados posteriormente, visto que estes resultados serão utilizados para validação do modelo a apresentar neste trabalho.

No mesmo ano, Escudier [14] apresentou outro artigo fazendo uma comparação dos resultados numéricos para escoamento não-Newtoniano (já comentados anteriormente) com os resultados experimentais de outros autores como Nouar [15], que utilizou CMC a 3%, Nouri [16], que utilizou CMC a 0.2% e Xisheng [17], que utilizou poliacrilamida (PAA) a 0.25%. Escudier considerou que todos estes escoamentos poderiam ser representados mediante o modelo de potencia (Power-law), sendo o índice power-law igual a 0,75 como se mostra a Figura 1-13:

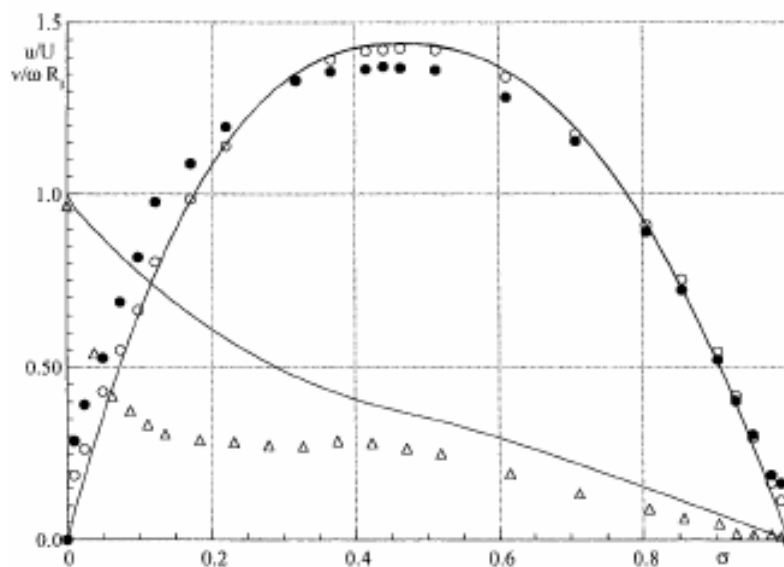


Figura 1-13 – Perfil de Velocidade de Nouri e Whitelaw (1994) para 0,2% CMC, $k=0,5$, $e=0$, $Re = 664$, $Ta=0$ (O); $Re = 684$, $Ta = 31.100$ (●, axial), (Δ, tangencial)

1.4 Objetivos do trabalho

Modelos matemáticos apresentados na literatura desenvolvidos para descrever o escoamento de lamas de perfuração são relativamente caros computacionalmente. Neste trabalho, pretende-se desenvolver um modelo matemático capaz de descrever o escoamento de um líquido pseudoplástico através de um espaço anular com excentricidade variável ao longo do eixo do cilindro com um custo computacional bem menor do que os modelos disponíveis na literatura. As equações que governam o escoamento serão simplificadas

usando a Teoria da Lubrificação. As equações resultantes serão discretizadas pelo método de diferenças finitas e linearizadas pelo método de Newton. A análise da influencia da excentricidade, da variação da mesma ao longo do eixo e da rotação do cilindro interno no fator de atrito do escoamento fRe e no gradiente de pressão é um dos objetivos principais deste trabalho.

1.5 Roteiro

No capítulo 2 definem-se as equações que governam o escoamento, equações constitutivas assim como suas respectivas restrições. No capítulo 3, definem-se os métodos de discretização utilizados para resolver estas equações. No capítulo 4, são apresentados os resultados para fluídos não-Newtonianos, com seus respectivos comentários. No capítulo 5, são apresentadas as conclusões e as sugestões para os trabalhos futuros.