

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

Dissertação Apresentada à
Faculdade de Engenharia Mecânica
Como Requisito Parcial à Obtenção do
Título de Mestre em Engenharia de Petróleo

ESTUDO DAS PRESSÕES DE BOMBEIO
DURANTE AS OPERAÇÕES DE CIMENTAÇÃO
COM PASTAS ESPUMADAS

Esse exemplar corresponde a redação final da tese
defendida pelo Engenheiro Heitor Garcia Junior e aprovada
pela comissão julgadora em 9/3/92

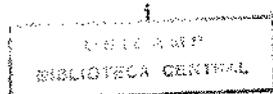
Eric Maidla
Prof. Dr. Eric Edgar Maidla

Autor: Heitor Garcia Junior

19/92

Orientador: Eric Edgar Maidla

Março de 1992

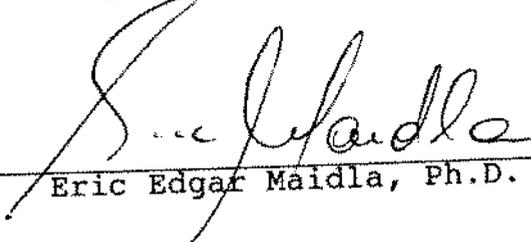


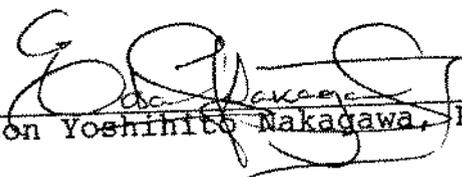
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

A dissertação "Estudo das Pressões de Bombeio Durante as Operações de Cimentação com Pastas Espumadas", elaborada por Heitor Garcia Junior e aprovada por todos os membros da Banca Examinadora, foi aceita pela Sub-Comissão de Pós-Graduação em Engenharia de Petróleo, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Petróleo.

Campinas, 9 de Março de 1992.

Banca Examinadora:


Eric Edgar Maida, Ph.D.


Edson Yoshihito Nakagawa, Ph.D.


Otto Luiz Alcântara Santos, Ph.D.

Este trabalho é dedicado à
minha esposa Edna, meus fi-
lhos Priscila e Heitor Ne-
to e meus pais Heitor e
Ada.

AGRADECIMENTOS

À PETROBRÁS, pela oportunidade que me proporcionou na realização do Curso de Mestrado em Engenharia de Petróleo, na UNICAMP;

Ao Prof. Dr. Eric Edgar Maidla, pela amizade e inestimável colaboração na realização e orientação no desenvolvimento desta dissertação;

Aos professores, funcionários e colegas da UNICAMP, pelo agradável convívio universitário proporcionado;

À SEBEP - Serviços Brasileiros Especializados em Petróleo, pela valiosa colaboração na realização de testes de laboratório, cedendo amostras de aditivos químicos e cimento. Pelo fornecimento de dados de simulação, os quais auxiliaram-me na comparação dos resultados.

À UNICAMP, pela cessão dos equipamentos de laboratório necessários à execução dos testes.

À HALLIBURTON SERVICES COMPANY, pela atenção dada ao meu orientador em questões teóricas e fornecimento de dados de simulação para efeito de comparação de resultados.

Aos amigos e colegas da PETROBRÁS, André, Wellington, Carlos Fernando, Edson, Graça, Sarmento, Osmond e tantos outros, pelo auxílio na escolha e desenvolvimento do presente trabalho.

Aos meus chefes de então, Clóvis e Siqueira, pelo apoio e incentivo dados ao meu curso de mestrado.

A todas as pessoas que direta ou indiretamente colaboraram na elaboração deste trabalho.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO	vii
Capítulo	
I. INTRODUÇÃO	1
Necessidades de se espumar uma pasta de ci- mento.	1
Principais aplicações de uma pasta de cimen- to espumada.	1
Como espumar uma pasta de cimento.	2
Equipamentos necessários à operação.	2
Programação da cimentação.	3
Descrição sucinta da operação.	4
II. HISTÓRICO	5
III. SÍNTESE DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA	7
Parte Estática.	7
Parte Dinâmica.	8
IV. FORMULAÇÃO	10
Modelo homogêneo de fluxo multifásico.	10
Cálculo da taxa de injeção de nitrogênio.	12
Equações de conservação.	18
Cálculo das perdas de carga por atrito.	19
Reologia da pasta espumada.	21
Variação da vazão ao longo da espuma.	23
Fator de compressibilidade z .	24
V. TESTES DE LABORATÓRIO	26
Tabela com dados das leituras reológicas.	28

VI. PROGRAMA DE COMPUTADOR	31
Listagem de Entrada de Dados.	31
Listagem de Saída de Dados.	32
Síntese do Programa.	32
VII. DADOS DE CAMPO	35
Dados de campo - cimentação espumada.	40
VIII. CONCLUSÕES	42
NOMENCLATURA	44
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46

RESUMO

O presente trabalho consiste em desenvolver um programa computacional que possa simular as condições de bombeio de uma pasta de cimento espumada, em condições dinâmicas, apresentando como resultado, as pressões de bombeio durante toda a fase de deslocamento da pasta, ao longo de todo o caminho percorrido por esta no poço.

A partir da obtenção desses valores de pressão, podemos dimensionar o projeto de toda a operação, podendo-se alterar valores de taxa de injeção de gás na pasta base de cimento, vazões envolvidas no deslocamento, volumes de fluidos, contra pressões no anular, etc.

Para tal, foi feita uma extensiva pesquisa bibliográfica, na qual obteve-se dados suficientes para se estabelecer equações adequadas ao cálculo das propriedades da espuma, assim como o cálculo das perdas de carga envolvidas durante o deslocamento de todo o conjunto de fluidos envolvidos na operação de cimentação espumada.

Durante a formulação das propriedades reológicas da espuma, foi utilizada uma correlação que, a partir da pasta base de cimento, determina-se os parâmetros reológicos da espuma. O

modelo reológico escolhido foi o da Potência (*Power Law*), e esta correlação permite calcular os parâmetros n' e k' da espuma, em função de n e k da pasta base, como também em função da temperatura e da fração de vazios (gás) da espuma no ponto em estudo.

Foram realizados testes de laboratório com reômetro Fann 35 para validação da correlação ⁽⁵⁾ anteriormente citada. São apresentados em anexo os dados e gráficos destes testes laboratoriais, assim como suas conclusões.

A linguagem do programa escolhida foi Turbo Pascal da *Borland International*, para ser utilizada em micro computadores compatíveis com *IBM PC*, largamente utilizados pelas empresas internacionais e nacionais.

ABSTRACT

This present work consists in studying the pressures that develop during a foam cement job under dynamic pumping conditions during the entire slurry displacement in the well path.

This pressure profile allow us to design the complete foam cement job, choosing the adequate Nitrogen injection rate, pumping flow rates, fluid volumes and back pressures.

For such, the bibliographical research gave us sufficient data to establish equations to calculate the foam properties and its hydrostatic and friction pressures for all fluids involved in the job.

Based on correlations developed by Harris-Reidenbach (⁵), foam rheology properties were calculated for the Power Law model.

Laboratories tests using a Fann 35 rheometer were performed to validate these correlations. The results are presented through the use of charts and tables.

The computer program was developed in Turbo Pascal 5.5
and can be run in any PC IBM compatible.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Necessidades de se espumar uma pasta de cimento

Determinadas operações de cimentação necessitam que uma pasta de cimento tenha pesos específicos baixos para poderem propiciar uma operação que desenvolva baixas pressões de bombeio.

O uso de pastas convencionais de baixo peso, que utilizam a incorporação de água para se tornarem mais leves, muitas vezes não tem a resistência à compressão desejada, e por este motivo utilizam-se pastas de cimento com gás incorporado, formando assim uma espuma que pode adquirir resistência à compressão mais adequada.

Principais aplicações de uma pasta de cimento espumada

- Cimentar zonas frágeis, geralmente depletadas, com baixa resistência a pressões.

- Cimentar zonas portadoras de gás que possam ser contidas pela expansão do gás incorporado na pasta de cimento.

- Cimentar grandes extensões de poço sem a necessidade de se executar cimentação em mais de um estágio, eliminando assim todos os riscos inerentes a esta operação, sem contar a economia do equipamento e tempo de espera para executar os estágios seguintes.
- Cimentar zonas de cavernas, com menor risco de se perder a pasta devido a propriedades tixotrópicas e ao baixo peso da pasta.
- Executar *squeeze* com maiores chances de sucesso, já que se pode deslocar uma pasta com densidade bastante baixa, e posteriormente adensá-la aplicando-se pressão após seu deslocamento, sem o efeito de pressões adicionais de perda de carga devido ao fluxo da pasta.

Como espumar uma pasta de cimento

Basicamente, para se obter uma pasta de cimento espumada, devemos misturar uma pasta de cimento convencional que chamaremos de pasta base, e injetarmos nesta, quantidades de gás, geralmente nitrogênio, que possam baixar o peso da pasta até um valor pré requerido. Faz-se necessário o uso de agentes espumantes e estabilizantes de espuma na pasta de cimento, sem os quais não conseguimos obter uma espuma estável e homogênea.

Equipamentos necessários à operação

Além do equipamento convencional de cimentação, que consiste de silos de cimento, unidade de bombeio e mistura da

pasta, utilizam-se também tanques de armazenagem de nitrogênio líquido a baixa temperatura, unidade de bombeio e aquecimento do nitrogênio gasoso.

Estranguladores para energinação da mistura do nitrogênio com a pasta de cimento, com o intuito de homogeneizar as bolhas em seu interior.

Dosadores líquidos de agentes espumantes e estabilizadores de espuma.

Manômetros e linhas em geral.

Densitômetros e registradores de cartas para pressão e vazão.

Programação da cimentação

Elabora-se inicialmente o programa de cimentação a ser executado, estabelecendo-se o seguinte:

Pasta Base e Pasta Espumada:

Através de testes laboratoriais, determina-se sua composição.

Colchões Lavadores e Espaçadores:

Calculam-se volumes e composição.

Vazões e Pressões:

São calculados seus valores máximos permitidos.

Descrição sucinta da operação

Uma vez elaborado o programa de cimentação, condiciona-se o fluido de perfuração para a operação.

Pré misturam-se os colchões lavadores e/ou espaçadores e também a pasta base de cimento.

Após o bombeio dos colchões, inicia-se o bombeio e mistura da pasta base com o nitrogênio sendo injetado e misturado em proporções pré estabelecidas.

Após a mistura e injeção da pasta espumada, desloca-se ou não uma pasta de cimento não espumada atrás (*tail slurry*).

Por fim, bombeia-se o fluido de deslocamento utilizando-se um tampão de borracha separando os dois fluidos que servirá para nos dar o indicativo do término do deslocamento após o posicionamento deste tampão no colar do revestimento.

CAPÍTULO II

HISTÓRICO

Com a necessidade de se utilizar sistemas de pastas de cimento com baixa densidade, pelas companhias de cimentação, foram desenvolvidos alguns sistemas alternativos (²):

- Utilização de estendedores químicos (p.e. silicatos de sódio) ou sólidos inorgânicos (p.e. bentonitas e materiais pozolânicos) para se aumentar a razão água / cimento sem haver decantação de sólidos.
- Utilização de sólidos de baixa densidade incorporados à pasta com água adicional, tais como fibras vegetais, carvão ou gilsonita.
- Utilização de micro esferas ocas de cerâmica em pastas convencionais, sem adição de água extra.
- Finalmente, utilização de ar ou nitrogênio incorporado à pasta de cimento contendo espumantes e estabilizadores de espuma.

Para utilização de pastas com massa específica maiores que 1438 kg/m^3 (12 lb/gal), os dois primeiros sistemas têm tido larga utilização, sendo uma solução bastante econômica. Porém quando se necessita uma massa específica menor, não se consegue uma pasta com resistência à compressão e nem propriedades reológicas adequadas.

O terceiro sistema permite obter propriedades e massa específica mais baixa adequadas, porém limitado pela resistência à compressão das esferas de cerâmica. O seu custo mostra-se também muito elevado.

Já os sistemas aerados permitem as vantagens das esferas ocas, porém com boa resistência à compressão e custos relativamente mais baixos.

Por este motivo, estes sistemas têm sido largamente utilizados no exterior há alguns anos.

CAPÍTULO III

SÍNTESE DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Podemos separar esta simulação em duas partes distintas, ou seja, uma parte estática e outra dinâmica.

Parte Estática

O principal objetivo nesta parte foi o de se estabelecer a quantidade de nitrogênio que deverá ser injetada na pasta.

Sendo a pasta espumada um fluido compressível, a sua densidade varia de acordo com as condições de pressão e temperatura.

Desta maneira, podemos programar a operação de injeção de gás na pasta de cimento de duas maneiras básicas:

- a) Pasta de cimento espumada com densidade constante ao longo do trecho a ser cimentado. Para que isto ocorra, devemos variar a taxa de injeção de gás na pasta ao longo de sua mistura e injeção no poço.

Na prática, escolhemos pequenos trechos do intervalo a ser cimentado, e variamos a taxa de injeção para cada

trecho.

Uma opção seria a de se escolher trechos com volumes tais que com a vazão de mistura da pasta tem-se um tempo de um minuto para cada variação.

- b) Taxa de injeção de gás constante. Com isto, tem-se uma pasta de cimento com densidade variável ao longo do trecho cimentado com a espuma.

Partindo-se da condição final de deslocamento da pasta, quando teríamos já uma condição estática, calculamos a quantidade de gás na pasta considerando sua densidade desejada, e discretizando o trecho da espuma para podermos avaliar as condições de pressão em cada intervalo discretizado.

Com isto, podemos obter como resultados, a taxa de injeção de gás na pasta, os volumes de pasta base e nitrogênio (em condições *standard*) e um gráfico com o perfil de pressões no poço logo após o término do deslocamento.

Parte Dinâmica

Esta foi sem dúvida a parte mais difícil, e que exigiu uma modelagem matemática amparada em dados de campo para se obter uma aproximação das pressões desenvolvidas durante a operação de cimentação.

Nesta parte levou-se em consideração, além da geometria

do poço, as propriedades reológicas do fluido para se avaliar as perdas por fricção em função da vazão da operação.

O resultado final é uma listagem juntamente com um gráfico das pressões em diversos pontos ao longo de todo o deslocamento da espuma.

Com este resultado, e de posse do perfil de gradiente de fratura do poço, podemos avaliar se a operação é ou não exequível com a vazão e densidade da espuma inicialmente programadas.

CAPÍTULO IV

FORMULAÇÃO

Modelo homogêneo de fluxo multifásico

No caso da espuma, adotamos o modelo homogêneo considerando que as bolhas distribuem-se uniformemente na pasta de cimento, e a pasta em si como sendo o meio contínuo desta mistura comportando-se como um líquido.

Na verdade, sabemos tratar-se de um fluido onde encontramos o meio gasoso composto pelo gás nitrogênio, o meio aquoso composto por água, aditivos químicos aquosos, e o meio sólido composto pelas partículas de cimento e em algumas vezes por aditivos químicos sólidos.

A premissa do modelo homogêneo baseia-se no fato de que um fluido homogêneo seja desejável para o trabalho que queremos realizar. A pasta base de cimento é projetada de tal forma que, após vários ensaios de laboratório para determinação de sua composição, obtenha-se uma reologia tal que não haja decantação de sólidos, um mínimo de água livre, e que se mantenha bombeável até o final do deslocamento da pasta à sua posição final no poço.

A distribuição uniforme de bolhas e seu tamanho, é regulado pela quantidade de agentes espumantes e estabilizadores de espumas, assim como pela quantidade do próprio gás na composição da pasta.

Da mesma maneira que são realizados vários testes de laboratório para se obter a composição da pasta base, são também realizados vários testes laboratoriais com a espuma, de modo a obter-se uma espuma consistente e estável. Vale lembrar que estes testes são realizados em condições de pressão atmosférica.

Um ponto de crucial importância na execução da operação da pasta espumada, é no momento de sua mistura e injeção no poço. Apesar de o nitrogênio ainda encontrar-se em temperaturas bastante baixas, a presença de baixas pressões pode provocar um aumento considerável no tamanho de bolhas dentro da pasta criando uma situação de instabilidade da espuma no momento de comprimi-la e manter as bolhas uniformemente distribuídas.

O fenômeno de queda livre do cimento, ou *free fall* como é conhecido, não é desejável à execução da operação, em virtude da presença de baixas pressões atuantes na pasta espumada. Por este motivo, não foi implementado o seu cálculo no modelo numérico que desenvolvemos. Vale lembrar que este fenômeno é detectado durante o cálculo. O *free fall* deve ser evitado com maiores contra pressões no anular, limitando-se o seu valor

pelo gradiente de fratura encontrado no poço.

Cálculo da taxa de injeção de nitrogênio

Na discretização dos trechos de espuma, são consideradas algumas de suas propriedades como sendo constantes em cada elemento, tais como: massa específica, temperatura, fração de vazios (também conhecida como qualidade da espuma) e reologia.

Determinando-se a priori a massa específica desejada para a espuma, passamos ao cálculo de sua fração de vazios (conseqüentemente a taxa de injeção de nitrogênio na espuma), partindo-se da premissa que a pressão no topo do trecho discretizado seja conhecida, e procedemos ao cálculo da pressão no meio do trecho discretizado.

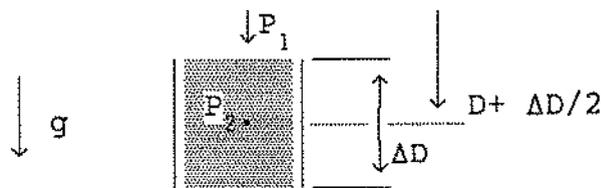


FIG.1

Considerando-se apenas a condição estática, a pressão P_2 no meio do trecho discretizado (FIG.1) pode ser calculada da seguinte maneira:

$$P_2 = P_1 + \rho_e g \Delta D/2 \dots\dots\dots(1)$$

Porém, para o cálculo da massa específica ρ_e , é necessário que se conheça a pressão P_2 , e passamos então a um cálculo iterativo, até que a pressão P_2 seja conhecida.

A massa específica ρ_e pode ser calculada da seguinte maneira:

$$\rho_e = \Gamma \cdot \rho_n + (1 - \Gamma) \cdot \rho_{pb} \dots \dots \dots (2)$$

onde:

ρ_e : massa específica da espuma.

ρ_{pb} : massa específica da pasta base.

ρ_n : massa específica do nitrogênio gás.

Γ : fração de vazios ou qualidade da espuma.

Considerando que ρ_e e ρ_{pb} sejam conhecidas, necessitamos calcular o valor de ρ_n para podermos calcular Γ .

Temos então que:

$$\Gamma = \frac{(\rho_{pb} - \rho_e)}{(\rho_{pb} - \rho_n)} \dots \dots \dots (3)$$

Precisamos então proceder ao cálculo de ρ_n :

$$\rho_n = \frac{\text{massa de nitrogênio gás}}{\text{volume de nitrogênio gás}} \dots \dots \dots (4)$$

Sabemos que nas condições normais de temperatura e pressão, um mol de gás ocupa 22,4 litros.

As condições normais de temperatura e pressão são:

$$P = 1 \text{ atm e } T = 0 \text{ }^\circ\text{C ou } 32 \text{ }^\circ\text{F.}$$

Porém, as condições *standard* para gases são: $P = 1 \text{ atm}$ e $T = 60 \text{ }^\circ\text{F}$. Temos portanto que converter o volume nas CNTP para

as condições *standard* dos gases.

Aplicamos então a equação dos gases:

$$P V = n z R T. \dots\dots\dots(5)$$

Para baixas pressões $z = 1$.

(z : fator de compressibilidade dos gases).

Temos que:
$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \dots\dots\dots(6)$$

Sendo: $P_1 = 1 \text{ atm}; V_1 = 22,4 \text{ l}; T_1 = (32 + 459,7) \text{ }^\circ\text{R};$

$P_2 = 1 \text{ atm}; T_2 = (60 + 459,7) \text{ }^\circ\text{R},$ podemos então calcular V_2 .

Da equação 6 calculamos $V_2 \longrightarrow V_2 = 23,7 \text{ l}.$

Então, o volume de um mol de gás nas condições *standard* de pressão e temperatura é de 23,7 litros.

Para o cálculo de ρ_n , necessitamos saber a relação entre sua massa e seu volume.

Sabemos que para 1 mol de gás (seu peso molecular expresso em gramas), o volume nas condições *standard* é de 23,7 l.

Podemos então calcular ρ_e nas condições *standard*, e a partir da equação dos gases, podemos calcular ρ_e nas condições (P e T) em que se encontra a espuma no trecho discretizado

(necessitamos saber a pressão no ponto de estudo da espuma).

Sabendo que o peso molecular do gás nitrogênio é 28,018; passamos então ao cálculo do volume do gás nas condições de pressão e temperatura.

$$P_{STD} V_{STD} = n R T_{STD} \dots\dots\dots(7)$$

sendo $n = 1$ mol.

Então, pela relação entre as equações 5 e 7, podemos calcular o volume de um mol de nitrogênio gás.

$$V_n = \frac{z T P_{STD} V_{STD}}{P T_{STD}} \dots\dots\dots(8)$$

A massa correspondente a este volume é de 1 mol de gás.

Substituindo por valores numéricos, e trabalhando no Sistema Internacional de unidades, temos as seguintes equações:

$$\rho_n = \frac{\text{massa de nitrogênio gás}}{\text{volume de nitrogênio gás}} \dots\dots\dots(9)$$

$$\rho_n = \frac{1 \text{ mol nitrogênio}}{\text{Volume de 1 mol}} \dots\dots\dots(10)$$

Sendo 1 mol de nitrogênio equivalente a uma massa de 0,028018 Kg, e substituindo na equação 10 teremos:

$$\rho_n = \frac{1 \text{ mol} \cdot T_{STD} P}{z T P_{STD} V_{STD}} \dots\dots\dots(11)$$

$$\rho_n = \frac{0,028018 \cdot 288,6 \cdot P}{z \cdot T \cdot 101353 \cdot 0,0237} \dots\dots\dots(12)$$

$$\rho_n = 0,003366 \frac{P}{z \cdot T} \dots\dots\dots(13)$$

As unidades são: ρ_n : kg/m³

P : Pa

T : K.

Desta maneira, podemos então escrever a fórmula para a qualidade da espuma como sendo:

$$\Gamma = \frac{(\rho_{pb} - \rho_e)}{\left(\rho_{pb} - 0,003366 \frac{P}{z \cdot T} \right)} \dots\dots\dots(14)$$

Para o cálculo da taxa de injeção de nitrogênio, que aqui chamaremos de B, adotamos a seguinte formulação:

$$B = \frac{\text{volume nitrogênio nas condições standard}}{\text{volume pasta base}} \dots\dots\dots(15)$$

Chamando o numerador de V_{STD} , tiramos seu valor da equação (8):

$$V_{STD} = \frac{P \cdot T_{STD}}{z \cdot T \cdot P_{STD}} V_n \dots\dots\dots(16)$$

Portanto:

$$B = \frac{\frac{P \cdot T_{STD}}{z \cdot T \cdot P_{STD}} \cdot V_n}{V_{pb}} \dots\dots\dots(17)$$

Mas $V_n = \Gamma \cdot V_e$ e $V_{pb} = (1-\Gamma) \cdot V_e$; onde V_e é o volume da espuma.

Substituindo na equação 17 teremos:

$$B = \frac{\frac{P}{z} \frac{T_{STD}}{P_{STD}} \cdot \Gamma}{(1-\Gamma)} \dots\dots\dots(18)$$

Substituindo os valores numéricos para o Sistema Internacional de unidades teremos:

$$B = 0,002847 \frac{\Gamma}{(1-\Gamma)} \frac{P}{z T} \dots\dots\dots(19)$$

Sendo: B, z, Γ : dimensionais

P: Pa

T: K.

Por esta formulação, podemos calcular a qualidade da espuma Γ a partir da taxa de injeção de nitrogênio B:

$$\Gamma = \frac{1}{1 + 0,002847 \frac{P}{z T B}} \dots\dots\dots(20)$$

EM RESUMO: Para procedermos ao cálculo da taxa de injeção de nitrogênio na pasta base, escolhemos o ponto médio do trecho de espuma com taxa constante, e conhecendo-se a massa específica da espuma requerida, a massa específica da pasta base, a temperatura e a pressão estimada, calcula-se a qualidade da espuma com a equação (14).

De posse da qualidade da espuma, calcula-se a taxa de injeção B com a equação (19).

Discretiza-se o intervalo com B constante e estima-se a pressão no ponto médio de ΔD (FIG.1) calculando-se a qualidade da espuma com a equação (20).

De posse do valor da qualidade, calculamos a massa específica da espuma no ponto médio de ΔD utilizando as equações (2) e (13).

Com o valor da massa específica da espuma, recalculamos a pressão no ponto médio utilizando a equação (1), recalculando assim a qualidade da espuma, massa específica da espuma e a pressão, até que, iterativamente, obtenhamos a pressão no ponto médio em estudo.

Após o cálculo da taxa de injeção B, e a massa específica da espuma ao longo do trecho discretizado, calculamos ρ_e médio no trecho e comparamos com ρ_e requerido.

Havendo muita divergência entre estes dois valores, recalculamos B como acima, até que a diferença entre os valores de ρ_e requerido e médio medido, estejam numa tolerância pré determinada (*).

Desta maneira concluímos os cálculos da parte estática da simulação.

Equações de conservação

Fazendo-se o desenvolvimento das equações de conservação de massa e energia, chega-se à seguinte formulação:

$$\frac{dP}{dD} = 2 f \rho \frac{v_a^2}{d_e} + \rho g + \frac{d}{dD} \left(\dot{G}_n v_n + \dot{G}_{pb} v_{pb} \right) \dots\dots(21)$$

Considerando que a espuma seja um fluido homogêneo, cada parcela representa a perda de carga respectivamente de atrito, gravidade e de aceleração.

Em nossos cálculos desprezamos a perda por aceleração, por não ser significativa para os cálculos.

Cálculo das perdas de carga por atrito

Para a determinação das perdas de carga por atrito, foram utilizadas as recomendações do trabalho de Silva, Martins e Oliveira (6).

Modelo Reológico: Potência (Power Law).

$$\tau = k' \cdot (\dot{\gamma})^{n'} \dots\dots\dots(22)$$

Diâmetro Equivalente: Anular Slot.

$$d_e = 0,816 (d_2 - d_1) \dots\dots\dots(23)$$

Perda de Carga por Atrito:

$$\frac{dP}{dD} = 2 f \rho \frac{v_a^2}{d_e} \dots\dots\dots(24)$$

Fator de Atrito:

Regime Laminar: $f = \frac{16}{N_{Re}} \dots\dots\dots(25)$

Regime Transitório:

Se $n' > 1$:

Ellis⁽⁶⁾ $f = 0,00454 + 0,645 N_{Re}^{-0,70} \dots(26)$

Se $n' < 1$:

FSGomes⁽⁶⁾ $f = 0,11 n'^{0,616} N_{Re}^{0,287} \dots(27)$

Regime Turbulento:

Se $n' > 1$:

Ellis $f = 0,00454 + 0,645 N_{Re}^{-0,70} \dots\dots\dots(28)$

Se $n' < 1$:

FSGomes $f = 0,069 n'^{0,666} N_{Re}^{-0,235} \dots\dots\dots(29)$

Número de Reynolds da Potência:

$$N_{Re} = \frac{v_a^{(2-n')} \cdot d_e^{n'} \cdot \rho}{k' \cdot g^{(n'-1)}} \dots\dots\dots(30)$$

Faixas do Número de Reynolds:

Laminar: $N_{Re} < 4000 \dots\dots\dots(31)$

Transitório: $4000 \leq N_{Re} \leq 6000 \dots\dots\dots(32)$

Turbulento: $N_{Re} > 6000 \dots\dots\dots(33)$

Reologia da pasta espumada

Medidas feitas com reômetro Fann 35, mostram que se trata de um fluido pseudo-plástico em que o índice de comportamento n' decresce com o acréscimo da qualidade (quantidade de nitrogênio na pasta).

A reologia das espumas depende em geral da quantidade de gás, tamanho das bolhas, razão água / cimento, existência de forças geis entre as partículas sólidas na espuma, e do tipo e concentração do agente surfactante. Espumas de cimento exibem um comportamento reológico similar às espumas normais, e são bombeáveis sob condições normais de cimentação de poços de petróleo.

Em virtude da relação das propriedades reológicas da espuma dependerem de todos estes aspectos, fica muito difícil prever-se a sua reologia com a mudança das condições em que se encontra no poço durante o seu deslocamento.

Al-Mashat ⁽⁴⁾ em sua tese de doutorado, realizou vários testes de reologia com pastas de cimento espumadas, utilizando um viscosímetro capilar com diâmetros de tubos variando de 2,4 a 3,4 mm (0,093 a 0,132 pol) de diâmetro.

Porém a faixa da taxa de deformação a que eram submetidas as pastas espumadas, variavam de 1000 a 10.000 s^{-1} , o que, nos trabalhos usuais de cimentação, são muito elevadas.

Optamos, então, utilizar uma correlação para espumas,

apresentada em 1984 por Harris e Reindenbach ⁽⁵⁾, onde, a partir do conhecimento de n' e k' da pasta base em condições atmosféricas, pode-se prever quais serão os índices n' e k' da espuma, em função de sua qualidade e temperatura no ponto em estudo.

Este trabalho propõe a seguinte correlação:

$$n'_e = n'_{75} \cdot e^{(0,0028 - 0,0019 \Gamma) (T_e - 75)} \dots\dots\dots(34)$$

$$c1 = 4 n'_{75}{}^{1,8} \dots\dots\dots(35)$$

$$c2 = e^{-(3,1 + 3 n'_{75})} \dots\dots\dots(36)$$

$$k'_t = k'_{75} e^{(c2\Gamma - 0,018) (T_e - 75)} \dots\dots\dots(37)$$

$$k'_e = k'_t e^{(c1 \Gamma + 0,75 \Gamma^2)} \dots\dots\dots(38)$$

onde: n'_e :índice de comportamento de fluxo da fase líquida à temperatura no ponto de observação.

n'_{75} :índice de comportamento de fluxo da fase líquida à temperatura 75°F.

Γ :qualidade da espuma.

T_e :temperatura no ponto em estudo em °F.

$c1$ e $c2$:coeficientes de ajuste.

k'_{75} :índice de consistência da pasta base à temperatura ambiente.

k'_t e k'_e :índices de consistência corrigidos pela temperatura e qualidade da espuma respectivamente.

Variação da vazão ao longo da espuma

Pelo fato de a espuma ser um fluido compressível, ela pode tanto expandir como também comprimir à medida em que ela percorre o interior do revestimento e o anular poço x revestimento ao longo do poço, expandindo-se poço acima e comprimindo-se poço abaixo. Por este motivo, é necessário que se faça uma correção na vazão de bombeio no trecho espumado.

Segundo Mueller et alli (7) pode-se adotar um algoritmo de cálculo aproximado para a vazão da seguinte maneira:

$$q_{dh} = (q_s)(NVF) \dots\dots\dots(39)$$

onde:

q_{dh} = Vazão no fundo do poço para a espuma de cimento.

q_s = Vazão de bombeio na superfície.

NVF = Fator de volume da espuma (nitrogenada) $\left(\frac{NVF_0}{NVF_i} \right)$

Como a qualidade da espuma Γ varia ao longo de todo o trecho espumado, temos que fazer uma correção da vazão para cada trecho em que calculamos uma nova qualidade.

Desta forma, o procedimento de cálculo é o seguinte:

$$q_{dh} = \left(\frac{q_s}{NVF_i} \right) (NVF_o) \dots\dots\dots(40)$$

onde:

NVF_i = Fator de volume da espuma ($1/(1-\Gamma)$) na interface dos fluidos nitrogenados e não nitrogenados.

NVF_o = Fator de volume da espuma ($1/(1-\Gamma)$) no ponto de observação.

q_{dh} = Vazão no fundo do poço para a espuma de cimento.

q_s = Vazão de bombeio na superfície da interface.

Fator de compressibilidade z

Para o cálculo do fator z nas equações, foi utilizado uma aproximação numérica proposta por Sage and Williams (¹) sendo uma função da Temperatura e Pressão Absolutas:

$$z = a P^2 + b P + c. \dots\dots\dots(41)$$

onde: z é o fator de compressibilidade do gás nitrogênio (N_2)

P é a pressão absoluta em psia.

a, b, c são coeficientes que dependem da Temperatura Absoluta em °R.

Se $P < 500$ psia então: $a = 0$; $b = 0$; $c = 1$;

Se $500 \leq P \leq 4000$ psia então:

$$a = 1,679393 \cdot 10^{-7} - 6,2243 \cdot 10^{-10} \cdot T + 8,0385 \cdot 10^{-13} \cdot T^2 - 3,5472 \cdot 10^{-16} \cdot T^3.$$

$$b = -3,122 \cdot 10^{-4} + 8,488 \cdot 10^{-7} \cdot T - 5,37 \cdot 10^{-10} \cdot T^2.$$

$$c = 1,0.$$

Se $4000 < P < 8000$ psia então:

$$a = 0.$$

$$b = 2,2817 \cdot 10^{-4} - 4,066 \cdot 10^{-7} \cdot T + 2,3 \cdot 10^{-10} \cdot T^2.$$

$$c = -0,0956 + 0,0025 \cdot T - 1,5 \cdot 10^{-6} \cdot T^2.$$

Se $P \geq 8000$ psia então:

$$a = 0;$$

$$b = 2,2042 \cdot 10^{-4} - 3,515 \cdot 10^{-7} \cdot T + 1,815 \cdot 10^{-10} \cdot T^2.$$

$$c = -0,1573 + 2,438 \cdot 10^{-3} \cdot T - 1,4 \cdot 10^{-6} \cdot T^2.$$

CAPÍTULO V

TESTES DE LABORATÓRIO

Com o objetivo de validar as correlações de Harris & Reidenbach citadas no capítulo anterior, foram feitos vários testes de laboratório nas instalações da Universidade, contando com isto com cimento e aditivos químicos cedidos pela SEBEP.

Estes testes foram realizados no período de 30 de Agosto a 05 de Setembro de 1991.

Os procedimentos utilizados na realização destes testes foram todos baseados nas recomendações do PROCELAB (⁸).

Foram preparadas 4 pastas bases de cimento com as seguintes composições:

PASTA A:

cimento Alvorada

água doce 42,14 % (em peso de cimento)

SCF1LB (controlador de filtrado) 0,36 gpc

CD31LB (dispersante) 0,05 gpc

A3LB (estendedor) 0,18 gpc

Esta pasta resultou muito grossa e não foi possível determinar-se as leituras reológicas.

PASTA B:

cimento Alvorada	
água doce	42,14 % (em peso de cimento)
SCF1LB (controlador de filtrado)	0,36 gpc
CD31LB (dispersante)	0,20 gpc
A3LB (estendedor)	0,18 gpc

Esta pasta resultou muito dispersa e as leituras reológicas da pasta espumada resultou a mesma da pasta base, provavelmente pelo fato da espuma apresentar-se instável e na agitação do reômetro Fann o ar ter sido liberado da pasta.

PASTA C:

cimento Alvorada	
água doce	42,14 % (em peso de cimento)
SCF1LB (controlador de filtrado)	0,36 gpc
CD31LB (dispersante)	0,15 gpc
A3LB (estendedor)	0,18 gpc

PASTA D:

cimento Alvorada	
água doce	42,14 % (em peso de cimento)
SCF1LB (controlador de filtrado)	0,36 gpc
CD31LB (dispersante)	0,10 gpc
A3LB (estendedor)	0,18 gpc

Listamos a seguir uma tabela contendo os dados das leituras reológicas com as pastas bases com e sem gás (ar) incorporado.

Para incorporar gás nas pastas bases, foi utilizado o agente espumante J15LB.

Tabela com dados das leituras reológicas

Pasta Base	Temper. (°F)	Peso (ppg)	LEITURAS FANN (RPM/Deflex.)						Qual. (%)
			600	300	200	100	6	3	
B	80	15,5	104	57	41	22	4	3	0
B	80	8,9	103	57	41	25	4	3	42,6
C	80	15,5	111	60	44	24	4	3	0
C	80	10,2	130	70	52	30	4	3	34,2
D	80	15,5	139	84	64	46	26	17	0
D	80	9,9	160	92	68	43	23	16	36,2
D	80	9,5	163	105	88	75	22	15	38,7
D	80	7,2	216	165	145	125	20	15	53,6
D	110	15,5	146	89	70	49	23	15	0
D	110	10,2	252	175	145	125	23	15	34,2
D	110	8,3	210	153	125	98	38	20	46,5

Com base nestes resultados, são apresentados, ao final deste capítulo, as figuras com os gráficos contendo as leituras feitas nas composições de pasta (somente a pasta D) com 80 e 110 °F e incorporando-se ar nas pastas bases.

Mostram-se nos gráficos as curvas reológicas resultantes da correlação de Harris-Reidenbach citada no capítulo anterior.

A partir de n'_e e K'_f traça-se a curva reológica correlacionada à reologia da pasta base.

Podemos observar, através das figuras 1 e 2, que a correlação aproxima-se bem dos resultados dos testes de laboratório, o que vem validar o modelo proposto.

Correlação Temperatura 80 F

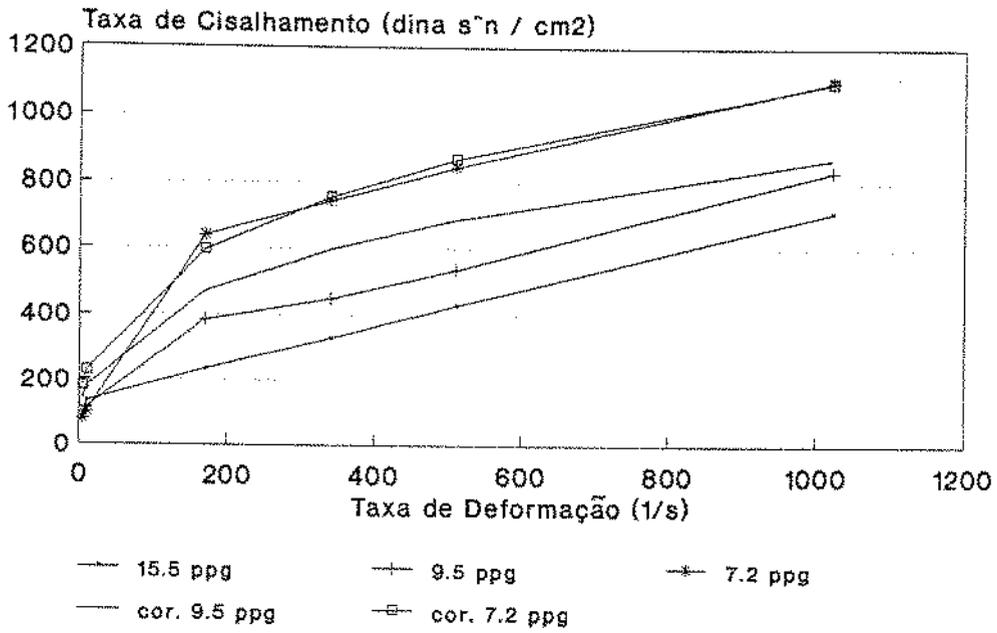


Figura 1

Correlação Temperatura 110F

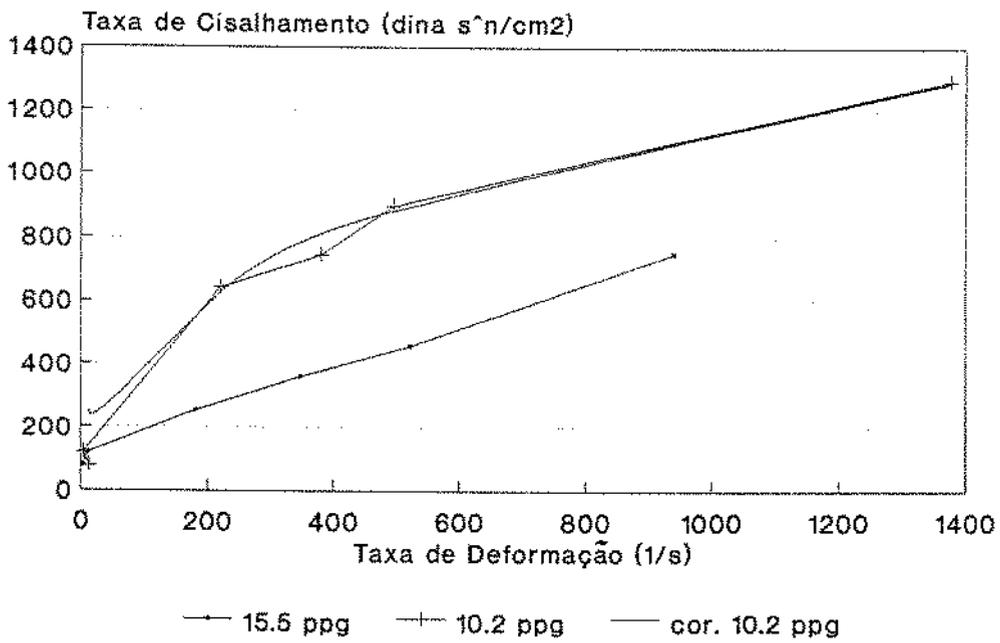


Figura 2

CAPÍTULO VI
PROGRAMA DE COMPUTADOR

Listagem de Entrada de Dados

Geometria do Poço:

Calibre (calíper) do anular, incluindo profundidades e diâmetros.

Composição da coluna de revestimento, incluindo profundidades e diâmetros internos.

Propriedades dos Fluidos:

Dados reológicos.

Massa específica.

Volume ou topo e base na condição final da operação.

Dados de Temperatura:

Temperatura de circulação.

Temperatura estática.

Profundidade da tomada da temperatura estática.

Esquema durante o deslocamento dos fluidos:

Vazões de deslocamento.

Contra pressões no anular.

Esquema das taxas de injeção de gás na pasta base.

Dados de um ponto escolhido no espaço anular para análise:

Pressão de fratura.

Pressão de poros.

Profundidade do ponto.

Listagem de Saída de Dados

- Listagem dos dados de entrada.
- Regime de escoamento, vazões críticas dos fluidos, a depender da posição destes no poço.
- Listagem das pressões de bombeio ao longo de todo o caminho percorrido pelos fluidos no poço, a cada volume deslocado.
- Perfil das massas específicas da espuma ao longo do poço a cada volume deslocado.
- Perfil de vazões de retorno.
- Interface dos fluidos envolvidos a cada volume deslocado.
- Perfil de pressão *versus* volume deslocado, para um ou mais pontos previamente escolhidos.

Síntese do Programa

O programa faz um cálculo completo das pressões de bombeio ao longo de todo o poço, espaço interior e anular, a cada volume deslocado.

As condições de contorno para o cálculo das pressões são a pressão anular na superfície (pressão atmosférica ou contra pressão no anular) e a vazão de deslocamento na entrada do revestimento (saída da bomba).

Se iniciarmos o cálculo a partir do anular, não conhecendo a priori a vazão de saída, não conseguiremos efetuar o cálculo. Por este motivo, atribuímos uma pressão de bombeio na superfície (entrada) e calculamos as pressões de bombeio ao longo do poço até alcançarmos o anular, calculando assim a pressão na superfície.

Atribuímos um segundo valor para a pressão na entrada a depender da diferença entre os valores da pressão anular pré estabelecida e a pressão anular calculada.

Recalculando o novo valor da pressão anular, utilizamos o método de Newton-Raphson para determinar o próximo valor da pressão de bombeio de entrada, e assim, iterativamente, calculamos os valores das pressões até que se convirja para uma tolerância entre o valor da pressão anular pré estabelecida e a calculada (6890 Pa ou 1 psi).

Supondo que os valores de pressão anular estejam coincidindo, admite-se que a pressão de bombeio na entrada e as demais pressões estejam corretas.

Este procedimento é feito para cada volume bombeado, e a partir dos valores obtidos, pode-se traçar um gráfico em qualquer ponto do poço, das pressões ao longo do tempo (ou volume bombeado).

O cálculo das pressões é feito somando-se as perdas de

carga por gravidade e diminuindo-se as perdas de carga por atrito no sentido da entrada do revestimento até a sapata, e diminuindo-se ambas no sentido da sapata até a saída do poço.

O intervalo de comprimento para o cálculo de pressões é o mais longo possível nos fluidos incompressíveis e na espuma de maneira que sua massa específica varie, entre o topo e a base do intervalo, de no máximo $\pm 60 \text{ kg/m}^3$ ($\pm 0,5 \text{ lb/gal}$). Observou-se que intervalos de no máximo 10m atendem a esse requisito.

A cada trecho discretizado, é calculada a perda de carga por gravidade, baseada na massa específica do fluido, e a perda de carga por atrito, baseada na massa específica, vazão de bombeio (no caso da espuma esta vazão é corrigida pela variação da fração de vazios), geometria do poço (anular ou interior), e parâmetros reológicos (corrigidos pela temperatura e, no caso da espuma, pela fração de vazios).

Portanto, a cada intervalo, o programa calcula a massa específica (no caso da espuma), o número de Reynolds, a vazão e velocidade críticas, o regime de fluxo, os parâmetros reológicos corrigidos, a vazão corrigida na espuma e a pressão.

O programa leva em consideração também a perda de carga no colar e sapata.

CAPÍTULO VII DADOS DE CAMPO

Durante o desenvolvimento da tese, planejou-se a execução da segunda operação de cimentação espumada no Brasil. A primeira havia sido executada no campo de Araçás, na Bahia, em 1987. Para esta segunda operação, escolheu-se o campo de Alto da Pedra, na região de Mossoró-RN. Diante desta oportunidade, planejou-se a obtenção de dados de campo para, não só acompanhar a operação em si, como também para a aquisição de dados de campo para a validação do modelo teórico.

Esta operação foi conduzida pela SEBEP (Serviços Brasileiros Especializados em Petróleo), companhia de prestação de serviços na área de cimentação.

Os principais dados obtidos, na ocasião da operação foram:

- Vazões (entrada e saída do poço).
- Pressões (antes e após o energizador, na entrada do poço e na saída pelo anular).
- Injeção de N_2 na pasta (vazão e volume).
- Volumes (injetados na entrada e medidos na saída).

Estes dados estão listados ao final deste capítulo.

De posse destes dados, rodou-se o programa para comparar dados de pressão de bombeio na superfície calculados com os obtidos experimentalmente, já que não se tinha condições de instalar medidores de pressão ao longo de todo o poço para compararmos as pressões nos demais pontos do poço (anular e interior).

Rodou-se também um programa da SEBEP para efeito de projeto e comparação.

Plotando-se os dados de pressões na superfície destas três relações de dados (valores medidos, este simulador e simulador da SEBEP), verifica-se que os dados da SEBEP e os do simulador proposto são muito semelhantes, porém muito desviados dos valores medidos no campo (figura 3).

Numa tentativa de explicar o fato de tal discordância, experimentou-se rodar nosso programa considerando que a espuma tenha se desfeito durante o deslocamento da pasta, e considerando um fluido não espumado, pôde-se plotar estes novos dados de pressões na superfície calculados sob esta nossa hipótese.

A semelhança entre os dados medidos e esta nova saída de dados é forte o suficiente para se admitir que esta suposição realmente se verifica. (figuras 3 e 4).

Para reforçar esta hipótese, observou-se durante a operação no campo que a pasta não obteve a mistura desejada, apre-

sentando-se muito viscosa.

Uma explicação para este fato, deve-se ao aparecimento das pressões muito baixas na cabeça do poço, o que ocasionaria uma expansão elevada do gás dentro da pasta, o que contribuiria para a instabilidade da mistura pasta-nitrogênio.

Notar que a figura 4 nada mais é do que uma ampliação de escala da figura 3, ressaltando apenas o resultado da simulação considerando o fluido incompressível e os dados de campo.

Uma maneira de se evitar que isto aconteça, seria através da aplicação de uma contra-pressão anular que impedisse a criação de baixas pressões de bombeio na cabeça do poço.

Desta maneira, poderíamos planejar a operação com base na simulação das pressões envolvidas na injeção e deslocamento da pasta espumada com uma certa contra-pressão anular.

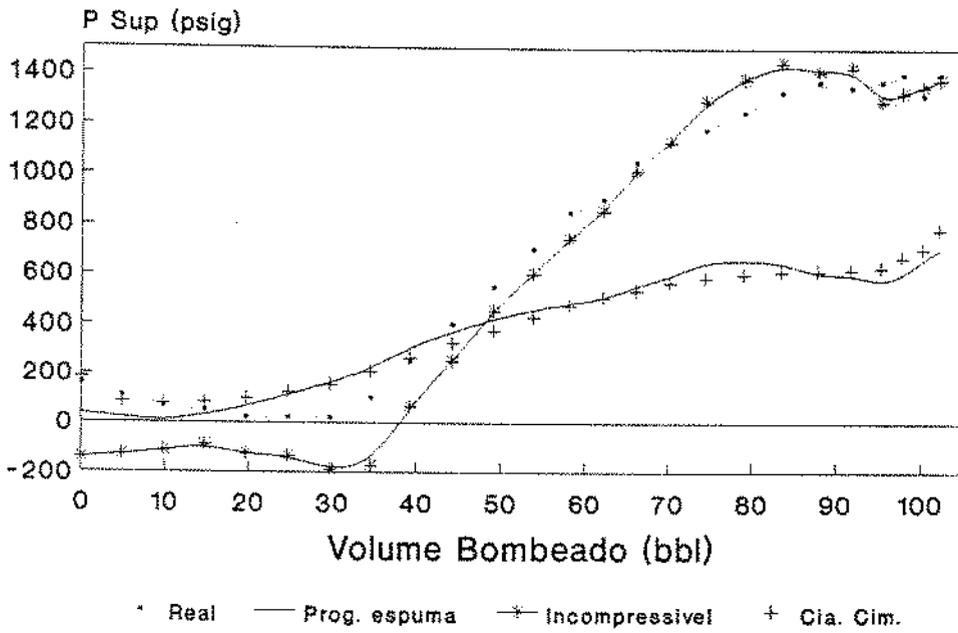
A figura 5 mostra a comparação entre os dados gerados pelo programa proposto e os gerados pela companhia de serviço SEBEP. Ambos partem das mesmas premissas de contra pressão anular de 690 kPa (100 psi) e vazão de bombeio constante. Pode-se observar que o programa da SEBEP não considera as variações de vazão, devido à contração e expansão da espuma, ao longo do deslocamento.

A figura 6 mostra as pressões máximas e mínimas atuantes

em cada ponto do poço (anular revestimento x poço aberto) em termos de densidade equivalente. Estes dados são gerados pelo programa proposto ao longo do cálculo de pressões de bombeio a cada intervalo de volume deslocado.

Para se tirar conclusões mais confiáveis, seriam necessários outros dados de campo para uma melhor verificação do modelo proposto pelo programa computacional.

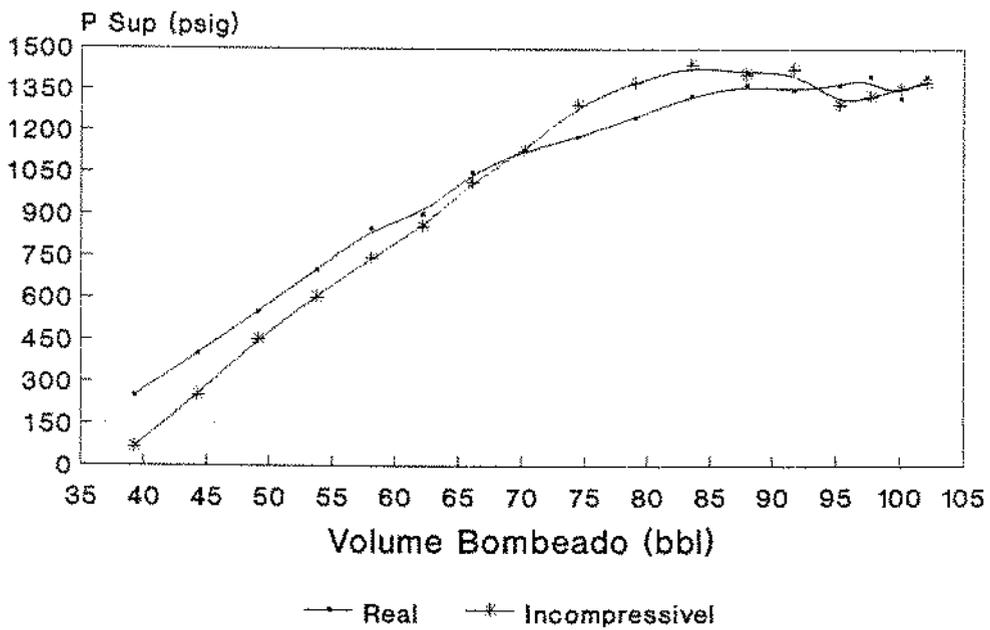
Poço 7-AP-178-RN
Pressão de Bombeio



dados de campo (1991)

Figura 3

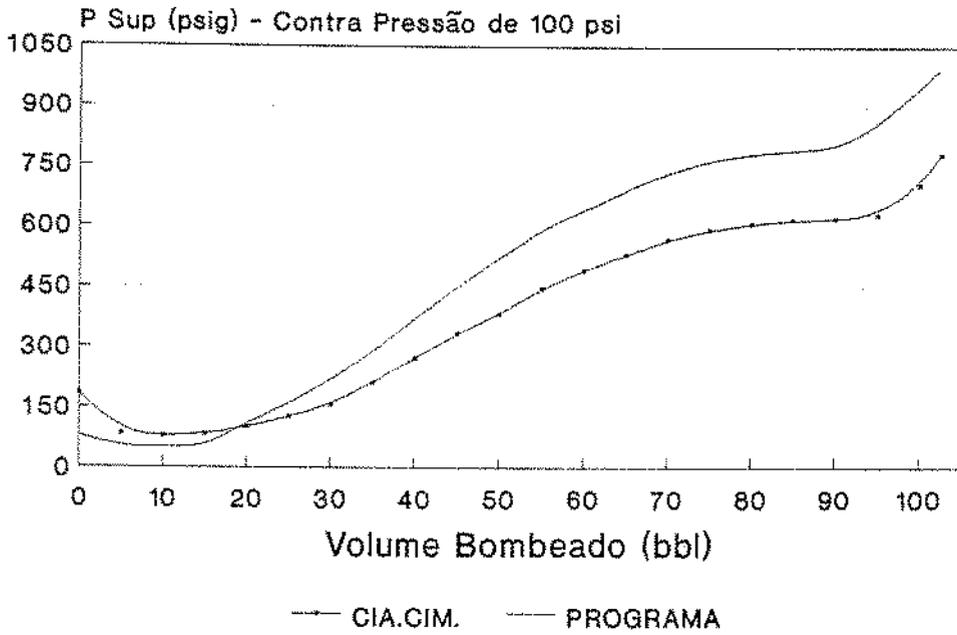
Poço 7-AP-178-RN
Pressão de Bombeio



dados de campo (1991)

Figura 4

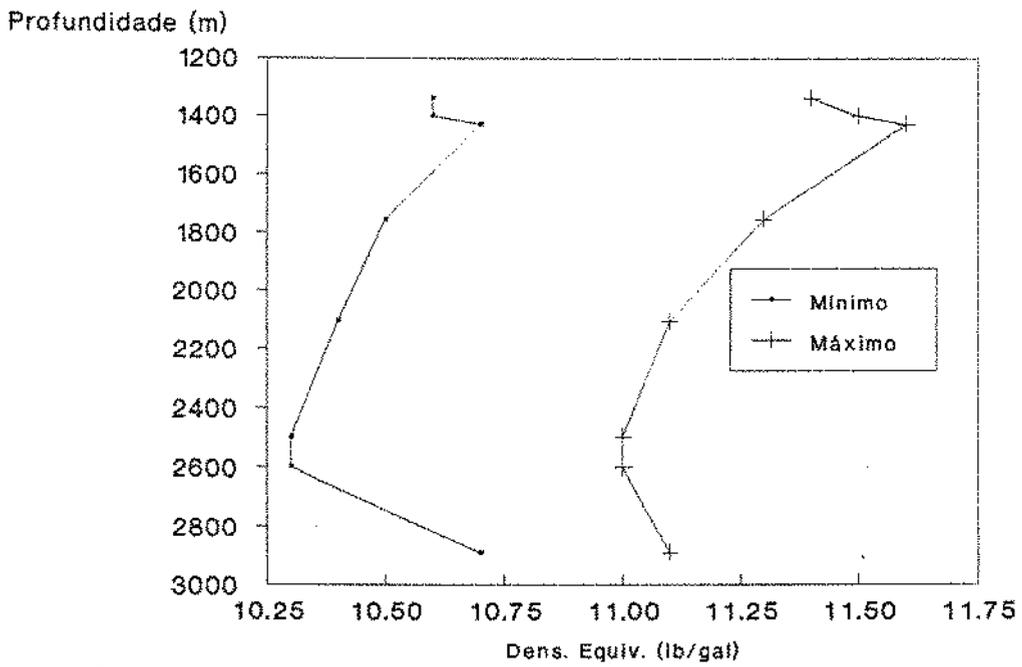
Poço 7-AP-178-RN
Pressão de Bombeio



dados simulados

Figura 5

Poço 7-AR-260-BA
Cimentação Rev. Prod. 5 1/2"



Dados do Simulador Numérico

Figura 6

Dados de campo - cimentação espumada

POÇO 7-AP-178-RN

TEMPO	VAZÃO BOMB. (BPM)	VOL. BOMB. (BBL)	PRES. POÇO (PSI)	VAZÃO N2 (SCFM)	VOL. N2 (SCF)	VAZÃO RET. (BPM)	VOL. RET. (BBL)	PRES. RET. (PSI)	OBS.
16:34	0.0	0.0	0	0	0	0	0	60	COLCHÃO
16:35	5.0	5.0	600	0	0	2	2	110	*
16:36	5.0	10.0	600	0	0	2	4	110	*
16:37	5.0	15.0	600	0	0	7	11	60	*
16:38	5.0	20.0	600	0	0	5	16	10	*
16:39	0.0	20.0	100	0	0	4	20	0	PREPARANDO
16:40	0.0	20.0	110	0	0	2	22	0	P/ BOMBEAR
16:41	0.0	20.0	210	0	0	0	22	0	PASTA
16:42	0.0	20.0	110	0	0	0	22	0	*
16:43	0.0	20.0	110	0	0	0	22	0	*
16:44	5.0	25.0	280	0	0	0	22	60	PASTA SUP.
16:45	5.0	30.0	380	245	245	0	22	60	PASTA N2
16:46	0.0	30.0	100	0	245	0	22	60	VAZAMENTO
16:47	0.0	30.0	80	0	245	6	28	60	LINHA N2
16:48	0.0	30.0	40	0	245	1	29	10	*
16:49	0.0	30.0	10	0	245	1	30	0	*
16:50	0.0	30.0	0	0	245	0	30	0	*
16:51	0.0	30.0	0	0	245	0	30	0	*
16:52	0.0	30.0	0	0	245	0	30	0	*
16:53	0.0	30.0	0	0	245	0	30	0	*
16:54	0.0	30.0	0	0	245	1	31	0	*
16:54	5.0	35.0	150	220	465	0	31	20	PASTA N2
16:55	5.0	40.0	200	310	775	1	32	90	ENERGIZADOR
16:56	5.0	45.0	200	320	1095	1	33	120	*
16:57	5.0	50.0	600	340	1435	0	33	120	*
16:58	5.0	55.0	600	380	1815	3	36	120	*
16:59	5.0	60.0	600	425	2240	2	38	130	*
17:00	0.0	60.0	100	0	2240	4	42	0	ENTUPIIMENTO
17:01	0.0	60.0	100	0	2240	5	47	0	PRE-MIX
17:02	0.0	60.0	100	0	2240	5	52	0	*
17:03	0.0	60.0	100	0	2240	5	57	0	*
17:04	0.0	60.0	100	0	2240	5	62	0	*
17:05	0.0	60.0	100	0	2240	2	64	0	*
17:06	0.0	60.0	100	0	2240	2	66	0	*
17:07	5.0	65.0	200	480	2720	3	69	0	PASTA N2
17:08	5.0	70.0	300	500	3220	1	70	40	*
17:09	5.0	75.0	400	590	3810	1	71	80	*
17:10	5.0	80.0	500	710	4520	1	72	140	*
17:11	5.0	85.0	600	830	5350	1	73	180	*
17:12	5.0	90.0	650	0	5350	1	74	150	PASTA INF.
17:13	0.0	90.0	400	0	5350	4	78	120	LIBERANDO
17:14	0.0	90.0	350	0	5350	5	83	80	PLUG
17:15	0.0	90.0	300	0	5350	5	88	70	*
17:16	0.0	90.0	250	0	5350	5	93	200	*
17:17	0.0	90.0	200	0	5350	2	95	200	*
17:18	0.0	90.0	200	0	5350	3	98	200	*
17:19	0.0	90.0	200	0	5350	3	101	200	*
17:20	0.0	90.0	200	0	5350	5	106	20	*
17:21	0.0	90.0	280	0	5350	2	108	10	*

TEMPO	VAZÃO BOMB. (BPM)	VOL. BOMB. (BBL)	PRES. POÇO (PSI)	VAZÃO N2 (SCFM)	VOL. N2 (SCF)	VAZÃO RET. (BPM)	VOL. RET. (BBL)	PRES. RET. (PSI)	OBS.
17:22	0.0	90.0	160	0	5350	3	4	10	DESLOC.
17:23	4.9	94.9	110	0	5350	3	7	10	*
17:24	4.9	99.8	70	0	5350	4	11	10	*
17:25	4.9	104.7	50	0	5350	6	17	20	*
17:26	5.0	109.7	20	0	5350	3	20	20	*
17:27	5.0	114.7	20	0	5350	3	22	40	*
17:28	5.0	119.7	20	0	5350	1	23	40	*
17:29	4.9	124.6	100	0	5350	2	25	40	*
17:30	4.7	129.3	250	0	5350	3	28	40	*
17:31	5.0	134.3	400	0	5350	4	31	40	*
17:32	4.8	139.1	550	0	5350	4	35	40	*
17:33	4.7	143.8	700	0	5350	4	39	40	*
17:34	4.3	148.1	850	0	5350	4	43	40	FLOW METER
17:35	4.1	152.2	900	0	5350	4	47	40	*
17:36	3.9	156.1	1050	0	5350	4	47	40	*
17:37	4.1	160.2	1130	0	5350	5	52	40	*
17:38	4.2	164.4	1180	0	5350	5	57	40	*
17:39	4.6	169.0	1250	0	5350	5	62	40	*
17:40	4.5	173.5	1330	0	5350	5	66	40	*
17:41	4.4	177.9	1370	0	5350	5	71	40	*
17:42	3.8	181.7	1350	0	5350	5	75	40	*
17:43	3.6	185.3	1370	0	5350	5	80	40	*
17:44	2.4	187.7	1400	0	5350	4	84	40	*
				0	5350	3	86	40	*

CAPÍTULO VIII

CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos na comparação das saídas de dados do programa aqui proposto e do programa da Companhia de Cimentação SEBEP, podemos concluir que os resultados foram satisfatórios.

Vale aqui lembrar que os valores calculados pelo programa proposto levam em consideração a variação de vazão durante o deslocamento, devido a compressibilidade da espuma, consideração esta que o programa da SEBEP não leva em conta.

Os testes de laboratório realizados serviram para respaldar a correlação aqui utilizada.

Os dados coletados na operação de cimentação no campo de Alto da Pedra, no Rio Grande do Norte, serviram para verificar, através do programa proposto, que a operação não foi bem sucedida. Calculando-se os valores de pressão de bombeio, considerando-se uma pasta não espumada, conseguiu-se prever com uma razoável exatidão os valores medidos durante a operação.

Pudemos constatar que a utilização do programa proposto serve para um melhor planejamento da operação de cimentação espumada, evitando-se assim a instabilidade da espuma e conseqüentemente o insucesso da operação.

NOMENCLATURA

Símbolos principais:

Caracteres romanos maiúsculos:

- BTaxa de injeção de nitrogênio (-)
DProfundidade (m)
 \dot{G} Vazão específica ($\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$)
 N_{Re} Número de Reynolds (-)
NVFFator de volume da espuma (*Nitrified volume factor*) (-)
PPressão (Pa)
RConstante dos gases ($\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{K}\cdot\text{moles}$)
TTemperatura (K)
VVolume (m^3)

Caracteres romanos minúsculos:

- a, b, c,
c1, c2 ...Parâmetros de cálculo
dDiâmetro (m) ou diferencial
fFator de atrito (-)
gAceleração da gravidade (m/s^2)
k'Índice de consistência de fluxo do fluido da Lei de Potência ($\text{Pa}\cdot\text{s}^n$)
n'Índice de comportamento de fluxo do fluido da Lei de Potência (-)
nNúmero de moles (-)
qVazão (m^3/s)
vVelocidade do fluido (m/s)
zFator de compressibilidade (-)

Caracteres gregos:

- ρ Massa específica (kg/m^3)
 Γ Qualidade da espuma, ou fração de vazios da espuma (-)
 $\dot{\gamma}$ Taxa de deformação do fluido (s^{-1})
 τ Tensão de deformação do fluido (Pa)
 Δ Variação entre dois pontos

Subscritos:

- 1,2 posição ou interno e externo respectivamente
75 à temperatura de 75°F
a no espaço anular
dh no fundo do poço (*down hole*)
e referente à espuma ou equivalente
i na interface
n referente ao gás nitrogênio
o no ponto de observação
pb referente à pasta base
s na superfície
STD em condições *standard*
t corrigido pela temperatura

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Sage, B.H. and W.N. Lacey: "Thermodynamic Properties of the Lighter Paraffin Hydrocarbons and Nitrogen"; American Petroleum Institute, New York (1950).
2. Martins A.L.: "Cimentação com Pastas Espumadas Utilizando Nitrogênio"; Petrobrás CENPES, Rio de Janeiro (Julho 1990).
3. Kulakofsky, D.S and Creel, P.G.: "Techniques for Planning and Execution to Improve Foam Cement Job Performance"; (SPE 15519) Annual Technical Conference and Exhibition of the SPE. New Orleans, Oct. 5-8 1986.
4. Al-Masshat, A.M.: "Rheology of Foam Cement"; Colorado School of Mines, Golden, CO, 1976. (Tese de Doutorado).
5. Harris, D.C., and Reindenbach, V.G., "High Temperature Rheological Study of Foam Fracturing Fluids"; (SPE 13177) Annual Technical Conference, Houston, TX, Sep. 16-19, 1984.
6. Silva, M.G.P., Martins, A.L., e Oliveira, A.A.J., "Escoamento Anular de Pastas de Cimento"; (Petrobrás) 3º Seminário Sobre Revestimento e Cimentação de Poços de Petróleo, Rio de Janeiro (RJ), 1989.
7. Mueller, D.T., Franklin Jr, V.L., and Daulton, D.J., "The Determination of the Static and Dynamic Properties of Nitrified Cements", (SPE 20116) Permian Basin Oil and Gas Recovery Conference, Midland, TX, March 8-9, 1990.
8. PROCELAB - Manual de Procedimentos e Métodos de Laboratório Destinados à Cimentação de Poços Petrolíferos. (PETROBRÁS S.A.).