

10º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA
PLANEJAMENTO DE OPERAÇÕES DE CIMENTAÇÃO PRIMÁRIA

AUTORES:

Leonardo Asfora de Oliveira¹, Lindemberg de Jesus Nogueira Duarte²

INSTITUIÇÃO:

¹ Diretoria Acadêmica de Indústria, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

² Departamento de Engenharia de Petróleo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte

DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA PLANEJAMENTO DE OPERAÇÕES DE CIMENTAÇÃO PRIMÁRIA

Abstract

This paper describes and presents the development of a computational tool in Microsoft Excel 2013, using Visual Basic For Applications (VBA) features, which allows to estimate the dynamic pressures in front of formations during primary cementing operations. In addition, it allows the planning of these operations, as the user can modify various design parameters, such as: pump flow rate, fluid properties and their arrangements. Primary cementing is a technique used to position cement slurries in the annular space after casings have descended into the well. Its correct planning is of paramount importance, as there is only one chance to perform such a procedure successfully. Based on casing data, their setting depths, geopressures, physical and chemical properties of the fluids involved, required volumes and flow rate, the program generates pressure curves as a function of time at depths of interest. From this information, it is possible to identify problems related to the fracture of the formations or kick occurrences, and the project can then be considered appropriate or not. In addition, the program has some alerts and checks that warn the user of possible errors in the input data or design criteria that are not being met. The results obtained were compared with those of a commercial simulator for the validation of the program, and the results were considered satisfactory.

Introdução

A cimentação primária consiste no processo de posicionamento de uma pasta de cimento (uma mistura de cimento, água e aditivos) no espaço anular entre o revestimento e as paredes do poço após cada fase perfurada. Juntamente com a pasta, também são bombeados os colchões, que possuem a finalidade de auxiliar a limpeza do poço e promover vedação hidráulica entre fluidos não compatíveis. O objetivo maior da cimentação primária tem sido promover o isolamento hidráulico de zonas permeáveis perfuradas pela broca em poços de óleo e gás e o suporte estrutural para a coluna de revestimento. Este primeiro é de particular importância durante toda a vida produtora/injetora de um poço, já que permite o controle da origem/destino dos fluidos produzidos/injetados.

Segundo Newman et al. (2001), cerca de 15% das operações de cimentação primária falham, acarretando em prejuízos de 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. Durante toda a operação, ambas as pressões dinâmicas e estáticas devem situar-se no interior da chamada Janela Operacional, delimitada pelas geopressões (Thomas, 2001). O controle destas pressões é uma tarefa complexa, uma vez que dependem de diversos parâmetros, a saber: geometria do poço, diâmetros dos revestimentos, propriedades e volumes dos fluidos bombeados e da vazão de bombeio.

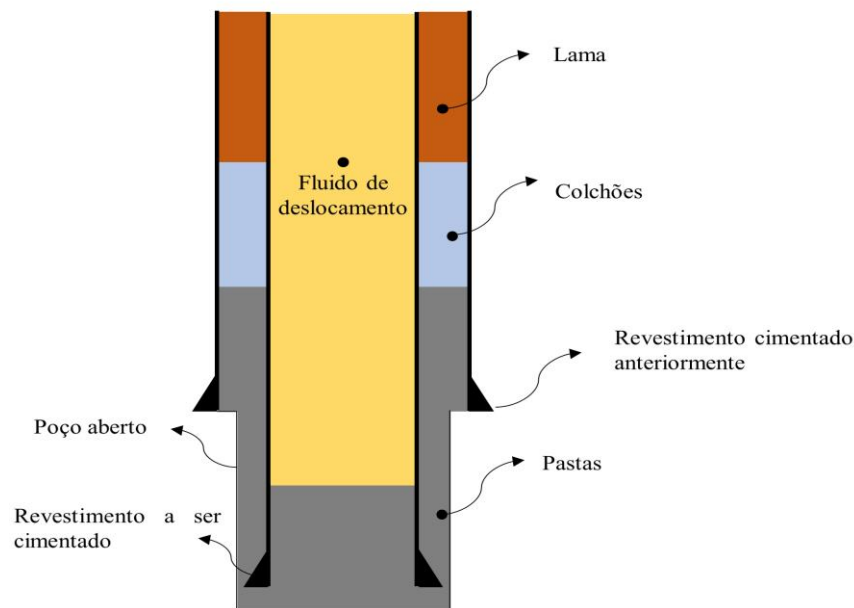
Dentro deste contexto, foi desenvolvida uma ferramenta computacional em *Microsoft Excel*, utilizando o *Visual Basic for Applications* (VBA), para planejamento e simulação de operações de cimentação primária. Esta ferramenta, denominada de PCsim (*Primary Cementing Simulator*), informa ao usuário o volume necessário a ser bombeado dos fluidos envolvidos na cimentação primária, dado uma certa configuração de fluidos desejadas pelo usuário. 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. De forma a validar o programa desenvolvido, foi realizada uma comparação com um software comercial dos parâmetros mais relevantes de uma operação de cimentação primária, e os resultados se mostraram bastante satisfatórios.

Metodologia

A Figura 1 representa um esquema do posicionamento dos fluidos em um tempo arbitrário durante uma operação de cimentação primária.

Figura 1: Disposição dos fluidos na cimentação primária.



A pressão que a bomba de superfície (p_b) deve fornecer para deslocar os fluidos é dada por:

$$p_b = p_{ha} - p_{hc} + \Delta p_{atrito} \quad (1)$$

Onde p_{ha} , p_{hc} e Δp_{atrito} representam, respectivamente, a pressão hidrostática no fundo do poço pelo lado do anular, pelo lado da coluna e a perda de carga total. O cálculo de cada um destes termos envolve monitorar a altura da coluna dos fluidos enquanto estes são deslocados do interior do revestimento para o espaço anular. Já o cálculo das pressões dinâmicas no espaço anular é dado por:

$$p = p_h + \Delta p_{atrito}^{jusante} \quad (2)$$

Onde p_h é a pressão hidrostática e $\Delta p_{atrito}^{jusante}$ a perda de carga calculada nas seções a jusante da profundidade considerada.

O PCsim é composto por cinco telas: Revestimentos, Poço, Formação, Fluidos e Resultados. Por conveniência, apenas duas serão aqui apresentadas. Uma discussão mais detalhada a respeito do PCsim pode ser encontrada em Oliveira (2014). A Tela dos Fluidos, Figura 2, 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. 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. Já para os colchões, deve-se informar os seus volumes. 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. Estes volumes são calculados utilizando as características geométricas dos revestimento e do poço, informados nas Telas dos Revestimentos e na Tela do Poço. Além disto, pode-se escolher a quantidade de excesso de pasta de cimento que se deseja bombear (em percentual de volume de poço aberto).

Figura 2: Tela dos Fluidos.

Dados dos Fluidos (em ordem de bombeio)

Nome dos Fluidos	Peso lb/gal	Cor	Modelo Reológico	Visc. Plástica cP	Limite de Esc. lbf/100ft ²	Índice de Comp. n	Índice de Cons. lbf-s ⁿ /ft ²
Lama	11		Potência			0.7	0.02
Colchão Lavador	9		Newtoniano	1			
Colchão Espaçador	12.5		Potência			0.7	0.03
1ª Pasta	13.5		Bingham	25	12		
2ª Pasta	16.4		Bingham	30	16		
Fluido Deslocador	11		Potência			0.7	0.02

Profundidades das Pastas/Volumes de Colchão

Profundidade do topo da 1ª Pasta ft

Profundidade do topo da 2ª Pasta ft

Volume de colchao espaçador bbl Topo ft

Volume do colchão de limpeza bbl Topo ft

OBS: Os valores dos topos dos fluidos estão referenciados a partir da superfície.

Cálculos de Volumes

Volume Necessário da 1ª Pasta bbl

Volume Necessário da 2ª Pasta bbl

Volume Necessário de Fluido Deslocador bbl

Excesso %

☐ Considerar Excesso

Obs: Relativo ao volume do poço

Pressões Hidrostáticas

Pressão Hidrostática no Fundo do Poço psi

Pressão Hidrostática no Ponto de Interesse 1 psi

Pressão Hidrostática no Ponto de Interesse 2 psi

☐ Considerar o cimento em pega

Calcular Perda Máxima de Hidrostática psi

Obs: No fundo do poço, considerando o peso da água de mistura igual ao da água doce (8,33 lb/gal)

VERIFICAÇÕES

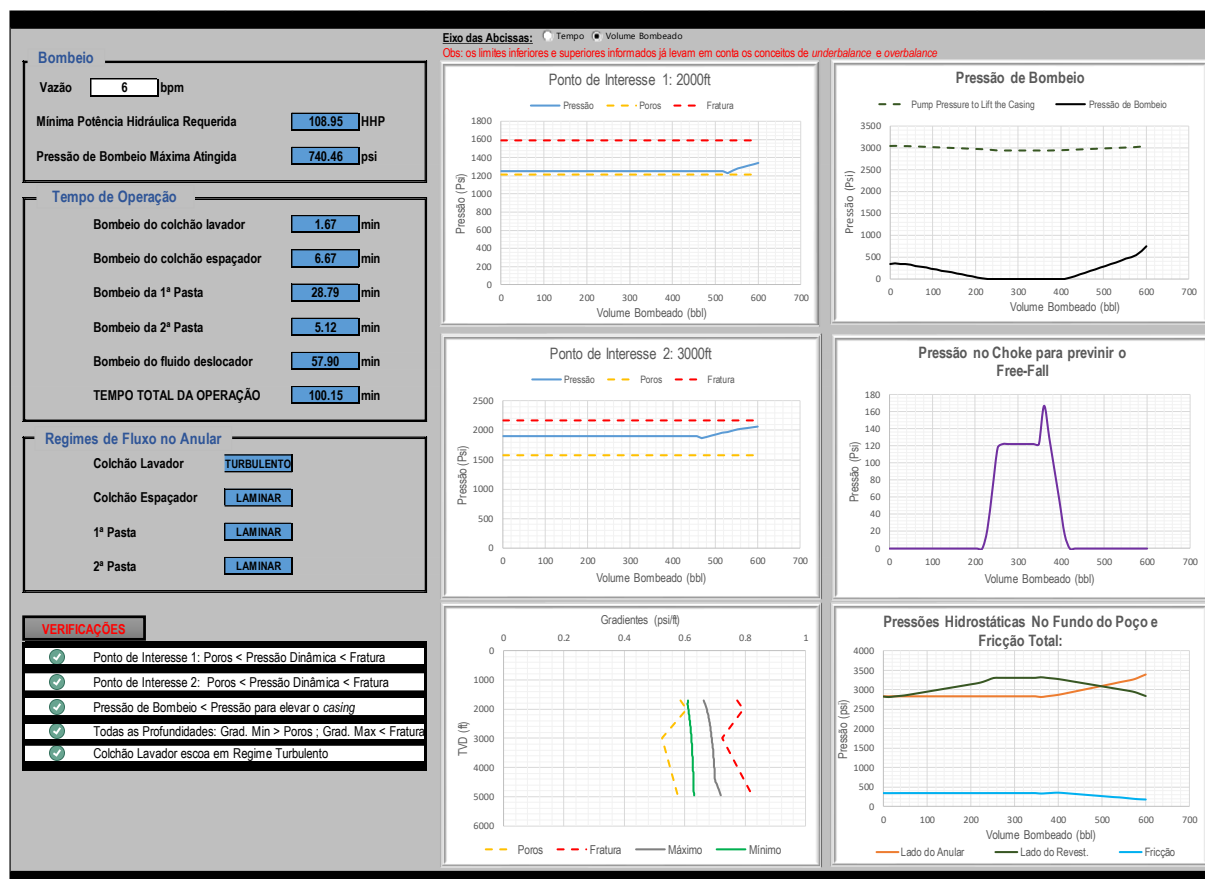
☒	Topo do Cimento localizado acima da sapata do revestimento anterior
☒	A profundidade da 1ª Pasta é superior ao da 2ª Pasta
☒	Ponto de Interesse 1: Pressão Poros < Pressão Hidrostática < Pressão Fratura
☒	Ponto de Interesse 2: Pressão Poros < Pressão Hidrostática < Pressão Fratura
☒	Fundo do Poço: Pressão de Poros < Pressão Hidrostática < Pressão de Fratura
☒	Análise Geral das Pressões Hidrostática : Todas as Profundidades

DISPOSIÇÃO DOS FLUIDOS

Condição no Fim da Operação

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 diminuiu devido a este fenômeno, basta clicar no botão “Calcular perda de hidrostática”.

Figura 3: Tela dos resultados.



Preenchidos todos os dados necessários, o usuário poderá seguir para a Tela dos Resultados, Figura 3. Nela, ele poderá informar a vazão de bombeio que deseja operar. Informado este dado, o programa fornece uma série de informações sobre 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. Além disto, plota uma série de gráficos informando propriedades importantes em função do tempo de operação ou volume bombeado.

Resultados e Discussões

Para validação do PCsim, foram realizadas comparações com o software CEMENT da Maurer Engineering. Foi simulado a cimentação de um revestimento de 9 5/8" 53,5 lb/ft (colar flutuante a 42ft da extremidade inferior) assentado à 4950ft da superfície descido em um poço com caliper médio de 12 1/4". O revestimento da fase anterior é do tipo 13 3/8" 54,5 lb/ft, e sua sapata está assentada a 1700 ft. O sistema de fluidos referente a este estudo de caso foi bombeado a uma vazão constante de 5 bpm,

e suas reologias estão descritas na Tabela 1. A própria lama de perfuração foi utilizada como fluido de deslocamento. A configuração desejada das pastas é tal que o topo da primeira pasta (*lead*) deve estar localizado a 1400 ft da superfície, enquanto o da segunda pasta (*tail*) deve estar a 4450 ft. O volume de colchão lavador utilizado foi de 10 bbl, enquanto que o de colchão espaçador foi de 40 bbl. Neste estudo de caso, a pressão em frente a duas formações foram analisadas: à 2000 m (maior pressão de poros, 0,6 psi/ft) e 3000 m (menor pressão de fratura, 0,75 psi/ft). Uma margem de segurança de 0,026 psi/ft foi utilizada.

É importante ressaltar que os dados de entrada do PCsim diferem daqueles do simulador comercial. Enquanto no PCsim entra-se com a disposição desejada das pastas (profundidade dos topos), neste último deve-se entrar diretamente com os volumes. No entanto, independentemente do caso, o comportamento das pressões deve ser similar. Desta forma, alimentou-se o simulador comercial com os volumes de 1ª e 2ª pasta, que foram calculados como sendo, respectivamente, de 172,76 bbl e 30,86 bbl. Ainda, o volume de fluido de deslocamento calculado foi de 347,29 bbl.

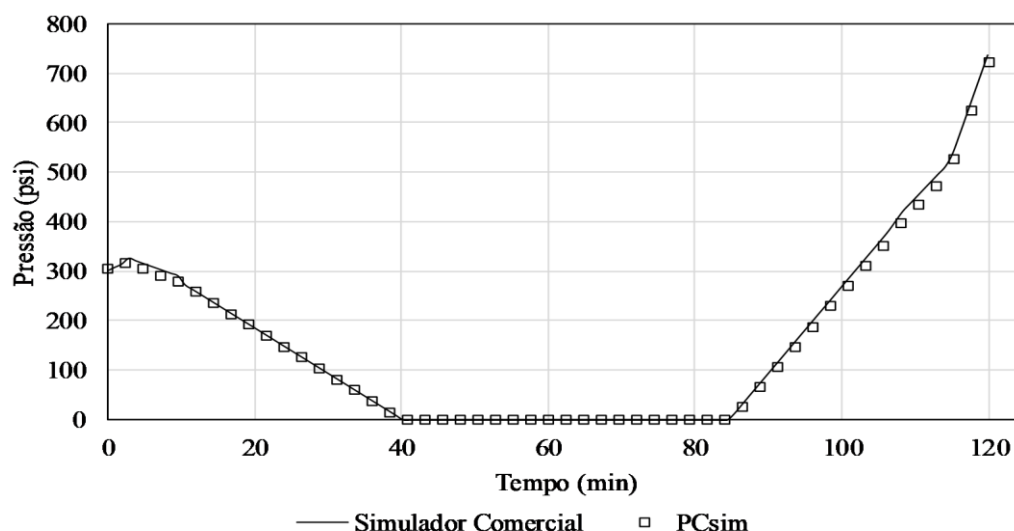
Tabela 1: parâmetros reológicos dos fluidos bombeados.

Fluidos	ρ (lbm/gal)	μ_p (cp)	τ_L (lbf/100ft ²)	n	K (lbf s ⁿ / ft ²)
Lama	11	-	-	0,7	0,02
Colchão lavador	9	1	0	-	-
Colchão espaçador	12,5	-	-	0,7	0,03
1ª Pasta	13,5	25	12	-	-
2ª Pasta	16,4	30	16	-	-

A Figura 4 mostra um gráfico da pressão de bombeio em função do tempo de operação, comparando os resultados obtidos pelo PCsim e pelo simulador comercial. Como pode ser visto, a concordância entre os resultados é notória. Em $t = 0$, o poço encontra-se completamente preenchido pela lama. À medida que os colchões e pastas começam a ser deslocadas pelo interior do revestimento, o termo p_{hc} aumenta enquanto p_{ha} permanece constante. A combinação destes efeitos prova a redução da pressão de bombeio (ver Equação (1)). Em $t = 40$ min, a pressão de bombeio torna-se nula. Durante este período, caso não seja aplicado uma contrapressão no *choke*, ocorrerá o fenômeno denominado na literatura de *free fall* (ver, por exemplo, Beirute (1984)), ou seja, a queda livre dos fluidos. Para $t > 85$ min, a pressão de bombeio começa a crescer, já que agora os fluidos mais pesados encontram-se no anular. É importante ressaltar que o PCsim não leva em conta o efeito *free fall* no cálculo das pressões dinâmicas, sendo uma das principais limitações do programa.

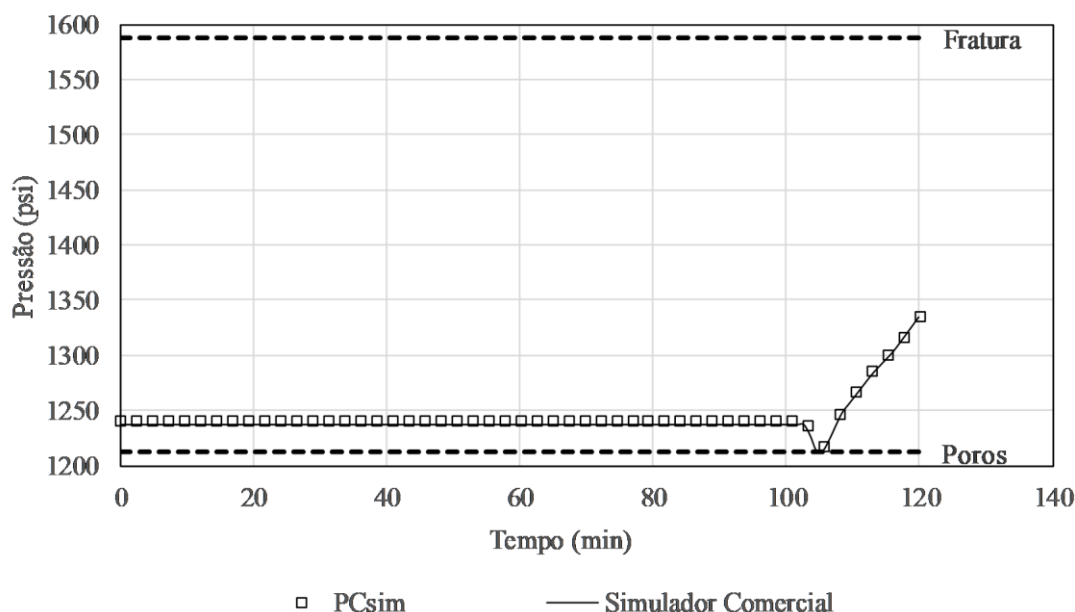
Nas Figura 5 e Figura 6 são analisadas as pressões dinâmicas à 2000 ft e 3000 ft, realizando uma comparação direta com as pressões de poros e fratura a estas profundidades (levando em conta os fatores de segurança mencionados). Novamente, um bom ajuste foi observado em relação ao simulador comercial. Todos estes resultados validam a formulação matemática desenvolvida no PCsim, pelo menos para o caso estudado.

Figura 4: Pressão de bombeio.



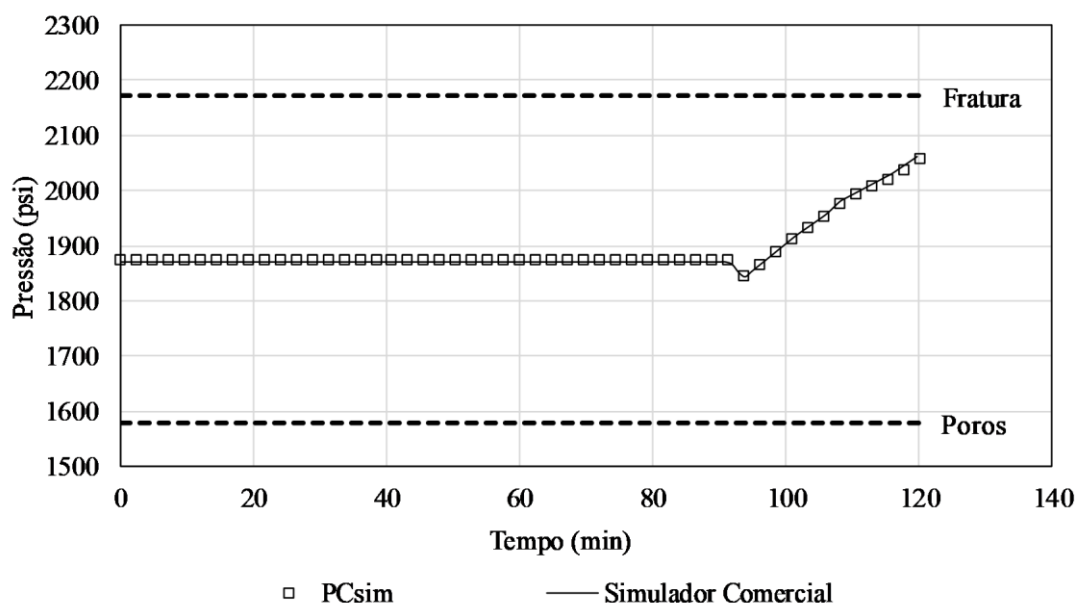
A análise do comportamento da pressão na Figura 5 é interessante. Esta mantém-se constante até cerca de 100 min. Isto deve-se ao fato de que durante este período apenas a lama de perfuração ocupa a região do espaço anular acima de 2000 ft. Quando o colchão lavador adentra no espaço anular e passa por este ponto, por possuir menor peso que a lama, observa-se uma queda de pressão. Isto ocorre até atingir um valor mínimo, condição esta onde todo o colchão se localiza acima de 2000 ft. A partir daí, a passagem de fluidos mais pesados por este ponto (colchão espaçador e 1ª pasta) provoca um aumento de pressão, que se perpetua até o final da operação. Comportamento similar é observado para a profundidade de 3000 ft, mas em um tempo obviamente inferior.

Figura 5: Pressões dinâmicas na formação a 2000 ft.



Não foi observado a ocorrência de *kick* nem de fratura em nenhuma das duas profundidades críticas analisadas, embora à 2000 ft a pressão dinâmica tenha chegado extremamente perto do limite de segurança inferior delimitado pela pressão de poros.

Figura 6: Pressões dinâmicas na formação a 3000 ft.



Conclusões

Neste trabalho, uma ferramenta computacional (PCsim) que possibilita o dimensionamento e análise de operações de cimentação primária foi desenvolvida. O PCsim possibilita o cálculo do volume necessário de pasta de cimento para garantir que seu topo atinja uma altura desejada, o tempo total de operação e, além disso, curvas de pressão em função do tempo de operação em frente as formações. Um estudo de caso foi analisado para fins de validação através da comparação com um simulador comercial, e os resultados foram considerados satisfatórios. O programa ainda possui algumas limitações: válido apenas para poços verticais, com vazão de bombeio constante e também não leva em conta o efeito do *free fall*. No entanto, tem sido utilizado como ferramenta de ensino com grande sucesso.

Referências Bibliográficas

- BEIRUTE, R.M. The phenomenon of free fall during primary cementing. In: 59th Annual Technical Conference and Exhibition, 09, 1984, Houston. Texas, 2016.
- NELSON, E.B., Well Cementing, Saint-Etienne: Schlumberger Educational Services, 1990.
- OLIVEIRA, L.A. Desenvolvimento de uma ferramenta computacional para simulação de operações de cimentação primária. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.
- THOMAS, J. E. et al. Fundamentos da engenharia de petróleo. 2 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2004.