

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE
LABORATÓRIO DE ENGENHARIA E EXPLORAÇÃO DE PETRÓLEO
CENTRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

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

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Versão 1:

NATHAN RANGEL MAGALHÃES
THAUAN FERREIRA BARBOSA;

Versão 2:

NATHAN RANGEL MAGALHÃES

Orientador: André Duarte Bueno

MACAÉ - RJ

Janeiro - 2025

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE
LABORATÓRIO DE ENGENHARIA E EXPLORAÇÃO DE PETRÓLEO
CENTRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

NATHAN RANGEL MAGALHÃES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense, como parte das exigências para obtenção do Título de Engenheiro de Exploração e Produção de Petróleo.

Orientador: André Duarte Bueno, D.Sc.

Macaé - RJ
Janeiro - 2025

Dedico este trabalho aos meus pais, que, sob o sol, lutaram para que eu pudesse caminhar na sombra; aos meus avós, que sempre me apoiaram e foram luz no meu caminho; e à minha noiva, que foi meu alicerce nos momentos em que achei que não conseguiria.

Agradecimientos

Resumo

O presente trabalho consiste no desenvolvimento de um software educacional voltado para alunos de Engenharia de Petróleo, com foco no estudo e aplicação de conceitos da Engenharia de Poços. O software integra ferramentas para visualização, análise, simulação e cálculos, reunindo os principais tópicos da ementa da disciplina.

O software foi projetado para oferecer uma experiência intuitiva, facilitando o aprendizado e aprofundamento dos usuários, podendo ser utilizado tanto por estudantes da disciplina quanto por outros interessados, independentemente de estarem no LENEP ou em outras instituições.

Este documento apresenta a estrutura e o desenvolvimento do projeto, abordando as metodologias utilizadas para garantir sua funcionalidade e aplicabilidade no ensino de Engenharia de Poços.

O software tem um cunho educacional, com o objetivo de auxiliar o ensino em engenharia de poços em diversas situações educativas aplicadas a engenharia de petróleo.

Este documento mostra a estrutura e sequência de um projeto de engenharia desenvolvido com metodologias ágeis e sistema de controle de versões (git/github), comuns no mercado de trabalho. O software pode ser obtido neste endereço:

<https://github.com/ldsc/SoftwareEducatonalEngenhariaDePoco>.

Palavras-chave: Simulador educacional. Engenharia de Poços. Visualização e análise. Simulação. Ensino de Engenharia de Petróleo.

Lista de Figuras

1.1	Diagrama de caso de uso – caso de uso geral	15
1.2	Diagrama de caso de uso específico: cálculo de pressão hidrostática e densidade	16
1.3	Diagrama de caso de uso específico - cálculo da perda de pressão devido a perda por fricção no poço e no anular	17
2.1	Diagrama de corpo livre, atuação de forças em um elemento de fluido . . .	22
2.2	Coluna composta por fluidos com diferentes características	24
2.3	Fluxo laminar de fluido Newtoniano	26
2.4	Diagrama de pacotes	32

Lista de Tabelas

1.1	Características básicas do programa	12
1.2	Caso de uso 1	14

Sumário

1	Concepção	11
1.1	Nome do sistema/produto	11
1.2	Especificação	12
1.3	Requisitos	12
1.3.1	Requisitos Funcionais	12
1.3.2	Requisitos Não Funcionais	13
1.4	Casos de Uso do Software	13
1.4.1	Diagrama de caso de uso geral	14
1.4.2	Diagrama de caso de uso específico	14
2	Elaboração	18
2.1	Análise de Domínio	18
2.2	Formulação Teórica	20
2.2.1	Termos e Unidades	20
2.2.2	Hidráulica de Perfuração	21
2.2.3	Pressão Hidrostática	22
2.2.4	Pressão Hidrostática em Colunas Com Mais de Um Tipo de Fluido	23
2.2.5	Densidade Equivalente	25
2.2.6	Modelos Reológicos de Fluidos de Perfuração	25
2.2.7	Perda de Pressão Friccional em um Tubo de Perfuração	28
2.2.8	Perda de Pressão Friccional em um Anular	29
2.3	Identificação de Pacotes – Assuntos	31
2.4	Diagrama de Pacotes – Assuntos	31
	Referências Bibliográficas	33

Capítulo 1

Concepção

Apresenta-se neste capítulo do projeto de engenharia a concepção, a especificação do sistema a ser modelado e desenvolvido.

1.1 Nome do sistema/produto

O Programa Educacional para Análise e Solução de Desafios em Engenharia de Poço foi criado em C++, empregando o modelo de programação orientada a objetos e a estrutura Qt, que facilita a criação de aplicações tanto gráficas quanto não gráficas.

Esse programa oferece várias funções, como o cálculo da pressão hidrostática em qualquer ponto do poço e a análise das propriedades médias dos fluidos, que inclui a viscosidade e a densidade. Ademais, possui a capacidade de detectar possíveis falhas nas entradas, como volumes de fluido que superam a capacidade do poço ou propriedades que estão fora dos limites esperados.

Uma função significativa é a identificação do tipo de escoamento, que pode ser tanto laminar quanto turbulento. O programa também integra três modelos reológicos—Newtoniano, Plástico de Bingham e Lei das Potências—para avaliar a queda de pressão gerada pela perda de carga friccional.

Além dessas funcionalidades, o software possibilita a interação com gráficos e o armazenamento de dados em arquivos com a extensão .dat, proporcionando uma experiência mais satisfatória para o usuário.

A Tabela 1.1 apresenta as características do software desenvolvido.

Tabela 1.1: Características básicas do programa

Nome	Software Educacional Para Análise e Solução de Problemas em Engenharia de Poço
Componentes principais	Banco de dados com métodos e propriedades da Engenharia de Poço. Algoritmo de aproximação de resultados. Interface gráfica para o plotar resultados. Saída gráfica e em arquivo .dat.
Missão	A missão do software é fornecer uma ferramenta eficiente para potencializar o aprendizado de alunos que buscam se aprofundar nos conceitos de engenharia de poço. O software oferece uma ferramenta didática para a engenharia de petróleo.

1.2 Especificação

O programa criado apresenta uma interface intuitiva que possibilita ao usuário selecionar livremente a função que deseja acessar em um determinado momento. As operações realizadas pelo programa se fundamentam em fórmulas estabelecidas na área de Engenharia de Poço, conforme a grade curricular de 2024/01 e o código LEP01353.

Primeiramente, o usuário deverá definir as características do poço e adicionar os fluidos que nele estão presentes. Essa ação pode ser feita de duas maneiras: através da importação de um arquivo .dat ou pela entrada manual dos dados na tela principal do programa. Após realizar essas configurações, o usuário poderá observar as características do poço e, a partir daí, executar simulações pertinentes ao conteúdo da matéria.

Dentre as opções oferecidas, o software possibilita calcular a pressão hidrostática em um ponto determinado do poço, criar gráficos de perfis, como o gráfico de profundidade em relação à densidade, além de determinar a perda de pressão resultante da perda de carga por fricção. Este cálculo pode ser efetuado para o fluxo dentro do poço e/ou no anular, levando em consideração três modelos reológicos disponíveis no programa: o modelo Newtoniano, o modelo de Plástico de Bingham e o modelo de Lei de Potências.

1.3 Requisitos

Apresenta-se a seguir os requisitos funcionais e não funcionais.

1.3.1 Requisitos Funcionais

Apresenta-se a seguir os requisitos funcionais

RF-01	O sistema deve conter uma base de dados confiáveis retiradas de referências bibliográficas como Mitchell & Miska (2011) e Jr. <i>et al.</i> (1991).
RF-02	O usuário poderá carregar dados da propriedade para a simulação.
RF-03	O usuário deverá ter liberdade para alterar as propriedades reológicas do poço/fluido.
RF-04	Deve permitir a exportação de simulações.
RF-05	Deve permitir cenários de simulação baseado em diferentes modelos teóricos.
RF-06	O usuário poderá comparar os resultados da simulação em diferentes modelos reológicos.
RF-07	O usuário deve ter liberdade para adicionar ou retirar simplificações das premissas do modelo.
RF-08	O usuário poderá visualizar seus resultados em um gráfico. O gráfico poderá ser salvo como imagem.

1.3.2 Requisitos Não Funcionais

RNF-01	Suas primeiras versões devem suportar os sistemas operacionais Linux e <i>Windows</i> .
RNF-02	A linguagem predominante a ser utilizada é C++.
RNF-03	Os gráficos devem ser gerados usando a biblioteca QCustom-Plot
RNF-04	Possibilitar exportação dos estudos realizados em saída de texto.
RNF-05	Apresentar interface gráfica construída com o Qt Framework

1.4 Casos de Uso do Software

Nesta seção iremos mostrar o caso de uso do software a ser desenvolvido.

1.4.1 Diagrama de caso de uso geral

O diagrama de caso de uso geral da Figura 1.1 mostra o usuário de frente a interface com as opções permitidas do simulador. Com essas opções ele poderá executar, analisar os resultados obtidos e salvar as imagens ou os dados em um arquivo PDF. As condições do caso de uso são apresentadas na Tabela 1.2.

Tabela 1.2: Caso de uso 1

Nome do caso de uso:	Simulação das propriedades de fluido e poço
Resumo/descrição:	Calcular as propriedades de fluido e poço para diferentes condições
Etapas:	<ol style="list-style-type: none">1. Adicionar propriedades do fluido2. Adicionar propriedades do poço3. Incluir diferentes tipos de fluidos no poço4. Calcular pressão hidrostática do poço5. Calcular densidade do fluido6. Calcular a queda de pressão devido a perdas por fricção6. Plotar perfis de poço7. Salvar dados em saída .dat

1.4.2 Diagrama de caso de uso específico

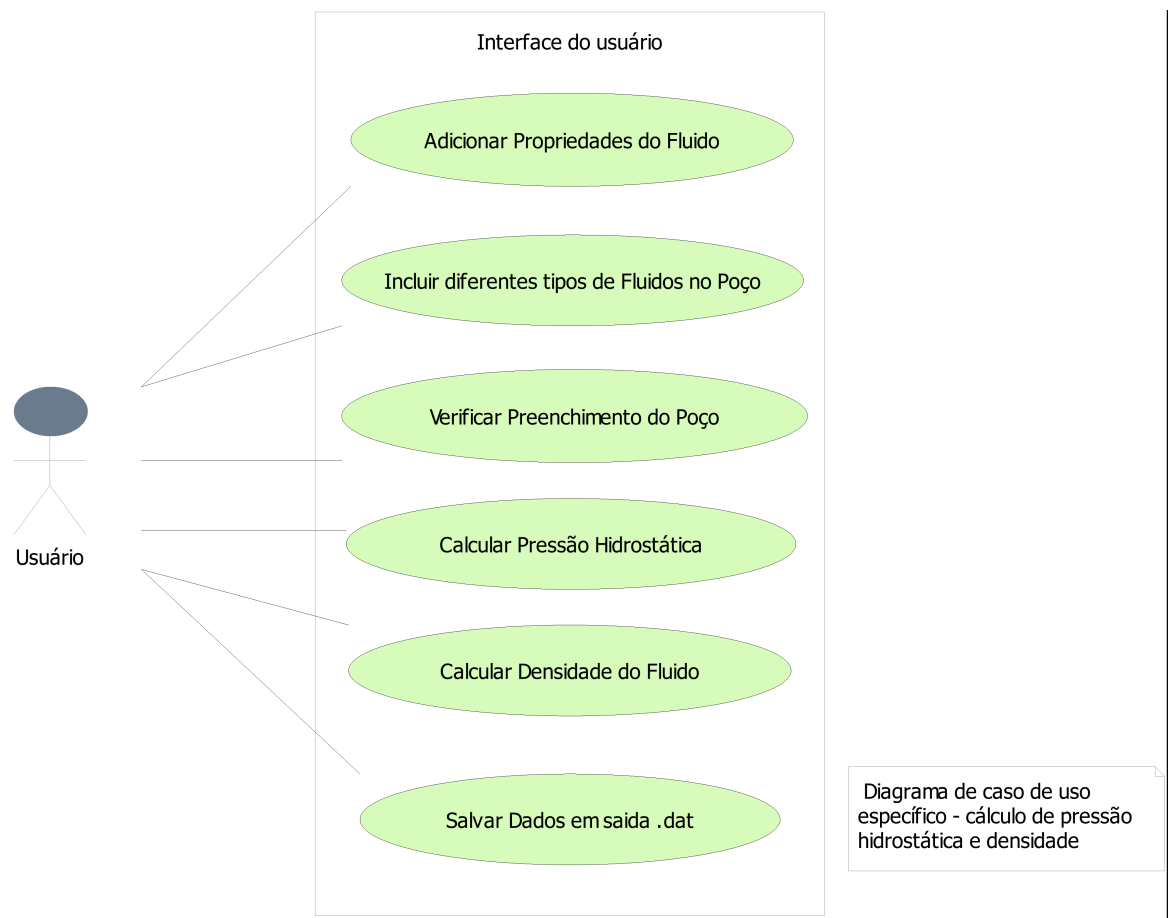
O caso de uso específico da Figura 1.2 mostra o cenário onde o usuário deseja calcular a pressão hidrostática e a densidade dos fluidos configurados no poço.

Figura 1.1: Diagrama de caso de uso – caso de uso geral



Fonte: Produzido pelo autor.

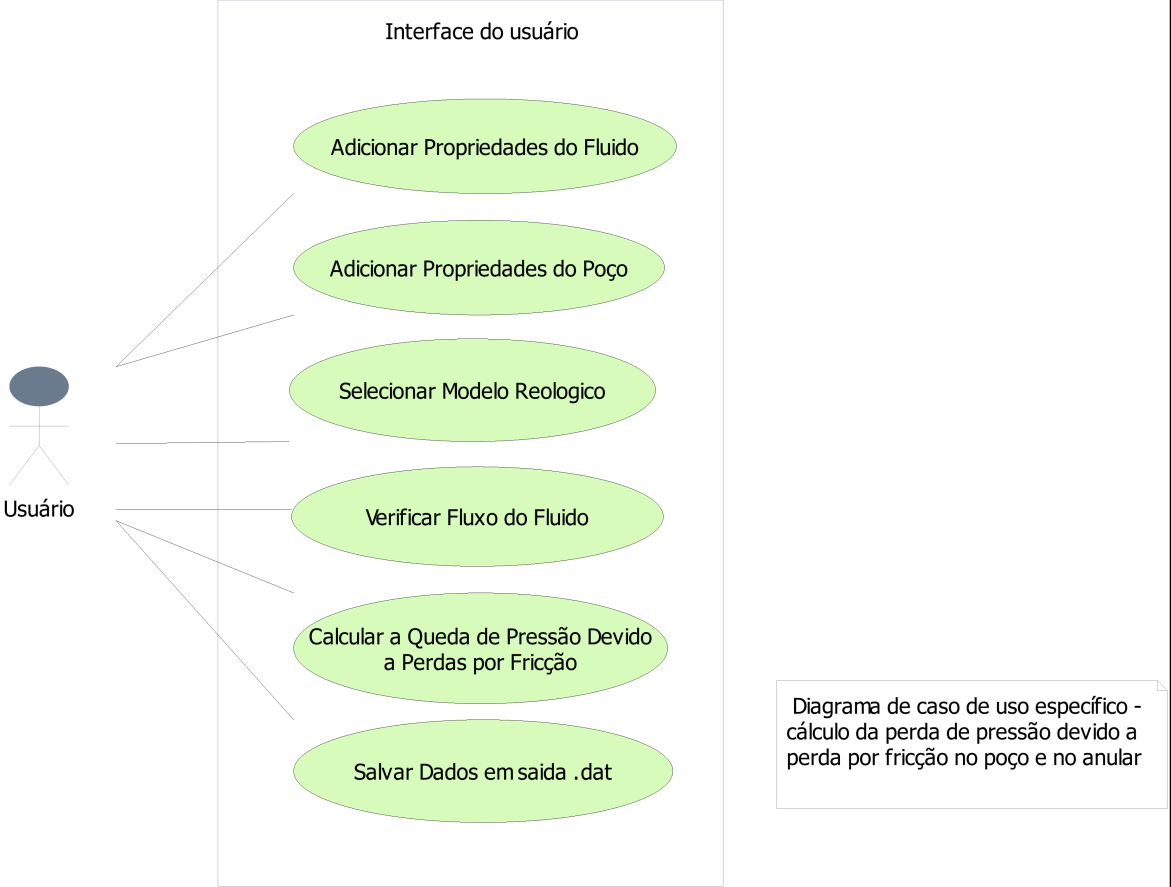
Figura 1.2: Diagrama de caso de uso específico: cálculo de pressão hidrostática e densidade



Fonte: Produzido pelo autor.

O caso de uso específico da Figura 1.3 mostra o cenário onde o usuário deseja calcular a perda de pressão devido a perda por fricção no poço e no anular.

Figura 1.3: Diagrama de caso de uso específico - cálculo da perda de pressão devido a perda por fricção no poço e no anular



Fonte: Produzido pelo autor.

Capítulo 2

Elaboração

Neste capítulo será apresentada a elaboração do simulador, que envolve o desenvolvimento teórico, as equações analíticas, identificação dos pacotes e algoritmos adicionais relacionados ao software a ser desenvolvido.

2.1 Análise de Domínio

O tópico de análise de domínio é essencial na criação de um projeto, pois é necessário compreender e definir os conceitos principais necessários para o desenvolvimento do simulador.

Este projeto está vinculado a cinco conceitos essenciais:

1. Mecânica dos fluidos:

A Mecânica dos fluidos, especialmente no que diz respeito à engenharia de perfuração, envolve a análise e a regulação do comportamento dos líquidos sob várias condições de temperatura, pressão e velocidade. Isso ocorre em contextos que consideram a influência de composições sólidas, como cascalho e cimento. A competência na perfuração de poços de petróleo é, sem dúvida, uma das áreas onde a gestão eficaz da dinâmica dos fluidos se destaca. Os líquidos utilizados para estabilizar as perfurações, controlar as pressões, remover o cascalho e aplicar o cimento têm um papel crucial nesse processo. Neste trabalho, Pode-se calcular as pressões dos fluidos em relação a uma condição padrão do poço: o estado de repouso da coluna e do fluido.

2. Mecânica das rochas:

A mecânica das rochas é crucial para a engenharia de perfuração, pois abrange como as formações rochosas se comportam e quais fatores as influenciam ao longo do poço. A interação entre as tensões no local e as rochas durante a perfuração tem um impacto direto na estabilidade do poço, na sua eficiência de produção e na eficácia

do processo de perfuração, além de afetar a integridade do revestimento. É essencial entender a mecânica que regula o comportamento das rochas para prever e se preparar para os problemas potencialmente graves do poço, como colapsos, fraturas indesejadas e falhas. A análise detalhada das rochas sob condições de compressão, cisalhamento e outras tensões é fundamental para garantir o bom funcionamento e a segurança do poço, especialmente quando lidamos com rochas frágeis ou propensas a fraturas.

3. Equações analíticas:

Equações analíticas são fundamentais para a engenharia de perfuração e fornecem representações matemáticas para facilitar a previsão e o controle de aspectos operacionais como tensões, transmissões de líquidos e dinâmica entre as rochas da área de operação. A exploração dessas equações lhes permite aos engenheiros desenvolver ativamente soluções rápidas e precisas para desafios complexos sem depender somente de simulações numéricas. A campo de perfuração, equações como a Lei de Darcy, usando a qual se modela o fluxo de líquidos em materiais porosos, e a equação de Bernoulli, quando se trata da energia do fluxo em sistemas líquidos, são usadas para modelar a circulação de laminação – não só previsão de perdas de fluidos como calcular a pressão hidrostática necessária para estabilização do poço. Além disso eles também são mais valiosos porque podem calcular as tensões nas paredes do poço para poder antecipar fraturas ou falhas na camada parede e para determinar as pressões de poro para as quais se deve estar bem atento,.

4. Programação:

O conceito de programação orientada a objetos continua a se destacar nos grandes sistemas de desenvolvimento de software devido a capacidade de agrupar o código para objetos que podem ser reutilizados, sendo esta uma das definições utilizadas para orientar a melhoria dos módulos de maneira mais simplificada. Fundado nas classes, objetos, herança, encapsulamento, polimorfismo e abstração permite gerar pequenos problemas baseados nos problemas maiores que facilitam a prestação de assistência e a manutenção. É uma facilitadora de manutenção, ampliação e escalonamento para sistemas extensos, como processadores de perfuração, simulações e guarda-costas de poço, baseada em C++ W. pois é também uma popular utilização, uma linguagem de computador que exige alta performance em perfuração e recursos de gerenciamento, principalmente no processo de perfuração, bem como uma geológica um . principalmente provedor do c++ se destaca pelas estruturas que são comuns, uma vez que proporciona POO apenas como memória, pois, é a concepção baseada na seleção de C++ implementada por alguns sistemas de bibliotecas, exemplo Qt para GUI e Gnuplot para uso de gráficos científicos.

5. Modelagem Gráfica:

A Modelagem Gráfico desempenha uma função fundamental em várias engenharias áreas, sendo a aplicação para as atividades de perfuração e exploração de petróleo a mais significativa, uma vez que cria meios icônicos e simples de compreensão e análise de informações complexas com o auxílio da exibição dos dados, para o engenheiro, por meio de gráficos 2D e 3D, mapeamento subterrâneo, e visualização de simulações de poço e reservatório, isso ajuda a traçar decisões baseadas em operação e planejamento. Criar tantos desses gráficos científicos e representações binárias complexos, por exemplo, perfis de pressão, porosidade velocity, velocidades de ondas P e S em formação geológica, utilizar a API para fazer uso do idioma Qt uma interface eficiente de integração do C++.

2.2 Formulação Teórica

2.2.1 Termos e Unidades

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

- dp é a variação de pressão [psi];
- dZ é a variação de profundidade [ft];
- ρ é a densidade do fluido [lbm/gal];
- p_0 é a constante de integração igual a pressão na superfície [psi];
- p é a pressão [psi];
- Z é a profundidade [ft];
- z é o fator de desvio de gás;
- R é constante universal dos gases [$psi.ft^3/lb - mol.^{\circ}R$];
- T é a temperatura absoluta [$^{\circ}R$];
- M é o peso molecular do gás [$lb/lb - mol$];
- ΔZ é a variação de profundidade [ft];
- g é a gravidade [ft/s^2];
- v velocidade [ft/s];
- τ é a tensão de cisalhamento exercida sobre o fluido [psi];
- μ é a viscosidade aparente [cP];

- $\dot{\gamma}$ é a taxa de cisalhamento $[1/s]$;
- τ_y é a tensão de escoamento ou o ponto de escoamento $[lb\cdot f/100\cdot sq\cdot ft]$;
- μ_p é a viscosidade plástica $[cP]$;
- K é o índice de consistência do fluido $[cP]$;
- n é o expoente da lei de potência ou o índice de comportamento do fluxo;
- N_{re} é o número de Reynolds;
- d é o diâmetro interno do revestimento ID $[in]$;
- \bar{v} é a velocidade média $[ft/s]$;
- q é a vazão do poço $[gal/min]$;
- $\frac{dp_f}{dL}$ é a perda de pressão por fricção $[psi/ft]$;
- f é o fator de fricção;
- τ_w é a tensão de cisalhamento na parede $[lb\cdot f/ft^2]$;
- N_{rec} é o número de Reynolds crítico;
- N_{He} é o número de Hedstrom;
- d_1 é o diâmetro externo do revestimento OD $[in]$;
- d_2 é o diâmetro do poço $[in]$; d_1 é o diâmetro externo do revestimento OD $[in]$;
- d_2 é o diâmetro do poço $[in]$;

2.2.2 Hidráulica de Perfuração

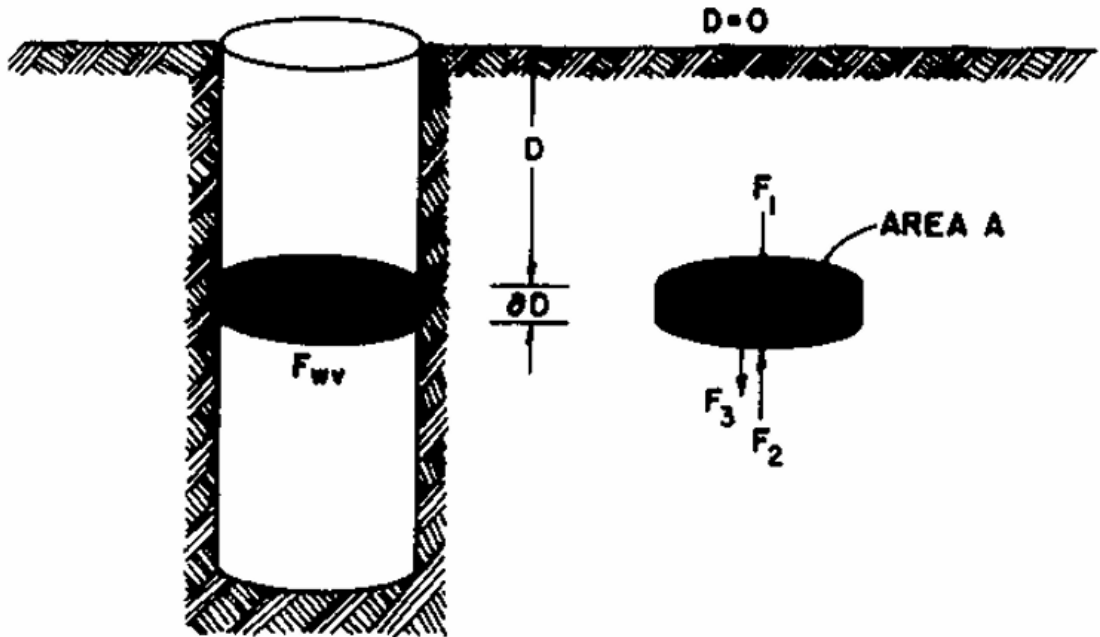
Na engenharia de perfuração um fluido de perfuração tem três funções principais: transportar cascalho, prevenir o influxo de fluidos e manter a estabilidade do poço. Para que possa cumprir tais funções o fluido depende do seu fluxo na tubulação e das pressões associadas a esse fluxo. Para que um engenheiro possa formular o melhor fluido de perfuração para cada situação específica ele deve ser capaz de prever as pressões e fluxos de fluidos no poço.

Os fluidos de perfuração podem ser bem variados em termos de composição e propriedades indo desde fluidos incompressíveis como a água até fluidos muito compressíveis como a espuma. O simulador se propõe a resolver dois tipos de problema, o primeiro deles sendo problemas estáticos que envolvem o cálculo de pressão hidrostática e o segundo deles com a movimentação de fluidos pelo tubo.

2.2.3 Pressão Hidrostática

A pressão hidrostática é a variação da pressão com a profundidade em uma coluna de fluido, que normalmente é mais facilmente calculada em condições de poço estático. Essa pressão pode ser deduzida considerando o diagrama de corpo livre mostrado na Figura 2.1.

Figura 2.1: Diagrama de corpo livre, atuação de forças em um elemento de fluido



Fonte Jr. *et al.* (1991)

A partir dessa dedução chegamos à Equação (2.1) a seguir 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*].

$$\frac{dp}{dZ} = 0.05195\rho \quad (2.1)$$

Podemos calcular a pressão hidrostática para dois tipos de fluidos, os incompressíveis e os fluidos compressíveis.

Fluidos incompressíveis

Sabemos que alguns fluidos usados como lama de perfuração tem um comportamento aproximadamente incompressível, como por exemplo o uso de água salgada, nesses casos a compressibilidade do fluido para baixas temperaturas pode ser desprezada e o peso específico pode ser considerado constante com a profundidade. De forma que a partir da integração da Equação (2.1) podemos chegar na equação hidrostática para fluidos incompressíveis:

$$p = 0.05195\rho Z + p_0 \quad (2.2)$$

Onde p_0 é a constante de integração, é igual a pressão na superfície $[psi]$, p é a pressão $[psi]$ e Z é a profundidade $[ft]$. Uma importante aplicação para essa equação é determinar a densidade correta de um fluido de perfuração, de forma que o mesmo seja capaz de evitar o influxo de fluidos da formação para o poço, evitando dessa forma *kicks* ou *blowouts*, além de não causar fraturas na formação que poderia provocar uma perda de circulação de fluido que também é indesejada Jr. *et al.* (1991).

Fluidos compressíveis

Em muitas operações temos a presença de gás em algum momento da perfuração ou completação, podendo ser injetado ou fluir de alguma formação. Calcular a pressão hidrostática de uma coluna de gás estática é um tanto quanto mais complicado devido ao fato da compressibilidade fazer com que a densidade do gás mude com a variação de pressão. O comportamento do gás é modelado utilizando a equação do gás real:

$$p = \rho z \frac{RT}{M} \quad (2.3)$$

Onde z é o fator de desvio de gás, R é constante universal dos gases $[psi.ft^3/lb - mol.^{\circ}R]$, T é a temperatura absoluta $[^{\circ}R]$ e M é o peso molecular do gás $[lb/lb - mol]$.

Realizando a combinação da equação da pressão hidrostática para fluidos incompressíveis e da equação do gás real chegamos a seguinte equação da pressão hidrostática para fluidos compressíveis:

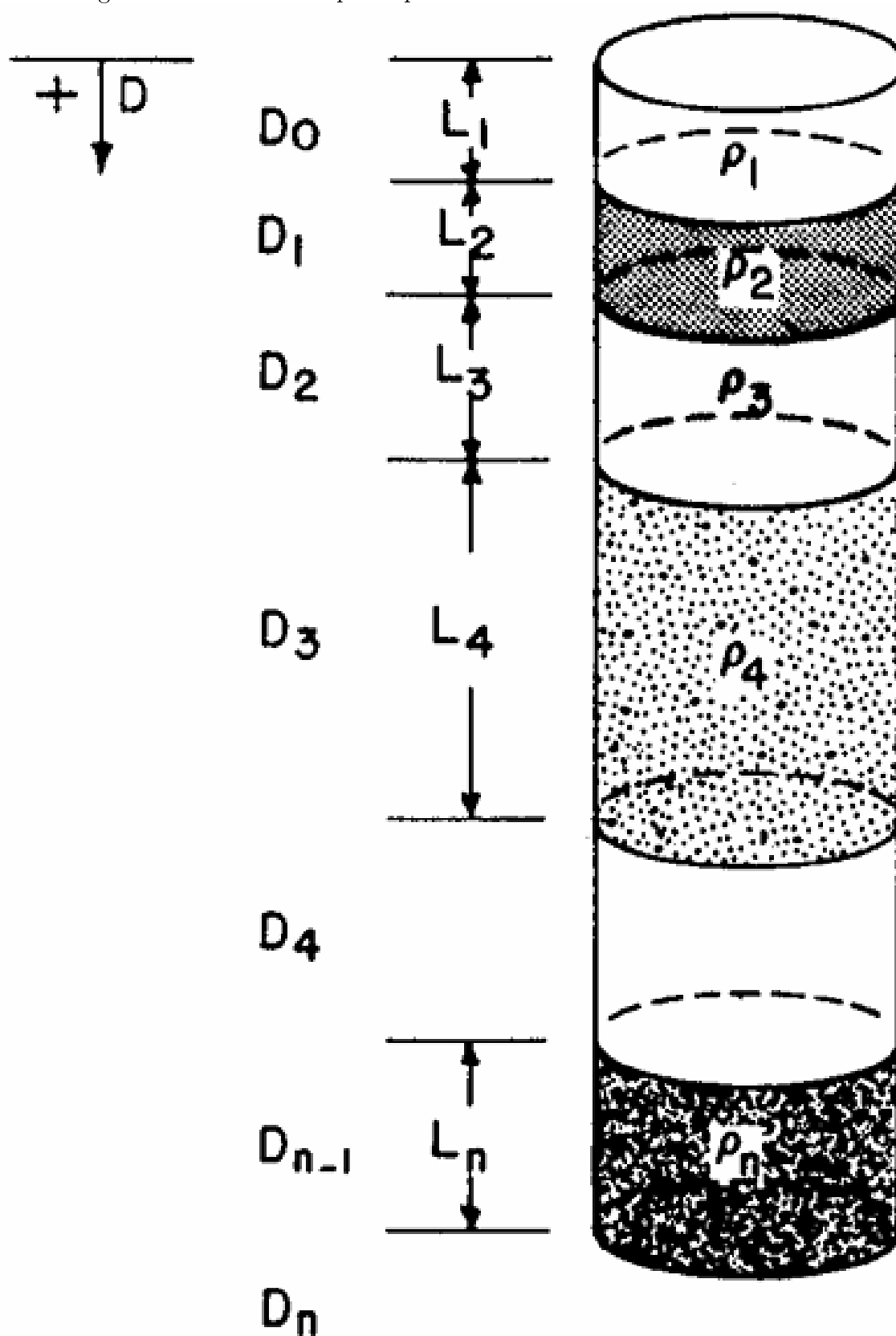
$$p = p_0 \exp \left(\frac{M \Delta Z}{1544 z T} \right) \quad (2.4)$$

Onde ΔZ é a variação de profundidade $[ft]$.

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

Outra situação muito comum durante a perfuração é a existência de seções com diferentes densidades de fluidos na coluna. Para se calcular a pressão hidrostática nesse tipo de situação precisamos determinar a variação de pressão separadamente para cada seção, como na Figura 2.2.

Figura 2.2: Coluna composta por fluidos com diferentes características



Fonte Jr. *et al.* (1991)

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

ção:

$$p = p_0 + g \sum p_i (Z_i - Z_{i-1}) + g\rho_n (Z_i - Z_{i-1}) \quad (2.5)$$

Onde g é a gravidade $[ft/s^2]$.

2.2.5 Densidade Equivalente

Em muitas situações de campo é útil comparar uma coluna com vários fluidos com uma coluna com um único fluido equivalente que esteja aberta para a atmosfera. Isso só é possível calculando a densidade da lama equivalente, definida por:

$$\rho_e = \frac{p}{0.05195Z} \quad (2.6)$$

A densidade da lama equivalente sempre deve ser calculada utilizando uma profundidade de referência específica.

2.2.6 Modelos Reológicos de Fluidos de Perfuração

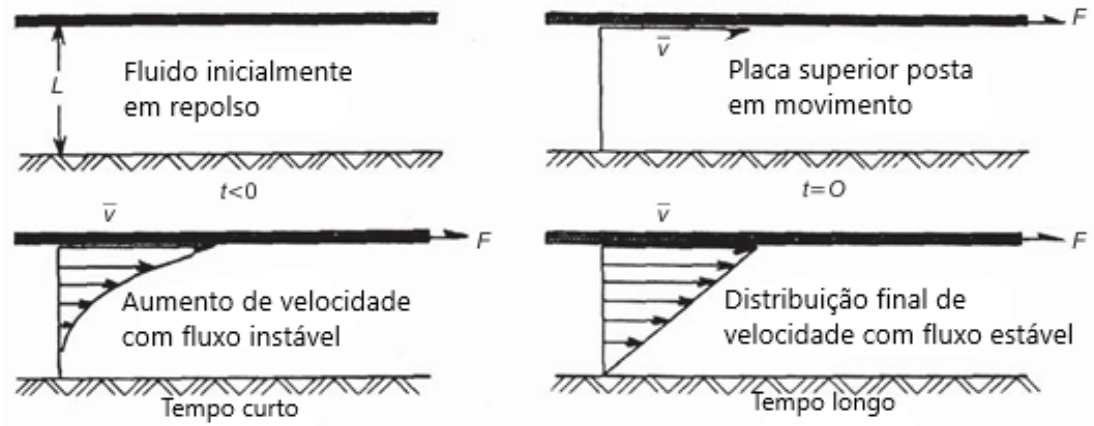
Durante o processo de perfuração de um poço muitas vezes forças viscoelásticas extremamente grandes precisam ser vencidas para que o fluido de perfuração se mova pelos conduítes longos e finos utilizados nesse processo, dessa forma se faz essencial a análise da perda de pressão por atrito. Na maioria dos casos as propriedades elásticas dos fluidos de perfuração e seus efeitos durante o fluxo de um poço são desprezíveis, sendo consideradas para o cálculo apenas as forças viscosas. Entretanto com o avanço tecnológico lamas cada vez mais complexas estão sendo formuladas de forma que os testes devem considerar as propriedades elásticas da deformação que ocorre durante o fluxo.

Para tal, se faz necessária uma descrição matemática e desenvolvimento de equações para a perda por atrito, de forma que modelos reológicos são geralmente utilizados por engenheiros de perfuração para aproximar o comportamento de um fluido, nesse projeto abordaremos três modelos sendo eles o modelo Newtoniano, o modelo plástico de Bingham e o modelo de lei de potências Mitchell & Miska (2011). É importante ressaltar a existência de outros modelos que podem futuramente ser acrescentados no aprimoramento desse projeto.

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 2.3.

Figura 2.3: Fluxo laminar de fluido Newtoniano



Adaptado de Mitchell & Miska (2011)

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 HALLIDAY & RESNICK (2009), a magnitude dessa força pode ser determinada por:

$$\frac{F}{A} = \mu \frac{v}{L} \quad (2.7)$$

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:

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (2.8)$$

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

$$\dot{\gamma} = \frac{dv}{dL} \approx \frac{v}{L} \quad (2.9)$$

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 Mitchell & Miska (2011).

Modelo de fluido Newtoniano

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

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (2.10)$$

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 (2.10) 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 Mitchell & Miska (2011) pode ser definido como:

$$\tau = \tau_y + \mu_p \dot{\gamma} \quad (2.11)$$

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 [*lbf/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 Mitchell & Miska (2011) pode ser definido como:

$$\tau = K \dot{\gamma}^n \quad (2.12)$$

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.

2.2.7 Perda de Pressão Friccional em um Tubo de Perfuração

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 Jr. *et al.* (1991).

Modelo de fluido Newtoniano

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

$$N_{re} = \frac{928\rho\bar{v}d}{\mu} \quad (2.13)$$

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:

$$\bar{v} = \frac{q}{2.448d^2} \quad (2.14)$$

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:

$$\frac{dp_f}{dL} = \frac{\mu\bar{v}}{1500d^2} \quad (2.15)$$

Para o fluxo turbulento:

$$\frac{dp_f}{dL} = \frac{f\rho\bar{v}^2}{25.8d} \quad (2.16)$$

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 (2.14). O número de Reynolds pode ser obtido a partir da seguinte equação:

$$N_{re} = \frac{928\rho\bar{v}d}{\mu_p} \quad (2.17)$$

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 seguinte fórmula:

$$N_{rec} = \frac{1 - \frac{4}{3} \left(\frac{\tau_y}{\tau_w} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{\tau_y}{\tau_w} \right)^4}{8 \left(\frac{\tau_y}{\tau_w} \right)} N_{He} \quad (2.18)$$

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

$$N_{He} = \frac{37100 \rho \tau_y d^2}{\mu_p^2} \quad (2.19)$$

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

Para fluxo laminar:

$$\frac{dp_f}{dL} = \frac{\mu_p \bar{v}}{1500 d^2} + \frac{\tau_y}{225 d} \quad (2.20)$$

Para o fluxo turbulento podemos usar a Equação (2.16).

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:

$$N_{re} = \frac{89100 \rho \bar{v}^{2-n}}{K} \left(\frac{0.0416 d}{3 + \frac{1}{n}} \right)^n \quad (2.21)$$

A velocidade média pode ser obtida pela Equação (2.14). 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:

$$\frac{dp_f}{dL} = \frac{K \bar{v}^n \left(\frac{3 + \frac{1}{n}}{0.0416} \right)^n}{144000 d^{1+n}} \quad (2.22)$$

Para o fluxo turbulento podemos usar a Equação (2.16).

2.2.8 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.

Modelo de fluido Newtoniano

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

$$N_{re} = \frac{757\rho\bar{v}(d_2 - d_1)}{\mu} \quad (2.23)$$

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:

$$\bar{v} = \frac{q}{2.448(d_2^2 - d_1^2)} \quad (2.24)$$

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:

$$\frac{dp_f}{dL} = \frac{\mu\bar{v}}{1000(d_2 - d_1)^2} \quad (2.25)$$

Para o fluxo turbulento:

$$\frac{dp_f}{dL} = \frac{f\rho\bar{v}^2}{21.1(d_2 - d_1)} \quad (2.26)$$

Fluidos plásticos de Bingham

Para um fluido que se comporta como plástico de Bingham a velocidade média pode ser obtida pela Equações (2.24). O número de Reynolds pode ser obtido a partir da seguinte equação:

$$N_{re} = \frac{757\rho\bar{v}(d_2 - d_1)}{\mu_p} \quad (2.27)$$

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 (2.18), mas o número de Hedstrom deve ser calculado pela seguinte equação:

$$N_{He} = \frac{24700\rho\tau_y(d_2 - d_1)^2}{\mu_p^2} \quad (2.28)$$

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

Para fluxo laminar:

$$\frac{dp_f}{dL} = \frac{\mu\bar{v}}{1000(d_2 - d_1)^2} + \frac{\tau_y}{200(d_2 - d_1)} \quad (2.29)$$

Para o fluxo turbulento podemos usar a Equação (2.26).

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:

$$N_{re} = \frac{109000 \rho \bar{v}^{2-n}}{K} \left(\frac{0.0208 (d_2 - d_1)}{2 + \frac{1}{n}} \right)^n \quad (2.30)$$

A velocidade média pode ser obtida pela Equação (2.24). 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:

$$\frac{dp_f}{dL} = \frac{K \bar{v}^n \left(\frac{2 + \frac{1}{n}}{0.0208} \right)^n}{144000 (d_2 - d_1)^{1+n}} \quad (2.31)$$

Para o fluxo turbulento podemos usar a Equação (2.26).

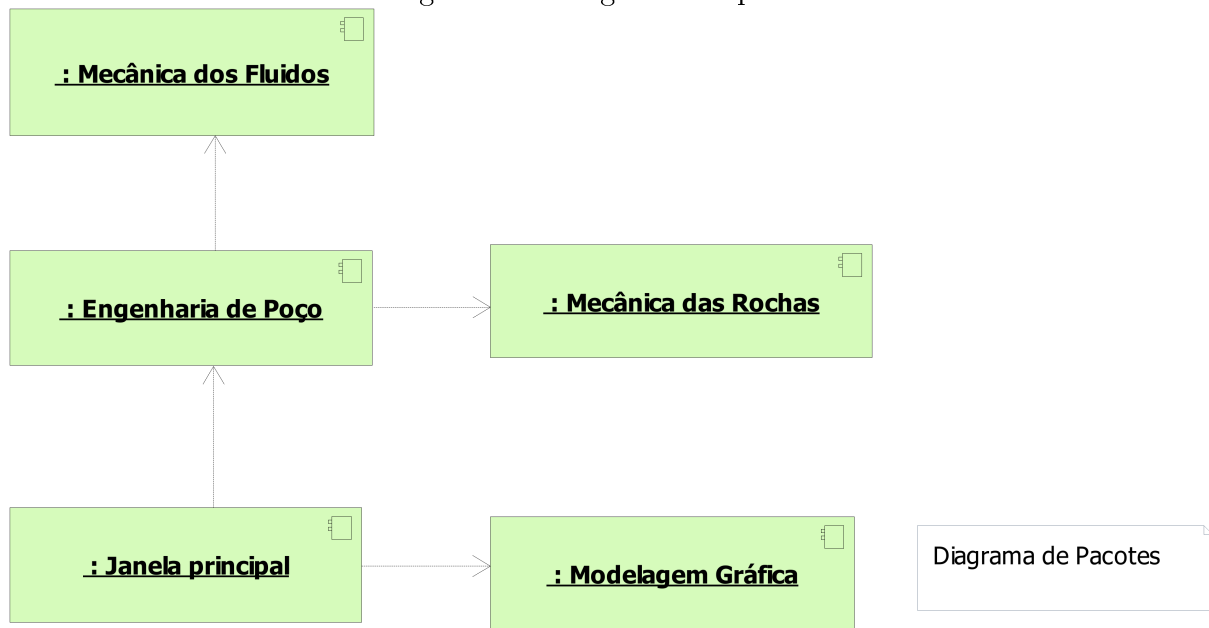
2.3 Identificação de Pacotes – Assuntos

- 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 equações analíticas: Neste pacote estão agrupadas todas as equações analíticas que são aplicadas durante a simulação
- Pacote modelagem gráfica: Esse é o pacote responsável por montar os gráficos que são obtidos a partir dos resultados da simulação.

2.4 Diagrama de Pacotes – Assuntos

O diagrama de pacotes é apresentado na Figura 2.4.

Figura 2.4: Diagrama de pacotes



Referências Bibliográficas

- HALLIDAY, David, & RESNICK, Jearld Walker. 2009. *Fundamentos de física, volume 2: gravitação, ondas e termodinâmica*. 26
- Jr., Adam T. Bourgoyne, Millheim, Keith E., Chenevert, Martin E., & Jr., F. S. Young. 1991. *Applied drilling engineering*. Society of Petroleum Engineers. 13, 22, 23, 24, 28
- Mitchell, Robert F., & Miska, Stefam Z. 2011. *Fundamentals of drilling engineering*. Society of Petroleum Engineers. 13, 25, 26, 27