

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO
LABORATÓRIO DE ENGENHARIA E EXPLORAÇÃO DE PETRÓLEO

SOFTWARE EDUCACIONAL PARA ANÁLISE
E SOLUÇÕES DE PROBLEMAS EM ENGENHARIA DE POÇOS

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Versão 1

THAUAN FERREIRA BARBOSA
NATHAN RANGEL MAGALHÃES

Versão 2

NATHAN RANGEL MAGALHÃES

CONCEPÇÃO

Objetivo e Nome do Sistema

Desenvolver um software educacional em C++ para a análise e solução de desafios em Engenharia de Poço, proporcionando ferramentas para cálculo de pressão hidrostática, análise reológica de fluidos e identificação do regime de escoamento. O programa visa facilitar a simulação de cenários operacionais, detectar inconsistências nos dados de entrada e permitir a visualização gráfica dos resultados, promovendo uma experiência interativa e didática para os usuários.

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.

CONCEPÇÃO

Especificação

Linguagem e Estrutura

- Desenvolvido em C++ com Qt para interface gráfica e não gráfica.

Principais funcionalidades

- Cálculo da Pressão Hidroestática
- Análise de Viscosidade e Densidade dos Fluidos.
- Identificação do Tipo de Escoamento
- Modelos Reológicos: Newtoniano, Plástico de Bingham e De Potência
- Cálculo de perda de carga por fricção no poço e anular

Interação e Armazenamento

- Importação ou entrada manual de dados
- Visualização de gráficos e armazenamento de arquivos .dat

Base Teórica

- Fórmulas de Engenharia de Poço conforme a grade 2024/01 e código LEP01353

CONCEPÇÃO

Requisitos

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.

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

CONCEPÇÃO

Diagrama de Caso de uso

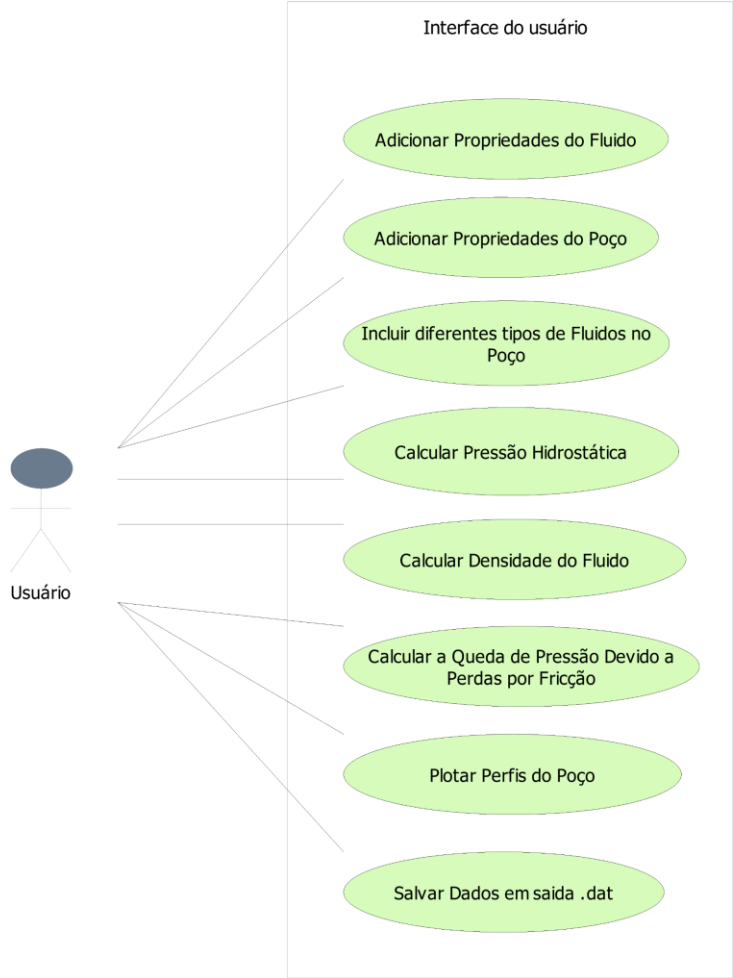


Diagrama de caso de uso geral

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:	1. Adicionar propriedades do fluido 2. Adicionar propriedades do poço 3. Incluir diferentes tipos de fluidos no poço 4. Calcular pressão hidrostática do poço 5. Calcular densidade do fluido 6. Calcular a queda de pressão devido a perdas por fricção 6. Plotar perfis de poço 7. Salvar dados em saída .dat

ELABORAÇÃO

Análise domínio

Mecânica dos Fluidos

Estuda o comportamento dos fluidos na perfuração, permitindo o controle de pressões, remoção de cascalho e estabilização do poço.

Equações Analíticas

Utiliza modelos matemáticos, como a Lei de Darcy e a equação de Bernoulli, para prever fluxos, tensões e pressões no poço.

Modelagem gráfica

Facilita a análise e a tomada de decisão na engenharia de petróleo por meio de gráficos, mapas subterrâneos e simulações 3D.

Mecânica das Rochas

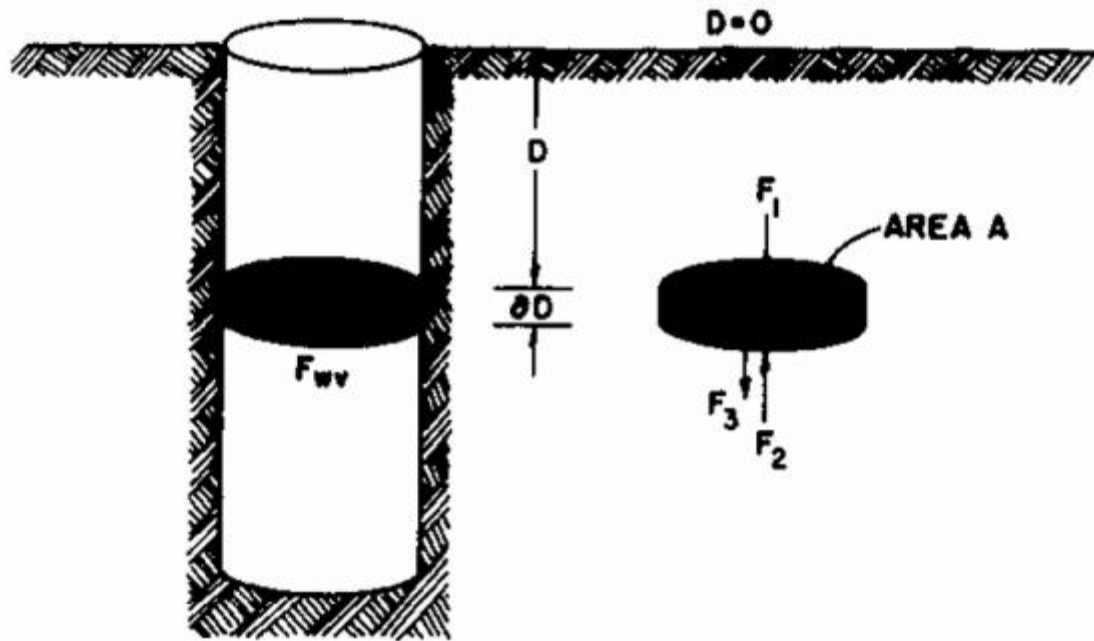
Analisa a interação das tensões com as formações rochosas para garantir a estabilidade e segurança do poço durante a perfuração.

Programação

A programação orientada a objetos em C++ otimiza simulações, controle de processos e desenvolvimento de ferramentas para engenharia de perfuração.

ELABORAÇÃO

Pressão Hidroestática



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 hidroestática para dois tipos de fluidos, os incompressíveis e os fluidos compressíveis.

Fluidos incompressíveis

$$p = 0.05195\rho Z + p_0$$

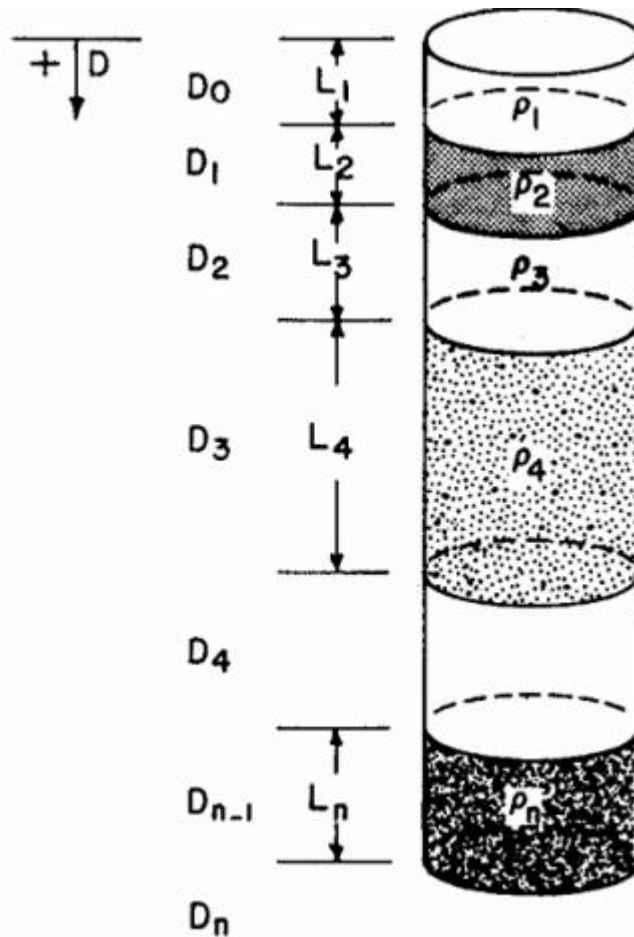
Fluidos compressíveis

$$p = \rho z \frac{RT}{M}$$

$$p = p_0 \exp\left(\frac{M\Delta Z}{1544zT}\right)$$

ELABORAÇÃO

Pressão Hidroestática



Fonse Jr., et al., [1991]

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,

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

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:

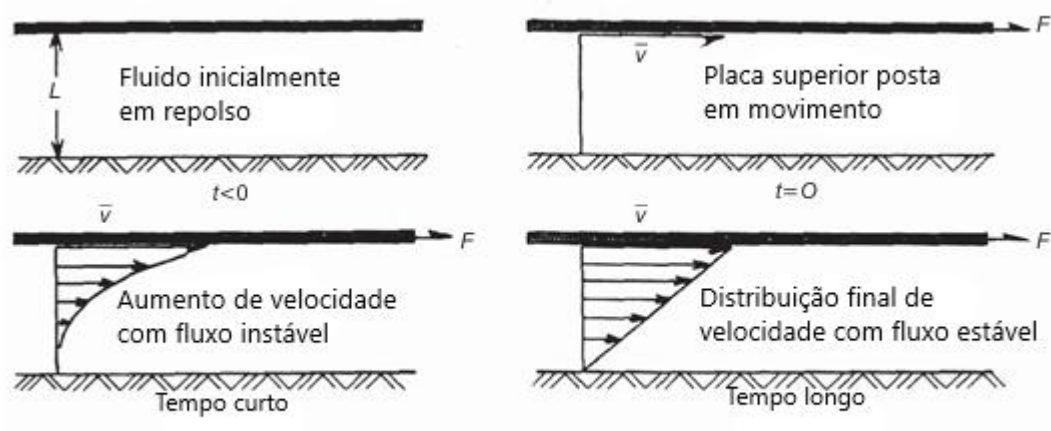
$$\rho_e = \frac{p}{0.05195Z}$$

ELABORAÇÃO

Modelos Reológicos

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 .



Adaptado de Mitchell & Miska (2011)

$$\frac{F}{A} = \mu \frac{v}{L} \quad \tau = \frac{F}{A} \quad \dot{\gamma} = \frac{dv}{dL} \approx \frac{v}{L}$$

Modelo de fluido Newtoniano

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

$$\tau = \mu \dot{\gamma}$$

Modelo de fluidos plásticos de Bingham

O modelo plástico de Bingham Mitchell & Miska (2011) pode ser definido como:

$$\tau = \tau_y + \mu_p \dot{\gamma}$$

Modelo fluidos de lei de potência

O modelo de lei de potência Mitchell & Miska (2011) pode ser definido como:

$$\tau = K \dot{\gamma}^n$$

ELABORAÇÃO

Perda de Pressão Friccional

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:

$$N_{re} = \frac{928\rho\bar{v}d}{\mu}$$

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:

$$\bar{v} = \frac{q}{2.448d^2}$$

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:

$$\frac{dp_f}{dL} = \frac{\mu\bar{v}}{1500d^2}$$

Para o fluxo turbulento:

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

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

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

ELABORAÇÃO

Perda de Pressão Friccional

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:

$$N_{re} = \frac{928\rho\bar{v}d}{\mu_p}$$

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:

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

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:

$$N_{He} = \frac{37100\rho\tau_y d^2}{\mu_p^2}$$

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

Para fluxo laminar:

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

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

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

ELABORAÇÃO

Perda de Pressão Friccional

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:

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

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:

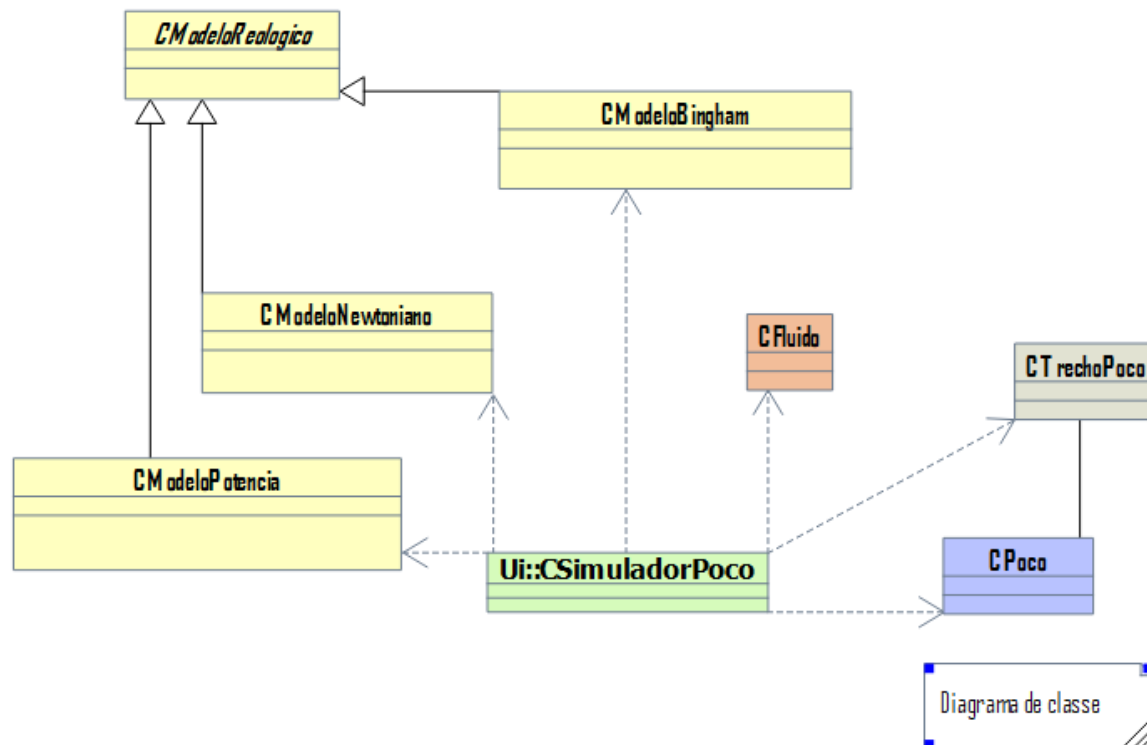
$$\frac{dp_f}{dL} = \frac{K \bar{v}^n \left(\frac{3 + \frac{1}{n}}{0.0416} \right)^n}{144000 d^{1+n}}$$

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

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

AOO – Análise Orientada a Objeto

Diagramas de Classes



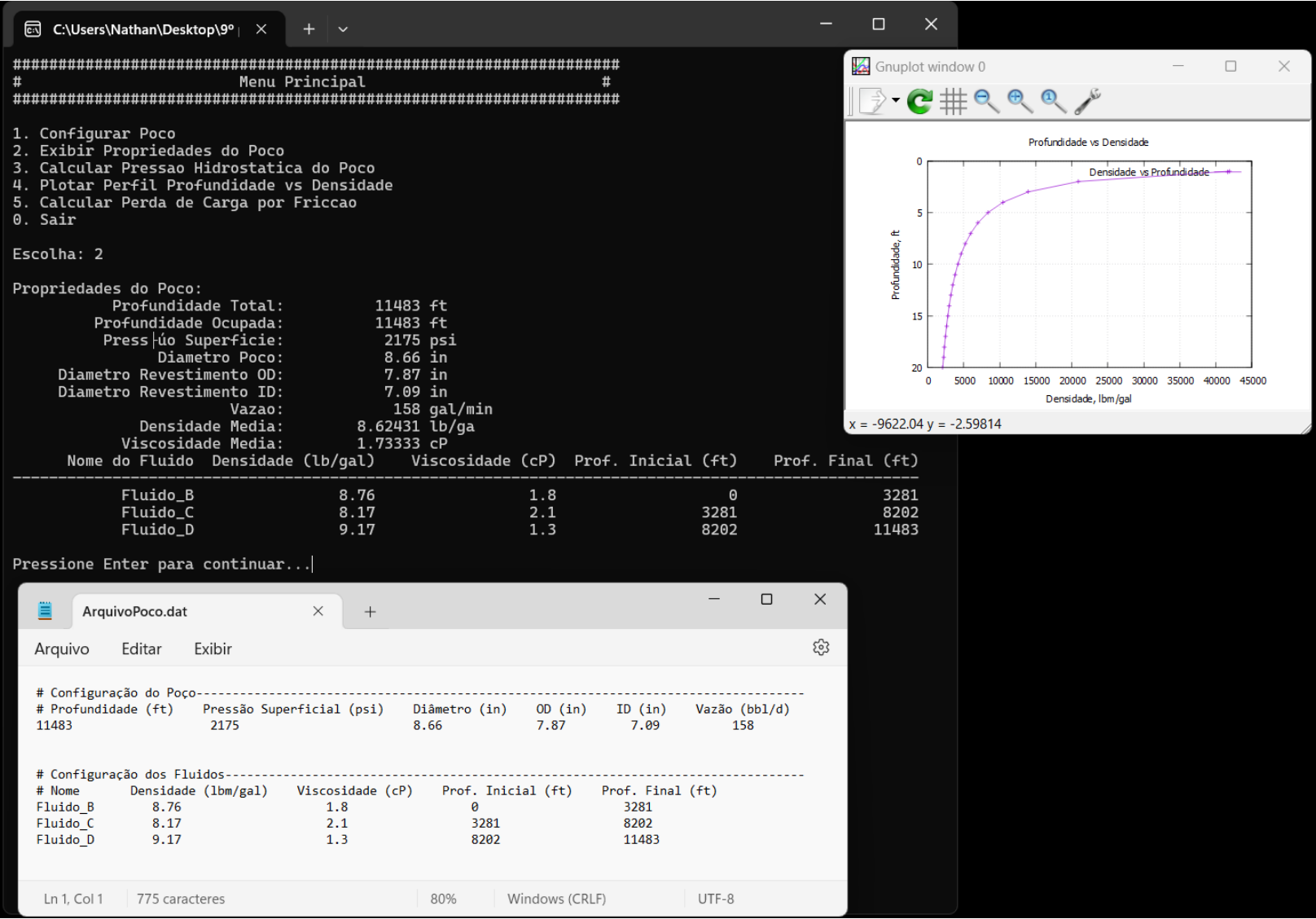
Dicionário de Classes

O software é composto por um total de 10 classes:

- **CSimuladorPoco:** Classe responsável por integrar todas as funcionalidades do simulador de interface Gráfica.
- **CPoco:** Classe responsável por fornecer os valores e propriedades do poço.
- **CTrechoPoco:** Classe herdeira responsável por subdividir as dif poço, permitindo uma análise detalhada das seções.
- **CFluido:** Classe responsável por prover os valores e propriedades do fluid
- **CModeloReologico:** Classe responsável pelos modelos utilizados para calcular a perda de pressão friccional.
- **CModeloNewtoniano:** Classe responsável por calcular perda de pressão friccional para o modelo Newtoniano.
- **CModeloBingham:** Classe responsável por calcular perda de pressão friccional para o modelo plástico de Bingham.
- **CModeloPotencia:** Classe responsável por calcular perda de Δp para o modelo lei de potência.

Ciclos de Planejamento/Detalhamento

Versão protótipo v0.1



Ciclos de Planejamento/Detalhamento

Versão protótipo v0.2



Menu Principal

1. Configurar POCO
2. Exibir Propriedades do POCO
3. Calcular Pressao Hidrostatica do POCO
4. Plotar Perfil Profundidade vs Densidade
5. Calcular Perda de Carga por Friccao
6. Configurar preferencias de armazenamento
0. Sair

Escolha: 6

=== Configura|*|ção da Interface CLI ===
1. Armazenar propriedades do poco: True
2. Armazenar historico de presao hidroestatica do poco: True
3. Armazenar historico de perda de carga do poco: True

Escolha a configura|*|ção para alternar (1, 2, 3) ou 0 para sair: |

1. Configurar POCO
2. Exibir Propriedades do POCO
3. Calcular Pressao Hidrostatica do POCO
4. Plotar Perfil Profundidade vs Densidade
5. Calcular Perda de Carga por Friccao
6. Configurar preferencias de armazenamento
0. Sair

Escolha: 2

Propriedades do POCO:
Nome POCO: 7-TES-01-RJS
Profundidade Total: 11483 ft
Profundidade Ocupada: 11483 ft
Pressao Superfície: 2175 psi
Diametro POCO: 8.66 in
Diametro Revestimento OD: 7.87 in
Diametro Revestimento ID: 7.09 in

ArquivoPoco-7-TES-01-RJS.dat

Arquivo Editar Exibir

Propriedades do POCO:
Nome POCO: 7-TES-01-RJS
Profundidade Total: 11483 ft
Profundidade Ocupada: 11483 ft
Pressao Superfície: 2175 psi
Diametro POCO: 8.66 in
Diametro Revestimento OD: 7.87 in
Diametro Revestimento ID: 7.09 in
Vazao: 150 gal/min
Densidade Média: 8.62431 lb/gal
Viscosidade Média: 1.73333 cP

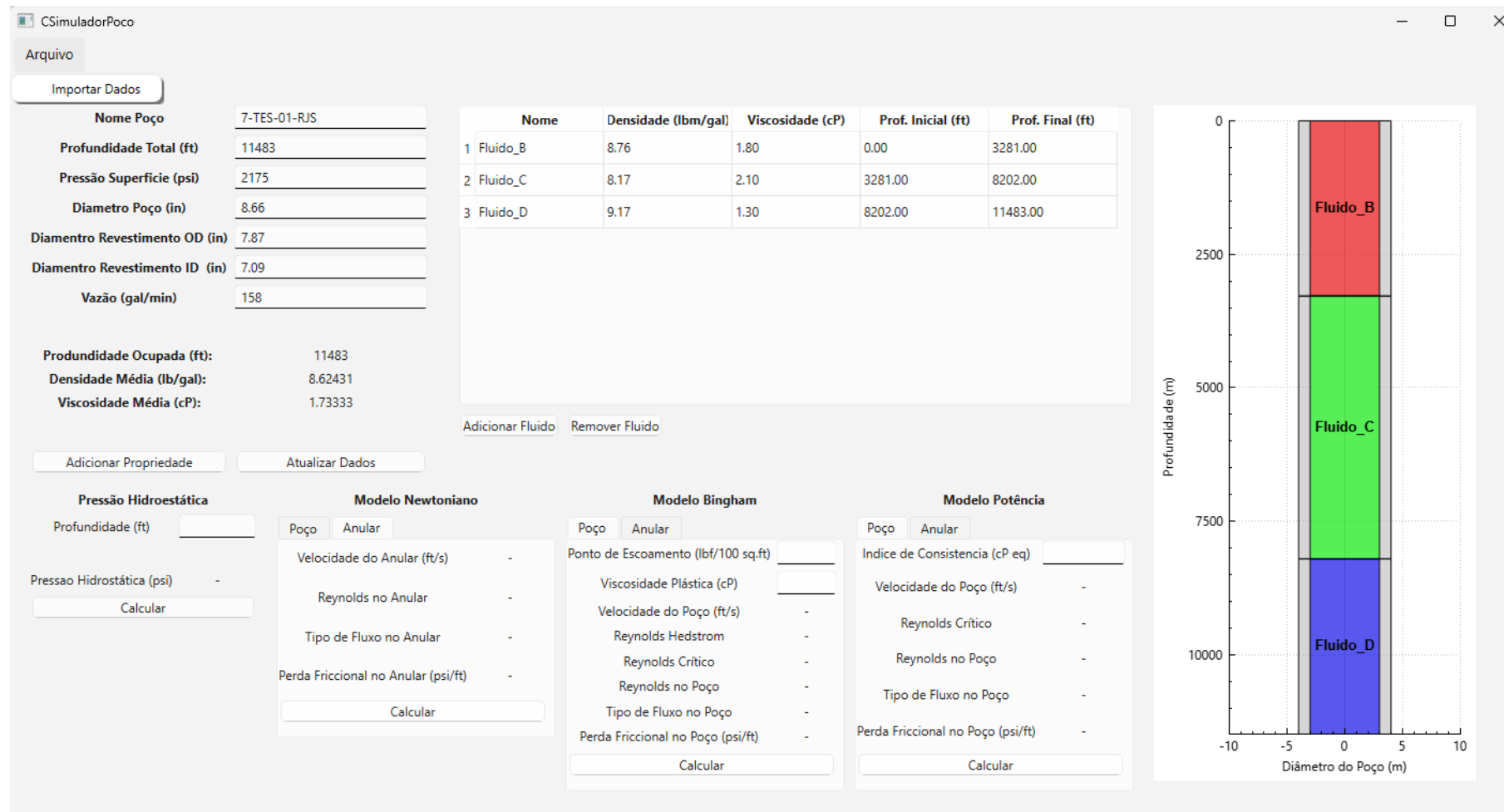
Nome do Fluido	Densidade (lb/gal)	Viscosidade (cP)	Prof. Inicial (ft)	Prof. Final (ft)
Fluido_B	8.76	1.8	0	3281
Fluido_C	8.17	2.1	3281	8202
Fluido_D	9.17	1.3	8202	11483

Historico de operacoes:

O Valor da Perda de Friccao no POCO para o Modelo Newtoniano: 0.00543119 psi/ft
O Valor da Perda de Friccao no Anular para o Modelo Newtoniano: 0.00698677 psi/ft
O Valor da Perda de Friccao no POCO para o Modelo Bingham: 0.0349811 psi/ft
O Valor da Perda de Friccao no POCO para o Modelo Newtoniano: 0.00543119 psi/ft
O Valor da Perda de Friccao no Anular para o Modelo Newtoniano: 0.00698677 psi/ft
O Valor da Perda de Friccao no POCO para o Modelo Newtoniano: 0.00543119 psi/ft
O Valor da Perda de Friccao no Anular para o Modelo Newtoniano: 0.00698677 psi/ft
O Valor da Perda de Friccao no POCO para o Modelo Bingham: 0.0349811 psi/ft
O Valor da Perda de Friccao no Anular para o Modelo Bingham: 0.0619273 psi/ft
O Valor da Perda de Friccao no POCO para o Modelo Potencia: 0.0137365 psi/ft
O Valor da Perda de Friccao no Anular para o Modelo Potencia: 0.0201701 psi/ft

Ciclos de Planejamento/Detalhamento

Versão estável



Ciclos de Planejamento/Detalhamento

Versão estável

Opção para importação dos dados ao invés do preenchimento manual

Campo de preenchimento das propriedades dos Fluidos

Campo de preenchimento das propriedades do poço

Simular a pressão hidrostática do cenário

Simular a pressão Friccional de diferentes modelos reológicos

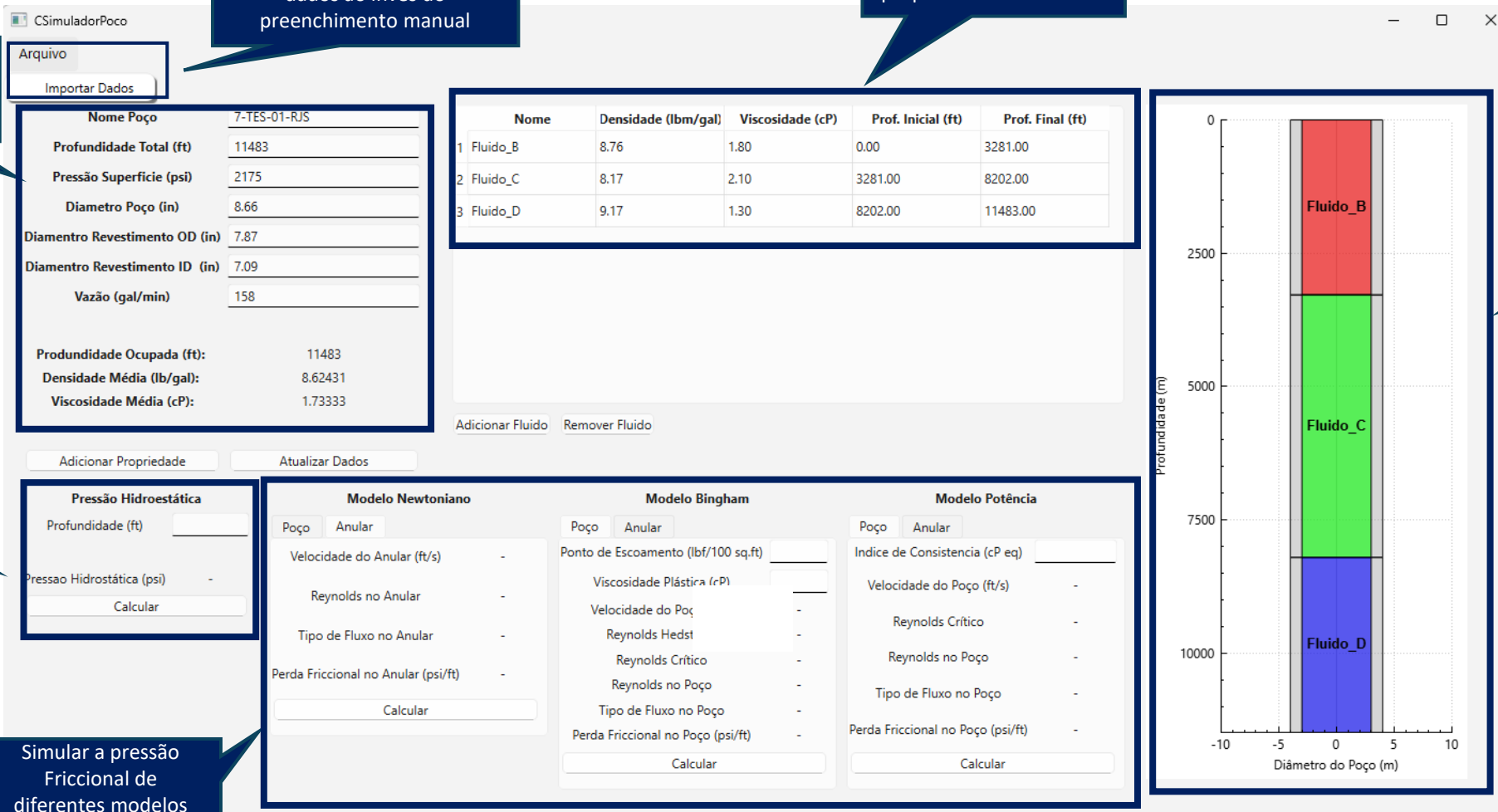


Gráfico que representa o poço de acordo com as propriedades inseridas

OBRIGADO!