

Capítulo 1

Formulas Utilizadas

SOFTWARE EDUCACIONAL PARA ANÁLISE E SOLUÇÃO DE PROBLEMAS EM ENGENHARIA DE POÇO

Neste capítulo, apresenta-se a elaboração do simulador, abrangendo o desenvolvimento teórico, a formulação das equações analíticas, a definição dos pacotes computacionais utilizados e os algoritmos adicionais integrados ao software.

Nota sobre a fonte do conteúdo: Este capítulo foi inteiramente desenvolvido a partir das referências bibliográficas Applied Drilling Engineering ([?], 1986) e Fundamentals of Drilling Engineering ([?], 2011). Todo o embasamento teórico, as formulações matemáticas, os algoritmos descritos e demais conteúdos apresentados foram extraídos dessas obras, com adaptações de linguagem e organização para fins acadêmicos, conforme exigências deste trabalho.

1.1 Análise de Domínio

A análise de domínio é uma etapa essencial no desenvolvimento de um projeto, pois envolve a identificação e compreensão dos conceitos fundamentais que orientarão a construção do simulador. Essa fase permite mapear os elementos-chave do problema, definindo as entidades, relações e comportamentos que deverão ser representados no sistema.

Este projeto está vinculado a cinco conceitos essenciais:

1. Mecânica dos fluidos:

No contexto da engenharia de perfuração, a mecânica dos fluidos trata do comportamento dos líquidos sob diferentes condições de temperatura, pressão e velocidade, considerando também a presença de sólidos como cascalho e cimento. Os fluidos utilizados nas operações têm papel fundamental na estabilização da perfuração, controle de pressões, remoção de cascalho e aplicação de cimento. Neste projeto, calcula-se a pressão dos fluidos considerando uma condição padrão: o estado de repouso da coluna e do fluido.

2. Mecânica das rochas:

A mecânica das rochas é crucial para entender o comportamento das formações geológicas durante a perfuração. Essa análise permite avaliar a estabilidade do poço, prevenir colapsos e falhas no revestimento, além de estimar tensões e fraturas que possam comprometer a integridade da operação. Conhecimentos sobre compressão, cisalhamento e tensões atuantes são fundamentais para garantir a segurança da estrutura do poço.

3. Equações analíticas:

As equações analíticas oferecem modelos matemáticos que permitem prever e controlar aspectos operacionais, como o escoamento de fluidos e o comportamento das rochas. Equações como a Lei de Darcy e a equação de Bernoulli são aplicadas para calcular perdas de carga, pressões hidrostáticas e tensões nas paredes do poço. Esses cálculos são indispensáveis para prever fraturas, definir pressões de poro e garantir a estabilidade do sistema.

4. Programação:

A programação orientada a objetos (POO) é a base do desenvolvimento do simulador, promovendo modularidade, reutilização de código e manutenção facilitada. A linguagem C++ foi adotada por sua robustez, alto desempenho e compatibilidade com bibliotecas como Qt (para interfaces gráficas) e Gnuplot (para gráficos científicos). Com conceitos como herança, polimorfismo e encapsulamento, a POO permite a estruturação eficiente dos componentes do simulador.

5. Modelagem Gráfica:

A modelagem gráfica é fundamental para representar visualmente fenômenos complexos, facilitando a análise e a tomada de decisões. A integração com a API Qt permite criar uma interface intuitiva e interativa, essencial para o uso didático e técnico do simulador.

1.2.1 Ementa da Disciplina

A seguir dados da ementa da disciplina cujo software atende.

- Dados básicos:
 - Sigla: LEP01353
 - Nome: Engenharia de Poço
 - Centro: CCT - Centro de Ciência e Tecnologia
 - Laboratório: CCT/LENEP - Laboratório de Engenharia e Exploração de Petróleo
 - Criação: 2024/1, 01/01/2024
 - Horas teórica: 68
 - Horas prática: 0
 - Horas extra classe: 0
 - Horas extensão: 0
 - Carga horária total: 68
 - Créditos: 4
 - Tipo de aprovação: Média/Frequência
- Objetivos:
 - Conhecer os tipos de sonda de perfuração de poços de petróleo; conhecer as funções dos componentes da coluna de perfuração e de completação; conhecer o processo de cimentação de poços de poços; conhecer as propriedades, funções e características dos fluidos de perfuração; modelar o escoamento do fluido de perfuração no espaço anular e dentro da coluna de perfuração; analisar a estabilidade de poços de petróleo. calcular as tensões na coluna de produção; selecionar a metalurgia ideal para a completação de poços.
- Ementa resumida:
 - Introdução à perfuração e completação de poços de petróleo; Fluidos de perfuração e completação de poços de petróleo; Hidráulica de perfuração;
 - Estabilidade mecânica durante a perfuração de poços de petróleo;
 - Seleção de materiais para completação de poços de petróleo; Análise de tensões na coluna de produção;
- Conteúdo programático:

- * Tipos de sonda de perfuração;
- * Elementos da coluna de perfuração e produção;
- * Cimentação;
- Fluidos de perfuração e completação de poços de petróleo:
 - * Composição dos fluidos de perfuração;
 - * Função e características dos fluidos;
 - * Dano de formação;
 - * Reologia;
 - * Filtração estática e dinâmica;
- Hidráulica de perfuração:
 - * Transporte de cascalho;
 - * Fluxo não-newtoniano dentro da coluna de perfuração e no espaço anular;
- Estabilidade mecânica de poços de petróleo:
 - * Introdução à mecânica das rochas;
 - * Gradiente de sobrecarga e de pressão de poros;
 - * Tensões ao redor de um poço;
- Introdução à completação de poços de petróleo:
 - * Elementos da coluna de produção;
 - * Operações de completação de poços;
- Seleção de materiais para completação de poços de petróleo:
 - * Tipo de metais;
 - * Corrosão;
 - * Seleção de metalurgia.
- Análise de tensões na coluna de produção:
 - * Carga axial;
 - * Colapso e explosão da coluna de produção;
 - * Fatores de segurança;
 - * Obturadores;
- Tópicos especiais
- Avaliação do curso
- Provas escritas

- Bibliografia

- BOURGOYNE, A.; MILLHEIM, K.K.; CHENEVERT, M.E. YOUNG JR., F.D. Applied drilling engineering. Richardson, TX: Society of Petroleum Engineers, 1986.
- GRAY, G.R.; DARLEY, H.; CAENN, R. Fluidos de perfuração e completção. Rio de Janeiro: LTC, 2014.
- RENPU, W. Engenharia de completção de poços. Amsterdam: Elsevier, 2017.
- ROCHA, L.A.S.; AZEVEDO, C.T.: Projetos de poços de petróleo. Geopressões e assentamento de colunas de revestimento. Rio de Janeiro: Interciência, 2019.

1.2.2 Termos e Unidades

Os principais termos e suas unidades utilizadas neste projeto estão listadas abaixo:

- Z é a profundidade [ft];
- dZ é a variação de profundidade [ft];
- d é o diâmetro interno do revestimento ID [in];
- d_1 é o diâmetro externo do revestimento OD [in];
- d_2 é o diâmetro do poço [in];
- p_0 é a constante de integração igual a pressão na superfície [psi];
- p é a pressão [psi];
- dp é a variação de pressão [psi];
- ΔP_{in} Variação de pressão na parte interna do poço [psi];
- ΔP_{out} Variação de pressão no anular [psi];
- τ é a tensão de cisalhamento exercida sobre o fluido [psi];
- $\dot{\gamma}$ é a taxa de cisalhamento [$1/s$];
- τ_y é a tensão de escoamento ou o ponto de escoamento [$lbf/100.sq.ft$];
- τ_w é a tensão de cisalhamento na parede [lbf/ft^2];
- ρ é a densidade do fluido [lbm/gal];
- T é a temperatura absoluta [$^{\circ}R$];

- μ_p é a viscosidade plástica $[cP]$;
- g é a gravidade $[ft/s^2]$;
- v velocidade $[ft/s]$;
- q é a vazão do poço $[gal/min]$;
- z é o fator de desvio de gás;
- n é o expoente da lei de potência ou o índice de comportamento do fluxo;
- R é constante universal dos gases $[psi.ft^3/lb - mol.^{\circ}R]$;
- M é o peso molecular do gás $[lb/lb - mol]$;
- K é o índice de consistência do fluido $[cP]$;
- f é o fator de fricção;
- E Módulo de elasticidade $[psi]$;
- N_{re} é o número de Reynolds;
- N_{rec} é o número de Reynods crítico;
- N_{He} é o número de Hedstrom;
- $\frac{dp_f}{dL}$ é a perda de pressão por fricção $[psi/ft]$;
- L Comprimento do tubo $[ft]$;
- ΔL Variação de comprimento do tubo $[ft]$;
- ΔL_b Variação de comprimento do tubo devido efeito balão $[ft]$;
- ΔL_{packer} Variação de comprimento do tubo devido força pistão $[ft]$;
- $\Delta L_{crossover}$ Variação de comprimento do tubo devido ao crossover $[ft]$;

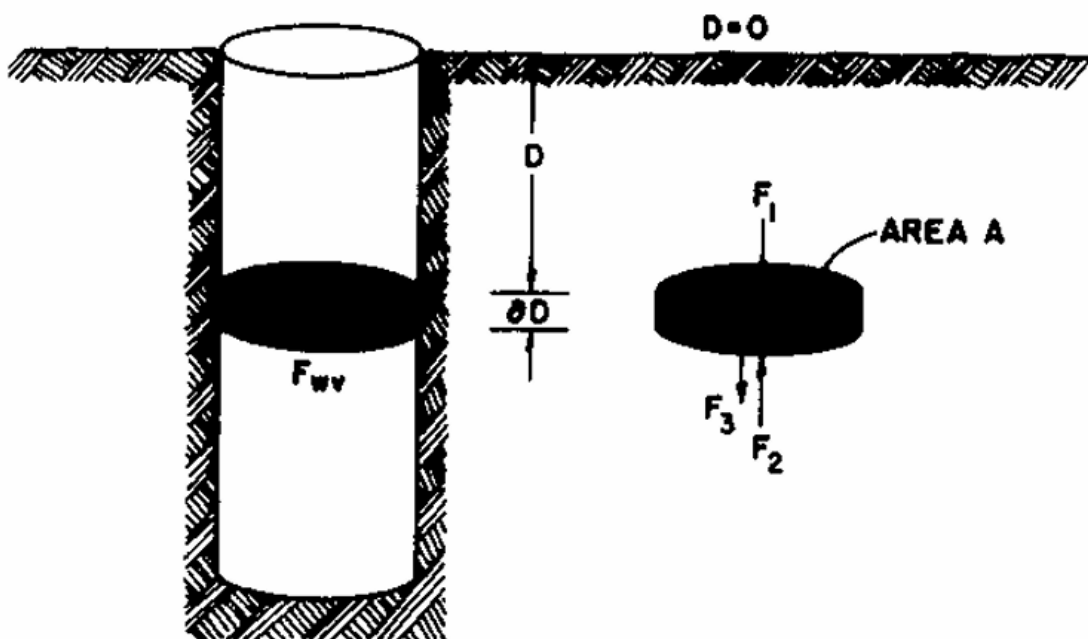
1.2.3 Pressão Hidrostática

Na engenharia de perfuração, um fluido de perfuração possui três funções principais: transportar cascalho, prevenir o influxo de fluidos e manter a estabilidade do poço. Para cumprir essas funções, o fluido depende do seu escoamento na tubulação e das pressões associadas. Para que o engenheiro possa formular o fluido mais adequado a cada situação específica, é essencial que ele seja capaz de prever as pressões e os escoamentos ao longo do poço.

Os fluidos de perfuração podem variar amplamente em termos de composição e propriedades, indo desde fluidos incompressíveis, como a água, até fluidos altamente compressíveis, como a espuma. O simulador desenvolvido neste trabalho se propõe a um dos tipos de problemas: os estáticos, que envolvem o cálculo da pressão hidrostática ([?]).

A pressão hidrostática corresponde à variação da pressão em função da profundidade ao longo de uma coluna de fluido, sendo comumente calculada em condições de poço estático. Sua dedução pode ser realizada a partir da análise do diagrama de corpo livre apresentado na Figura 1.1.

Figura 1.1: Diagrama de corpo livre, atuação de forças em um elemento de fluido



Fonte [?]

A partir dessa dedução chegamos à Equação (1.1) a seguir:

$$\frac{dp}{dZ} = 0.05195\rho \quad (1.1)$$

onde em unidades *oil field*, onde dp é a variação de pressão [*psi*], dZ é a variação de profundidade [*ft*] e ρ é a densidade do fluido [*lb/gal*].

Fluidos incompressíveis

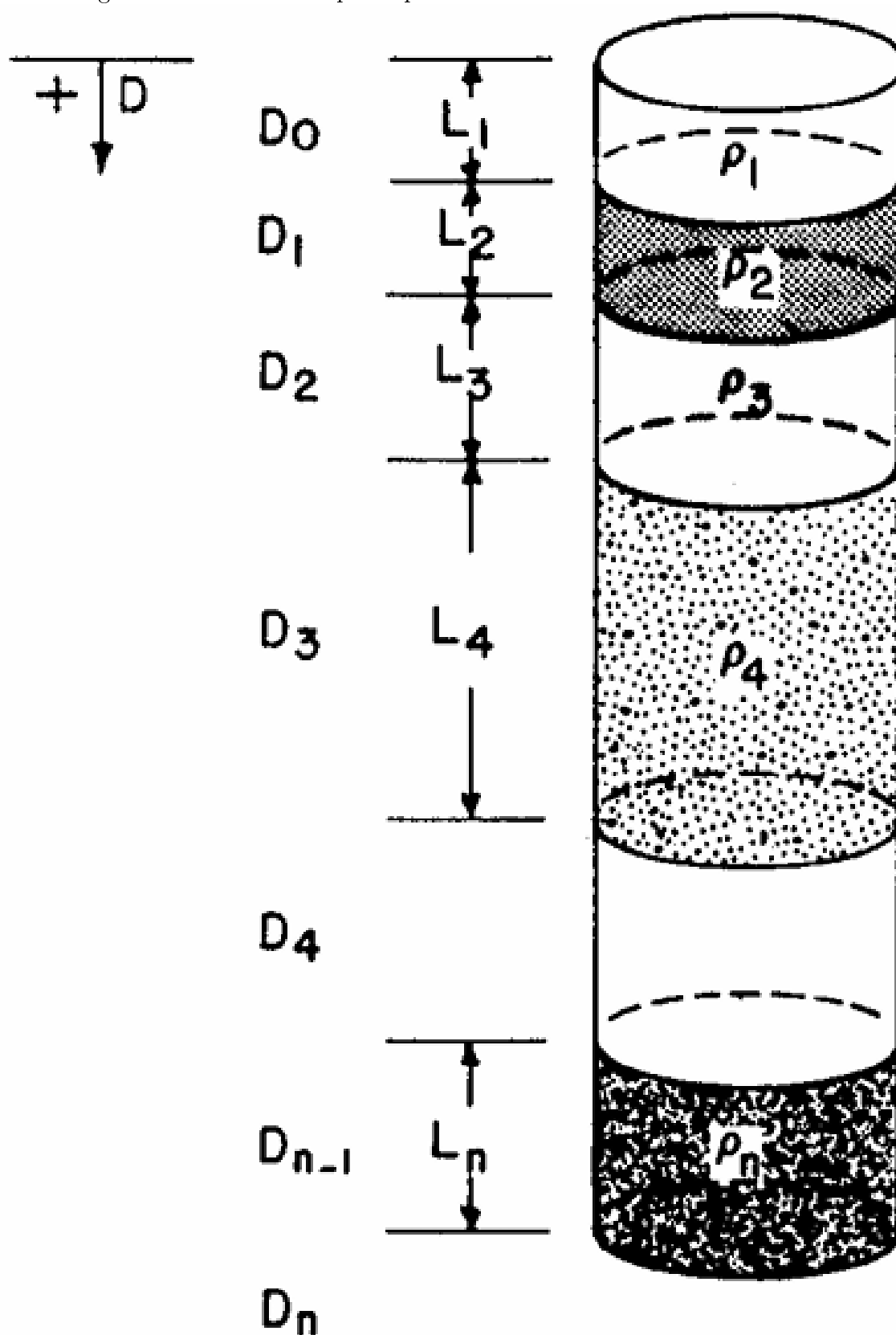
Sabemos que alguns fluidos utilizados como lama de perfuração apresentam um comportamento aproximadamente incompressível, como é o caso da água salgada. Nesses casos, a compressibilidade do fluido em baixas temperaturas pode ser desprezada, permitindo considerar o peso específico constante ao longo da profundidade. Assim, a partir da integração da Equação (1.1), obtém-se a equação hidrostática para fluidos incompressíveis:

$$p = 0.05195\rho Z + p_0 \tag{1.2}$$

Onde p_0 é a constante de integração, igual a pressão na superfície [*psi*], p é a pressão [*psi*] e Z é a profundidade [*ft*]. Uma importante aplicação dessa equação é determinar a densidade correta de um fluido de perfuração, de modo que ele seja capaz de evitar o influxo de fluidos da formação para o poço, prevenindo, assim, situações de *kik* ou *blowout*, além de não causar fraturas na formação as quais poderiam provocar uma perda de circulação de fluido que também é indesejada ([?]).

1.2.4 Pressão Hidrostática em Colunas Com Mais de Um Tipo de Fluido

Outra situação bastante comum durante a perfuração é a presença de seções contendo fluidos com diferentes densidades ao longo da coluna. Para calcular a pressão hidrostática nesse tipo de condição, é necessário determinar a variação de pressão separadamente para cada seção, conforme ilustrado na Figura 1.2.



Fonte [?]

Em geral a pressão em qualquer profundidade Z pode ser calculada por meio da equa-

$$p = p_0 + g \sum p_i (Z_i - Z_{i-1}) + g \rho_n (Z_i - Z_{i-1}) \quad (1.3)$$

Onde g é a gravidade $[ft/s^2]$.

1.2.5 Modelos Reológicos de Fluidos de Perfuração

Durante o processo de perfuração de um poço, é frequentemente necessário vencer forças viscoelásticas consideráveis para que o fluido de perfuração possa escoar através dos conduítes longos e estreitos utilizados nessa operação. Por isso, torna-se essencial a análise da perda de pressão por atrito.

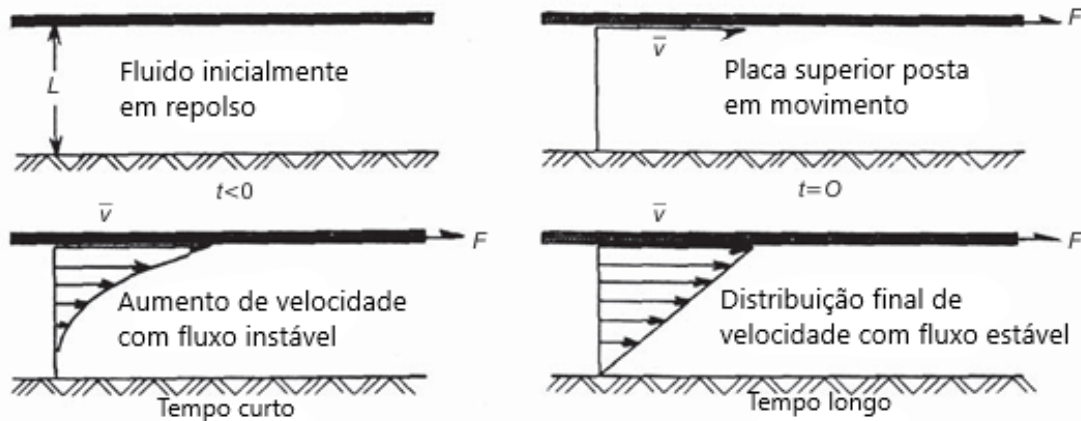
Na maioria dos casos, as propriedades elásticas dos fluidos de perfuração e seus efeitos durante o escoamento no poço são desprezíveis, sendo consideradas apenas as forças viscosas nos cálculos. Entretanto, com o avanço tecnológico, lamas cada vez mais complexas vêm sendo desenvolvidas, e, portanto, os testes devem considerar também as propriedades elásticas associadas à deformação do fluido durante o escoamento ([?]).

Para isso, é necessário descrever matematicamente e desenvolver equações que representem as perdas por atrito. Nesse contexto, engenheiros de perfuração costumam utilizar modelos reológicos para representar o comportamento dos fluidos. Neste trabalho, são abordados três modelos principais: o modelo Newtoniano, o modelo plástico de Bingham e o modelo da lei das potências ([?]). Ressalta-se ainda que outros modelos poderão ser incorporados em versões futuras do simulador, visando seu aprimoramento contínuo.

Visão geral dos modelos reológicos

As forças viscosas de um fluido são governadas pela viscosidade do mesmo, para entender o que é a viscosidade podemos analisar um simples experimento em que um fluido é colocado entre duas placas paralelas de área A separadas por uma distância L como mostra a Figura 1.3.

Figura 1.3: Fluxo laminar de fluido Newtoniano



Adaptado de [?]

Ao colocar a placa superior inicialmente em repouso em um movimento na direção x [ft] com uma velocidade constante v [ft/s] por um tempo suficiente, percebemos que uma força F [lbf] constante é necessária para manter a placa superior em movimento, a magnitude dessa força pode ser determinada por:

$$\frac{F}{A} = \mu \frac{v}{L} \quad (1.4)$$

A razão $\frac{F}{A}$ é conhecida como tensão de cisalhamento exercida sobre o fluido τ [psi]. a constante de proporcionalidade μ é chamada de viscosidade aparente [cP]. Dessa forma podemos definir a tensão de cisalhamento como:

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (1.5)$$

A taxa de cisalhamento $\dot{\gamma}$ [1/s] é expressa como o gradiente da velocidade $\frac{v}{L}$:

$$\dot{\gamma} = \frac{dv}{dL} \approx \frac{v}{L} \quad (1.6)$$

A viscosidade aparente pode ser definida como a razão entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento. A principal característica de um fluido Newtoniano é a viscosidade constante do fluido. Como sabemos os fluidos de perfuração são misturas complexas que não podem ser caracterizadas por um único valor de viscosidade, quando um fluido não apresenta uma proporcionalidade entre tensão de cisalhamento e taxa de cisalhamento ele passa a ser conhecido como um fluido não Newtoniano, podendo ser pseudoplásticos se a viscosidade diminui com o aumento da taxa de cisalhamento e dilatantes se a viscosidade aumenta com o aumento da taxa de cisalhamento ([?]).

Como já afirmamos um fluido Newtoniano tem a taxa de cisalhamento proporcional a tensão de cisalhamento:

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (1.7)$$

Onde a constante de proporcionalidade μ é o que chamamos de viscosidade. Para o caso de um fluido Newtoniano é retomando nosso experimento das placas, isso significa que se a força F for dobrada a velocidade da placa também será dobrada. Os principais fluidos Newtonianos são água, gás e salmouras, fluidos muito comuns na engenharia de poço.

A relação linear descrita pela Equação (1.7) só é válida para o fluxo laminar, quando o fluido se move em camadas, que ocorre apenas em taxas de cisalhamento baixas. Em altas taxas de cisalhamento o fluxo deixa de ser laminar e se torna turbulento, no qual as partículas se movem de forma caótica em relação ao sentido do fluxo criando vórtices e redemoinhos.

Modelo de fluidos plásticos de Bingham

O modelo plástico de Bingham [?] pode ser definido como:

$$\tau = \tau_y + \mu_p \dot{\gamma} \quad (1.8)$$

A principal característica de um plástico Bingham é a necessidade de um valor mínimo de tensão de cisalhamento para que o fluido comece a fluir, essa tensão mínima τ_y é chamada de tensão de escoamento [*lb.f/100.sq.ft*]. Após a tensão de escoamento o fluido de Bingham se comporta como um fluido Newtoniano onde a mudança na tensão de cisalhamento é proporcional a mudança na taxa de cisalhamento. A constante de proporcionalidade μ_p é chamada de viscosidade plástica [*cP*].

Modelo fluidos de lei de potência

O modelo de lei de potência ([?]) pode ser definido como:

$$\tau = K \dot{\gamma}^n \quad (1.9)$$

O modelo de lei de potências requer também dois parâmetros para caracterização de fluidos, porém, esse modelo pode ser utilizado para representar um fluido pseudoplástico ($n < 1$), um fluido Newtoniano ($n = 1$) ou um fluido dilatante ($n > 1$).

O parâmetro K é chamado de índice de consistência do fluido [*cP*], e o parâmetro n é chamado de expoente da lei de potência ou índice de comportamento do fluxo.

A perda de pressão friccional durante a circulação de fluidos em operações de perfuração pode ser calculada através de diferentes modelos de fluido. O primeiro passo é determinar o tipo de escoamento, para isso utilizamos o número de Reynolds N_{re} , porém, para cada modelo existe uma equação para a obtenção do número de Reynolds ([?]).

Modelo de fluido Newtoniano

Para um fluido Newtoniano o número de Reynolds pode ser obtido a partir da seguinte equação:

$$N_{re} = \frac{928\rho\bar{v}d}{\mu} \quad (1.10)$$

Onde d é o diâmetro interno do revestimento ID [in] e \bar{v} é a velocidade média [ft/s] que pode ser obtida pela seguinte equação:

$$\bar{v} = \frac{q}{2.448d^2} \quad (1.11)$$

Onde q é a vazão do poço [gal/min].

O fluxo é considerado turbulento quando o número de Reynolds é maior ou igual a 2100. Após determinar o regime de fluxo podemos utilizar uma das duas equações abaixo para calcular a perda de pressão por fricção em um poço $\frac{dp_f}{dL}$ [psi/ft].

Para fluxo laminar:

$$\frac{dp_f}{dL} = \frac{\mu\bar{v}}{1500d^2} \quad (1.12)$$

Para o fluxo turbulento:

$$\frac{dp_f}{dL} = \frac{f\rho\bar{v}^2}{25.8d} \quad (1.13)$$

Onde f é chamado de fator de fricção e pode ser calculado utilizando o método numérico de Newton-Raphson.

Fluidos plásticos de Bingham

Para um fluido que se comporta como plástico de Bingham a velocidade média podem ser obtida pela Equação (1.11). O número de Reynolds pode ser obtido a partir da seguinte equação:

$$N_{re} = \frac{928\rho\bar{v}d}{\mu_p} \quad (1.14)$$

O fluxo é considerado turbulento quando o número de Reynolds é maior ou igual ao número de Reynolds crítico N_{rec} . O número de Reynolds crítico pode ser calculado pela

$$N_{rec} = \frac{1 - \frac{4}{3} \left(\frac{\tau_y}{\tau_w} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{\tau_y}{\tau_w} \right)^4}{8 \left(\frac{\tau_y}{\tau_w} \right)} N_{He} \quad (1.15)$$

Onde τ_w é a tensão de cisalhamento na parede [lbf/ft^2], N_{He} é chamado de número de Hedstrom e pode ser calculado pela seguinte fórmula:

$$N_{He} = \frac{37100 \rho \tau_y d^2}{\mu_p^2} \quad (1.16)$$

Para calcular a perda de pressão por fricção utilizamos as seguintes equações:

Para fluxo laminar:

$$\frac{dp_f}{dL} = \frac{\mu_p \bar{v}}{1500 d^2} + \frac{\tau_y}{225 d} \quad (1.17)$$

Para o fluxo turbulento podemos usar a Equação (1.13).

Fluidos de lei de potência

Para um fluido que atende ao modelo de lei de potência o número de Reynolds pode ser obtido a partir da seguinte equação:

$$N_{re} = \frac{89100 \rho \bar{v}^{2-n}}{K} \left(\frac{0.0416 d}{3 + \frac{1}{n}} \right)^n \quad (1.18)$$

A velocidade média pode ser obtida pela Equação (1.11). O fluxo é considerado turbulento quando o número de Reynolds é maior ou igual a 2100. Para calcular a perda de pressão por fricção utilizamos as seguintes equações:

Para fluxo laminar:

$$\frac{dp_f}{dL} = \frac{K \bar{v}^n \left(\frac{3 + \frac{1}{n}}{0.0416} \right)^n}{144000 d^{1+n}} \quad (1.19)$$

Para o fluxo turbulento podemos usar a Equação (1.13).

1.2.7 Perda de Pressão Friccional em um Anular

A perda de pressão friccional durante a circulação de fluidos em operações de perfuração também pode ocorrer no anular, e assim como a perda na tubulação, pode ser calculada através de diferentes modelos de fluido. Assim como vimos anteriormente o primeiro passo é determinar o tipo de escoamento, para isso utilizamos o número de Reynolds, porém para cada modelo existe uma equação para a obtenção do número de Reynolds.

Para um fluido Newtoniano o número de Reynolds pode ser obtido a partir da seguinte equação:

$$N_{re} = \frac{757\rho\bar{v}(d_2 - d_1)}{\mu} \quad (1.20)$$

Onde d_1 é o diâmetro externo do revestimento OD [in] e d_2 é o diâmetro do poço [in]. A velocidade média pode ser obtida pela equação:

$$\bar{v} = \frac{q}{2.448(d_2^2 - d_1^2)} \quad (1.21)$$

O fluxo é considerado turbulento quando o número de Reynolds é maior ou igual a 2100. Após determinar o regime de fluxo podemos utilizar uma das duas equações abaixo para calcular a perda de pressão por fricção em um anular.

Para fluxo laminar:

$$\frac{dp_f}{dL} = \frac{\mu\bar{v}}{1000(d_2 - d_1)^2} \quad (1.22)$$

Para o fluxo turbulento:

$$\frac{dp_f}{dL} = \frac{f\rho\bar{v}^2}{21.1(d_2 - d_1)} \quad (1.23)$$

Fluidos plásticos de Bingham

Para um fluido que se comporta como plástico de Bingham a velocidade média pode ser obtida pela Equações (1.21). O número de Reynolds pode ser obtido a partir da seguinte equação:

$$N_{re} = \frac{757\rho\bar{v}(d_2 - d_1)}{\mu_p} \quad (1.24)$$

O fluxo é considerado turbulento quando o número de Reynolds é maior ou igual ao número de Reynolds crítico. O número de Reynolds crítico pode ser calculado usando a Equação (1.15), mas o número de Hedstrom deve ser calculado pela seguinte equação:

$$N_{He} = \frac{24700\rho\tau_y(d_2 - d_1)^2}{\mu_p^2} \quad (1.25)$$

Para calcular a perda de pressão por fricção utilizamos as seguintes equações:

Para fluxo laminar:

$$\frac{dp_f}{dL} = \frac{\mu\bar{v}}{1000(d_2 - d_1)^2} + \frac{\tau_y}{200(d_2 - d_1)} \quad (1.26)$$

Para o fluxo turbulento podemos usar a Equação (1.23).

Para um fluido que atende ao modelo de lei de potência o número de Reynolds pode ser obtido a partir da seguinte equação:

$$N_{re} = \frac{109000\rho\bar{v}^{2-n}}{K} \left(\frac{0.0208(d_2 - d_1)}{2 + \frac{1}{n}} \right)^n \quad (1.27)$$

A velocidade média pode ser obtida pela Equação (1.21). O fluxo é considerado turbulento quando o número de Reynolds é maior ou igual a 2100. Para calcular a perda de pressão por fricção utilizamos as seguintes equações:

Para fluxo laminar:

$$\frac{dp_f}{dL} = \frac{K\bar{v}^n \left(\frac{2 + \frac{1}{n}}{0.0208} \right)^n}{144000(d_2 - d_1)^{1+n}} \quad (1.28)$$

Para o fluxo turbulento podemos usar a Equação (1.23).

Grande parte das informações apresentadas neste capítulo foram extraídas de [?] e [?].

1.2.8 Variações de Carga Axial e Deslocamento em Colunas de Poço

Durante a operação de perfuração ou completção, as colunas de revestimento e produção estão sujeitas a variações de pressão e temperatura que afetam diretamente sua integridade estrutural. Essas variações resultam em alterações na carga axial e no deslocamento da coluna, o que pode comprometer sua função caso não sejam corretamente previstas e monitoradas.

Com base em Bourgoyne et al. (2011), apresenta-se nesta seção a descrição dos principais efeitos envolvidos na variação da carga e do deslocamento axial de colunas tubulares em poços de petróleo ([?]).

Efeito da Variação de Temperatura

A variação de temperatura ao longo de uma coluna de produção causa dilatação ou contração térmica, influenciando diretamente o seu comprimento axial. Esse efeito é particularmente importante em poços profundos, onde o gradiente geotérmico e as operações de circulação de fluido podem resultar em variações térmicas significativas. O alongamento ou encurtamento da coluna por temperatura é um fenômeno reversível, assumindo-se comportamento elástico do material.

$$\Delta L_t = \int_0^L \alpha_T \Delta T(s) ds \quad (1.29)$$

$$\Delta L_t = \alpha_T \Delta T \int_0^L ds \quad (1.30)$$

$$\Delta L_t = \alpha_T L \Delta T \quad (1.31)$$

Onde α_T é o coeficiente de expansão térmica linear, L o comprimento da coluna e ΔT a variação térmica ao longo da profundidade considerada. Essa formulação é derivada da equação 7.57e apresentada por [?] (2011, p. 436).

Efeito Balão (Ballooning Effect)

O efeito balão ocorre quando há uma diferença entre a pressão interna e externa atuante sobre a parede do tubo. Essa diferença provoca uma deformação radial, que se traduz em uma variação de comprimento axial da coluna. O tubo se comporta como um cilindro elástico: ao expandir radialmente por pressão interna, ocorre também um leve alongamento longitudinal, mesmo sob regime de equilíbrio estático. Este fenômeno é tratado na equação 7.57d por [?], como parte da variação total de comprimento da coluna.

$$\Delta L_b = \int_0^L \frac{2v[\Delta P_i A_i - \Delta P_e A_e]}{EA} ds \quad (1.32)$$

$$\Delta L_b = \frac{2v[\Delta P_{in} A_{in} - \Delta P_{out} A_{out}]}{E(A_{out} - A_{in})} \int_0^L ds \quad (1.33)$$

$$\Delta L_b = \frac{2v[\Delta P_{in} A_{in} - \Delta P_{out} A_{out}]L}{E(A_{out} - A_{in})} \quad (1.34)$$

Onde v é o coeficiente de Poisson, E é o módulo de elasticidade, L o comprimento da coluna, P_{in} pressão interna, P_{out} pressão externa, A_{in} área interna e A_{out} área externa.

Variação Axial Devido à Força de Pistão (ΔF)

A força de pistão é um fenômeno mecânico relevante no comportamento de colunas de revestimento em poços de petróleo, surgindo em situações onde há descontinuidades geométricas ou barreiras à livre movimentação axial, como crossovers e packers. Este efeito resulta da aplicação de pressões desbalanceadas sobre áreas distintas ao longo da coluna, gerando uma força líquida que provoca deslocamento axial. Esse comportamento é especialmente crítico em cenários de altas pressões diferenciais, podendo contribuir para falhas estruturais se não for devidamente considerado no projeto. A formulação matemática para esse efeito encontra-se descrita por [?], em sua Equação 7.51 (p. 426).

A equação que representa o efeito pistão total sobre a coluna, considerando tanto a pressão interna quanto a externa atuando em áreas diferentes, é expressa por:

$$\Delta F = \Delta P_{in} A_{in} + \Delta P_{out} A_{out} \quad (1.35)$$

Essa equação é geral e pode ser aplicada a qualquer ponto da coluna onde haja mudança de geometria ou contenção axial.

A força de pistão produzida atua axialmente e gera uma deformação elástica ao longo da coluna, proporcional à sua rigidez axial. O deslocamento resultante pode ser determinado pela Lei de Hooke para tração/compressão axial:

$$\Delta L = \frac{(\Delta F)L}{EA_s} \quad (1.36)$$

Essa expressão permite estimar o alongamento ou encurtamento da coluna em decorrência de efeitos locais de pressão.

Força de Pistão Gerada por Packer

Quando um packer é instalado em uma coluna, ele atua como um ponto fixo que impede a movimentação axial da tubulação. Isso gera uma condição assimétrica, onde a pressão do fluido acima e abaixo do packer pode ser distinta. Essa diferença de pressão exerce uma força líquida axial sobre a coluna, caracterizando o chamado efeito pistão.

A força resultante é dada por:

$$\Delta F_{packer} = (P_{acima} - P_{abaixo})A_{packer} \quad (1.37)$$

Onde A_{packer} é a área efetiva no qual a diferença de pressão atua. Essa força provoca um deslocamento axial calculado por:

$$\Delta L_{packer} = \frac{(\Delta F_{packer})L}{EA_s} \quad (1.38)$$

Essa deformação pode impactar a integridade da coluna, principalmente em compleções profundas ou com altos diferenciais de pressão.

Força de Pistão em Crossovers Em pontos da coluna onde há mudanças geométricas, como transições entre seções com diferentes diâmetros ou espessuras, ocorre o que se denomina crossover. Nessas regiões, as áreas internas e externas variam, o que implica em diferenças de força quando submetidas à mesma pressão.

A força líquida causada por esse desbalanceamento é expressa como:

$$\Delta F_{crossover} = P_{in}(A_{in+} - A_{in-}) + P_{out}(A_{out+} - A_{out-}) \quad (1.39)$$

onde A_{in+}/A_{in-} são as áreas internas acima e abaixo do ponto de transição e A_{out+}/A_{out-} são as áreas externas imediatamente acima e abaixo.

A variação de comprimento causada por essa força é dada por:

$$\Delta L_{crossover} = \frac{(\Delta F_{crossover})L}{EA_s} \quad (1.40)$$

Essa formulação é essencial para prever deslocamentos localizados que ocorrem em colunas compostas por múltiplos trechos com diferentes especificações geométricas ou mecânicas.

Efeitos de Injeção: Coluna Livre vs. Coluna Fixa Durante operações de injeção, como na pressurização do poço por circulação de fluidos, a variação da pressão interna influencia diretamente o comportamento axial da coluna de revestimento. Essa influência depende da condição de restrição mecânica da coluna:

- **Coluna livre:** quando a extremidade inferior da coluna está desacoplada ou apenas parcialmente apoiada, permite-se sua expansão ou contração axial. Nesse cenário, parte da energia associada à variação de pressão é absorvida na forma de deformação longitudinal, reduzindo a magnitude da carga axial transmitida.
- **Coluna fixa:** quando a extremidade inferior está rigidamente ancorada ou cimentada, a coluna não pode se mover livremente. Assim, qualquer variação de pressão resulta diretamente em um acréscimo ou alívio de carga axial, sem o amortecimento promovido pelo deslocamento axial.

Essa distinção entre colunas fixas e livres é essencial para a previsão do comportamento estrutural durante operações pressurizadas ([?]).

1.3 Identificação de Pacotes – Assuntos

- Pacote engenharia de poço:
 - O pacote engenharia de poço é responsável por relacionar os pacotes mecânica dos fluidos, mecânica das rochas e equações analíticas de forma a tornar possível e coerente os resultados obtidos pela simulação.
- Pacote mecânica dos fluidos:
 - É o pacote que relaciona todas as propriedades dos fluidos e como esses fluidos se correlacionam com o poço e com outros fluidos.
- Pacote mecânica das rochas:
 - É o pacote que relaciona todas as propriedades das rochas presentes no sistema.
- Pacote janela principal:

É o pacote que compreende a interface amigável que o usuário terá contato, é o ambiente onde o usuário poderá enviar comandos para o simulador e é a partir daqui que poderá visualizar os resultados.

- Pacote modelagem gráfica:
 - Esse é o pacote responsável por montar os gráficos que são obtidos a partir dos resultados da simulação.

1.4 Diagrama de Pacotes – Assuntos

O diagrama de pacotes é apresentado na Figura 1.4.

Figura 1.4: Diagrama de pacotes

