

## ANÁLISE DOS CRITÉRIOS DE ASSENTAMENTO DE SAPATAS DE REVESTIMENTO EM ÁGUAS PROFUNDAS

Geovanna Cruz Fernandes<sup>1</sup>; Carla Salvador<sup>2</sup>; Daniel de Oliveira Mendonça<sup>3</sup>; Paloma dos Santos<sup>4</sup>; Douglas Bitencourt Vidal<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Sergipe, Núcleo Engenharia de Petróleo – geovannafernandes1@hotmail.com

<sup>2</sup>Universidade Federal do Espírito Santo, Pós-Graduação em Energia – carla.salvador@ufes.br

<sup>3</sup>Universidade Federal de Sergipe, Núcleo de Engenharia de Petróleo – danielfreipaulo@gmail.com

<sup>4</sup>Universidade Federal de Sergipe, Núcleo de Engenharia de Petróleo – palloma\_se@hotmail.com

<sup>5</sup>Universidade Federal do Espírito Santo, Pós-Graduação em Energia – bitencourt\_douglas@hotmail.com

### Resumo

Em um projeto de poço de petróleo, o estudo das geopressões é uma etapa fundamental do planejamento. Este estudo foi desenvolvido com dados de um poço com lâmina d'água profunda localizado no Nordeste Brasileiro. Para tanto, determinou-se as pressões de poros, de sobrecarga, de fratura e colapso, como também as curvas necessárias para montagem da janela operacional que forneceram a variação das pressões do fluido exercidas na perfuração, a profundidade de assentamento das sapatas de revestimento, assim como o peso de fluido ideal. Foram realizadas simulações para obtenção de duas janelas operacionais. A primeira, feita com assentamento de sapatas de baixo para cima, com uma margem de segurança de 0,5 lb/gal, já a segunda, considerando o critério de tolerância ao *kick* diferencial mínima com assentamento de cima para baixo. Para a primeira simulação, assentou-se quatro sapatas, correspondendo a um revestimento de superfície, dois intermediários e um de produção. Para a segunda simulação, também foram assentadas quatro sapatas, sendo os revestimentos intermediários mais elevados. Porém, analisado o critério de diferencial de pressão, houve a necessidade de se assentar às mesmas profundidades da primeira simulação, a fim de que se evitasse riscos de prisão da coluna, logo, as profundidades de assentamento coincidiram em ambas as simulações.

**Palavras-chave:** Geopressões, Janela operacional, Revestimento, Sapatas.

### Introdução

A elaboração de um projeto de poço é uma das etapas do planejamento que se inicia com um estudo da área de interesse e resulta em um levantamento e análise de dados da locação. O estudo das geopressões de um poço possibilita garantir a estabilidade e segurança na construção de um poço, além de verificar se é economicamente viável (SILVA, 2016).

Através da janela operacional é possível identificar o peso ideal do fluido, a profundidade de assentamento das sapatas de revestimento, com o objetivo de evitar a ocorrência de *kick*, fraturas ou colapso do poço, por isso ela deve ser levada em consideração na etapa da perfuração (JUNQUEIRA, 2014).

É pela janela operacional que também se determina a variação máxima de pressão exercida pelo fluido do poço, visando a integridade do mesmo. Estes limites são estabelecidos pela pressão de poros, de fratura e de colapso. O peso do fluido também pode ser determinado

com o auxílio da janela operacional, já que a cada profundidade um fluido mais e menos denso deverá ser utilizado (RAMIREZ PERDOMO, 2003).

Os projetos de poços são elaborados pelas correlações empíricas que permitem o cálculo dos gradientes de pressão, assim como dados da sísmica do poço e testes de medição indireta e direta, como *Leaf off test* (LOT) e curva de tendência de compactação normal. Assim, este trabalho é um esboço de dois projetos para o assentamento de sapatas de revestimento, cujo objetivo é apresentar uma análise dos critérios para elaboração destes, como tolerância ao *kick* e diferencial de pressão, respeitando as limitações do poço e da formação e, assim, auxiliar na escolha de um fluido de perfuração adequado para a atividade de perfuração.

## Metodologia

O objeto de estudo deste trabalho foi um poço com lâmina d'água profunda localizado no Nordeste Brasileiro. Devido à confidencialidade dos dados, o poço é referido como A, cujas informações foram cedidas pela empresa B. Na Tabela 1 são apresentados os dados de entrada do simulador. O processamento dos dados foi feito no *software* Microsoft Office Excel 2007.

Tabela 1 – Dados de entrada do simulador

<b>Lâmina d'água</b>	1000 m
<b>Profundidade final</b>	4500 m
<b>Air gap</b>	25 m
<b>Altura do <i>kick</i></b>	88 m
<b>Densidade do fluido invasor</b>	2 lb/gal
<b>Tolerância ao <i>kick</i> diferencial mínima</b>	0,5 lb/gal
<b>Valores de LOT dos poços de correlação</b>	2000 m – 11,1 lb/gal 3000 m – 12,1 lb/gal 4000 m – 15,4 lb/gal
<b>Dados de <i>kick</i> dos poços de correlação</b>	Profundidade de ocorrência – 4100 m SIDPP – 643 psi Fluido de perfuração – 11 lb/gal

Fonte: Autor

Cada rocha possui características diferentes, sejam elas mineralógicas, litológicas, paleontológicas, ou sejam físicas, etc. Desta forma, é necessário conhecer características da rocha e do poço, como a densidade ou massa específica da formação (DOS SANTOS, 2015).

Para se obter a curva do gradiente de sobrecarga, deve-se estimar a densidade da formação a partir do perfil sônico, através do método de Gardner (1974), expressa pela

Equação 1:

$$\rho_b = a * \left( \frac{10^6}{\Delta t} \right)^b, \left( \frac{g}{cm^3} \right) \quad (1)$$

No qual a e b são 0,23 e 0,25, constante e expoente empíricos, respectivamente. Com os valores de densidade calculados e, aplicando-se a massa específica da formação, obtêm-se as pressões de sobrecarga ( $\sigma_{ov}$ ) e gradientes de sobrecarga ( $G_{ov}$ ), através das Equações 2 e 3:

$$\sigma_{ov} = 1,422. \left( \rho_w \cdot D_w + \sum_0^n \rho_{bi} \cdot \Delta D_i \right), (psi) \quad (2)$$

Em que temos:  $\rho_{bi}$  = densidade de cada camada da formação, g/cm<sup>3</sup>;  $\rho_w$  = densidade da água do mar, g/cm<sup>3</sup>;  $D_w$  = lâmina d'água, metros;  $\Delta D_i$  = intervalos de profundidade, metros. Uma vez obtida a pressão de sobrecarga, pode-se calcular o gradiente de sobrecarga, através da Equação 3:

$$G_{ov} = \frac{\sigma_{ov}}{0,1704 \cdot D_{total}}, \left( \frac{lb}{gal} \right) \quad (3)$$

Com os valores obtidos, obtêm-se o gráfico do gradiente de sobrecarga. Para calibrar a curva ao longo do poço, é necessário calcular a pressão de poros em um ponto a partir dos dados do *kick*, utilizando-se a Equação 5:

$$G_p = \frac{SIDPP + 0,1704 * \rho_{mud} * D_h}{0,1704 * D_h} \quad (4)$$

Onde  $D_h$  é a profundidade e  $\rho_{mud}$  é o peso do fluido. Para a determinação da curva de compactação normal (*trend line*), plota-se o gráfico de profundidade *versus* tempo de trânsito, selecionando dois pontos pertencentes à reta para calcular o coeficiente angular  $m$ . Comumente, a curva de tendência de compactação normal é aproximada de uma reta de um gráfico semilogarítmico (FERREIRA, 2010). Sabe-se que poços de correlação não apresentaram valores em excesso para torque, *drag*, gás de conexão e manobra no intervalo 1000-3000 m, logo, os pontos selecionados devem estar nesse intervalo. A Equação 5 é utilizada para cálculo do  $m$ . Após encontrar o valor do coeficiente  $m$ , calcula-se o tempo de trânsito normal, utilizando-se a Equação 6:

$$m = \frac{\log(\Delta t_2) - \log(\Delta t_1)}{D_2 - D_1} \quad (5)$$

$$\Delta t_n = \Delta t_1 \cdot 10^{m(D - D_1)}, (\mu s/ft) \quad (6)$$

Em que  $\Delta t_1$  é o tempo de trânsito nas profundidades onde ocorreu a compactação normal e D é a profundidade de interesse da reta de tendência. Para se estimar o gradiente de

pressão de poros pode-se utilizar o método de Eaton (1975), que utiliza o expoente 2 quando se trata de bacias brasileiras através de dados do perfil sônico, logo, pela Equação 7, tem-se:

$$G_p = G_{ov} - \left[ (G_{ov} - G_N) * \left( \frac{\Delta t_N}{\Delta t_0} \right)^2 \right] \quad (7)$$

Em que  $G_N$  é o gradiente de pressão de poros normal. Utilizando o método indireto de tensão mínima, estima-se o gradiente de fratura. Para isso, é necessário que se empregue os três dados de LOT disponíveis na área para que se obtenham três valores pontuais de K, através da relação, desenvolvidas por Hubert & Willis (1957). Traçando-se uma curva de interpolação entre os três valores de K pontuais e a profundidade de sedimentos obtêm-se uma curva que, quando ajustada irá fornecer uma equação para cálculo do K ajustado ao longo de todo o poço. Por fim, pode-se estimar o gradiente de fratura. As Equações 8, 9 e 10 evidenciam esses cálculos:

$$K = \frac{LOT - G_p}{G_{ov} - G_p} \quad (8)$$

$$K = a * \ln(D_s) + b \quad (9)$$

$$G_F = G_p + K(G_{ov} - G_p) \quad (10)$$

As equações para obtenção dos gradientes se completam até chegar ao gradiente de pressão de fratura. Considerando uma margem de segurança de 0,5 lb/gal, é possível a construção da janela operacional e o posterior assentamento de sapatas.

A simulação 1 foi feita adotando-se o um diferencial de pressão máximo de 2000 psi para o assentamento de sapatas, que foi feito de baixo para cima. Já a simulação 2 deve ser feita com base na tolerância ao *kick*, que é calculado pela Equação 11 a seguir, para cada intervalo de profundidade:

$$\Delta \rho_{kt} = \frac{D_{fm} * (G_F - \rho_{mud})}{D_h} - \frac{h_k * (\rho_{mud} - \rho_k)}{D_h} + \rho_{mud} - G_p \quad (11)$$

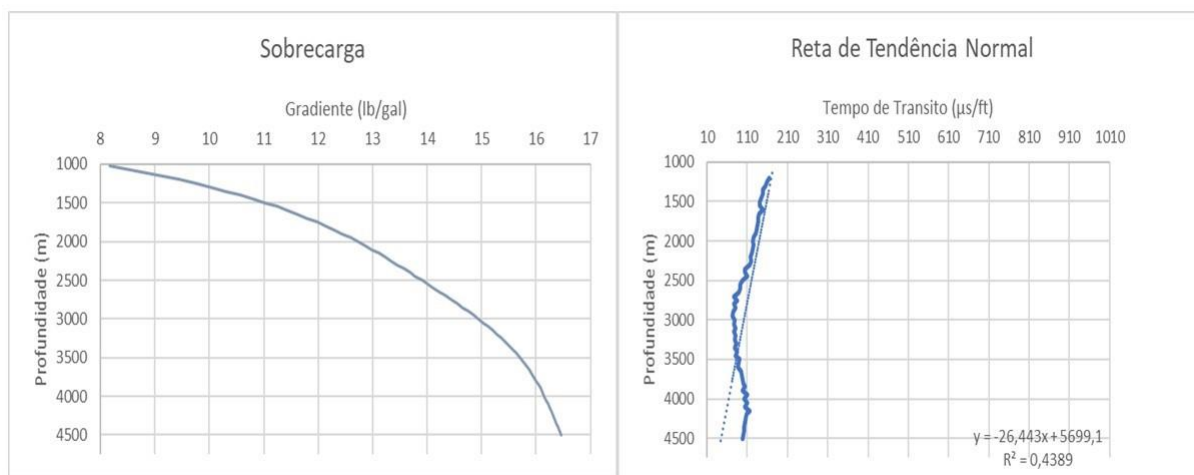
Para o cálculo do peso do fluido adequado, utilizou-se a Equação 12, que é a média entre as pressões de poros e fratura, que é igual à tensão horizontal:

$$\sigma_H = \frac{P_p + P_F}{2} \quad (12)$$

A partir de dados do perfil sônico fornecidos, estimou-se as geopressões, elaborando em seguida a janela operacional do poço e a partir dela definindo as profundidades de assentamento das sapatas, bem como a definição do peso de fluido de perfuração que deveria ser utilizado em cada fase do projeto.

## Resultados e Discussão

Utilizando-se a Equação 1, calculou-se a densidade de cada camada da formação e assim, obteve-se a pressão de poros e o gradiente de sobrecarga. Através dos dados, plotou-se a curva do gradiente de sobrecarga. Com os dados do *kick* e a uma profundidade de 4100 m, obteve-se a pressão de poros, igual a 11,92 lb/gal. Para outras profundidades, a pressão de poros apresentou valores negativos. Isso pode ser justificado pela reta *trend line*, ou pelo valor utilizado na constante de Eaton. A Figura 1 mostra o comportamento da curva de sobrecarga e da reta de tendência normal:



**Figura 1** – Curva do gradiente de sobrecarga e reta de tendência de compactação normal  
Fonte: Autor

Dois pontos pertencentes à reta foram selecionados e, através da Equação 5, calculou-se o coeficiente *m*. Os pontos selecionados foram nas profundidades de 1300 e 2100 m, com tempo de 155 e 124, respectivamente. Logo o *m* obtido foi igual a -0,000121.

Para a estimativa do gradiente de fratura, utilizou-se os dados de LOT fornecidos e obteve-se valores pontuais para *K*, através da Equação 8. Com os valores de *K* pontual, traçou-se uma curva de *K versus* profundidade de sedimentos, obtendo-se um ajuste da curva para que se pudesse obter um *K* ajustado ao longo de todo o poço.

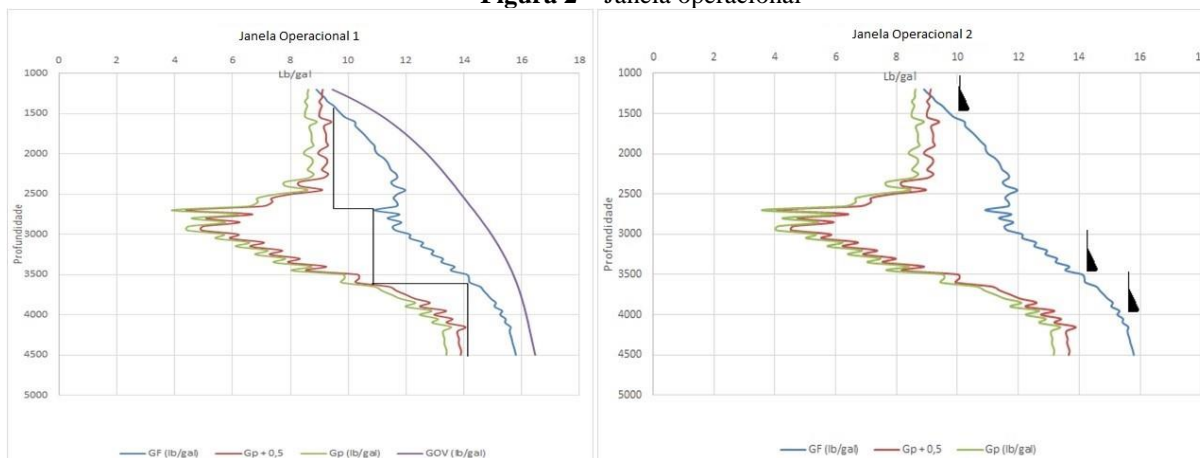
A equação fornecida pelo ajuste da curva é a Equação 13 a seguir:

$$K = 0,1825 \ln(D_s) - 0,609 \quad (13)$$

Através destes dados e da Equação 9, obteve-se o gradiente de fraturas e a janela operacional.

A simulação 1 foi feita com assentamento de sapatas de baixo para cima, com uma margem de segurança de 0,5 lb/gal e a simulação 2 considerando-se o critério de tolerância ao *kick* diferencial mínima com assentamento de cima para baixo. A Figura 2 mostra o modelo de assentamento de sapatas para cada simulação:

**Figura 2 – Janela operacional**



Fonte: Autor

Tendo obtido os dados de profundidade da sapata a partir dos critérios mencionados, pode-se estimar o peso do fluido a ser utilizado em cada fase com base na média entre o maior gradiente de poros da fase e o menor gradiente de fratura atravessados na fase, como mostra a Equação 12. Assim, têm-se a Tabela 2:

**Tabela 2 – Peso de fluido para a Simulação 1**

Fase (")	Profundidade da sapata	$\rho_{mud}$ (lb/gal)	$G_p + 0,5$ (lb/gal)	$G_f$ (lb/gal)
26	1450	9,3	9,03	9,62
17 ½	2700	9,4	4,41	10,91
12 ¼	3600	10,5	10,02	14,21
8 ¾	4500	14,7	13,65	15,79

Fonte: Autor

A primeira sapata corresponde ao revestimento de superfície, fixada em 1450 m, de acordo com especificações da literatura (ROCHA; AZEVEDO, 2009). A segunda e terceira sapatas estão fixadas em 2700 m e 3600 m e correspondem aos revestimentos intermediários. A última sapata refere-se ao revestimento de produção, e deverá ser assentada a 4500 m. Também foi levado em consideração o critério de diferencial de pressão, para o qual deveria ser assentado uma sapata nas profundidades em que as diferenças de pressão entre o poço e a formação excedessem 2000 psi. Esse diferencial foi alcançado na profundidade de 2700 m, entretanto, utilizando-se o assentamento com base apenas na janela operacional, uma sapata já havia sido assentada. Desta maneira, nenhuma sapata extra precisou ser assentada, logo o Tabela 3 fornece um projeto satisfatório.

Em relação à simulação 2, dados como altura do *kick* e densidade do fluido invasor foram avaliados e a análise da intolerância ao *kick* sugere que quando, durante a perfuração tiver  $\Delta\rho_{kt} \leq \Delta\rho_{kt\ min} = 0,5\ lb/gal$  deve-se assentar uma sapata. O peso de fluido ( $\rho_{mud}$ )



utilizado no cálculo para a profundidade da sapata da fase 2 é igual ao gradiente de poros ( $G_p$ ) daquela profundidade mais 0,5 lb/gal. Profundidade do poço ( $D_h$ ) é constante e igual a 4500 metros, a formação mais fraca que se encontra na sapata da fase anterior a uma profundidade ( $D_{fm}$ ) de 1450 metros possui gradiente de fratura ( $G_f$ ) igual a 9,62 lb/gal. Substituindo os dados mencionados na equação e variando os valores de  $\rho_{mud}$  e  $G_p$ , verificamos que a sapata deve ser assentada na profundidade de 3450 metros, pois para valores acima disso  $\Delta\rho_{kt} \leq \Delta\rho_{kt\ min} = 0,5\ lb/gal$ , que é o critério para assentamento com base na tolerância ao *kick*.

**Tabela 3** – Peso de fluido para a Simulação 2

Fase (")	Profundidade da sapata	$\rho_{mud}$ (lb/gal)	$G_f$ (lb/gal)	$\Delta\rho_{kt}$
26	1450	9,3	-	-
17 ½	3450	9,3	9,62	0,843
12 ¼	4000	13,0	13,55	0,912
8 ¾	4500	14,5	15,25	1,69

Fonte: Autor.

A primeira sapata, correspondente ao revestimento de superfície, foi fixada a 1450 m. A segunda e terceira sapatas, assentadas em 3450 e 4000 m, correspondem ao critério de tolerância ao *kick*, que leva em consideração a ocorrência de um influxo da formação para o poço (*kick*), sendo esta última fixada para que seja possível o aumento do peso do fluido aplicado para a fase seguinte. Entretanto, utilizando o critério de diferencial de pressão, observa-se que a partir da profundidade de 2700 metros, o aumento do peso do fluido passa a acontecer gradativamente, além de que o diferencial entre o poço e a formação se torna superior a 2000 psi, o que acaba gerando riscos de prisão de coluna por diferencial de pressão, sendo necessário assentar outra sapata nesta profundidade. Assim, a simulação 2 nos fornece um novo assentamento com as mesmas profundidades de assentamento de sapatas da simulação 1 e conseqüente aumento no peso do fluido de perfuração, que deve sofrer oscilações graduais, garantindo um diferencial de pressão positivo sem que seja necessário assentar novo revestimento, além de respeitar o limite superior de fratura, como mostra a Tabela 3 acima.

## Conclusões

Neste trabalho foram apresentadas as etapas da construção de uma janela operacional de um projeto de poço que contemplou a operação de perfuração e assentamento de sapatas de revestimento. Os parâmetros e critérios utilizados na metodologia são os mesmos adotados

por companhias da indústria petrolífera e referenciados por grandes engenheiros e autores. A simulação 1 foi feita com assentamento de sapatas de baixo para cima, com uma margem de segurança de 0,5 lb/gal, onde a primeira sapata fixada em 1450 m, a segunda e terceira sapatas estão fixadas em 2700 e 3600 m e última sapata refere-se ao revestimento de produção, e deverá ser assentada a 4500 m, com o peso de fluido de 14,7 lb/gal. Na simulação 2 foi considerado o critério de tolerância ao *kick* diferencial mínima com assentamento de cima para baixo. Ela nos fornece um novo assentamento com as profundidades de assentamento de sapatas semelhantes a simulação 1, onde houve um aumento no peso do fluido de perfuração, garantindo um diferencial de pressão positivo, respeitando o limite superior de fratura. O projeto respeitou as finalidades e limitações do poço e da formação, mostrando-se satisfatório, além de evitar acidentes, contribui para o aumento da vida útil do poço e da produção. Também foi possível escolher corretamente o fluido de perfuração bem como o assentamento de sapatas.

## Referências

DOS SANTOS, João Paulo Lobo et al. Projetos de Poços: um Estudo de Caso na Bacia Sergipe-Alagoas. **RUnPetro-ISSN 2316-6681**, v. 3, n. 2, p. 31-39, 2015.

EATON, B. The Equation for Geopressure Prediction from Well Logs. **SPE Journal** 5544, 1975.

FERREIRA, C. D. **Novo método para estimativa do gradiente de fratura para poços de petróleo**. Tese de Doutorado - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2010.

GARDNER, G.H.F, GARDNER, L.W., GREGORY, A.R.. Formation Velocity and Density – The diagnostic basis for stratigraphic traps, **Geophysics**, Volume 39, Number 6, pp. 2085 – 2095, 1974.

HUBBERT, M. K., and WILLIS, D. G. Mechanics of Hidraulics Fracturing. AIME Petroleum Transactions, V. 210, p. 153-168, 1957.

JUNQUEIRA, Cecília Pinheiro et al. A Prática da Estabilidade de Poços: Exemplos do Brasil. 2014.

RAMIREZ PERDOMO, Paul Richard et al. Metodologia para determinar as profundidades de assentamento das sapatas dos revestimentos de poços de petróleo em águas profundas. 2003.

ROCHA, Luiz Alberto Santos; AZEVEDO, Cecilia Toledo de. Projeto de Poços de Petróleo: geopressões e assentamentos de colunas de revestimentos. Rio de Janeiro. **Interciencia, Petrobras**, 2009.

SILVA, Aquiles Oliveira Mendes da et al. Perfuração e Completação de Poços HPHT. 2016.