

9º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



9º CONGRESSO
Brasileiro de P&D em
PETRÓLEO E GÁS

Maceió, AL
de 09 a 11 de novembro
2017

Realização:



ABPG
ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE P&D EM
PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

ESTUDO DAS GEOPRESSÕES PARA A DEFINIÇÃO DO ASSENTAMENTO DE SAPATAS DE REVESTIMENTO BASEADO NO CRITÉRIO DA JANELA OPERACIONAL

AUTORES:

Milena Raquel Almeida de Aguiar¹, João Paulo Lima Santos², Jeremias Christian Honorato Costa.³
E-mail: milena.aguiar2@hotmail.com

INSTITUIÇÃO:

¹²³Unidade Acadêmica Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Campus A. C. Simões, Tabuleiro dos Martins, Maceió-AL, 57072-970.

Abstract

Oil wells are drilled for phases defined by drill bit sizes used in the operation. After the drilling of each phase goes down the casing, special steel pipes that have among other functions to protect the well walls and to avoid inflow of drilling mud to the formation. Wells casing besides being one of most expensive and important steps on the drilling, it is one of the crucial factors for the success that. During the phase of well planning is realized the research to determine the shoes sitting depth, it is directly linked to security and well viability, thus avoiding that the shoe be sitting in a well unsteady zone. According to the area, superficial zones or deeper zones, where the shoe will be install and considering there are challenges in areas determined, the depth that can be defined on the basis of sitting criteria. In this search will be approach the sitting criterion based on only operational window, which will involve the study of geopressures and methods used to estimate them, as well as the factors that affect the sitting. To complement this search will be done an implementation of the computational algorithm purposing to determine the geopressures, to detect the shoe sitting depth and, consequently to define the amount of well phases, on the basis on sitting criterion studied.

Keywords: *geopressures, sitting shoes, casing, operational window.*

ESTUDO DAS GEOPRESSÕES PARA A DEFINIÇÃO DO ASSENTAMENTO DE SAPATAS DE REVESTIMENTO BASEADO NO CRITÉRIO DA JANELA OPERACIONAL

Introdução

A perfuração de poços é feita por fases e no decorrer dessas fases são encontradas zonas críticas de alta pressão ou de formações não consolidadas, o que gera a necessidade desses poços serem revestidos a fim de selar essas zonas e permitir a perfuração até a profundidade total desejada, sem que ocorra desmoronamento ou contaminação da formação por fluido de perfuração (RAHMAN e CHILINGARIAN, 1995). Esse revestimento é conhecido como coluna de revestimento e, de acordo com Thomas (2004), a quantidade de fases a serem utilizadas depende da profundidade prevista para o poço e das características das formações a serem perfuradas.

Ao final de cada fase perfurada é feito o assentamento da sapata, para que dessa forma, a próxima fase, com diâmetro menor, seja também perfurada e revestida. Para que isso aconteça com segurança e sucesso é necessário considerar as propriedades das formações a serem perfuradas e definir a correta profundidade da sapata, o que pode ser feito por meio da janela operacional, a qual determina o limite de pressão que o fluido de perfuração pode atingir considerando como limite inferior o gradiente de pressão de poros e como limite superior o gradiente de fratura.

As pressões e tensões existentes no subsolo são definidas como geopressões e neste trabalho serão abordadas algumas delas, como a tensão de sobrecarga, que é exercida em uma determinada profundidade devido ao peso das camadas acima; a pressão de poros que é definida como a pressão dos fluidos dentro dos poros da rocha e a pressão de fratura, que é a pressão com a qual a rocha tende a fraturar.

O revestimento de poços, além de ser uma das etapas mais onerosas e importantes na indústria petrolífera, é um dos fatores cruciais para a segurança e sucesso da perfuração. É nesse sentido que se vê o interesse em desenvolver uma aplicação computacional voltada para a definição da profundidade de assentamento de sapatas e consequentemente a quantidade de revestimento necessária para revestir o poço. Sendo assim, será implementada uma ferramenta computacional em linguagem de programação Python que abordará alguns dos métodos utilizados para estimar as geopressões, as quais serão utilizadas para a determinação da profundidade da sapata de acordo com o critério de assentamento baseado na janela operacional.

Metodologia

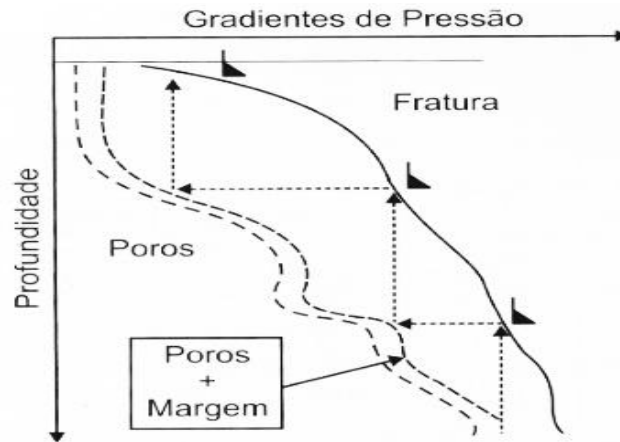
As pressões de poros e de fratura são as pressões que determinam a janela operacional do poço e com ajuda desta pode-se estimar a variação permitida de pressão exercida pelo fluido de perfuração dentro do poço, de forma a manter a integridade deste. Como a pressão do fluido é função da massa específica deste, consequentemente a janela operacional vai evidenciar o máximo e mínimo limite permitido para a massa específica do fluido de perfuração (ROCHA e AZEVEDO, 2009).

Segundo Rocha e Azevedo (2009), a profundidade de assentamento da sapata pode ser determinada pelo critério de assentamento baseado somente na janela operacional, onde o método consiste em traçar, de baixo para cima, uma reta vertical do limite inferior até o limite superior da janela operacional (Figura 1), sendo o ponto de cruzamento o local para o assentamento.

Na janela operacional, cada pressão é expressa pelo seu gradiente de pressão, dado em lb/gal ou g/cm³, o qual representa a razão entre a pressão e a profundidade. Isso é feito para que possa existir uma comparação entre as pressões e a massa específica do fluido de perfuração, o qual também é dado em lb/gal ou g/cm³. De acordo com Pereira (2007), o gradiente é expresso pela Equação 1, em que G é o gradiente de pressão; P é a pressão; C é a constante de conversão de unidades e Z é a profundidade vertical.

$$G = \frac{P}{C.Z} \quad (1)$$

Figura 1. Assentamento das sapatas de revestimento pelo critério baseado na janela operacional.



Fonte: ROCHA e AZEVEDO (2009)

O gradiente de pressão de poros e de fratura dependem diretamente do gradiente de sobrecarga, que pode ser estimado da seguinte forma:

$$G_{sob} = \frac{\sigma_{ov}}{c.z} \quad (2) \quad \sigma_{ov} = 1,422 (\rho_w D_w + \sum_0^n \rho_{bi} \Delta D_i) \quad (3)$$

em que, σ_{ov} é a tensão (pressão) de sobrecarga (psi); ρ_{bi} é a densidade de cada camada da formação (g/cm³); ρ_w é a densidade da água do mar (g/cm³); D_w é a profundidade da lâmina d'água (m) e ΔD_i é o intervalos de profundidade.

Como visto, a pressão de sobrecarga depende da massa específica das camadas sobrepostas, que segundo Rocha e Azevedo (2009), pode ser estimada através de métodos de cálculo como a correlação de *Belloti*, correlação de *Miller*, método de *Bourgoyne* e correlação de *Gardner*, este último além de ser o método mais simples e confiável, é o mais usado na indústria do petróleo (Eq.4).

O método de Gardner pode utilizar tanto o tempo de trânsito como a velocidade do som para estimar a densidade da formação, porém, neste trabalho será utilizado o tempo de trânsito, o qual é obtido através do perfil sônico e se trata do tempo de um pulso acústico, emitido pela onda sônica, entre dois pontos fixos de uma formação, no poço.

$$\rho_b = a \left(\frac{10^6}{\Delta t} \right)^b \quad (4)$$

sendo ρ_b a densidade total da formação (g/cm³); a uma constante empírica usualmente igual a 0,23 para o Golfo do México; b um expoente empírico usualmente igual a 0,25 para o Golfo do México e Δt o tempo de trânsito (μs/ft)

Para a estimativa do gradiente de poros também é necessário o uso de métodos de cálculo, como os métodos da Razão, Profundidade Equivalente e Eaton. Este último, de acordo com Rocha e Azevedo (2009), é um dos mais usados na indústria do petróleo e pode ser estimado também em função do tempo de trânsito (Eq. 5). É um método simples e prático para aplicação e, por isso, o mais popular (REYNA, 2007).

$$G_p = G_{ov} - \left[(G_{ov} - G_N) x \left(\frac{\Delta t_N}{\Delta t_0} \right)^{2,0} \right] \quad (5)$$

em que, G_p é o gradiente de pressão de poros (lb/gal); G_N é o gradiente de pressão de poros normal (lb/gal); G_{ov} é o gradiente de sobrecarga (lb/gal); Δt_0 : tempo de trânsito observado e Δt_N : valor da reta normal para o tempo de trânsito.

O gradiente de pressão de poros normal (G_N), que é o valor de pressão de poros considerado como normal ou igual a pressão hidrostática do poço varia, de acordo com Rocha e Azevedo (2007 *apud* CRUZ, 2009), entre 8,5 lb/gal a 9,0 lb/gal e os valores da reta normal para o tempo de trânsito (Δt_N) pode ser obtida através da Equação 6, na qual Δt_1 é o valor de tempo de trânsito onde começa a

compactação normal; m é o coeficiente angular da reta normal; D é a profundidade de interesse; D_1 é a profundidade do ponto Δt_1 e Δt_2 é o valor de tempo de trânsito onde acaba a compactação normal.

$$\Delta t_N = \Delta t_1 (10)^{m(D-D_1)} \quad (6) \quad m = \frac{\log(\Delta t_2) - \log(\Delta t_1)}{D_2 - D_1} \quad (7)$$

Para a estimativa do gradiente de fratura ao longo de todo o poço, Rocha e Azevedo (2009) citam três métodos: Método das Tensões Tangenciais, da Tensão Mínima e Correlações Específicas. O método mais utilizado na indústria é o da Tensão Mínima, pois é uma forma mais simples de determinar a fratura e pode ser calculada pela Equação 8.

$$G_F = G_P + K(G_{ov} - G_p) \quad (8)$$

sendo K é uma correlação entre as tensões efetivas horizontal mínima e vertical da rocha, que segundo Domingues (2013) pode ser aproximada de acordo com os diferentes intervalos de profundidades a seguir:

Tabela 1. Valores de K para cada intervalo de profundidade

Intervalo (m)	Valor de K
1500-2000	0,65
2000-2500	0,70
2500-3500	0,73
3500-4310	0,75
4310-5000	0,77
5000-6000	0,8

Fonte: DOMINGUES (2013)

Resultados e Discussão

Neste trabalho serão utilizados dados disponibilizados por Rocha e Azevedo (2009) do poço 1-PUC-A-RJS, onde tem-se:

Tabela 2. Tempo de trânsito para cada intervalo de formação dentro do poço.

Prof.(m)	Δt (μs/ft)	Prof.(m)	Δt (μs/ft)	Prof. (m)	Δt (μs/ft)	Prof. (m)	Δt (μs/ft)
1200	165	2050	125	2900	75	3750	98
1250	158	2100	124	2950	74	3800	100
1300	155	2150	121	3000	78	3850	105
1350	148	2200	118	3050	76	3900	99
1400	149	2250	119	3100	80	3950	110
1450	145	2300	115	3150	77	4000	102
1500	142	2350	105	3200	81	4050	110
1550	141	2400	104	3250	78	4100	105
1600	149	2450	110	3300	82	4150	115
1650	140	2500	99	3350	79	4200	108
1700	138	2550	93	3400	85	4250	106
1750	137	2600	92	3450	80	4300	105
1800	135	2650	89	3500	90	4350	103
1850	133	2700	76	3550	89	4400	102
1900	132	2750	85	3600	87	4450	101
1950	126	2800	77	3650	95	4500	99
2000	123	2850	81	3700	96		

Além disso, o poço tem lâmina d'água de 1000 metros, air gap de 35 metros e será considerado o gradiente normal de poros (G_N) de 8,5 lb/gal.

Através do tempo de trânsito é calculada a densidade de cada formação perfurada pela Correlação de Gardner (Eq. 4) para, assim, calcular a tensão de sobrecarga (Eq. 3) e o gradiente de sobrecarga (Eq. 2), o que pode ser observado na Tabela 3.

9º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS

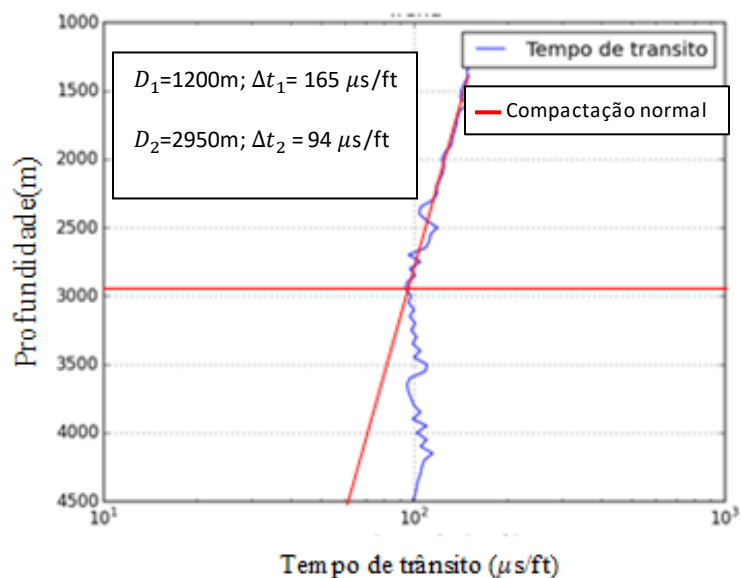
Para dar prosseguimento as estimativas, é plotado um gráfico Tempo de trânsito (Δt) x Profundidade (Figura 2), que originará o traçado da curva de tendência de compactação normal, o qual indicará o começo e fim da compactação normal, para que assim possa ser calculado o valor do coeficiente angular da reta de tendência normal do tempo de trânsito (m) (Eq.7) e os valores de tempo de trânsito estimados para a reta normal (Δt_N) (Eq.6). Por fim a Equação 5 dará o valor do gradiente de poros (G_p) para cada formação e usando a Equação 1 pode-se obter os valores de pressão de poros (P_p) (Tabela 4).

Já para obter o gradiente de fratura (Tabela 5) foi utilizada a Equação 8 com os respectivos valores de K da Tabela 1 para cada intervalo de profundidade.

Tabela 3. Densidades das formações e respectivo gradiente de sobrecarga

Prof (m)	ρ_{bi} (g/cm ³)	Gsob (lb/gal)	Prof. (m)	ρ_{bi} (g/cm ³)	Gsob (lb/gal)	Prof. (m)	ρ_{bi} (g/cm ³)	Gsob (lb/gal)
1000	1.03	8.61564706	2400	2.27755829	13.98622179	3650	2.32968356	15.75159651
1200	2.02934951	10.00885784	2450	2.24584441	14.08417294	3700	2.32359283	15.80138805
1250	2.05146241	10.29489871	2500	2.20212058	14.1708913	3750	2.31164594	15.84851939
1300	2.0613176	10.56210705	2550	2.23078762	14.25891073	3800	2.3	15.89312865
1350	2.08527054	10.81694289	2600	2.23575047	14.34434312	3850	2.27211606	15.93355013
1400	2.08176292	11.05252831	2650	2.2509778	14.4289549	3900	2.30578621	15.97654594
1450	2.09597373	11.27596539	2700	2.32359283	14.52168111	3950	2.24584441	16.01210648
1500	2.10695738	11.48756917	2750	2.27211606	14.60320659	4000	2.28864163	16.05125282
1550	2.11068322	11.68652644	2800	2.3175809	14.68861152	4050	2.24584441	16.08501301
1600	2.08176292	11.86548919	2850	2.29428567	14.76760123	4100	2.27211606	16.12062971
1650	2.11444225	12.04188914	2900	2.32968356	14.8489722	4150	2.22102464	16.1502392
1700	2.12206198	12.20978723	2950	2.33585496	14.92845979	4200	2.2561704	16.18264352
1750	2.1259238	12.36901409	3000	2.31164594	15.00192277	4250	2.26673823	16.21532535
1800	2.13375422	12.52121444	3050	2.32359283	15.07461535	4300	2.27211606	16.2477702
1850	2.14173101	12.66699107	3100	2.3	15.14178	4350	2.28306633	16.28052202
1900	2.14577585	12.80598562	3150	2.3175809	15.20914671	4400	2.28864163	16.31305943
1950	2.17087691	12.94323591	3200	2.29428567	15.27136356	4450	2.29428567	16.34539612
2000	2.18399459	13.07636682	3250	2.31164594	15.33390009	4500	2.30578621	16.37808309
2050	2.1752057	13.20121046	3300	2.28864163	15.39162606			
2100	2.179578	13.32097995	3350	2.30578621	15.44976931			
2150	2.19296396	13.4377827	3400	2.27211606	15.50206068			
2200	2.20677134	13.55190112	3450	2.3	15.55621666			
2250	2.20212058	13.66008312	3500	2.24584441	15.60235396			
2300	2.22102464	13.76699909	3550	2.2509778	15.6477964			
2350	2.27211606	13.87845831	3600	2.3175809	15.6997142			

Figura 2. Tempo de trânsito com traçado da curva de compactação normal e identificação do começo e fim da zona normalmente compactada.



Fonte: Autor deste trabalho.

Tabela 3. Gradiente de poros e pressão de poros.

Prof (m)	Gp (lb/gal)	Pp (psi)	Prof. (m)	Gp (lb/gal)	Pp (psi)	Prof. (m)	Gp (lb/gal)	Pp (psi)
1200	8.7	1774.8	2350	7.77415569	3105.775198	3500	12.0634212	7177.735637
1250	8.61058255	1829.748791	2400	7.83544926	3196.863297	3550	12.1346897	7323.285273
1300	8.58339442	1896.930166	2450	8.66140038	3607.473258	3600	11.3718773	6959.588960
1350	8.42767974	1934.152501	2500	9.61169053	4084.968476	3650	11.3499913	7042.669656
1400	8.51577994	2026.755626	2550	9.2838984	4024.569956	3700	11.59791363	7295.08767
1450	8.43571988	2079.404950	2600	9.36496044	4139.312512	3750	11.91656589	7596.81075
1500	8.38417013	2137.963383	2650	9.26173022	4172.409464	3800	12.2135419	7889.94806
1550	8.4209971	2218.932734	2700	7.96660589	3656.672102	3850	12.68349363	8301.34657
1600	8.86404312	2411.019727	2750	9.22276511	4311.642690	3900	12.41523663	8231.30188
1650	8.56624736	2402.832383	2800	8.49522769	4043.728382	3950	13.20506558	8867.20153
1700	8.57182276	2477.256777	2850	9.16284923	4439.400451	4000	12.87299288	8753.63515
1750	8.63237737	2568.132269	2900	8.63206719	4255.609126	4050	13.42654715	9244.17771
1800	8.64021751	2643.906557	2950	8.7	4363.05	4100	13.28163783	9257.30156
1850	8.6471937	2719.542417	3000	9.3873925	4787.570177	4150	13.84925669	9770.65059
1900	8.71570996	2815.174317	3050	9.34347802	4844.593355	4200	13.64527748	9742.72812
1950	8.45086198	2801.460746	3100	9.97319122	5255.871773	4250	13.65350643	9864.65839
2000	8.36811048	2845.157564	3150	9.83408471	5266.152361	4300	13.70861505	10020.9976
2050	8.66072077	3018.261188	3200	10.4245933	5670.978787	4350	13.71420309	10141.6531
2100	8.73406266	3118.060369	3250	10.3012903	5691.462934	4400	13.76809548	10298.5354
2150	8.655102	3163.439782	3300	10.853834	6089.000871	4450	13.82123661	10455.7654
2200	8.56475938	3203.220006	3350	10.7446720	6119.090723	4500	13.8231545	10574.7131
2250	8.80568254	3368.173570	3400	11.4202884	6600.926736			

2300	8.62499379	3372.372571	3450	11.1637528	6547.541067			
------	------------	-------------	------	------------	-------------	--	--	--

Tabela 4. Valor de K de acordo com a profundidade e gradiente de fratura.

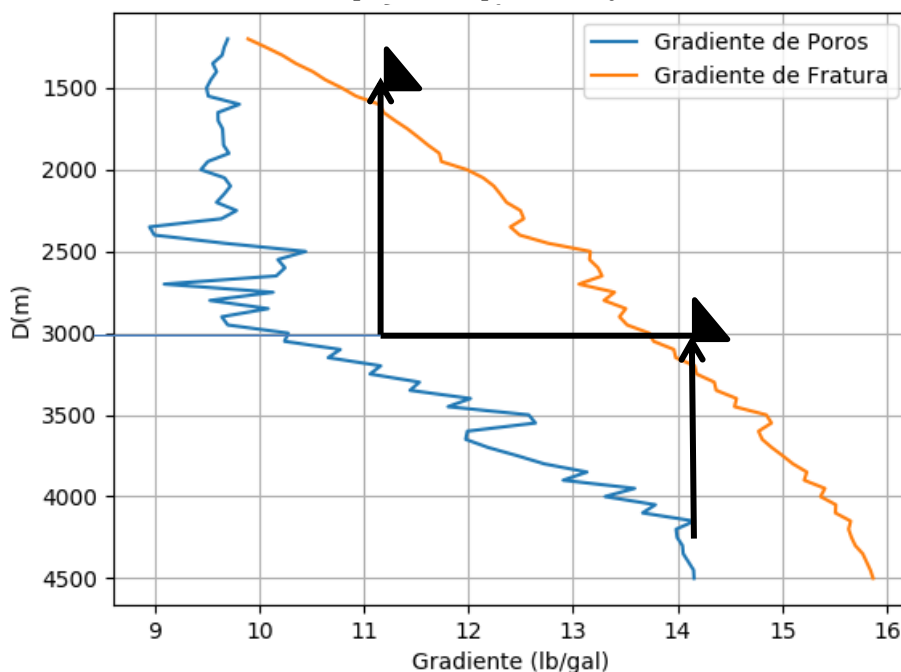
Prof (m)	K	Gf (lb/gal)	Prof. (m)	K (g/cm ³)	Gf (lb/gal)	Prof. (m)	K (g/cm ³)	Gf (lb/gal)
1200	0,63	9.89458044	2400	0,70	12.49005442	3600	0,75	14.77232696
1250	0,63	10.06244566	2450	0,70	12.7594919	3650	0,75	14.80724518
1300	0,63	10.22315286	2500	0,73	13.16491324	3700	0,75	14.89850018
1350	0,63	10.35051175	2550	0,73	13.15729707	3750	0,75	15.00304038
1400	0,63	10.5129051	2600	0,73	13.23810108	3800	0,75	15.10111744
1450	0,63	10.63303455	2650	0,73	13.27733044	3850	0,75	15.23336178
1500	0,65	10.79103429	2700	0,73	13.05582442	3900	0,75	15.20857438
1550	0,65	10.92628836	2750	0,73	13.39657724	3950	0,75	15.40631863
1600	0,65	11.14684524	2800	0,73	13.29563017	4000	0,75	15.36477349
1650	0,65	11.18942259	2850	0,73	13.50372203	4050	0,75	15.51039184
1700	0,65	11.29928165	2900	0,73	13.44339077	4100	0,75	15.50652699
1750	0,65	11.417642	2950	0,73	13.51677565	4150	0,75	15.65220527
1800	0,65	11.51834122	3000	0,73	13.72654891	4200	0,75	15.63307707
1850	0,65	11.61472099	3050	0,73	13.76995344	4250	0,75	15.66009044
1900	0,65	11.72305	3100	0,73	13.96289665	4300	0,75	15.69708423
1950	0,65	11.74145499	3150	0,73	13.98083803	4350	0,77	15.76813314
2000	0,70	11.98664095	3200	0,73	14.16187661	4400	0,77	15.80460425
2050	0,70	12.14168146	3250	0,73	14.17992289	4450	0,77	15.84077489
2100	0,70	12.24269337	3300	0,73	14.34951729	4500	0,77	15.8669834
2150	0,70	12.30582147	3350	0,73	14.36760337			
2200	0,70	12.36412072	3400	0,73	14.56200345			
2250	0,70	12.49737096	3450	0,73	14.54322807			
2300	0,70	12.52883837	3500	0,75	14.84579925			
2350	0,70	12.40080382	3550	0,75	14.89593057			

Depois de estimado os gradientes de poros e de fratura, foi plotado a janela operacional e determinado a profundidade do assentamento das sapatas de revestimento utilizando o critério de assentamento de sapatas baseado na janela operacional (Figura 3). Dessa forma, observou-se que as profundidades de assentamento foram aproximadamente 1650 m e 3200 m.

Conclusões

Por meio deste trabalho, notou-se que os resultados obtidos pelas implementações feitas em Python se assemelham com aqueles retirados da literatura, e que tais implementações além de gerar uma estimativa para os valores de geopressões também dispõe de gráficos para auxiliar na determinação da profundidade das sapatas de revestimento do poço. É sabido que alguns resultados podem diferenciar um pouco da realidade, já que alguns parâmetros utilizados nas estimativas são baseados em aproximações, como por exemplo os valores de K; o gradiente de poros normal, o qual seu limite de variação depende do ponto de vista de cada autor; e os dados da curva de compactação normal, que também são definidos por aproximação. Por fim, conclui-se que um poço com essas formações e características possuindo 4500 metros precisará assentar duas sapatas de revestimento nas respectivas profundidades para assim obter uma perfuração segura.

Figura 3. Critério baseado na Janela operacional para definição do assentamento das sapatas.



Fonte: Autor deste trabalho

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus. Ao Laboratório de Computação Científica e Visualização (LCCV) por ceder o espaço para estudos e pesquisa, ao meu orientador Prof.º Dr. João Paulo Lima Santos por todo o auxílio e apoio para a realização deste trabalho e ao meu coorientador e mestrando Jeremias Christian Honorato Costa pelo incentivo, ajuda e dedicação em todos os momentos.

Referências Bibliográficas

- CRUZ, N. V. V.; *Modelagem 3D de Pressão de Poros a partir de Dados de Poços*. 2009. Dissertação (Grau de mestre em Engenharia Civil) – PUC, Rio de Janeiro, 2009.
- DOMINGUES, F. C. P.; *Aplicação de um projeto de perfuração para um poço marítimo*. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Grau de Engenheiro de Petróleo) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2013.
- PEREIRA, B. C. M.; *Proposta de uma metodologia para estimativa de geopressões*. 2007. Dissertação (Grau de mestre em Ciências em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.
- RAHMAN, S. S.; CHILINGARIAN, G. V. *Casing Design Theory and Practice*. Amsterdam: ELSEVIER, 1995.
- REYNA, J. C. L.; *Investigação sobre os Métodos de Previsão de Pressão de Poros em Folhelhos e uma Aplicação de uma Abordagem Probabilística*. 2007. Dissertação (Grau de mestre em Engenharia Civil) – PUC, Rio de Janeiro, 2007.
- ROCHA, L. A. S.; AZEVEDO, C. T. *Projetos de Poços de Petróleo*. 2. Ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2009.
- THOMAS, J. E.. *Fundamentos de Engenharia de Petróleo*. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2004.