



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA – CT
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO – DPET

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA
COMPUTACIONAL PARA SIMULAÇÃO DE OPERAÇÕES DE
CIMENTAÇÃO PRIMÁRIA**

Leonardo Asfora de Oliveira

Orientador: Prof. Dr. Lindemberg de Jesus Nogueira Duarte

NOVEMBRO DE 2014

Leonardo Asfora de Oliveira

**DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA
COMPUTACIONAL PARA SIMULAÇÃO DE OPERAÇÕES DE
CIMENTAÇÃO PRIMÁRIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do Grau em Engenharia de Petróleo pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Aprovado em _____ de _____ de 2014

Prof. Dr. Lindemberg de Jesus Nogueira Duarte

Orientador – UFRN

Prof. Msc. Gustavo Arruda Ramalho Lira

Membro Examinador – UFRN

Prof. Dr. Julio Cezar de Oliveira Freitas

Membro Examinador – UFRN

AGRADECIMENTOS

À toda a minha família, pelo apoio à mim concedido em todos os momentos de minha vida.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Lindemberg de Jesus Nogueira Duarte, por seus ensinamentos, conselhos, disponibilidade e por me ajudar a realizar mais um de meus trabalhos acadêmicos. Agradeço também pela oportunidade a mim dada de trabalhar em algo tão prazeroso e gratificante.

Ao Prof. Dr. Flávio Medeiros, pelas sugestões e materiais cedidos à melhoria do programa,

Ao Prof. Gustavo Lira, que apesar de suas diversas atribuições e tempo extremamente limitado, sempre me recebeu com paciência para sanar dúvidas cruciais a realização deste trabalho.

Ao meu tio, George Bechara Asfora, pela disponibilidade que sempre me ofereceu nos momentos de dúvida.

Aos meus amigos de infância Senival, Felipe, Alexandre, João Carlos e Lucas Daniel,

Aos meus amigos de faculdade João Maria, Eduardo Barros, Vinicius, Yago, Rodrigo e Diego,

Enfim, a todas as pessoas que tiveram direta ou indiretamente algo a acrescentar a este trabalho, meu muito obrigado.

RESUMO

A cimentação primária é uma técnica utilizada para posicionar pastas de cimento no espaço anular após a descida dos revestimentos no poço. O seu correto planejamento é de fundamental importância, uma vez que há somente uma chance de realizar tal procedimento com sucesso. Este trabalho descreve e apresenta o desenvolvimento de uma ferramenta computacional em Microsoft Excel 2013, através de recursos do *Visual Basic For Applications* (VBA), que permite estimar as pressões dinâmicas em frente às formações durante operações de cimentação primária. Além disto, ele permite o planejamento destas operações, uma vez que o usuário pode modificar vários parâmetros de projeto, tais como: vazão de bombeio, propriedades dos fluidos e suas disposições. A partir de dados dos revestimentos envolvidos, das profundidades de assentamento dos mesmos, das propriedades das formações (gradientes de poros e fratura), das propriedades físico-químicas dos fluidos, dos seus volumes bombeados e da vazão, o programa gera curvas de pressão em função do tempo ou volume bombeado em profundidades de interesse. A partir de tais informações, é possível identificar possíveis problemas relacionados à fratura das formações ou a ocorrências de *kick*, podendo o projeto ser então considerado adequado ou não. Além disto, o programa possui alguns alertas e checagens, que avisam ao usuário de possíveis erros nos dados de entrada ou de critérios de projeto que não estão sendo atendidos. Para a realização dos cálculos foi desenvolvida uma metodologia a fim modelar o deslocamento dos diversos fluidos pelo interior do poço, de tal forma que as suas posições e comprimentos de coluna em qualquer instante de tempo possam ser determinadas. Para o cálculo das perdas por fricção durante o escoamento, foram utilizadas correlações empíricas de escoamento monofásico para os diversos modelos reológicos de fluido. Os resultados obtidos foram comparados com os de um simulador comercial para a validação do programa, e os resultados foram considerados satisfatórios.

Palavras – Chave: Ferramenta computacional, Cimentação Primária, Pressões Dinâmicas, Planejamento.

ABSTRACT

Primary cementing is a technique used to position cement slurries in the annulus after the well is cased up to the required depth. Planning a primary cement job correctly is very important, since there is only one chance to succeed. This work describes and presents the development of a computational tool in Microsoft Excel 2013, using Visual Basic for Applications (VBA) resources, that allows estimatives of dynamic pressures on formations during primary cementing jobs. Moreover, it also allows planning these operations, since the user can modify several important parameters, such as rate of displacement, fluids properties and arrangements. By using data such as casing specifications and shoe depths, formations properties (pore and fracture gradients), physical and chemical properties of displaced fluids and their volumes as well as the displacement rate, the program generates pressure curves as a function of time or displaced volume in points of interest. Based on this information, it is possible to identify possible problems related to formations fractures or kick occurrences, considering the project as satisfactory or not. In addition, the computational tool has some checks and alerts that warn the user of possible errors in the input data or design criteria that are not being met. As for the calculations, a methodology was developed for modelling the displacement of these various fluids in the wellbore, so that their positions and lengths at any instant of time could be determined. In order to calculate frictional losses during the flow process, single-phase flow correlations for different types of rheological models were used. The results obtained were compared with those of a commercial simulator used in the oil industry, and they were considered to acceptable.

Keywords: Computational tool, primary cementing, dynamic pressures, planning.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVO GERAL	13
2. ASPECTOS TEÓRICOS	16
2.1 REGIMES DE FLUXO	16
2.2 MODELOS REOLÓGICOS	17
2.2.1 Fluido Newtoniano	18
2.2.2 Fluidos não Newtonianos	18
2.3 PERDAS POR FRICÇÃO	20
2.4 CORRELAÇÕES PARA O FATOR DE ATRITO.....	21
2.4.1 Fluidos Newtonianos	21
2.4.2 Fluidos de Potência	22
2.4.2 Fluidos de Bingham	23
2.5 TEMPERATURA DE CIRCULAÇÃO NO FUNDO DO POÇO	23
2.6 A JANELA OPERACIONAL.....	24
2.7 CIMENTAÇÃO PRIMÁRIA.....	26
2.8 DESENVOLVIMENTO DA FORÇA GEL ESTÁTICA.....	29
2.9 ESTIMATIVA DAS PRESSÕES	30
2.10 A QUEDA LIVRE DOS FLUIDOS (<i>FREE FALL</i>).....	32
2.11 PRESSÃO PARA ELEVAR O REVESTIMENTO.....	35
3 DESENVOLVIMENTO DO PROGRAMA	38
3.1 A FERRAMENTA COMPUTACIONAL	38
3.1.1 A Tela Inicial	39
3.1.2 Tela dos Revestimentos.....	40
3.1.3 Tela do Poço	41
3.1.4 Tela da Formação.....	42
3.1.5 Tela dos Fluidos	44
3.1.6 Tela dos Resultados.....	45
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
4.1 PRIMEIRO COMPARATIVO: PRESSÃO DE BOMBEIO.....	51
4.2 SEGUNDO COMPARATIVO: PRESSÃO NO <i>CHOKE</i>	51
4.3 TERCEIRO COMPARATIVO: PRESSÃO NOS PONTOS DE INTERESSE ...	52
4.4 QUARTO COMPARATIVO: GRADIENTES MÁXIMOS E MÍNIMOS.....	54

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	57
5.1 CONCLUSÕES.....	57
5.2 RECOMENDAÇÕES.....	58
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	59

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Trajetória das partículas em regime de fluxo laminar e turbulento.

Figura 2: Reograma dos principais modelos reológicos de fluidos.

Figura 3: Ilustração da Janela Operacional de um poço.

Figura 4: Esquema de cimentação das fases de um poço.

Figura 5: Bombeio dos fluidos e o uso dos *plugs* durante a operação.

Figura 6: Disposição esquemática dos fluidos após certo tempo de bombeio.

Figura 7: Gráfico da pressão de bombeio para casos em que ocorre *Free-Fall*.

Figura 8: Exemplo de gráfico da pressão no *choke* necessária para evitar o *Free-Fall*.

Figura 9: Esquema de revestimento no interior do poço.

Figura 10: Tela Inicial.

Figura 11: Tela dos Revestimentos.

Figura 12: Tela do Poço.

Figura 13: Tela da Formação.

Figura 14: Tela dos Fluidos.

Figura 15: Tela dos Resultados.

Figura 16: Comparativo da Pressão de Bombeio.

Figura 17: Comparativo da Pressão no *Choke*.

Figura 18: Comparativo da pressão a 2000ft.

Figura 19: Comparativo da pressão a 3000ft.

Figura 20: Comparativo dos gradientes máximos e mínimos.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A – área total do *casing*

A_{ID} – área referente ao diâmetro interno

A_{OD} – área referente ao diâmetro externo

D_{eq} – diâmetro equivalente

f – fator de atrito de *Fanning*

g – aceleração gravitacional

K – índice de consistência

L_i – espessura do fluido “i” na coluna ou no anular

m_{csg} – massa do *casing*

m_{fluid} – massa dos fluidos que se encontram no interior do *casing*

n – índice de comportamento

N_{RE} – Número de Reynolds em sua forma geral

N_{REB} – Número de Reynolds para fluidos de Bingham

N_{REN} – Número de Reynolds para fluidos newtonianos

N_{REP} – Número de Reynolds para fluidos de Potência

P_h – pressão hidrostática na extremidade inferior do *casing*

P_{ha} – pressão hidrostática pelo lado do anular

P_{hc} – pressão hidrostática pelo lado da coluna

P_{max} – limite superior das pressões dinâmicas

P_{min} – limite inferior das pressões dinâmicas

P_p – pressão de bombeio

P_x – pressão dinâmica a uma profundidade arbitrária

Leonardo Asfora de Oliveira

TVD – profundidade vertical (*True Vertical Depth*)

v_i – velocidade média de escoamento do fluido “i”

$VALOR_{SIMULADOR}$ – valor de saída do simulador comercial

$VALOR_{PCsim}$ – valor de saída do *PCsim*

z – elevação vertical

LETRAS E SÍMBOLOS GREGOS

τ – tensão de cisalhamento

τ_L – limite de escoamento

γ – taxa de deformação ou de cisalhamento

μ_p – viscosidade plástica

μ – viscosidade absoluta

∇T – gradiente geotermal

ΔP_{over} – pressão de *overbalance*

ΔP_{under} – pressão de *underbalance*

∇P_{poros} – gradiente da pressão de poros

$\nabla P_{fratura}$ – gradiente da pressão de fratura

ρ – Massa específica

CAPÍTULO I:

INTRODUÇÃO

1. INTRODUÇÃO

A cimentação primária consiste no processo de posicionamento de pastas de cimento no espaço anular entre o revestimento e as paredes do poço após cada fase perfurada. Desde sua criação, em 1903, o seu objetivo maior tem sido promover o isolamento hidráulico de zonas permeáveis em poços de óleo e gás e o suporte estrutural para a coluna de revestimento.

A otimização da produção de um poço de petróleo depende da qualidade de sua completação, e qualquer boa completação depende da integridade da cimentação primária. Segundo Newman *et al.*, 2001, cerca de 15% das operações de cimentação primária falham, acarretando em prejuízos estimados em quatrocentos milhões de dólares todos os anos à indústria do petróleo. A causa primária de muitas destas falhas é o descontrole das pressões em frente às formações durante o posicionamento da pasta de cimento no espaço anular.

O controle destas pressões é um assunto delicado, uma vez que este conceito está atrelado a diversos parâmetros, a saber: geometria do poço, tipos de revestimento, características das formações, propriedades e volumes dos fluidos bombeados e da vazão de bombeio. Nota-se que, por serem decididos ainda no projeto de perfuração do poço, os dois primeiros parâmetros são fixos, e o terceiro é uma característica intrínseca da formação. Já as propriedades e volumes dos fluidos, assim como a vazão de bombeio, são, de fato, variáveis que podem ser ajustadas a fim de testar várias condições de projeto e escolher a mais adequada. A escolha correta da combinação destas variáveis influi não somente nas pressões em frente às formações, mas também em aspectos relacionados ao deslocamento dos fluidos pelo interior do poço e na qualidade da operação de cimentação primária.

Durante o escoamento da pasta, existem preocupações extras em relação a vazão de bombeio a ser fornecida pela bomba de superfície. Uma elevada velocidade de bombeio é eficiente no que diz respeito à remoção do reboco deixado pela lama de perfuração, melhorando assim a aderência do cimento às paredes do poço. No entanto, pode resultar em fratura das formações devido às altas pressões resultantes das perdas por fricção, que devem ser vencidas.

Nos processos em que se trabalha a baixas pressões, normalmente em formações fragilizadas, existe a preocupação de que ocorra a invasão de fluidos do interior da formação geológica para o interior da coluna de revestimento (*kick*), que ocorrendo de maneira descontrolada pode causar acidentes de grandes proporções (*blowout*), (Thomas *et al.*, 2001).

Dentro deste contexto, foi desenvolvida uma ferramenta computacional em *Microsoft Excel* para simular as pressões em frente às formações durante todo o processo de deslocamento da pasta de cimento. A partir de informações referentes às propriedades das formações, à geometria do poço, às características dos fluidos envolvidos e à vazão de bombeio, o programa fornece ao usuário, dentre outras informações, gráficos do comportamento da pressão em relação ao tempo em profundidades de interesse durante a operação. Deste modo, o usuário pode verificar facilmente a ocorrência de *kicks* ou fraturas, podendo assim julgar o projeto como adequado ou não.

O programa também possui alertas visuais que permitem informar ao usuário sobre possíveis erros na entrada dos dados e sobre critérios de projeto que não estão sendo atendidos. Deste modo, apenas os casos fisicamente possíveis serão simulados, e somente projetos que não acarretarem em problemas de segurança no poço serão aprovados.

Vale ressaltar, porém, que a ferramenta computacional desenvolvida ainda possui certas limitações importantes, que devem ser abordadas futuramente para sua melhoria e adequação à realidade dos simulares comerciais utilizados atualmente na indústria do petróleo. Tais limitações serão abordadas mais adiante nesta dissertação.

Este trabalho está dividido em seis capítulos. O primeiro é referente à introdução e objetivos. No segundo, são discutidos os principais aspectos teóricos fundamentais ao entendimento e compreensão do que será exposto. No terceiro capítulo é apresentado o desenvolvimento do programa, seguido dos resultados e discussões no capítulo 4 e, por fim, a conclusão no capítulo 5.

1.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho teve como objetivo principal desenvolver uma ferramenta computacional que permitisse o planejamento de operações de cimentação primária, sendo capaz de simular as pressões em frente às formações durante toda a operação. Deste

modo, este programa deve ser capaz de possibilitar, dentre outras coisas, a realização de análises quanto a segurança do poço, isto é, análises de fratura da formação e influxo de fluidos.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Desenvolvimento de uma metodologia matemática para simular as pressões em frente às formações;
2. Desenvolvimento de uma interface para o programa;
3. Desenvolvimento de um algoritmo para o simulador;
4. Análise das pressões envolvidas no que diz respeito à segurança e integridade das operações;
5. Teste de casos para validação do programa.

CAPÍTULO II:

ASPECTOS TEÓRICOS

2. ASPECTOS TEÓRICOS

Neste capítulo, serão abordados os tópicos teóricos necessários para o entendimento deste trabalho.

2.1 REGIMES DE FLUXO

Sobre condições isotérmicas e de regime permanente, os fluidos escoam ou em regime laminar ou em regime turbulento. Estas condições de fluxo são separadas por uma zona de transição, (Nelson, 1990). As condições de fluxo dependem de vários fatores, a saber: geometria da tubulação, as propriedades e modelos reológicos dos fluidos e a vazão de escoamento.

Como mostrado na Figura 1, o movimento das partículas de fluido depende do tipo de regime em que ele escoar. O regime é dito laminar quando as partículas se deslocam em finas camadas (ou lâminas) planas ou concêntricas paralelas entre si. Neste caso, o deslocamento se dá de maneira ordenada, de modo que as lâminas não se cruzam. Já o fluxo turbulento se caracteriza por distúrbios e misturas intensas do fluido, além de oscilações de velocidade, que acarretam em movimento aleatório de suas partículas.

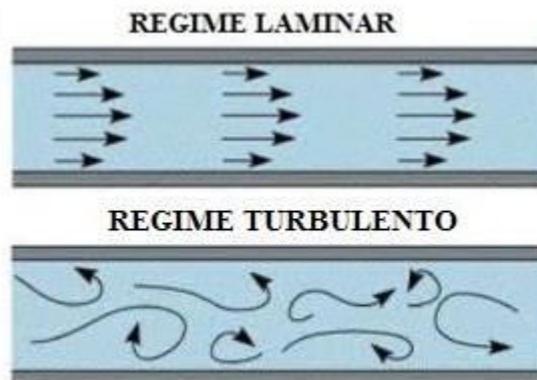


Figura 1: Trajetória das partículas em regime de fluxo laminar e turbulento.

O parâmetro que caracteriza o regime de fluxo é um número adimensional denominado de Número de Reynolds, que relaciona as forças inerciais e viscosas de um fluido durante o seu deslocamento, definido conceitualmente pela Equação (1):

$$N_{RE} = \frac{\text{Forças de Inércia}}{\text{Forças Viscosas}} \quad (1)$$

Se o número de Reynolds for pequeno, as forças de inércia serão insignificantes em relação às forças viscosas. Os distúrbios de fluxo são, então, dissipados e o escoamento permanece laminar. Entretanto, para um número de Reynolds grande, as forças de inércia podem ser suficientes para vencer as barreiras viscosas e amplificar tais distúrbios, e a transição de escoamento laminar para turbulento ocorrerá.

É importante citar que os termos “grande” e “pequeno” foram utilizados no parágrafo anterior de maneira geral. A depender do tipo de fluido que se utiliza, existirão diferentes faixas de valores em que o escoamento será considerado laminar, turbulento ou transitório. As maneiras de calcular o número de Reynolds, assim como as faixas de valores citadas anteriormente, serão mostradas no item 2.4, uma vez que elas dependem do modelo reológico do fluido que se está investigando.

2.2 MODELOS REOLÓGICOS

A relação entre a tensão cisalhante e a taxa de deformação define, de certo modo, o comportamento reológico dos fluidos considerados puramente viscosos. A equação matemática que relaciona estas duas variáveis é conhecida como equação de fluxo, e sua representação gráfica se dá através do Reograma. Os fluidos viscosos podem, portanto, ser classificados em função do seu comportamento de fluxo ou reológico, definindo assim o seu modelo reológico, (Machado, 2002). A Figura 2 mostra o comportamento do Reograma para os principais modelos reológicos de fluidos.

O conhecimento da reologia de um fluido é de fundamental importância para estudos de análise de escoamento, uma vez que as perdas por atrito e, conseqüentemente, as pressões em determinado trecho de uma tubulação dependerão de seu comportamento reológico. Na prática, tais características são geralmente determinadas em laboratório através da utilização de viscosímetros a uma temperatura específica, que será detalhada na seção 2.5.

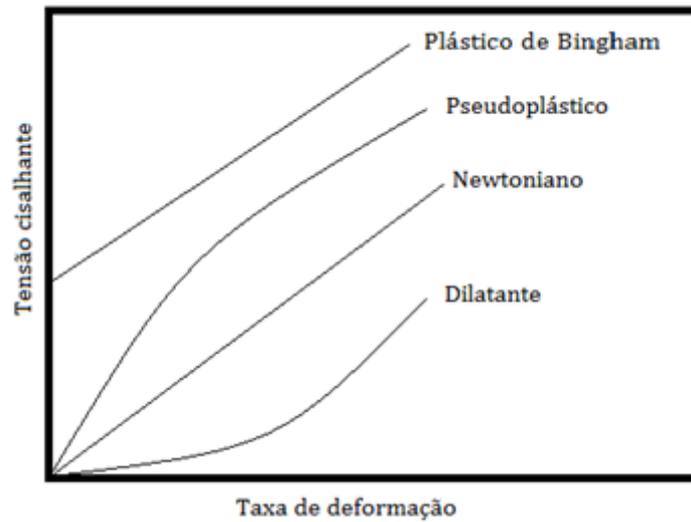


Figura 2: Reograma dos principais modelos reológicos de fluidos (Machado, 2002).

2.2.1 Fluido Newtoniano

Nos fluidos newtonianos, a tensão de cisalhamento (τ) é diretamente proporcional à taxa de deformação ($\dot{\gamma}$), Equação (2):

$$\tau = \mu\dot{\gamma} \quad (2)$$

O termo μ é um parâmetro reológico denominado de Viscosidade Dinâmica, que matematicamente é representado pela inclinação da reta no Reograma. Em um fluido newtoniano, a viscosidade dinâmica é uma constante, pois independe das condições de fluxo, sendo função somente da pressão e da temperatura a que o fluido está submetido. Por possuir tal característica, μ é também conhecido por Viscosidade Absoluta.

2.2.2 Fluidos não Newtonianos

Um fluido é dito não newtoniano quando o seu Reograma difere daquele de um fluido newtoniano, isto é, a relação entre a tensão cisalhante a taxa de deformação não é uma reta que passa pela origem. Além disto, a viscosidade dinâmica destes tipos de fluidos não é função apenas da pressão e da temperatura, mas também da taxa de cisalhamento.

Segundo Nelson (1990), a maioria dos fluidos de perfuração e das pastas de cimento são do tipo não newtoniano. Este trabalho abordará apenas dois modelos matemáticos para descrever o comportamento destes fluidos: o de Bingham e o de Potência (*Power Law*), já que são capazes de descrever com razoável precisão o comportamento reológico dos fluidos comumente utilizados durante as operações de cimentação primária.

A característica principal de um fluido modelo de Bingham é que o mesmo não sofre deformação (escoa) enquanto a tensão cisalhante a ele aplicada não for superior a um valor limite mínimo. Isto implica que, para deslocá-lo, faz-se necessário, de início, a aplicação de um gradiente mínimo de pressão.

Este comportamento é descrito pela Equação (3):

$$\begin{aligned} \tau &= \mu_p \gamma + \tau_L, & \tau &> \tau_L \\ \tau &= 0, & \tau &\leq \tau_L \end{aligned} \quad (3)$$

Os parâmetros reológicos μ_p e τ_L são conhecidos, respectivamente, por Viscosidade Plástica e Limite de Escoamento. Matematicamente, μ_p é a inclinação da reta do modelo de Bingham no Reograma, e τ_L o seu coeficiente linear.

Já um fluido de potência assume uma relação linear entre τ e γ em escala logarítmica, e sua equação de fluxo é dada pela Equação (4):

$$\tau = K\gamma^n \quad (4)$$

O parâmetro reológico Índice de Consistência (K) está relacionado com resistência que o fluido oferece ao escoamento como consequência primeira do atrito entre as lâminas que constituem a massa fluida. Já o parâmetro reológico Índice de Comportamento (n), expressa o afastamento do Reograma do fluido em relação a um fluido Newtoniano. Os fluidos com índices de comportamento menor que 1 são ditos pseudoplásticos, enquanto que aqueles com $n > 1$ são ditos dilatantes.

2.3 PERDAS POR FRICÇÃO

Quando um fluido viscoso se desloca pelo interior de uma tubulação, as tensões cisalhantes em suas paredes resultam em uma força de sentido contrário à velocidade de escoamento, denominada de força de atrito. É por isto que, nas operações de cimentação primária, faz-se necessário o fornecimento de energia adicional através de bombas na superfície para que se consiga, de fato, deslocar os fluidos.

Em condições isotérmicas, as perdas por fricção (também chamadas de perdas por atrito) podem ser determinadas através da Equação da Conservação da Energia, Equação (5). Esta expressa o fato de que a diferença de energia mecânica entre um ponto à montante e à jusante em uma linha de escoamento resulta da perda irreversível de calor resultante das perdas por atrito.

$$\left(\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 \right) - \left(\frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 \right) = \frac{2fv^2L}{D_{eq}g} \quad (5)$$

Onde:

P_1 = pressão à montante;

P_2 = pressão à jusante;

v_1 = velocidade média do fluido à montante;

v_2 = velocidade média do fluido à jusante;

v = velocidade média do fluido na seção onde atua o atrito;

z_1 = elevação vertical do fluido à montante;

z_2 = elevação vertical do fluido à jusante;

f = fator de atrito de Fanning;

L = comprimento do trecho percorrido pelo fluido na seção onde atua o atrito;

D_{eq} = diâmetro equivalente da tubulação;

g = aceleração da gravidade;

A Equação (5) pode ser aplicada de duas formas: a primeira é com o intuito de determinar as perdas por fricção quando as condições à montante e à jusante já são conhecidas. Na segunda, que é a mais comum nas aplicações de Engenharia, conhece-se apenas as condições à montante, e o objetivo é estimar a pressão à jusante em um trecho

qualquer de tubulação. Para isto, deve-se conhecer, a priori, uma estimativa das perdas por fricção.

O termo do lado direito da Equação (5) corresponde justamente a tais perdas. Para obter seu valor numérico e conseqüentemente estimar as pressões, deve-se determinar primeiro o fator f . Este, nas aplicações do dia a dia da Engenharia, é determinado através de correlações empíricas.

2.4 CORRELAÇÕES PARA O FATOR DE ATRITO

Existem na literatura diversas correlações empíricas para estimativas de perdas por fricção para os diversos modelos reológicos. Neste trabalho, a escolha destas correlações baseou-se em Nelson (1990) e no manual PETROGUIA (2002).

2.4.1 Fluidos Newtonianos

Para regime laminar, ou seja, para valores de número de Reynolds inferiores a 2100, as Equações (6) e (7) fornecem uma maneira de estimar fator de atrito de Fanning para tubulações e anulares, respectivamente.

$$f = \frac{16}{N_{REN}} \quad (6)$$

$$f = \frac{24}{N_{REN}} \quad (7)$$

Onde o número de Reynolds é definido pela Equação (8):

$$N_{RE} = \frac{\rho v D_{eq}}{\mu} \quad (8)$$

Já para valores de N_{REN} superiores a 3000, pode-se estimar fator de *Fanning* através da correlação de *Blausius*, Equação (9):

$$f = \frac{0,0791}{N_{RE}^{0,25}} \quad (9)$$

Para valores de número de Reynolds entre 2100 e 3000, o regime de fluxo é considerado de transição, e os valores do fator de atrito podem ser obtidos através da interpolação logarítmica entre os regimes laminar e turbulento.

2.4.2 Fluidos de Potência

Para fluidos modelo de Potência, o Número de Reynolds pode ser calculado segundo a Equação (10):

$$N_{REP} = \frac{v^{2-n} D_{eq}^n \rho}{K 96^n} \quad (10)$$

Para regime laminar, ou seja, para valores de número de Reynolds inferiores a 4000, o fator de fricção pode ser estimado através das Equações (11) e (12), para dutos e anulares, respectivamente.

$$f = \frac{16}{N_{REP}} \quad (11)$$

$$f = \frac{24}{N_{REP}} \quad (12)$$

Para o cálculo do fator de atrito em regime turbulento ($N_{REP} > 6000$) de fluidos pseudoplásticos, a correlação de Gomes (1987), Equação (13), pode ser utilizada:

$$f = 0,069n^{0,666} N_{REP}^{-0,235} \quad , \forall \quad n \leq 1 \quad (13)$$

Já para fluidos dilatantes, a correlação de Ellis e George (1977), dada pela Equação (14), fornece uma estimativa do fator de atrito como uma função apenas no número de Reynolds.

$$f = 0,00454 + 0,645 N_{REP}^{-0,7} \quad , \forall \quad n > 1 \quad (14)$$

Para valores de número de Reynolds compreendidos entre 4000 e 6000, tem-se regime de transição, e o fator de atrito pode ser estimado através da interpolação logarítmica entre os regimes laminar e turbulento.

2.4.2 Fluidos de Bingham

Uma maneira simplificada para o cálculo do Número de Reynolds para fluidos de Bingham foi proposta por Hedstrom(1952), dada pela Equação (15):

$$N_{REB} = \frac{\rho v D_{eq}}{\mu_p} \quad (15)$$

Se o $N_{REB} < 5000$, então o regime é dito laminar e o fator de Fanning pode ser determinado através das Equações (16) e (17), para dutos e anulares respectivamente.

$$f = \frac{16}{N_{REP}} \quad (16)$$

$$f = \frac{24}{N_{REP}} \quad (17)$$

No entanto, se $N_{REB} > 8000$, caracteriza-se um regime turbulento e pode-se utilizar a equação de Ellis e George previamente definida na Equação (14), bastando somente substituir o termo N_{REP} por N_{REB} . Para valores de Número de Reynolds compreendidos entre 5000 e 8000, o regime é considerado de transição e a mesma metodologia utilizada para os fluidos anteriores pode ser empregada para estimar o fator de atrito.

2.5 TEMPERATURA DE CIRCULAÇÃO NO FUNDO DO POÇO

Uma informação importante que se deve ter conhecimento durante o planejamento das operações de cimentação primária é a Temperatura de Circulação de Fundo de Poço (*Bottom Hole Circulation Temperature*), conhecida também por BHCT. Embora esta informação não seja utilizada diretamente para os cálculos de estimativa das pressões

durante as operações, é nessa temperatura que caracterizam-se reologicamente os fluidos bombeados.

Quando os fluidos são deslocados para o interior do anular, eles encontram-se, geralmente, à temperatura de superfície. À medida que se deslocam para o interior do poço, sofrem aumento de temperatura devido ao calor emanado pelas formações. A BHCT é, portanto, a temperatura teórica que os fluidos experimentariam no fundo do poço após estas trocas de calor, quando em fluxo.

Para o cálculo da BHCT leva-se em consideração dados como: gradiente geotermal da formação (∇T), profundidade vertical do fundo do poço (H_{vert}) e também da temperatura de superfície (T_{sup}).

Para profundidades verticais superiores a 10000ft (3048m), a Equação (18) pode ser utilizada para estimar a BHCT em unidades de campo (temperatura em $^{\circ}F$, com profundidades em *ft* e gradiente geotermal em $^{\circ}F/100ft$). Caso contrário, deve-se utilizar tabelas API, onde faz-se necessário a interpolação de valores. O programa desenvolvido dispõe em seu banco de dados tais tabelas.

$$BHCT = T_{sup} + \frac{0,019888141H_{vert}\nabla T - 10,0915}{1 - 0,00005H_{vert}} \quad (18)$$

No planejamento das operações de cimentação primária, geralmente já é conhecido o range máximo e mínimo que as pressões em frente às formações podem atingir (este tópico será tratado no item 2.6). O que é feito, então, é adequar a reologia dos fluidos bombeados a tais limitações. Neste processo, o conhecimento da BHCT é fundamental, uma vez que os parâmetros reológicos destes fluidos são determinados a esta temperatura através de testes reológicos em laboratório.

2.6 A JANELA OPERACIONAL

A janela operacional, item indispensável num projeto de poços de petróleo, é o principal parâmetro a ser analisado no estudo da estabilidade de um poço durante diversas operações, dentre elas a cimentação primária. É a partir da obtenção da janela operacional que se tem o intervalo (entre um limite inferior e superior) permitido para as pressões em frente às formações, possibilitando assim a realização da cimentação de maneira segura.

Qualquer flutuação fora dos limites máximo e mínimo traz riscos à integridade da formação e à operação como um todo, podendo, em casos extremos, inviabilizar a sua continuidade. Por exemplo, se a pressão anular atingir o limite mínimo da janela operacional, pode haver influxo de fluidos da formação (*kick*) para dentro do poço. Já uma flutuação para valores acima do limite máximo da janela operacional pode acarretar em fraturas nas formações.

O limite inferior da janela operacional é representado pelo maior valor entre as curvas do gradiente de pressão de poros e de colapso. O primeiro diz respeito à pressão dos fluidos no interior das formações porosas, e a segunda às forças na rocha que tendem a fechar o poço. Já o limite superior é representado pelo menor valor entre a curva do gradiente de fratura e o de sobrecarga. Este primeiro é definido com o valor de pressão que produz falha mecânica com resultante perda de fluido, e o segundo como a pressão resultante da compactação das diversas camadas de rocha. A Figura 3 mostra um exemplo de janela operacional de um poço de petróleo.

O valor das geopressões é comumente expresso em gradientes (razão entre a pressão e a profundidade vertical) ou como peso equivalente de fluido. Este último é muito útil, por exemplo, no planejamento da perfuração de um poço, uma vez que permite uma comparação direta com a massa específica do fluido de perfuração.

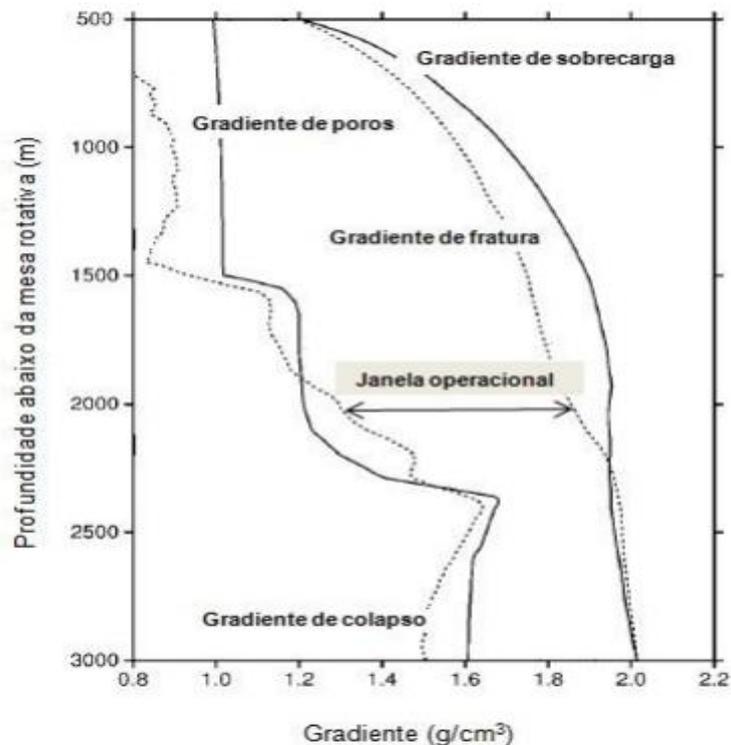


Figura 3: Ilustração da Janela Operacional de um poço de petróleo (Azevedo, 2011).

Por questão de simplicidade, o programa desenvolvido leva somente em consideração os gradientes de poros e de fratura, que são os dados com que usualmente os simuladores comerciais trabalham.

Para aumentar o nível de segurança das operações, deve-se adotar alguns critérios (margem de segurança) para restringir o quão acima da pressão de poros ou o quão abaixo da pressão de fratura as pressões dinâmicas podem se aproximar. Estes conceitos são conhecidos, respectivamente, como *overbalance* e *underbalance*.

Considerando tais valores constantes para qualquer profundidade, pode-se dizer que o range na qual os valores de pressão devem permanecer (considerando os gradientes de poros e de fratura como os limites mínimos e máximos, respectivamente) serão dados, para uma profundidade arbitrária, pelas Equações (19) e (20).

$$P_{min} = \nabla P_{poros} TVD + \Delta P_{over} \quad (19)$$

$$P_{max} = \nabla P_{fratura} TVD - \Delta P_{under} \quad (20)$$

Onde ∇P_{poros} e $\nabla P_{fratura}$ dizem respeito, respectivamente, aos gradientes de pressão de poros e de fratura, *TVD* (*True Vertical Depth*) à profundidade vertical da formação e ΔP_{over} e ΔP_{under} às margens de segurança de pressão do *overbalance* e do *underbalance*, respectivamente.

2.7 CIMENTAÇÃO PRIMÁRIA

A cimentação primária é uma técnica utilizada para posicionar pastas de cimento no espaço anular. Depois de seu posicionamento, o cimento endurece para formar um selo hidráulico no poço, prevenindo migração de fluidos das formações para o interior do mesmo. Além de promover o isolamento das zonas produtoras, o cimento deve ancorar e suportar o revestimento e protegê-lo contra corrosão de fluidos nocivos. Logo, a cimentação primária é um dos estágios mais críticos durante a perfuração e completação de um poço. Este procedimento deve ser planejado e executado cuidadosamente, uma vez que há apenas uma chance para realizar o trabalho com sucesso.

Após a perfuração de cada fase de um poço de petróleo, várias colunas de revestimento são descidas em seu interior com o objetivo de conter as formações e evitar o seu colapso. A Figura 4 mostra o esquema de um poço com duas fases perfuradas e cimentadas.

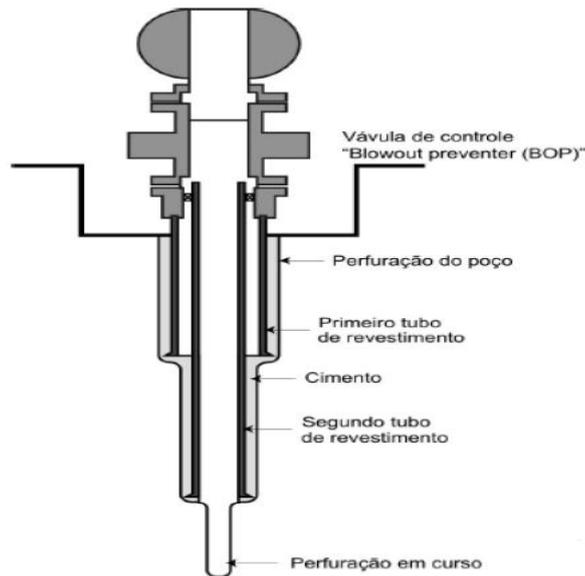


Figura 4: Esquema de cimentação das fases de um poço (Campos *et al.*, 2002).

A medida que o revestimento é descido no poço, o seu interior é preenchido com fluido de perfuração. Logo, durante a operação, deseja-se remover o fluido de perfuração do interior do revestimento, posicionar a pasta de cimento no anular e preencher o revestimento com um fluido de deslocamento, podendo este último ser o próprio fluido de perfuração, uma salmoura ou até mesmo água.

As pastas de cimento e o fluido de perfuração são geralmente incompatíveis, acarretando em gelificação na interface cimento/lama, o que reduz a eficiência de deslocamento. Logo, faz-se necessário o emprego de métodos químicos e físicos para manter a separação destes dois fluidos. Outro problema diz respeito ao reboco formado durante a perfuração, que pode acarretar em uma má aderência do cimento às paredes do poço. Na tentativa de contornar tais problemas, bombeiam-se fluidos denominados de colchões.

Existem basicamente dois tipos de colchões: lavadores e espaçadores. O primeiro é um fluido de baixa viscosidade composto, dentre outros, de aditivos dispersantes e detergentes, e o seu objetivo é o de remover não só quimicamente, mas também mecanicamente o reboco das paredes do poço. A remoção mecânica é realizada através

(quando possível) do regime turbulento de fluxo. Já o colchão espaçador é um fluido de maior viscosidade, cuja reologia é geralmente intermediária entre a pasta e fluido de perfuração. Seu objetivo principal é o de atuar como uma barreira hidráulica, impedindo o contato da lama de perfuração com a pasta bombeada.

A Figura 5 mostra um esquema de uma operação de cimentação primária, ilustrando a ordem comum do bombeio dos fluidos. Os tampões (*plugs*) esquematizados são acessórios feitos de elastômeros que possuem a função de atuar como barreira física entre os fluidos bombeados.

O *plug* de fundo separa a pasta de cimento do fluido de perfuração. Ele possui uma membrana que se rompe por pressão quando o mesmo se aloja no colar flutuante, permitindo a passagem dos demais fluidos. Já o *plug* de topo separa a pasta de cimento do fluido de deslocamento. Este não possui membrana, o que significa que, quando alojado no colar flutuante, acarreta em um aumento de pressão que é detectado na superfície, indicando assim o fim da operação de cimentação primária.

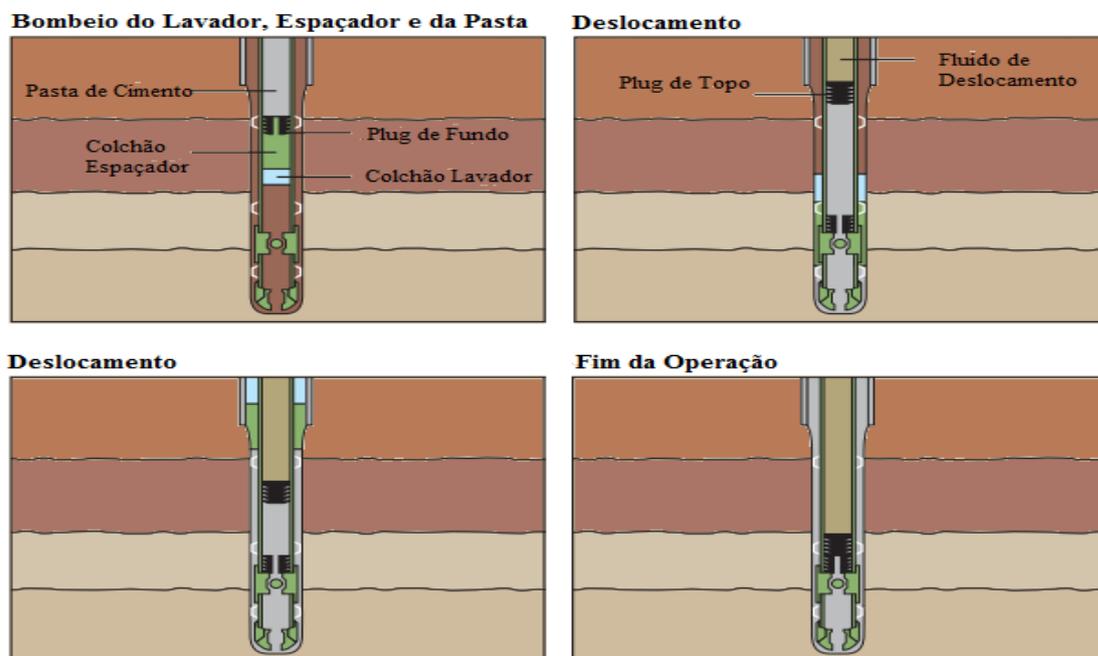


Figura 5: Bombeio dos fluidos e o uso dos *plugs* durante a operação. Modificado de:

http://www.slb.com/resources/publications/oilfield_review/~//media/Files/resources/oilfield_review/ors12/sum12/define_cement.ashx, acessado em 22/07/14.

Devido à dificuldade da medição em poço aberto, o volume do anular entre o revestimento e o poço é raramente conhecido com exatidão. O volume bombeado de pasta de cimento deve, então, basear-se na experiência de campo. Mesmo quando um *caliper* é corrido no poço e o seu volume teórico calculado, um volume em excesso de cimento é geralmente bombeado para garantir que o mesmo atinja a altura no anular desejada. Tal excesso é, geralmente, expresso como uma percentagem em volume do poço aberto.

Outra prática comum nas operações de cimentação primária é o bombeio de duas pastas de cimento distintas. A primeira, bombeada à frente e comumente denominada de primeira pasta (*lead slurry*), posiciona-se mais acima no anular, onde as pressões e temperaturas são menores. Já a pasta *tail*, geralmente mais pesada, é posicionada no fundo do poço, sendo submetida então a maiores pressões e temperaturas, devendo possuir, portanto, uma maior resistência mecânica e a compressão.

2.8 DESENVOLVIMENTO DA FORÇA GEL ESTÁTICA

A pasta de cimento na fase líquida comporta-se como um fluido verdadeiro, transmitindo integralmente a sua pressão hidrostática. Durante o processo de pega, há um período em que a pasta não se comportará nem como líquido nem como sólido, durante o qual terá a sua pressão hidrostática reduzida, (Rocha, 2010). Esta redução dependerá, além de outros fatores, de uma propriedade do cimento denominada de Força Gel Estática, que aumenta com o tempo durante a pega.

Esta queda de pressão hidrostática ocorre como consequência de um deslocamento vertical causado pela perda de volume da pasta, provocando assim uma tensão cisalhante contra as paredes do poço, que começa a suportar a coluna de cimento. Se cuidados não forem tomados, as pressões em frente às formações podem atingir valores inferiores à pressão de poros, podendo causar invasão de fluidos para o interior do espaço anular. Este problema é mais grave em poços de gás, devido a maior mobilidade que o mesmo possui.

A maneira mais conservadora de tratar este problema é levar em consideração que, no período de transição, a massa específica da pasta de cimento cai para um valor igual a massa específica de sua água de mistura (mistura de água e aditivos químicos utilizada na preparação das pastas). Esta nova informação pode então ser utilizada para o cálculo das pressões hidrostáticas, sendo possível assim analisar o aspecto da segurança de poço.

Existem algumas medidas que podem ser tomadas para mitigar os problemas da perda de pressão hidrostática no anular, a saber: utilização de colchões espaçadores

pesados para compensar a perda hidrostática do cimento, utilizar aditivos que bloqueiam a passagem de gás pela pasta, utilizar pastas de rápido período de transição, fechar o poço durante o período de pega e eventualmente aplicar pressão na superfície, dentre outros.

O programa desenvolvido leva em conta o efeito da Força Gel Estática durante o período de pega do cimento, mostrando ao usuário o perfil de pressão hidrostática no anular após o fim da cimentação. Ele informa também qual seria a pressão no *choke* necessária para compensar o efeito da perda da hidrostática no fundo do poço, impedindo assim a ocorrência de *kicks*.

Um exemplo real de acidente causado pela perda de hidrostática do cimento ocorreu no dia 20 de abril de 2010, no Golfo do México, onde houve a explosão da plataforma de petróleo *Deepwater Horizon*, que pertencia à *Transocean* e estava sendo operada pela *British Petroleum (BP)*. Houve 17 trabalhadores que ficaram feridos e 11 faleceram. Existiram um conjunto de falhas que levaram a tal tragédia, mas uma delas foi um problema durante a cimentação de uma pasta nitrogenada não convencional, que causou segregação das fases na pasta e reduziu sua hidrostática, permitindo assim o influxo de fluidos para a superfície.

2.9 ESTIMATIVA DAS PRESSÕES

As pressões em frente às formações durante o bombeio dos fluidos dependem do tempo. Isto porque, a cada instante que se passa, a distribuição dos fluidos é modificada, alterando assim os valores de pressão hidrostática e das perdas de carga.

A Figura 6 mostra, em um tempo Δt qualquer após o início da operação, a distribuição dos fluidos durante uma operação de cimentação primária.

A aplicação da Equação (5) entre a bomba e a superfície pelo lado do anular (por onde o fluido de perfuração é recolhido) resulta na Equação (21):

$$P_p = (P_{ha} - P_{hc}) + \sum_{i=1}^{i=k} \frac{f_i \rho_i v_i^2}{D_{eq_i}} L_i \quad (21)$$

A Equação (21) indica que a pressão de bombeio (P_p) necessária para deslocar os fluidos é a soma da diferença entre a pressão hidrostática no anular (P_{ha}) e a pressão hidrostática no interior da coluna (P_{hc}) com o somatório de todas as perdas de carga dos

fluidos envolvidos. O valor de k no somatório diz respeito ao número total de fluidos que fora bombeado no sistema até este intervalo de tempo.

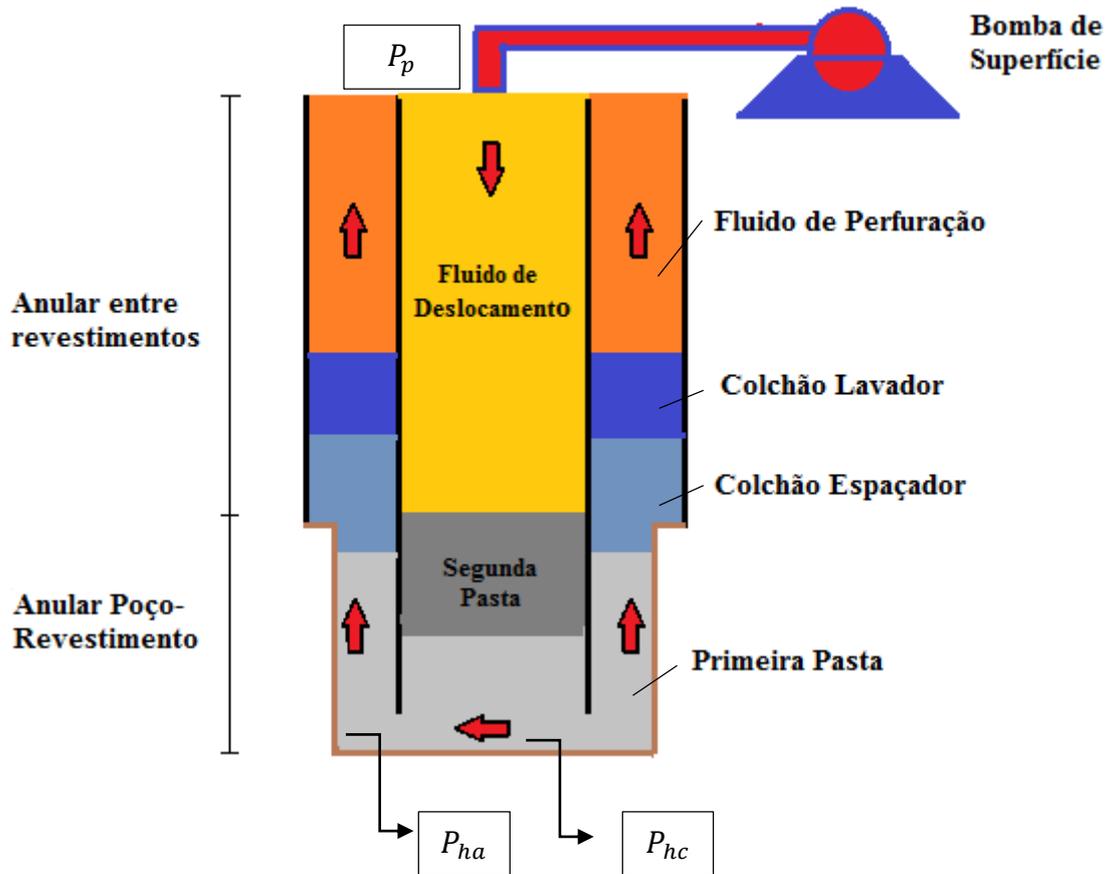


Figura 6: Disposição esquemática dos fluidos após certo tempo de bombeio.

Como a pressão de bombeio depende das perdas por fricção, então as pressões em frente às formações também dependerão. Explica-se, então, a importância da correta escolha da reologia dos fluidos e da vazão de bombeio para evitar problemas de fratura da formação devido a pressões excessivas. Analogamente, baixas vazões geram baixas perdas por atrito, necessitando portanto de uma menor pressão de bombeio, reduzindo assim as pressões dinâmicas, gerando assim riscos de *kick*.

A Equação (21) relaciona a pressão de bombeio à configuração dinâmica dos fluidos à medida que se deslocam pelo interior do poço. Para obtenção das equações gerais da pressão dinâmica no anular a qualquer profundidade da superfície, deve-se utilizar a Equação (5) entre a bomba e um ponto qualquer no interior do espaço anular. Pode-se mostrar que isto leva a relação estabelecida pela Equação (22):

$$P_x = P_{hx} + \sum_{i=1}^{i=p} \frac{f_i \rho_i v_i^2}{D_{eq_i}} L_i \quad (22)$$

A Equação (22) informa que a pressão dinâmica no interior do espaço anular a uma profundidade qualquer da superfície (P_x) é igual a soma da pressão hidrostática (P_{hx}) com as perdas de carga relativa a todos os fluidos que se encontram acima deste ponto, onde o número de fluidos é dado pelo valor p no somatório.

É importante, por fim, citar que nas Equações (21) e (22) está implícita a consideração de que a pressão na superfície é nula.

2.10 A QUEDA LIVRE DOS FLUIDOS (*FREE FALL*)

À medida que os fluidos são bombeados para o interior da coluna de revestimento, a pressão hidrostática no fundo do poço pelo interior da coluna aumenta, uma vez que a pasta de cimento e o colchão espaçador são, em geral, mais pesados que o fluido de perfuração. Enquanto o *plug* de fundo não for rompido, ou seja, enquanto os fluidos bombeados não deixarem o revestimento e passarem para o anular, este último permanece preenchido completamente pelo fluido de perfuração, que exerce uma pressão hidrostática no fundo do poço pelo lado do anular.

À medida que mais fluido é bombeado pelo interior do revestimento, P_{hc} aumenta, mas P_{ha} permanece constante. O processo pode continuar até chegar um ponto em que a pressão hidrostática no fundo do poço pelo interior da coluna é grande o suficiente para vencer todas as perdas de carga e deslocar os fluidos no interior do anular apenas através de seu próprio peso, ou seja, sem ser necessário o uso da bomba. Este fenômeno é denominado de queda livre ou *Free Fall*, cujo nome diz respeito à queda livre que os fluidos experimentam no interior da coluna.

A Figura 7 mostra um gráfico típico da pressão de bombeio para casos em que ocorre o *Free Fall*.

Matematicamente, o que ocorre é que a Equação (21) torna-se nula, ou seja, a parte negativa (relativa pressão hidrostática pelo lado da coluna) compensa a positiva (relativa a pressão hidrostática pelo lado do anular e as perdas por atrito). Percebe-se na Figura 7 que entre aproximadamente 40 e 80min após o início de da operação, não faz-se

necessário a utilização da bomba de superfície para deslocar os fluidos, visto que a pressão de bombeio é nula.

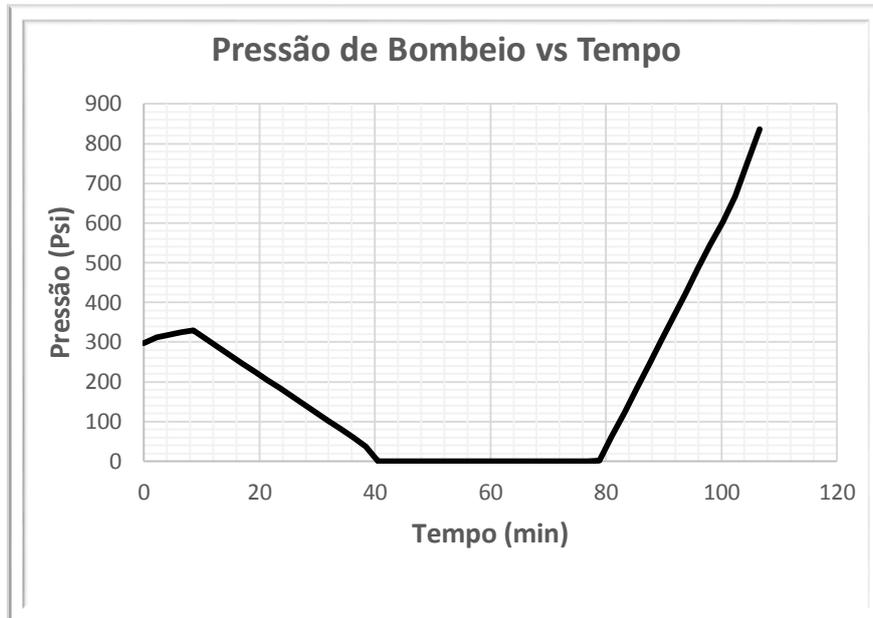


Figura 7: Gráfico da pressão de bombeio para casos em que ocorre *Free-Fall*

À medida que o tempo passa, o *plug* de fundo é rompido, e a pasta de cimento começa a deslocar-se pelo anular. À medida que sobe cada vez mais, a pressão hidrostática pelo lado do anular passa a crescer, e a bomba novamente precisa ser utilizada. A máxima solicitação à que a bomba é submetida ocorre no fim da operação, quando a altura da pasta atinge seu valor máximo.

O *Free-Fall* é, em geral, um fenômeno indesejado durante a cimentação. Isto porque quando o mesmo ocorre, perde-se controle das vazões em que os fluidos estão escoando pelo interior no revestimento. No início do processo, os fluidos em queda livre se deslocam cada vez mais rápido, uma vez que estão sujeito a um desbalanceio de forças que resulta em uma aceleração. No entanto, este processo tende a estagnar, uma vez que a pressão hidrostática do anular, como já dito, passa a aumentar. Durante este período, ocorre uma desaceleração dos fluidos com conseqüente redução da velocidade de escoamento. Como não há controle destas velocidades, há o risco da vazão cair em patamares suficientes para prejudicar a remoção do reboco das paredes do poço, comprometendo assim a qualidade da cimentação.

Um outro efeito do *Free Fall* é a discrepância entre a vazão de bombeio dos fluidos na coluna de revestimento e a vazão de retorno à superfície. Isto ocorre pois os fluidos no interior da coluna estão acelerando devido à queda livre, o que implica que os mesmos estão se deslocando a velocidades diferentes do que os fluidos que estão sendo deslocados pela bomba.

Para evitar o *Free-Fall*, uma das atitudes que podem ser tomadas é exercer pressão no anular através do *choke*. O cálculo desta contrapressão pode ser encontrado matematicamente através da Equação (23):

$$P_{choke} = 0, \quad \forall P_p \geq 0 \quad (23)$$

$$P_{choke} = |P_{bomb}|, \quad \forall P_p < 0$$

A explicação por trás da Equação (23) é simples. Sabe-se que o valor da pressão de bombeio não pode ser inferior a zero. Porém, a Equação (21) poderia assumir valores negativos, uma vez que o valor de P_{hc} pode continuar crescendo a ponto de torna-se maior que a soma entre a P_{ha} e as perdas de carga. A contrapressão necessária para evitar a queda livre dos fluidos seria, então, justamente esta parcela da pressão hidrostática pelo lado da coluna que torna a equação da pressão de bombeio negativa.

Um exemplo de gráfico obtido para a pressão no *choke* está mostrado na Figura 8, que está relacionado à mesma situação da Figura 7.



Figura 8: Exemplo de gráfico da pressão no *choke* necessária para evitar o *Free Fall*.

Nota-se que, de fato, a pressão no *choke* faz-se apenas necessária quando a pressão de bombeio torna-se nula, ou seja, entre 40 e 80min após o início da operação. O gráfico da Figura 8 consiste num cronograma de pressão que deve ser imposta no anular para evitar a aceleração descontrolada dos fluidos devido ao *Free Fall*. Em simuladores de cimentação primária mais avançados, este pode ser um dado informado pelo usuário.

A modelagem completa do fenômeno do *Free Fall* exige uma matemática mais complexa do que a que foi desenvolvida até o presente momento no programa. Este, atualmente, apenas informa a pressão no *choke* necessária para evitar a queda livre dos fluidos, mas não leva em consideração as mudanças das vazões e o efeito da queda livre em si.

Ao detectar que o valor da pressão de bombeio passar a ser negativa, o programa automaticamente impõe um valor nulo a esta variável, e mostra gráficos como os da Figura 8 através da utilização da Equação (23). Em outras palavras, ele só pode ser utilizado caso se deseja evitar o *Free Fall*. Isto consiste em uma limitação importante já que na prática não é comum a aplicação desta contrapressão no anular por receio de fraturar as formações. Resumindo, as operações são conduzidas sob efeito e influência da queda livre dos fluidos, sendo portanto fundamental a correta modelagem dos fenômenos para a previsão das pressões durante a operação.

A modelagem matemática do fenômeno *Free Fall*, com respectiva determinação da taxa com que a vazão varia à medida que ocorre o processo ainda está para ser desenvolvida e será considerada como uma próxima etapa para a melhoria do programa.

2.11 PRESSÃO PARA ELEVAR O REVESTIMENTO

Durante algumas operações com cimento, há o risco de que revestimento que se deseja cimentar possa ser deslocado verticalmente para cima devido à força de empuxo que os fluidos exercem em sua seção transversal durante o bombeio. Algumas condições que favorecem este tipo de ocorrência são:

- ✓ Tubos leves;
- ✓ Pequenos comprimentos dos tubos;
- ✓ Tubos de diâmetros grandes;
- ✓ Pastas de cimento de alta densidade;

- ✓ Fluidos de deslocamento de baixa densidade;
- ✓ Altas pressões de fricção no anular;
- ✓ Contrapressão, etc.

A Figura 9 mostra um esquema de revestimento de massa m_{csg} cuja área referente ao diâmetro externo e interno é, respectivamente, A_{OD} e A_{ID} , no interior de um poço onde a massa total dos fluidos no interior do *casing* é dado por m_{fluid} . Na figura, P_h é a pressão hidrostática agindo na extremidade inferior do revestimento, e P_p a pressão de bombeio.

Caso o revestimento esteja livre para se mover verticalmente, isto é, caso seu movimento vertical não esteja de algum modo restringido, então pode-se demonstrar que a pressão de bombeio máxima, também denominada de *Pump Pressure to Lift the Casing*, que pode ser atingida durante a operação é dada pela Equação 21 :

$$P_{pmax} = \frac{m_{csg}}{A_{OD}} - P_{hc} \left(1 - \frac{A_{ID}}{A_{OD}} \right) \quad (21)$$

Durante a operação, a equipe responsável pela cimentação deve garantir que a pressão de bombeio nunca ultrapasse este valor, a não ser que esteja restringida a movimentação do revestimento.

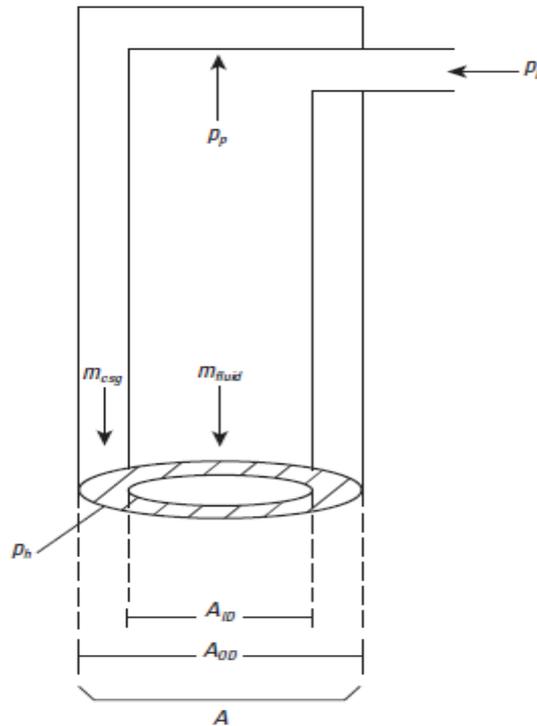


Figura 9: Esquema de revestimento no interior do poço.

CAPÍTULO III:
DESENVOLVIMENTO DO PROGRAMA

3 DESENVOLVIMENTO DO PROGRAMA

3.1 A FERRAMENTA COMPUTACIONAL

O correto planejamento de uma operação de cimentação primária é de extrema importância, seja para a garantia da segurança do poço no que diz respeito às pressões em frente as formações, seja para a determinação do volume necessário de cada fluido para obter a configuração no anular desejada, ou a vazão necessária para obter regime de fluxo turbulento de determinado fluido, etc.

Com este conceito em mente, foi desenvolvido uma ferramenta computacional em Microsoft Excel 2013 através de recursos do *Visual Basic For Applications* (VBA). O programa, de nome *PCsim (Primary Cementing Simulator)*, possui basicamente seis telas, onde o usuário poderá, passo a passo, planejar a operação de acordo com os dados de determinado poço. Além disto, possui verificações internas quanto a consistência dos dados de entrada e critérios de planejamento importantes.

A ferramenta computacional foi desenvolvida para propiciar uma fácil e intuitiva utilização pelo usuário. As células em branco são aquelas dos dados de entrada, enquanto que as células em azul são aquelas dos dados de saída, ou seja, dados que foram calculados internamente pelo programa.

Os cálculos das pressões levam em consideração o modelo reológico dos fluidos envolvidos, seus respectivos parâmetros reológicos, seus volumes bombeados, a vazão de bombeio e a geometria do poço, como profundidades verticais e diâmetros de revestimento.

Para a realização de tais cálculos, foi desenvolvido um algoritmo que, a qualquer instante de tempo, tem a capacidade de determinar a configuração dos fluidos no poço e no anular, calculando assim a espessura das colunas de fluidos. Este dado é então utilizado para o cálculo das perdas por fricção e das pressões hidrostáticas.

É importante, no entanto, frisar que o programa desenvolvido possui ainda algumas limitações importantes, onde as principais delas são: ser aplicável somente a poços verticais, não levar em consideração o efeito *Free Fall* e bombear os fluidos a uma taxa única constante.

3.1.1 A Tela Inicial

A Tela Inicial, mostrada na Figura 10, permite ao usuário cadastrar dados de projeto, tais quais: o nome do poço, o nome do projeto, o nome da companhia que realizará a cimentação, o nome do campo, a localização e, por fim, a data.

A imagem mostra a interface de usuário inicial, dividida em duas seções principais:

- Descrição do Projeto:** Uma seção contendo seis campos de entrada para os seguintes dados: Poço, Projeto, Companhia, Campo, Localização e Data.
- Sistema de Unidades:** Uma seção contendo cinco controles deslizantes para selecionar unidades: Comprimento (ft), Temperatura (°F), Vazão (bpm), Peso (lb/gal) e Volume (bbl).

Figura 10: Tela Inicial.

Além disto, para promover mais flexibilidade ao usuário, o programa permite escolher quais as unidades desejadas para alguns dados de entrada. As opções fornecidas para as unidades foram:

- Comprimento: em pés (ft) ou em metros (m);
- Temperatura: em *Fahrenheit* (°F) ou em *Celsius* (°C);
- Vazão: em barril por minuto (bpm), galão por minuto (gpm), metro cúbico por minuto (m³/min) e litros por minutos (L/min);
- Peso dos fluidos: em libra por galão (lb/gal ou ppg), em libra por pé cúbico (lb/ft³) e em quilograma por metro cúbico (kg/m³);
- Volume: em metro cúbico (m³), galão (gal), barril (bbl) e em litros (L);

É importante ressaltar que a escolha das unidades diz respeito somente a alguns dados de entrada e a alguns dados de saída. As unidades de pressão foram mantidas sempre em *psi*, já que este é a unidade mais usual, e os eixos dos gráficos possuem unidades fixas, como será mostrado nas próximas telas.

3.1.2 Tela dos Revestimentos

Na Tela dos Tubos, Figura 11, o usuário poderá informar qual o revestimento da fase atual, ou seja, aquele revestimento da fase que será cimentada, e o revestimento da fase anterior, isto é, aquele que fora cimentado anteriormente. Os dados abrangem desde revestimentos condutores a revestimentos de produção mais usuais.

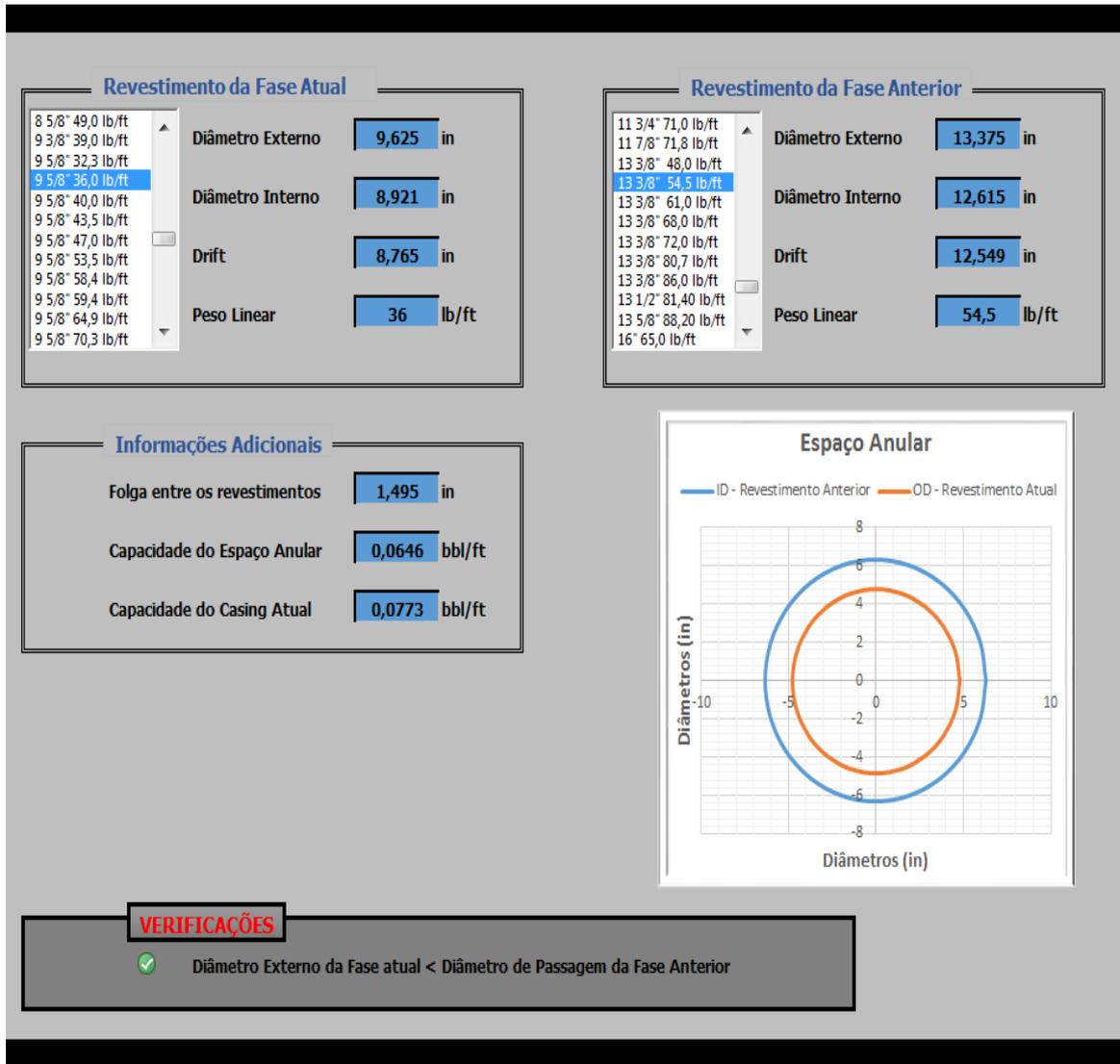


Figura 11: Tela dos Revestimentos.

Informado os tipos de revestimento, o programa mostrará os dados relativos a diâmetro externo, interno, de passagem (*drift*) e o peso linear dos mesmos. Além disto, na seção “Informações Adicionais”, calculará a folga entre os revestimentos e a capacidade do interior do *casing* e o do espaço anular entre revestimentos.

É importante frisar que este programa não realiza o dimensionamento ou correta escolha dos revestimentos. Esta etapa deve ser realizada quando o projeto de perfuração de poços está sendo desenvolvido. No entanto, caso o usuário, por descuido, informe erradamente os tipos de revestimento, o programa mostrará a ele um alerta básico, comparando apenas o diâmetro externo da fase atual com o diâmetro de passagem da fase anterior.

3.1.3 Tela do Poço

A Tela do Poço, Figura 12, permite ao usuário informar as profundidades de assentamento das sapatas de ambos os revestimentos em relação à superfície. Além disso, há um campo em que deverá ser informado a altura do colar flutuante em relação extremidade inferior do revestimento. Este dado é utilizado pelo programa para calcular o volume de fluido de descolamento necessário para posicionar a pasta de cimento na altura desejada.

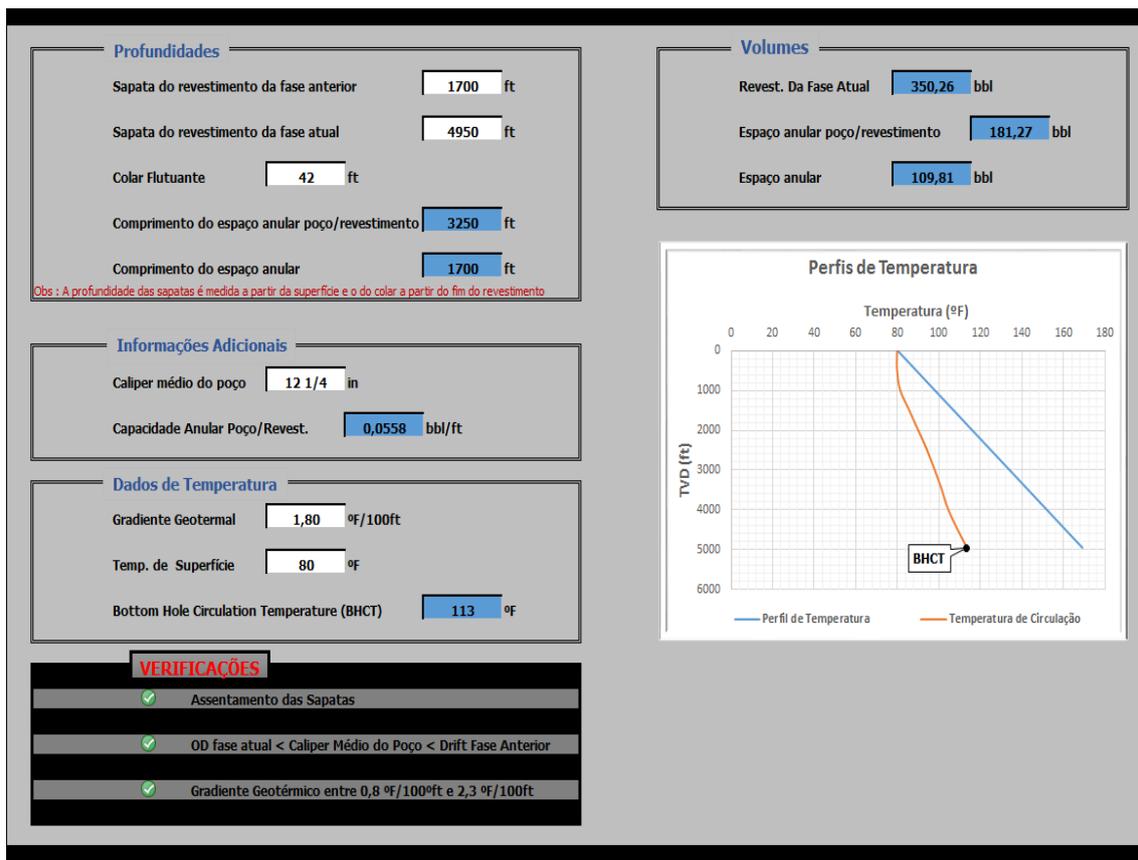


Figura 12: Tela do Poço.

Na seção “Informações Adicionais”, o dado do *caliper* médio do poço deve ser informado pelo usuário. O programa, de posse dessas informações, terá condições de calcular o volume de cada seção do poço: revestimento da fase atual, espaço anular poço/revestimento e espaço anular entre revestimento. Estes dados são importantes pois é utilizado internamente pelo algoritmo para os cálculos de perda de carga.

Por fim, na seção dados de temperatura, as informações do gradiente geotérmico do poço e a temperatura de superfície podem ser informadas, com o intuito de terminar a (BHCT). O programa também constrói curvas dos perfis de temperatura, mostrando-as no gráfico.

De acordo com os dados informados, o programa realizará algumas verificações básicas:

- Profundidade de Assentamento das Sapatas: a sapata do revestimento da fase atual deve estar a uma profundidade superior do que a sapata do revestimento da fase anterior;
- Diâmetros Informados: para a configuração de poços informada ser fisicamente possível, o diâmetro de passagem da fase anterior deve ser superior do que o diâmetro médio do *caliper*, que por sua vez deve ser superior ao diâmetro externo do revestimento da fase a ser cimentada;
- Gradiente Geotérmico: os valores informados devem estar entre 0,8°F/100ft e 2,3°F/100ft , uma vez que as tabelas API para cálculo da BHCT estão situadas entre estes limites.

3.1.4 Tela da Formação

Na tela da formação, Figura 13, o usuário deverá, na seção “Janela Operacional”, informar os valores de gradiente de poros e de fratura em psi/ft ou ppg (libra por galão) em função das profundidades verticais. Estas informações são fundamentais, uma vez que toda a análise de segurança das operações leva em conta a janela operacional do poço.

A medida que os dados forem informados, o programa construirá o gráfico da Janela Operacional. Em seguida, na seção “Pontos de Interesse”, o usuário deverá escolher qual a profundidade dos pontos críticos que ele deseja que o programa analise em mais detalhe, embora o fundo do poço seja automaticamente considerado pelo

3.1.5 Tela dos Fluidos

A Tela dos Fluidos, Figura 14, permite ao usuário caracterizar o sistema de fluidos que será utilizado na operação de cimentação primária. Na seção “ Dados dos Fluidos (em ordem de bombeio) ” devem ser informados os pesos de cada fluido, os modelos reológicos e seus respectivos parâmetros reológicos em unidades de campo.

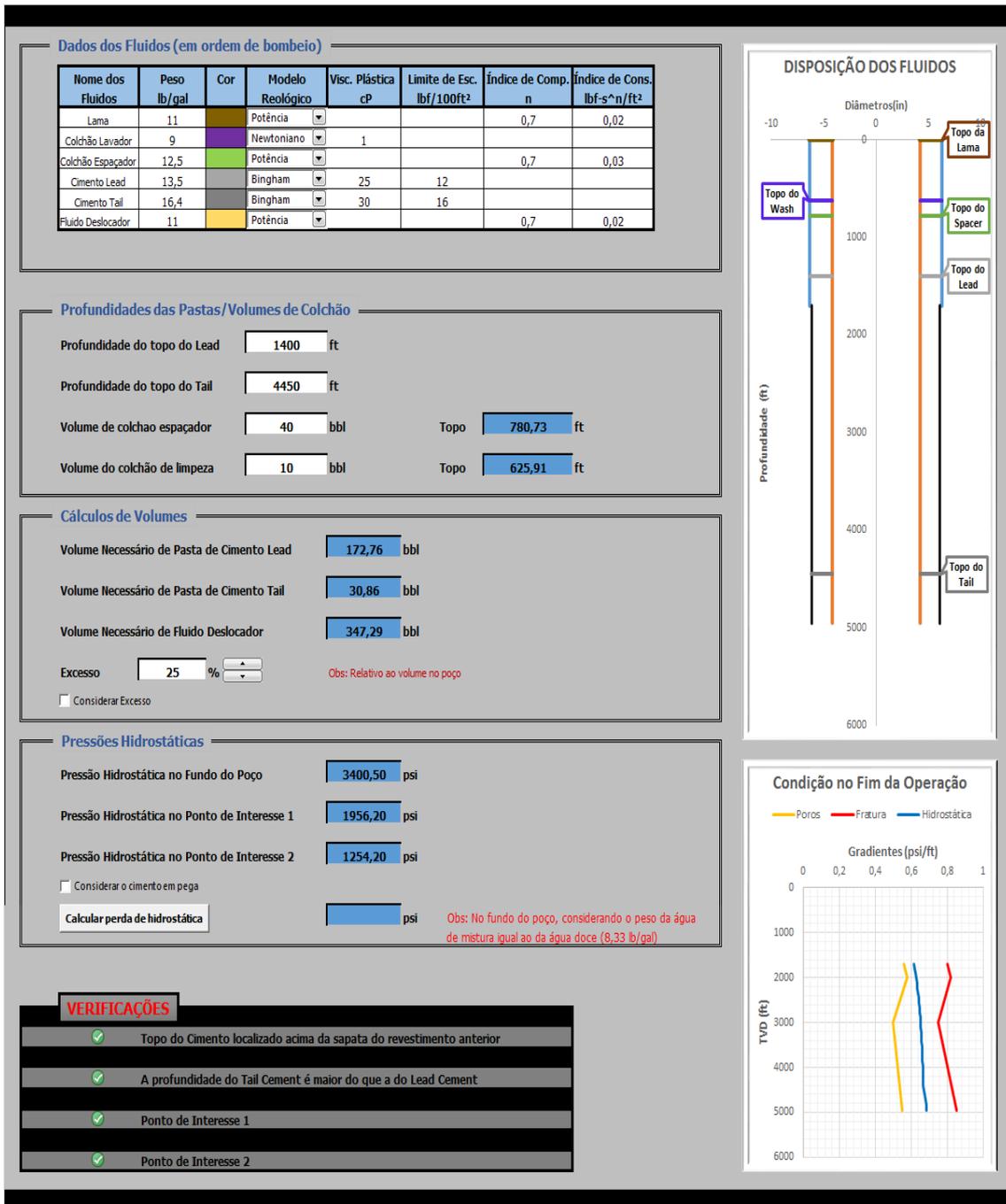


Figura 14: Tela dos Fluidos.

Já na seção “Profundidades das Pastas / Volumes de Colchão”, o usuário poderá planejar a configuração final dos fluidos após a cimentação. Para as pastas de cimento, faz-se necessário informar a profundidade desejada dos seus respectivos topos a partir da superfície, em pés. Já para os colchões, deve-se informar os seus volumes em barris. Feito isto, o programa mostrará ao usuário através de um gráfico o esquema da disposição dos fluidos, indicando os seus respectivos topos.

Na seção “Cálculo dos Volumes”, o programa informará quais os volumes das pastas de cimento e do fluido deslocador necessários para realizar tal operação. Além disto, pode-se escolher a quantidade de excesso de pasta de cimento que se deseja bombear (em percentual de volume de poço aberto), como discutido no item 2.7. Para fazer isto, basta selecionar a opção “Considerar Excesso” e informar o seu valor.

Há também a opção de considerar o efeito do Gel Estático, ou seja, a perda de pressão referente ao período de transição do cimento quando em pega. Para fazer isto, basta acionar a opção “Considerar o Cimento em Pega”. Ao fazer isto, o gráfico “Condição no Fim da Operação” mostrará o perfil de pressão hidrostática considerando o peso das pastas de cimento como sendo igual ao peso da água de mistura. Por questões de segurança, considerou-se este valor igual ao da água doce, isto é, 8,33 lb/gal. Caso o usuário deseje saber o quanto de pressão o fundo do poço perdeu devido a este fenômeno, basta clicar no botão “Calcular perda de hidrostática”.

Por fim, no final da tela, há algumas verificações básicas quando a consistência dos dados e condições de projeto. A primeira checa se o topo do cimento está assentado acima da sapata do revestimento anterior, condição necessária para garantir o isolamento das zonas no poço aberto e fixar confiavelmente o revestimento. A segunda permite checar se a profundidade da pasta *tail* é superior a da pasta *lead*. E por fim, as duas últimas checagens dizem respeito as profundidades de interesse, avaliando se houve *kick* ou problemas de fratura na formação.

3.1.6 Tela dos Resultados

Preenchidos todos os dados necessários, o usuário poderá seguir para a Tela dos Resultados, Figura 15. Aqui, ele poderá informar a vazão de bombeio que deseja operar. Informado este dado, o programa fornece uma série de informações sobre o as condições

de projeto, tais quais: potência hidráulica mínima requerida na bomba de superfície, a pressão máxima de bombeio atingida na operação, a pressão de bombeio limite para evitar elevar o casing, o tempo necessário para bombear cada fluido, o tempo total da operação e o regime de fluxo dos fluidos no espaço anular.

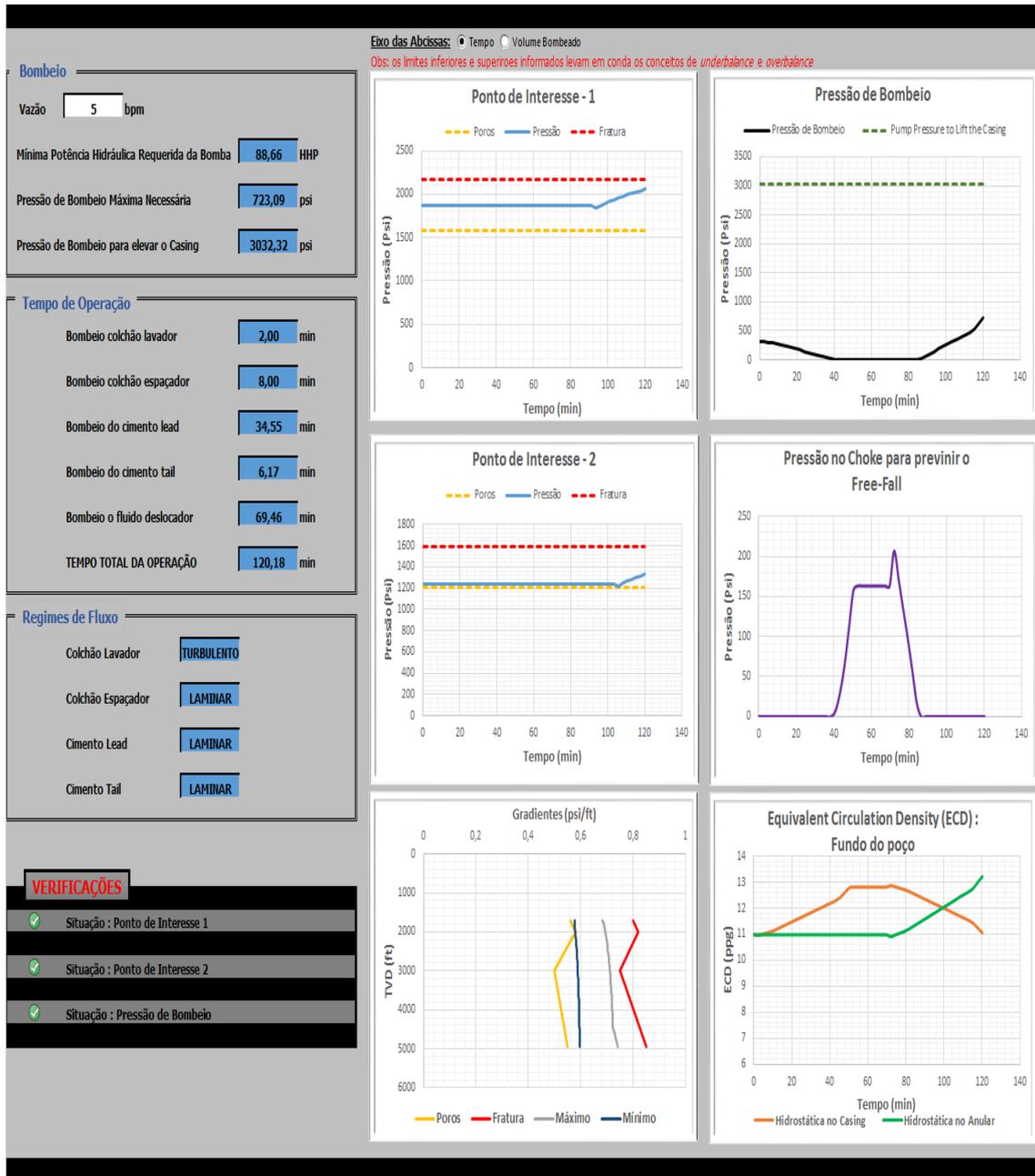


Figura 15: Tela dos Resultados.

Tão importante quanto estes dados são os gráficos gerados pelo programa. Neles estão todas as informações que o usuário precisa conhecer para avaliar o seu projeto de cimentação primária. Gráficos da pressão dinâmica em função do tempo ou do volume

bombeado nas profundidades de interesse são mostrados, assim como os gráficos da pressão de bombeio e pressão no *choke* para evitar o *Free-Fall*.

Além disto, é realizada uma “análise geral” das pressões para todas as profundidades. Isto é feito plotando os gradientes mínimos e máximos de pressão dinâmica obtidos para cada profundidade juntamente com a janela operacional. Desta forma, o usuário tem total conhecimento do que se passa não somente nas regiões de interesse, mas em todo o poço aberto.

Ainda, no gráfico *Equivalent Circulation Density (ECD)*, é mostrado o peso de fluido equivalente às pressões hidrostáticas no fundo do poço pelo lado do anular e pelo lado da coluna. Nele é possível observar o que foi discutido no item 2.10 ao respeito do comportamento da P_{hc} e da P_{ha} durante o deslocamento dos fluidos pelo interior do revestimento.

Por fim, o programa faz verificações a respeito da situação dos pontos de interesse e (ocorrência de fraturas ou influxo de fluidos) da pressão de bombeio (se atingiu o valor limite imposto pela pressão para elevar o revestimento).

CAPÍTULO IV:
RESULTADOS E DISCUSSÕES

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Desenvolvido o modelo matemático e implementado o algoritmo para a realização dos cálculos, a etapa mais importante consiste na validação do programa através de um comparativo com um simulador comercial: o *CEMENT* (versão 2), do grupo *Maurer Engineering*. Os parâmetros comparados foram: curvas de pressão nas profundidades de interesse, curva de pressão de bombeio, curva de pressão no *choke* para prevenir o *Free-Fall* e análise das pressões mínimas e máximas ocorridas nos pontos de interesse.

Para o estudo de caso, utilizaram-se alguns dados de revestimentos, propriedades dos fluidos, vazão de bombeio e margens de segurança tipicamente utilizados nestas operações. Assim, simulou-se a cimentação de um revestimento de 9 5/8” 53,5 lb/ft (colar flutuante a 42ft da extremidade) assentado a 4950ft da superfície descido em um poço com caliper médio de 12 1/4”. O revestimento da fase anterior utilizado foi um de 13 3/8” 54,5 lb/ft, assentado a 1700ft. Os valores dos gradientes de poros e fricção utilizados para definir a janela operacional estão mostrados na Tabela 1:

Tabela 1: Dados utilizados para a criação da Janela Operacional

Descrição	TVD (ft)	Poros (psi/ft)	Fratura (psi/ft)
Sapata	1700	0,56	0,8
-	2000	0,58	0,82
-	3000	0,5	0,75
Fundo do Poço	4950	0,55	0,85

Os valores de *underbalance* e *overbalance* utilizados foram de 0,026 psi/ft. A escolha das profundidades para análise mais detalhada foi feita através dos botões *Default*, que resultou nas formações à 2000 e 3000 ft.

O sistema de fluidos referente a esta análise de casos foi bombeado a uma vazão constante de 5 bpm, e suas características físico-químicas estão mostradas na Tabela 2. O topo da primeira pasta (*lead*) ficou a 1400 ft da superfície, enquanto a da segunda pasta

(*tail*) ficou a 4450ft. O volume de colchão lavador utilizado foi de 10 bbl, enquanto que o de colchão espaçador foi de 40 bbl. Não foi bombeado nenhum excesso de cimento.

Tabela 2: Sistema de fluidos bombeados na análise de caso

Fluidos	Peso (ppg)	Reologia -	μ_p (<i>cP</i>)	τ_L $\left(\frac{lbf}{100ft^2}\right)$	<i>n</i> -	<i>k</i> $\left(\frac{lbf}{ft^2}\right)$
Lama	11	Potência	-	-	0,7	0,02
Lavador	9	Newtoniano	1	-	-	-
Espaçador	12,5	Potência	-	-	0,7	0,03
<i>Lead</i>	13,5	Bingham	25	12	-	-
<i>Tail</i>	16,4	Bingham	30	16	-	-
Deslocador	11	Potência	-	-	0,7	0,02

Vale ressaltar que o simulador comercial utilizado para comparação possui como opções de dados de entrada somente os volumes dos fluidos bombeados, não sendo possível, portanto, escolher, por exemplo, a que profundidade o usuário desejaria que o topo da pasta de cimento ficasse posicionado.

Na Tela dos Fluidos do *PCsim*, Figura 14, vê-se que um dos dados de entrada é justamente as profundidades destes topos. Para alimentar o simulador comercial utilizou-se, então, os volumes de cimento *lead* e *tail* calculados pelo *PCsim*, valores estes também mostrados na Figura 14 (172,76 bbl para o *lead* e 30,86 bbl para o *tail*).

Se o modelo desenvolvido de cálculo estiver correto, então este volume calculado deve corresponder às profundidades de topos de cimento informados, e os valores de saídas do simulador comercial devem ser próximas às do *PCsim*, independentemente de quais dados (de volume ou profundidade dos topos) forem informados.

4.1 PRIMEIRO COMPARATIVO: PRESSÃO DE BOMBEIO

A Figura 16 mostra um comparativo da saída dos valores de pressão de bombeio pelo simulador comercial (linha cheia em azul) e pelo *PCsim* (asteriscos). Percebe-se que os valores são razoavelmente próximos, mostrando boa conformidade.

Nota-se também a ocorrência de um possível *Free Fall* entre cerca de 40 e 85min após o início da operação. Vale ressaltar mais uma vez que o *PCsim* ainda não leva em consideração tal fenômeno para os cálculos de pressão.

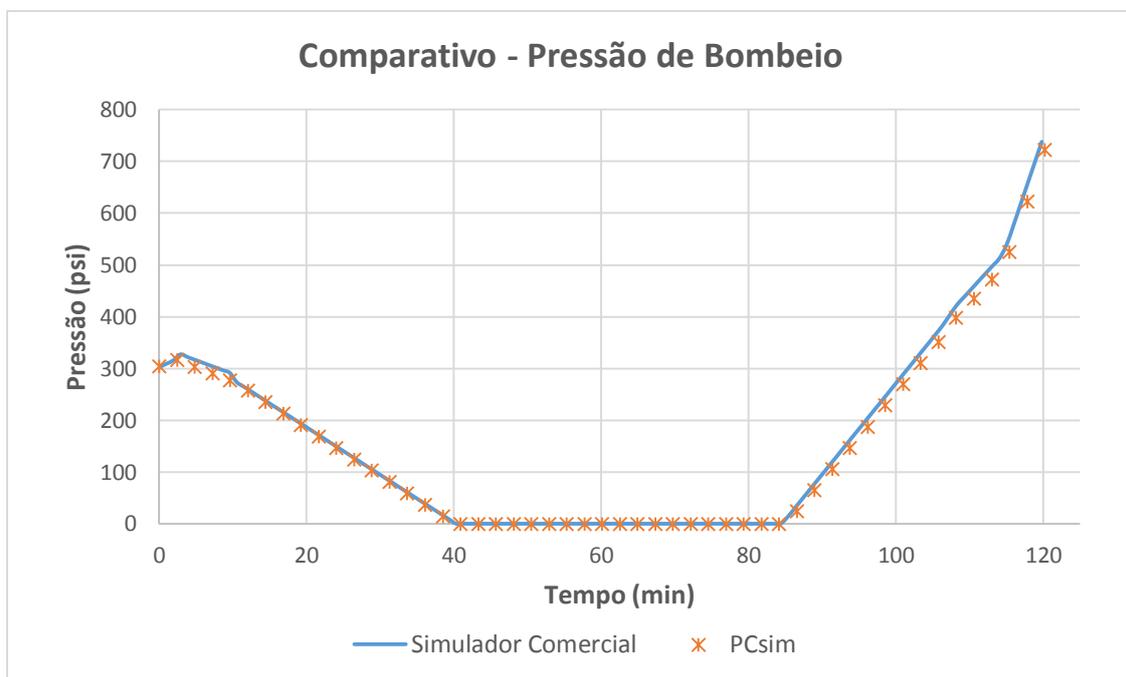


Figura 16: Comparativo da pressão de bombeio

4.2 SEGUNDO COMPARATIVO: PRESSÃO NO *CHOKE*

Se o *PCsim* está de fato realizando os cálculos corretamente, então a curva da pressão no *choke* deve possuir valor nulo em qualquer intervalo de tempo durante a operação, exceto onde os valores de pressão de bombeio na Figura 16 forem nulos.

A Figura 17 mostra um comparativo entre a saída do simulador comercial e a saída do *PCsim* para a curva de pressão no *choke* para evitar o *Free Fall*. Nota-se novamente

boa conformidade entre a linha cheia em azul e os asteriscos. Além disso, percebe-se que, de fato, os valores só não são nulos no intervalo especificado anteriormente.

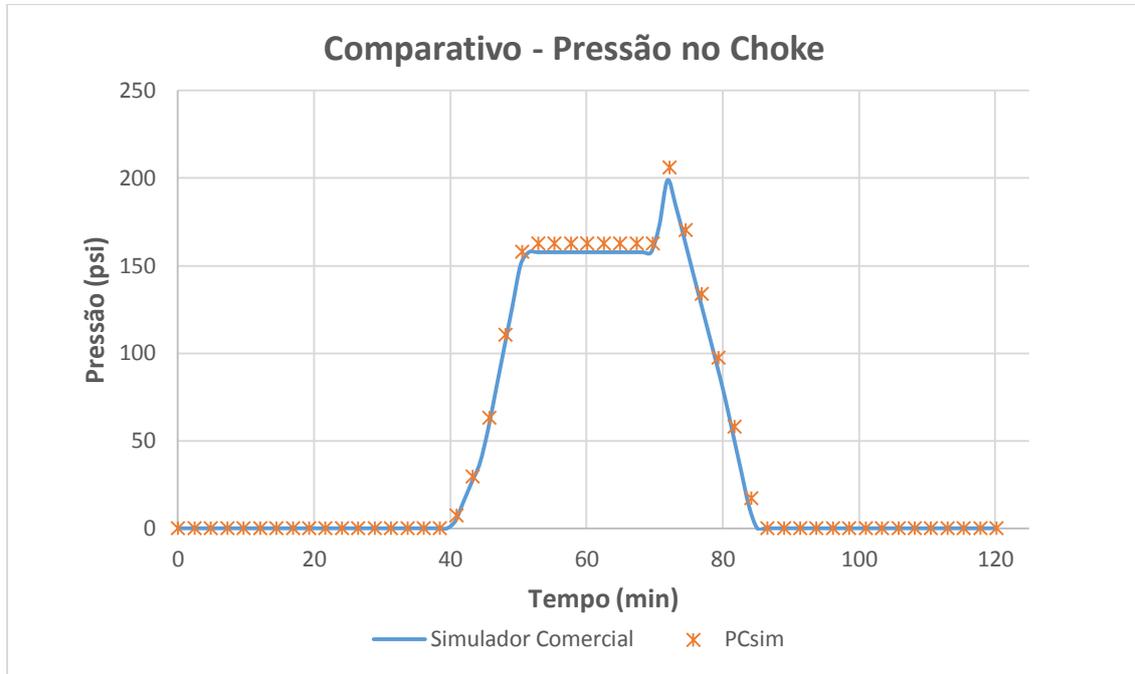


Figura 17: Comparativo da Pressão no *Choke*.

4.3 TERCEIRO COMPARATIVO: PRESSÃO NOS PONTOS DE INTERESSE

A Figura 18 mostra um comparativo da pressão na formação a 2000ft e a Figura 19 um comparativo a 3000ft. Estas profundidades dizem respeito aos pontos de interesse escolhidos na Tela da Formação (Figura 13) através dos botões *Default*. Percebe-se, novamente, uma boa conformidade entre os valores de pressão dinâmica calculados pelo *PCsim* e os valores referentes a saída do simulador comercial.

É válido ressaltar, não somente para este comparativo mas como para todos os já mostrados anteriormente e os que ainda serão, que os valores de pressão dinâmica dependem do tipo de correlação empírica de fator de atrito que se está utilizando para a realização dos cálculos. Pequenas diferenças nos valores podem então ser explicadas pelas diferentes correlações que podem estar sendo utilizadas pelo simulador comercial em sua modelagem, que são desconhecidas.

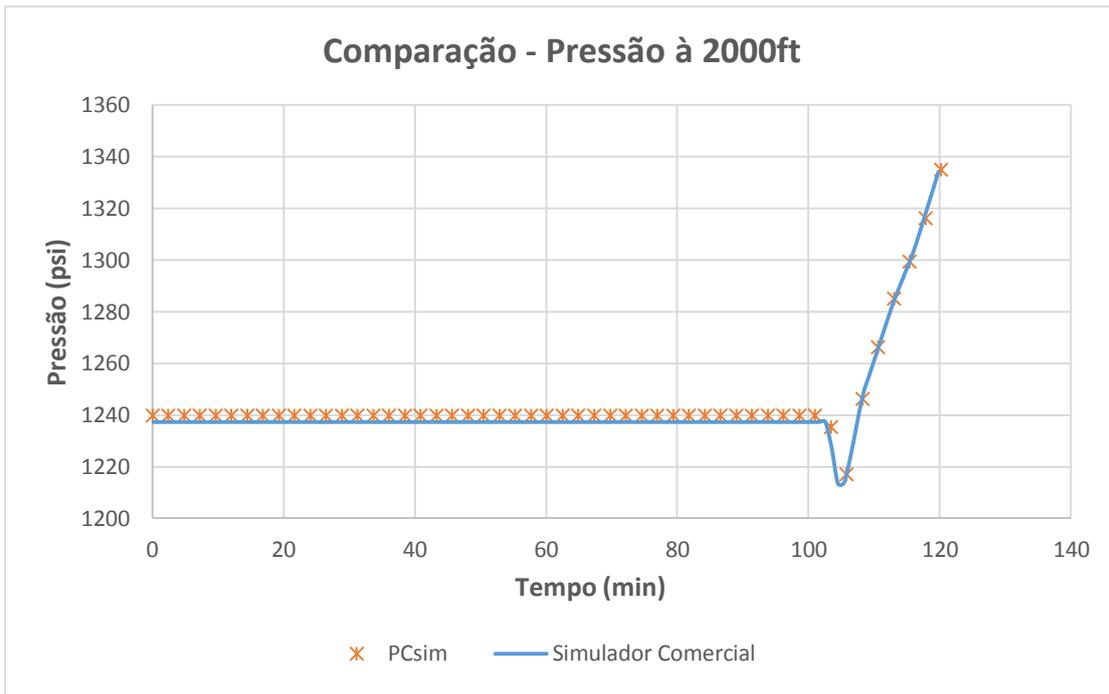


Figura 18: Comparativo da pressão a 2000ft.

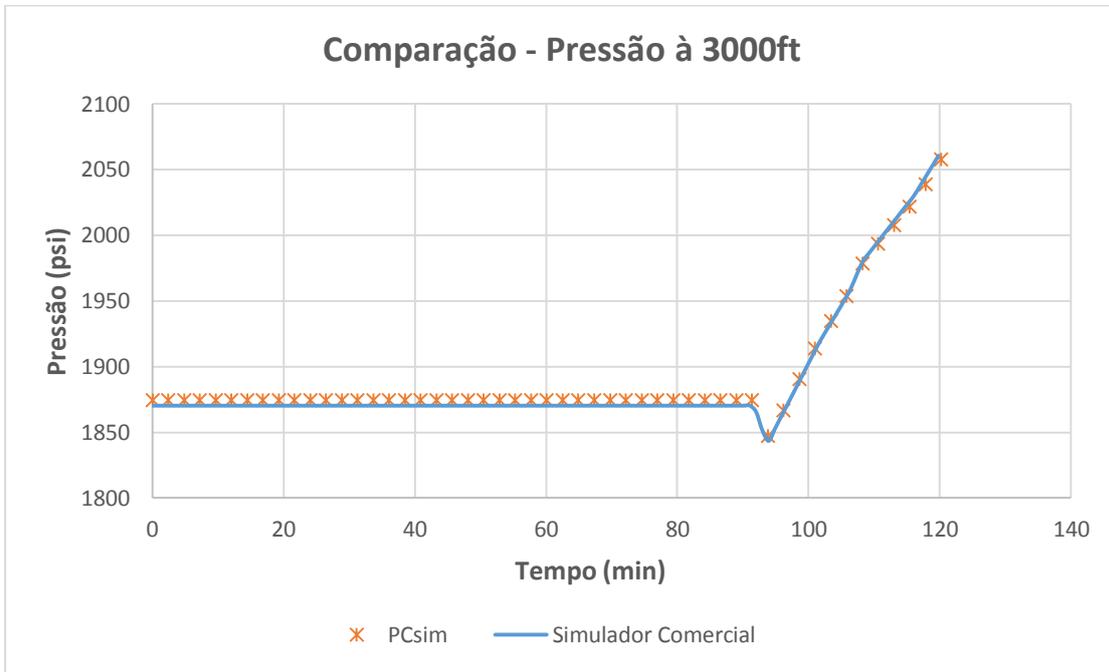


Figura 19: Comparativo da pressão a 3000ft.

4.4 QUARTO COMPARATIVO: GRADIENTES MÁXIMOS E MÍNIMOS

A Figura 20 mostra um comparativo entre os valores mínimos e máximos de gradientes de pressão ocorridos durante a operação de cimentação primária para os valores de profundidades informados na Tabela 1. Fica claro, mais uma vez, uma boa conformidade entre a saída do simulador comercial e os valores calculados pelo *PCsim*.

Já a Tabela 3 mostra um comparativo do tempo em que ocorre os valores mínimos de gradientes de pressão em frente às formações. Percebe-se que os erros relativos, calculados através da Equação (22), não ultrapassaram 0,2%.

$$Erro = 100 \left| \frac{Valor_{SIMULADOR} - Valor_{PCsim}}{Valor_{SIMULADOR}} \right| \quad (22)$$

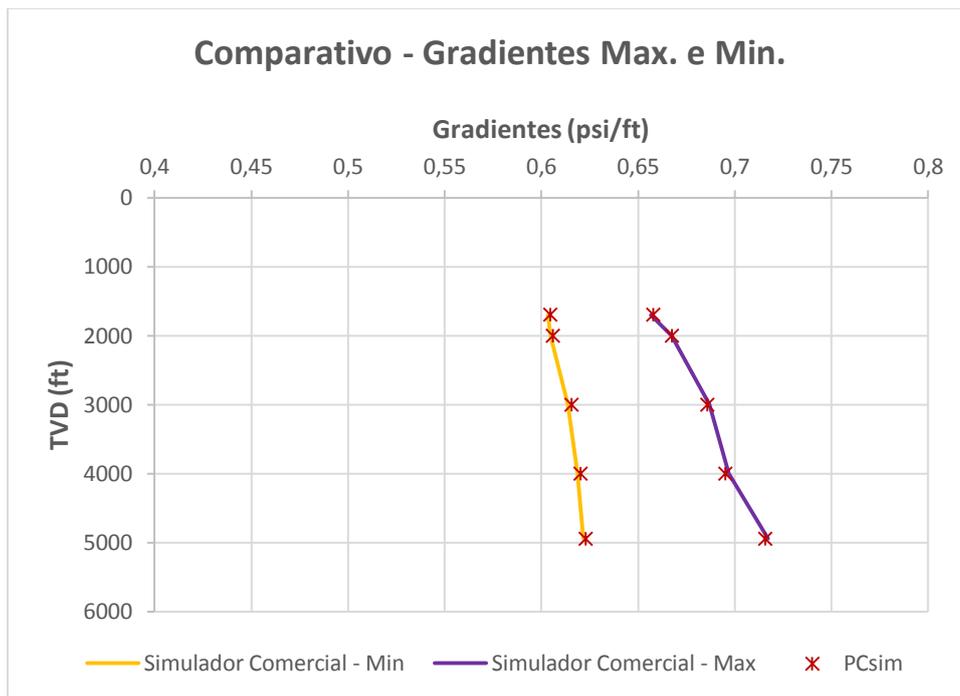


Figura 20: Comparativo entre os gradientes máximos e mínimos.

Tabela 3: Comparativo do tempo em que ocorre os gradientes mínimos.

TVD (ft)	Tempo (min) Simulador Comercial	Tempo (min) <i>PCsim</i>	Erro (%)
1700	108,3	108,3	0
2000	104,94	104,95	0,009
3000	93,68	93,80	0,1281
4000	82,66	82,64	0,024
4950	72,12	72,10	0,027

CAPÍTULO V:
CONCLUSÕES

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Aqui, serão citadas as principais conclusões a respeito do trabalho desenvolvido, assim como recomendações para trabalhos futuros.

5.1 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentada uma importante ferramenta computacional de fácil utilização pelo usuário para a simulação e planejamento de operações de cimentação primária. Com ela é possível planejar tais operações, fornecendo estimativas das pressões em frente às formações durante toda a operação. Além disto, o *PCsim* realiza verificações de dados e de condições de projeto, identificando, quando existirem, problemas de fratura das formações e influxo de fluidos para o interior do poço. Ainda, é possível verificar a ocorrência ou não do *Free-Fall* na operação a partir da análise dos gráficos da pressão de bombeio e da pressão no *choke*.

Identificados possíveis problemas de fratura ou *kick*, o usuário poderá alterar dados operacionais (vazão de bombeio, disposição e reologia dos fluidos) de forma a adequar o projeto aos critérios de segurança. Em outras palavras, o *PCsim* permite não somente a realização de simulações, mas também o seu planejamento.

O tratamento matemático utilizado para o cálculo das perdas por fricção, das pressões dinâmicas, da pressão de bombeio, da pressão no *choke* para evitar o *Free-Fall* e da pressão necessária para elevar o revestimento foram apresentados. Além disto, também foram citadas importantes limitações que o programa ainda possui e que devem ser sanadas para a melhoria do programa.

Com o intuito de validar a ferramenta computacional desenvolvida, foram realizados comparativos com o simulador *CEMENT* do grupo *Maurer*, utilizado na indústria do petróleo para simular operações de cimentação primária. Na análise dos gráficos, percebeu-se poucas diferenças entre os valores calculados pelo *PCsim* e os do simulador. Estas pequenas diferenças provavelmente devem-se ao fato de que os valores de pressão calculados dependem das correlações empíricas de perda de fricção utilizadas. No mais, os resultados se mostraram aceitáveis e satisfatórios, indicando que, pelo menos para as condições testadas, o *PCsim* se mostrou confiável e representativo.

5.2 RECOMENDAÇÕES

Recomenda-se, para trabalhos futuros, a implementação das seguintes melhorias no programa:

- Modelagem matemática do fenômeno *Free Fall*;
- Propiciar a possibilidade de bombear os diferentes fluidos com vazões distintas;
- Modelar a cimentação primária em poços direcionais;
- Promover a flexibilidade de se trabalhar com colunas de revestimento heterogêneas, isto é, colunas de diferentes diâmetros em série;
- Simular a cimentação com múltiplos-estágios;
- Realizar mais estudos de casos com diferentes condições de vazão de bombeio, disposição e reologia de fluidos;
- Adicionar outros modelos reológicos de fluidos não newtonianos;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- API SPEC 10A: *Specifications for Cements and Materials for Well Cementing*, 2000.
- API RP 10B: *Recommended Practice for Testing well Cements*.
- AZEVEDO, M.S.: *Análise Geomecânica Aplicada à Análise de Estabilidade de Poços*. Rio de Janeiro : UFRJ/Escola Politécnica, 2011.
- BEIRUTE, R.M.: “*The Phenomenon of Free Fall During Primary Cementing*”, paper SPE 13045.
- CAMPOS, G.; SIMÃO, A.C.; TEIXEIRA, C.K.; CONCEIÇÃO, F.C. A. Curso básico sobre cimentação primária. Apostila Interna, CENPES/PETROBRAS, novembro de 2002
- MACHADO, J.C.V, *Reologia e Escoamento de Fluidos: Ênfase na Indústria do Petróleo*. Editora Interciência, Petrobrás, Rio de Janeiro, 2002.
- NELSON, E.B., *Well Cementing*, Saint-Etienne: Schulumberger Educational Services, 1990.
- NEWMAN, K. Wojtanowicx, A., e Gahan, B.: “*Improving Gas Well Cement Jobs with Cement Pulsation*”, GasTIPS (2001).
- PARAISO, E.C.H. : *Estudo do Escoamento de Pastas de Cimento em Dutos Circulares e Anulares Concêntricos*. Tese de Mestrado, 2011.
- PETROGUIA 2002, elaborado pela gerência tecnológica de Engenharia de Poço da Petrobrás.
- ROCHA, J.M.S. “*Estudo da Migração de Gás em Pastas de Cimento Para Uso em Poços de Petróleo*”. Tese de Mestrado, 2010.
- ROCHA, L.A.S; AZEVEDO,T.C.: “*Projeto de Poços de Petróleo : Geopressões e Assentamento de Colunas de Revestimento*”. Editora Interciência,
- THOMAS, J.E.: *Fundamentos da Engenharia de Petróleo*. Editora Interciência. Petrobras, Rio de Janeiro, 2001.