

METODOLOGIA PARA DETERMINAR AS PROFUNDIDADES DE ASSENTAMENTO DAS SAPATAS DOS REVESTIMENTOS DE POÇOS DE PETRÓLEO EM ÁGUAS PROFUNDAS

Paul Richard Ramírez Perdomo¹ (PUC-Rio), Celso Kasuyuki Morooka² (UNICAMP), José Ricardo Pelaquim Mendes² (UNICAMP)

¹GTEP 22543-900 – DEC- PUC-Rio de Janeiro, RJ, paul@gtep.civ.puc-rio.com.br

²Caixa Postal 6122 – DEP - FEM - UNICAMP 13083-970 Campinas, SP - Brasil,
morooka@dep.fem.unicamp.com.br

Na etapa de planejamento da perfuração de um poço de petróleo a seleção da profundidade de assentamento da sapata é uma das tarefas mais importantes. As novas descobertas de reservatórios localizados em lâminas d'água profundas trazem consigo mais desafios operacionais e tecnológicos. Neste contexto, é importante conhecer as propriedades das formações a serem perfuradas a fim de fazer a correta seleção da profundidade da sapata. É preciso, por tanto, conhecer as incertezas associadas às ditas propriedades ou variáveis com o intuito de avaliar o risco assumido na seleção da profundidade de assentamento da sapata. Foi empregada a análise quantitativa de riscos para avaliar o risco de assentar a sapata.

A análise quantitativa de riscos permite considerar as incertezas envolvidas nas variáveis de entrada, e apresentar o resultado como uma função de densidade de probabilidade. É importante ressaltar o fato que é necessário o conhecimento especialista para assumir as incertezas nas variáveis de entrada, a fim de ter uma análise de riscos mais próxima da realidade. A técnica de análise quantitativa de riscos avaliou o risco da seleção da profundidade da sapata no caso de poços exploratórios, na qual as incertezas são maiores em comparação aos poços de desenvolvimento. A lâmina d'água faz com que a densidade de sobrecarga seja menor que a correspondente densidade de sobrecarga para poços perfurados em terra. Isto porque a camada d'água é de menor densidade comparada com a densidade dos sedimentos. Sendo a densidade de fratura fortemente dependente da densidade de sobrecarga, a densidade de fratura é menor quanto maior for a lâmina d'água. A lâmina d'água e o comprimento de *kick* são de muita influência nos cálculos das profundidades de assentamento da sapata e no número dos mesmos. Quanto maior o comprimento de *kick*, maior o número de revestimentos a serem descidos. Quanto maior a lâmina d'água, mantendo constante a profundidade final do poço e o comprimento de *kick*, maior o risco envolvido na seleção da profundidade de assentamento da sapata. A simulação de Monte Carlo permite considerar os dados de entrada como informação carregada de incertezas e simular os dados como variáveis pseudo-aleatórias, isto é, uma situação mais realista que simplesmente considerando os dados de entrada como variáveis determinísticas.

Com os resultados obtidos no presente trabalho foi possível avaliar o risco envolvido na seleção da profundidade de assentamento.

Planejamento de Poços, Assentamento da Sapata, Águas Profundas, Perfuração, Análise Quantitativa de Riscos.

1. INTRODUÇÃO

O revestimento tem diferentes funções na perfuração e completação de um poço de petróleo. Ele evita o colapso do poço aberto durante a perfuração e isola hidráulicamente os fluidos do poço das formações perfuradas e dos fluidos das formações. Ele serve de caminho para o escoamento do fluido de perfuração para a superfície, e junto com a *BOP* permite o controle seguro das pressões do poço e de formação. Na etapa de planejamento da perfuração de um poço de petróleo, a seleção da profundidade de assentamento da sapata é uma das tarefas mais importantes. As novas descobertas de reservatórios localizados em lâminas d'água profundas trazem consigo mais desafios tecnológicos e operacionais. O engenheiro de perfuração deve considerar os aspectos geológicos tais como gradiente de pressão de poros e de fratura, problemas de estabilidade do poço, litologia, fluxos da água em profundidade rasa (*shallow water flow*) entre outros, para a correta seleção da profundidade de assentamento da sapata.

Na perfuração de um poço de petróleo, em perfuração sobre-balanceada (*overbalanced drilling*) a densidade equivalente de circulação da lama deve ser maior que a densidade de pressão de poros¹ e menor que a densidade

¹ A fim de evitar o colapso do poço aberto

de fratura². Os métodos atuais empregados para o cálculo da profundidade da sapata são determinísticos, os quais basicamente têm como variáveis para calcular o posicionamento da sapata o gradiente de pressão de poros e de fratura. Os métodos para calcular a profundidade de assentamento da sapata podem ser divididos em duas abordagens: de cima para baixo e de baixo para cima. Recentemente, têm sido incluídas as considerações de controle de poço através do conceito de tolerância ao *kick* e margem de segurança ao *kick*. Quando acontecer um *kick*, a densidade equivalente da coluna dos fluidos deve ser menor ou igual à densidade equivalente de fratura na sapata. O problema se complica quando o poço é perfurado em uma região *offshore*, porque quanto maior a lâmina d'água menor é a densidade equivalente de fratura a uma dada profundidade. Isto faz com que a janela existente entre o gradiente de pressão de poros e de fratura seja menor em comparação com o mesmo poço perfurado em terra (*onshore*). Esta janela pode se estreitar quando se considera que o gradiente de pressão de poros e de fratura têm um comportamento aleatório (incertezas representadas pela sua distribuição de probabilidade) no seu intervalo estatístico a uma dada profundidade.

Os métodos determinísticos para calcular o posicionamento da sapata em águas profundas ignoram o intervalo estatístico de comportamento aleatório das variáveis usadas como dados de entrada (densidade de sobrecarga, tempo de trânsito, coeficiente de Poisson, resistividade, expoente “d” entre outros) para o cálculo das variáveis de saída (densidade de pressão de poros, de fratura, densidade equivalente após o fechamento do poço no momento de detecção de um *kick* e após a sua circulação). Portanto, aqueles métodos determinísticos produzem uma simplificação no cálculo da densidade de pressão de poros, fratura, sobrecarga e densidade equivalente após a detecção do *kick*. Como consequência perde-se a capacidade de avaliar o risco envolvido na seleção da profundidade da sapata, e por sua vez, quantificar as incertezas nas previsões das densidades de poros, fratura, sobrecarga e densidade equivalente. Finalmente o método determinístico simplesmente adiciona uma quantidade constante à densidade de pressão de poros para obter a densidade da lama.

Na presente metodologia trabalhou-se com lâminas d'água de 400, 700 e 1000 m, tendo em conta o controle do poço no momento após a detecção do *kick*, para poços exploratórios. São assumidas as seguintes suposições para o cálculo da profundidade de assentamento da sapata em águas profundas: a profundidade final do poço é constante, a origem da sobrepressão é devida a um desequilíbrio na taxa de compactação dos sedimentos, a rocha tem um comportamento plástico, os dados de *LOT* são obtidos de argilas ou folhelhos, o *kick* está na fase gasosa, não existem variações laterais bruscas da litologia, o comprimento de *kick* deve ser menor ou igual ao comprimento do poço aberto, o sistema se encontra em equilíbrio estático com a pressão de poros da formação produtora e a massa específica equivalente do fluido de perfuração deve ser menor ou igual à massa específica equivalente de fratura na sapata.

No presente trabalho considerou-se o risco de fraturar a sapata como a probabilidade que a densidade equivalente da coluna hidrostática dos fluidos no anular entre a coluna de perfuração e o diâmetro interno do poço, no momento de fechar o poço após a detecção do *kick*, seja maior que a densidade de fratura numa profundidade determinada. Esta probabilidade corresponde à área de intersecção entre a curva de distribuição da densidade equivalente e a curva de distribuição da densidade de fratura.

Na presente proposta consideraram-se as incertezas das variáveis envolvidas nos cálculos da profundidade de assentamento da sapata em águas profundas, visando avaliar o risco envolvido na seleção daquela profundidade. Além disso, é proposta uma metodologia para avaliar o risco envolvido na determinação da profundidade da sapata em águas profundas.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Segundo Adams (1985) para determinar a profundidade deve-se calcular a densidade da lama necessária para perfurar a profundidade final da fase. Devem ser protegidas as formações que possuem um gradiente de pressão de fratura menor que esse gradiente de pressão da lama, nessa profundidade assenta-se a sapata. Logo depois que tenha sido determinada a profundidade de assentamento, será determinado se o revestimento ficará preso durante a sua descida no poço.

Segundo Adams (1985) a profundidade de assentamento do revestimento de superfície é calculada levando em conta as pressões de *kick* desenvolvidas durante as operações de controle de poço. A densidade equivalente da lama da coluna de fluidos no anular entre a coluna de perfuração e o diâmetro interno do poço gerada durante as operações de controle de *kicks* é a causa da maioria dos influxos subterrâneos. Quando acontecer um *kick*, a pressão de fechamento (*shut-in casing pressure*) adicionada à pressão hidrostática equivalente da lama podem exceder a pressão de fratura da formação na sapata, portanto, induzindo uma fratura. Portanto, o objetivo do procedimento da seleção de profundidade de assentamento do revestimento de superfície será aquele que determina a profundidade da formação que possa suportar as pressões geradas por um volume de *kick* padrão, (mínimo volume de *kick* que uma sonda tem capacidade de detectar e o máximo volume que pode suportar).

² A fim de evitar a perda de circulação, e um consequente *kick* devido ao decremento da pressão da coluna hidrostática.

Segundo Santos et al. (1995) para a seleção da profundidade de assentamento de sapata é importante levar em conta as considerações de controle de poço por meio do conceito de tolerância ao *kick*. Esse conceito torna a perfuração mais segura.

A tolerância ao *kick* pode ser entendida como a capacidade do poço aberto ou formação de suportar as pressões geradas durante as operações de controle de poço (fechamento inicial do poço e posterior circulação do *kick*) sem fraturar a formação. Quando se emprega a tolerância ao *kick* para a seleção da profundidade de assentamento de sapata é importante ter a seguinte informação disponível: (1) a pressão de formação na profundidade final da fase do poço, (2) o máximo volume de *kick* que a sonda é capaz de suportar, e (3) o gradiente de pressão de fratura para a área. Além disso, para calcular a profundidade de assentamento da sapata é preciso conhecer a curva de densidade equivalente de circulação. O processo de cálculo pode ser feito de baixo para cima ou cima para baixo.

O procedimento para selecionar a profundidade de assentamento de sapata usando o conceito de tolerância ao *kick* durante a circulação de *kick* é similar ao usado no caso de fechamento do poço. Desta forma, depois que a profundidade de assentamento é assumida, calcula-se a densidade equivalente máxima a essa profundidade fazendo uso de um simulador (isso acontece quando o topo de *kick* alcança a profundidade de assentamento assumida). Adiciona-se um valor de 59,9 kg/m³ (0,5 lbm/gal) a este valor, se o valor resultante é igual à densidade equivalente de fratura, a profundidade assumida é a profundidade mais rasa de assentamento de sapata. Se o valor resultante não é igual ao valor da densidade equivalente de fratura, deve ser assumida outra profundidade de assentamento até que exista uma convergência.

No caso da integridade completa do poço proposto por Aadnoy (1997), considera a bolha de gás migrando do fundo do poço até superfície, isto faz com que as pressões desenvolvidas no interior do poço fossem maiores do que as respectivas pressões obtidas quando se circula o *kick* com expansão controlada. Uma solicitação de pressão de fratura maior é obtida a uma profundidade maior (profundidade de assentamento da sapata), por tanto aumentando os comprimentos dos revestimentos.

A integridade completa do poço significa que a sapata, os revestimentos e a cabeça do poço suportam as pressões desenvolvidas durante as operações de controle de poço. Deve-se, portanto sempre considerar as limitações impostas pela densidade da lama quando calcular a profundidade de assentamento da sapata, isto é, que a densidade da lama deve ser maior à densidade de pressão de poros para evitar um fluxo de fluidos da formação para o poço (*kick*). Porém quando leva-se em conta o controle de poço, (controle de *kick*) deve-se empregar a integridade reduzida de poço, para evitar as profundidades de revestimentos excessivas; a integridade reduzida do poço significa que a margem ou tolerância ao *kick* é considerada. Uma condição importante no caso da integridade reduzida do poço é que tem que ser garantido que o ponto fraco se encontra na sapata.

3. METODOLOGIA

No presente trabalho considerou-se o risco de fratura da sapata como a probabilidade que a densidade equivalente da coluna hidrostática de fluidos no anular entre a coluna de perfuração e o diâmetro interno do poço, no momento de fechar o poço após a detecção do *kick*, seja maior que a densidade de fratura numa profundidade determinada.

Descreve-se uma metodologia para o cálculo da profundidade de assentamento da sapata em águas profundas, a qual faz uso da análise quantitativa de riscos e da simulação de Monte Carlo. O método para calcular a profundidade de assentamento é o método de baixo para cima, isto porque ele considera a tolerância ao *kick* como a diferença entre a densidade de fratura e a máxima densidade equivalente da coluna hidrostática de fluidos no momento de fechar o poço quando um *kick* é detectado. Calcular-se-á o risco da densidade equivalente da coluna hidrostática de fluidos no momento de fechar o poço quando for maior que a densidade de fratura. A área comum entre a curva de densidade equivalente e densidade de fratura corresponde ao risco de fraturamento da formação na sapata. Segundo Liang (2002) a área comum ou de intersecção representa o risco da densidade equivalente quando esta for maior que a densidade de fratura.

3.1 Método de baixo para cima

Estabeleça a profundidade do último revestimento, D_v , e os respectivos valores de densidade de pressão de poros, ρ_p , densidade da lama, ρ_m e densidade de *kick*, ρ_k , nesta profundidade.

Estabeleça o valor do volume de *kick*, e, portanto comprimento de *kick*, L_k .

Calcule o valor da densidade equivalente, $\rho_{eq,cs}$, para profundidades decrescentes de revestimentos com a Equação 1. Os valores de densidade de pressão de poros, ρ_p , densidade da lama, ρ_m e densidade de *kick*, ρ_k , são fixos em relação à D_v .

$$\rho_{eq,cs} D_{cs} = \rho_p D_v - \rho_k L_k - \rho_m (D_v - D_{cs} - L_k) \quad (1)$$

Calcule a margem de segurança ao *kick* aplicando a Equação 2 para cada valor de $\rho_{eq,cs}$ obtido.

$$\Delta\rho_{ksm} = \rho_{fract} - \rho_{eq,cs} \quad (2)$$

O revestimento anterior será descido onde a margem de segurança ao *kick* alcança um valor estabelecido, sendo zero neste caso.

São os seguintes os parâmetros estatísticos necessários para o calculo do risco envolvido no cálculo da profundidade de assentamento da sapata: valor médio e desvio padrão.

Para calcular o risco quando a densidade equivalente da coluna hidrostática dos fluidos no anular entre a coluna de perfuração e o diâmetro interno do poço for maior que a densidade de fratura, ou o risco de fraturar da sapata, R_F , deve-se calcular as médias e os desvios padrões da densidade equivalente, μ_{de} e σ_{de} , e da densidade de fratura, μ_f e σ_f , respectivamente.

Para dados de densidade equivalente e de fratura normalmente distribuídos, a margem entre as duas funções de densidade de probabilidade (*probability density function, PDF*), Equação 3, é também uma distribuição normal, a qual tem uma margem média de:

$$\mu_{fde} = \mu_f - \mu_{de} \quad (3)$$

onde:

μ_{fde} : valor médio da margem de segurança entre a densidade equivalente e a densidade de fratura

O desvio padrão desta margem de segurança é dado pela Equação 4:

$$\sigma_{fde} = \sqrt{\sigma_f^2 + \sigma_{de}^2} \quad (4)$$

onde:

σ_{fde} : desvio padrão da margem de segurança entre a densidade equivalente e a densidade de fratura.

O risco de fraturar a sapata, R_F , pode ser calculado pela Equação 5:

$$R_F = 1 - \Phi\left(\frac{\mu_{fde}}{\sigma_{fde}}\right) \quad (5)$$

onde:

Φ : distribuição de probabilidade normal padrão.

A distribuição de probabilidade normal padrão, Φ , tem uma distribuição gaussiana com média, $\mu = 0$ e desvio padrão, $\sigma = 1$.

3.2 Cálculo do risco

A Figura 1 apresenta o diagrama de fluxo para o cálculo do risco de assentamento de sapata

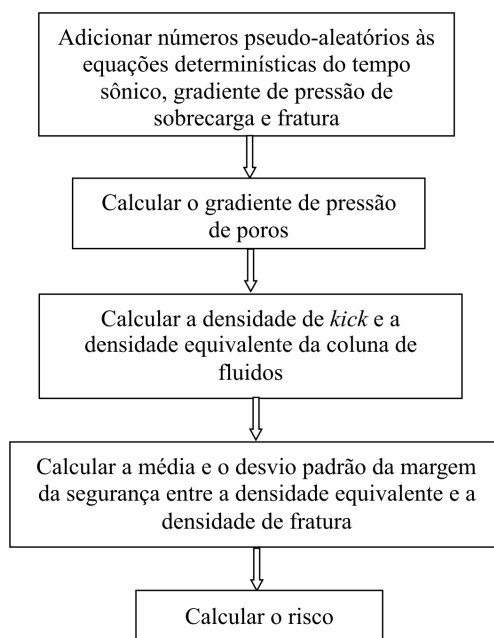


Figura 1. Cálculo do risco

4. RESULTADOS

Na Tabela 1 se apresentam as incertezas nos parâmetros envolvidos no cálculo de assentamento da sapata (Perdomo, 2003).

Tabela 1. Incertezas nos parâmetros.

Propriedade	Parâmetro	Média	Desvio padrão
Pressão de sobrecarga	Densidade d'água do mar	1018,3 kg/m ³	21,92 kg/m ³
	Densidade dos grãos	2594,6 kg/m ³	21,92 kg/m ³
	Densidade dos fluidos dos poros	1018,8 kg/m ³	21,92 kg/m ³
	Porosidade de superfície	0,41	0,0095
	Declínio da porosidade	$2,59 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$	$5,442 \times 10^{-7} \text{ m}^{-1}$
Pressão de fratura	Densidade d'água do mar	1018,3 kg/m ³	21,92 kg/m ³
	Densidade dos grãos	2594,6 kg/m ³	21,92 kg/m ³
	Densidade dos fluidos dos poros	1018,8 kg/m ³	21,92 kg/m ³
	Pseudo-porosidade de superfície	0,67	0,0095
	Pseudodeclínio da porosidade	$24,79 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$	$5,442 \times 10^{-7} \text{ m}^{-1}$
PP normal	Densidade	1025,21 kg/m ³	21,92 kg/m ³
Registro sônico	Tempo de trânsito normal	3,39 μsec	0,5 μsec
Registro sônico	Tempo de trânsito na região anormal	$5,49 \times 10^{-3} \mu\text{sec}$	0,152 $\mu\text{sec/m}$
Pressão de poros a D_v	Densidade de pressão de poros na profundidade final da fase	1545,88 kg/m ³	21,92 kg/m ³
Pressão de fratura	Densidade de fratura	Varia com a profundidade	10,37 kg/m ³
Pressão da lama a D_v	Densidade da lama na profundidade final da fase	1567,77 kg/m ³	21,92 kg/m ³

<i>Kick</i>	Comprimento de <i>kick</i>	Variável	0,305 m
Gravidade específica	Gravidade específica de <i>kick</i>	0,65	0,01

Calcularam-se os riscos para lâminas d'água de 1000, 700 e 400 m. Por exemplo, para a lâmina d'água de 1000 m a profundidade de assentamento foi de 2930 m com um risco associado de 0,3. O critério a ser adotado para os exemplos a seguir é o risco assumido como sendo 30% (0,3). Foram obtidas as seguintes curvas do risco de fraturamento da sapata, onde Deq é a densidade equivalente e DF é a densidade de fratura ($Deq > DF$) envolvida na seleção da profundidade de assentamento da sapata para uma lâmina d'água de 1000 m para as quatro fases com um risco de 0,3; Figura 2:

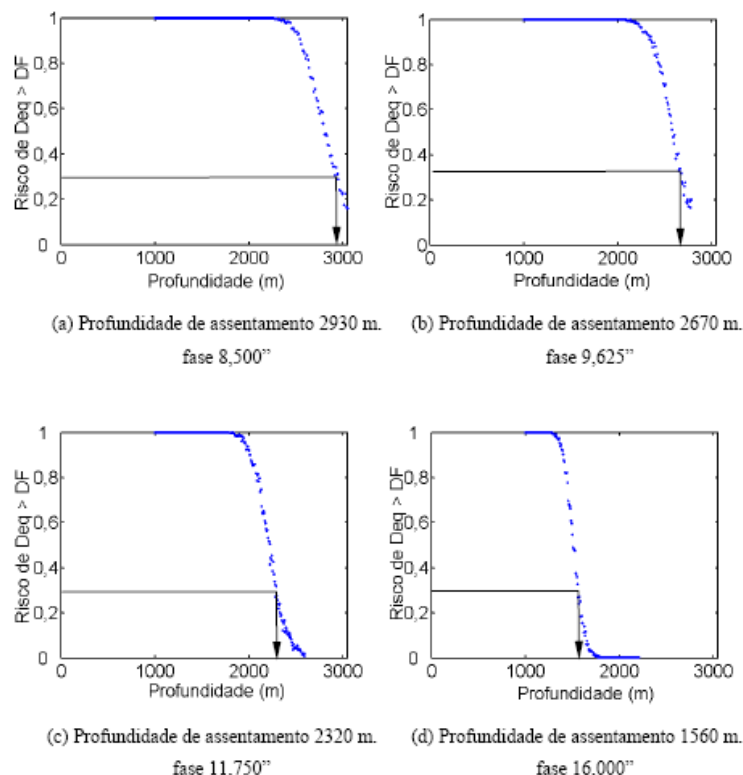


Figura 2. Profundidades de assentamento para uma lâmina da água de 1000 m e um comprimento do *kick* de 213 m.

A Tabela 2 contém as profundidades de assentamento obtidas para uma lâmina d'água de 1000, 700 e 400 m, uma profundidade vertical de 3050 m e um comprimento de *kick* de 213 m. Foi assumida para todos os casos uma profundidade constante, 1200 m do revestimento de superfície (DR é o diâmetro do revestimento).

Tabela 2. Profundidades de assentamento para lâminas de água de 1000, 700 e 400m e um comprimento do *kick* de 213 m.

DR (pol)	Dv (1000m)	Dv (700m)	Dv (400m)
8,500	2930		
9,625	2670	2840	2830
11,750	2320	2580	1680
16,000	1560	2180	1200
20,000	1200	1200	

A Figura 3 apresenta as profundidades de assentamento das sapatas para lâminas d'água de (a) 1000, (b) 700 e (c) 400 m. e um comprimento do *kick* de 213 m., como também as profundidades de assentamento da sapata para uma lâmina d'água de 1000 e comprimentos de *kick* de 213, 183 e 128m.

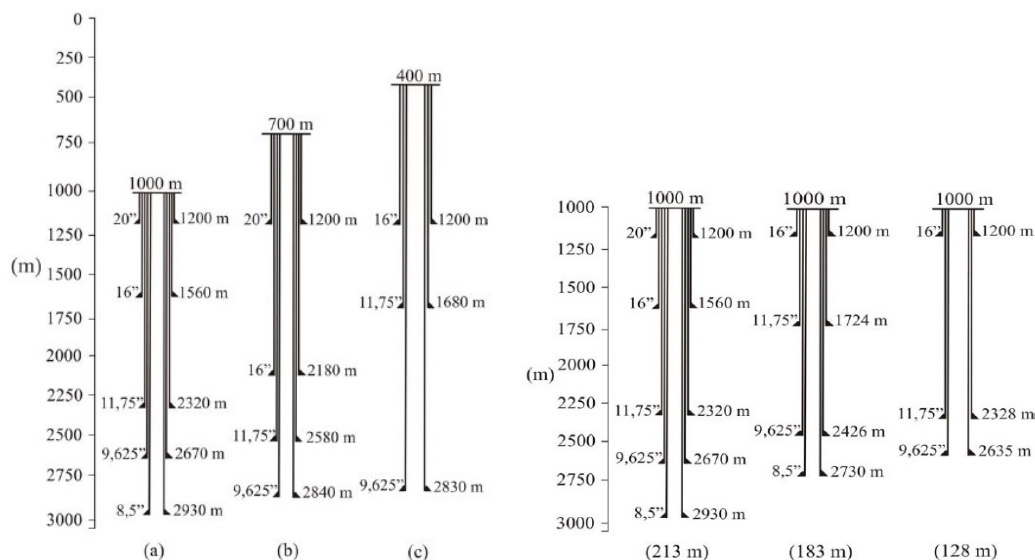


Figura 3. Profundidade de assentamento para lâminas de água de 1000, 700 e 400 m e comprimento do *kick* de 213 m, e profundidades de assentamento para lâmina da água de 1000 m e comprimentos de *kick* de 213, 183 e 128 m.

A Tabela 3 mostra as profundidades de assentamento para uma lâmina d'água de 1000 m, um comprimento de *kick* de 213, 183 e 128 m e uma fase final do poço de 3050 m.

Tabela 3. Profundidades de assentamento para uma lâmina d'água de 1000 m, um comprimento de *kick* de 213, 183 e 128 m.

DR (pol)	Dv (213m)	Dv (183 m)	Dv (128m)
8,500	2930	2730	
9,625	2670	2426	2635
11,750	2320	1724	2328
16,000	1560	1200	1200
20,000	1200		

Como se observa na Figura 3 que mantendo-se a lâmina d'água constante, quanto maior for o comprimento de *kick*, maior o número de revestimentos. Isto se explica pelo fato de que quanto maior o comprimento de *kick*, maior a média da densidade equivalente, portanto, sua função de distribuição estará mais próxima à função de distribuição da densidade de fratura, então uma maior área de intersecção entre as duas funções. Agora quando o comprimento de *kick* e a lâmina d'água são constantes, Figura 1, a curva de risco irá se mover para a esquerda, como acontece quando se observa o comportamento da curva de risco para a Figura 1. Na mesma Figura 1 começa com um risco de 0,14 porque quanto maior a profundidade, menor a janela entre a densidade de pressão de poros e fratura, portanto, a curva de distribuição da densidade equivalente, expressa como desvio padrão, irá se intersectar com a curva de distribuição da densidade de fratura.

Até agora se modificou os valores determinísticos, tais como lâmina d'água e comprimento de *kick*. Agora vamos modificar os desvios padrões para conhecer o comportamento da curva de risco. Manteve-se constante a lâmina d'água, 1000 m e um comprimento de *kick* de 213 m, variaram-se os desvios padrões da densidade de pressão de poros, fratura, lama, comprimento de *kick* e gravidade específica. Segundo Adams et al. (1993) pode ser assumida uma covariância de entre 0,01 até 0,05 para poços exploratórios. Neste caso foi assumido um valor de 0,01 para uma situação otimista e de 0,05 para uma situação pessimista; quanto maior a covariância, maior a dispersão dos dados. Por exemplo, para o cálculo do desvio padrão da densidade de pressão de poros:

A densidade de pressão de poros na profundidade final de 3050 m é de 1423,4 kg/m³, então o desvio padrão otimista, σ_o , para a densidade de pressão de poros é:

$$\frac{\sigma_o}{1423} = 0,01 \quad \therefore \quad \sigma_o = 14,23 \text{ kg/m}^3$$

e o desvio padrão pessimista, σ_p , para a densidade de pressão de poros é:

$$\frac{\sigma_p}{1423,4} = 0,05 \quad \therefore \quad \sigma_o = 71,17 \text{ kg/m}^3$$

O mesmo procedimento é feito para os desvios padrões da densidade de fratura e densidade da lama, comprimento de *kick* e gravidade específica. A Tabela 4 apresenta os dados:

Tabela 4 Dados para uma lâmina d'água de 1000 m um comprimento de *kick* de 213 m e diferentes cenários.

Desvio Padrão	Caso 1 Real	Caso 2 Otimista	Caso 3 Pessimista
Densidade de poro, kg/m^3	21,920	14,230	71,170
Densidade de fratura, kg/m^3	21,920	17,390	89,950
Densidade da lama, kg/m^3	21,920	15,690	78,470
Comprimento de <i>kick</i> , m	3,000	2,130	10,670
Gravidade específica	0,027	0,0065	0,0325

A Figura 4 apresenta o risco para cada caso, representando só a fase final do poço.

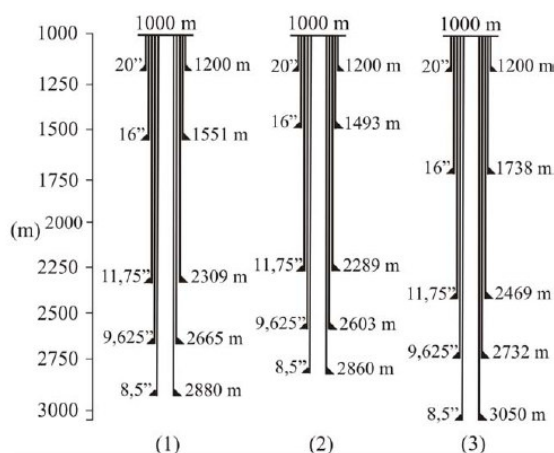


Figura 4. Profundidades de assentamento para lâmina da água de 1000 m. comprimento de *kick* de 213 m para (1) caso real, (2) caso otimista e (3) caso pessimista.

Como se esperava, pode-se observar que quanto maior o desvio padrão, maior a dispersão dos pontos, e menor a inclinação da curva de risco. Como consequência, a determinação do risco para uma determinada profundidade é difícil de estabelecer com precisão. Se a inclinação for menor, então se faz necessário descer a profundidade do revestimento para alcançar um risco determinado.

Como se observa na Figura 5(a) o risco começa a descer desde 1,0 a 2137 m, quando na figura 5(b) começa a 2439 m. Agora vamos representar o comportamento do risco em função da lâmina d'água de 400 m, 700 m e 1000 m. Neste caso manteve-se constante a profundidade final da fase (3050 m) e o comprimento de *kick* (213 m), e variou-se a espessura da lâmina d'água. Na Figura 6 podemos observar, mantendo constante a profundidade final da fase, quanto maior a lâmina d'água, maior o risco; em outras palavras, mantendo a espessura da lâmina d'água constante, quanto maior a profundidade da fase, maior o risco. Isto é explicado pelo fato que quanto maior a lâmina d'água, a janela entre a densidade de pressão de poros e densidade de fratura é menor. Portanto, fazendo a densidade equivalente da lama fique ainda mais perto da densidade de fratura.

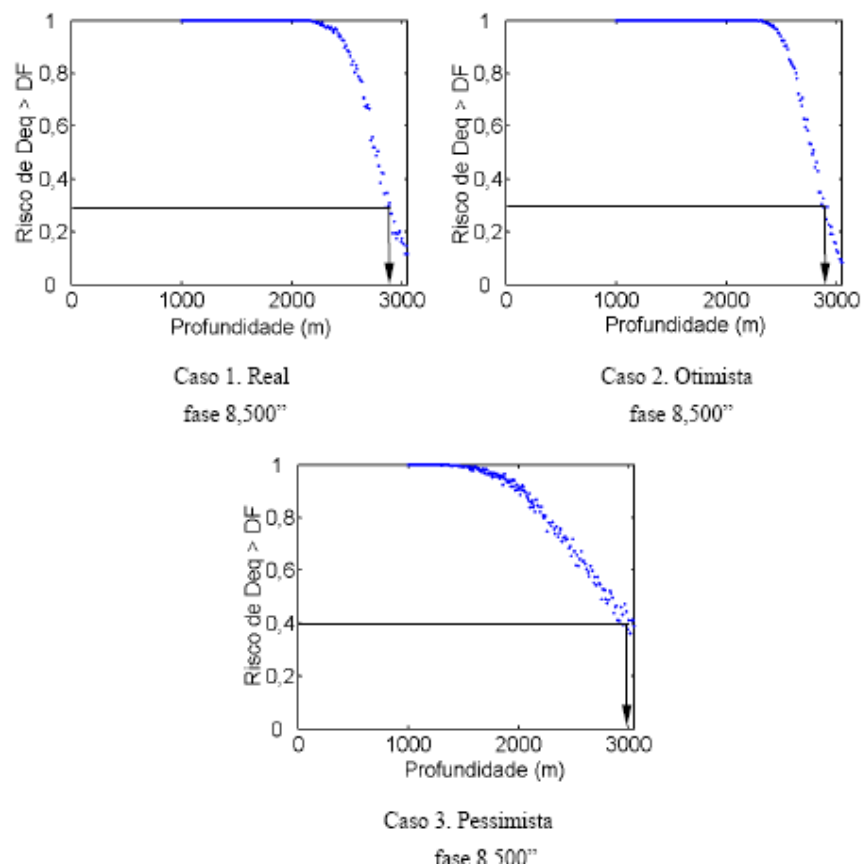


Figura 5. Profundidades assentamento para lâmina da água de 1000 m, comprimentos de kick de 213 m para diferentes cenários.

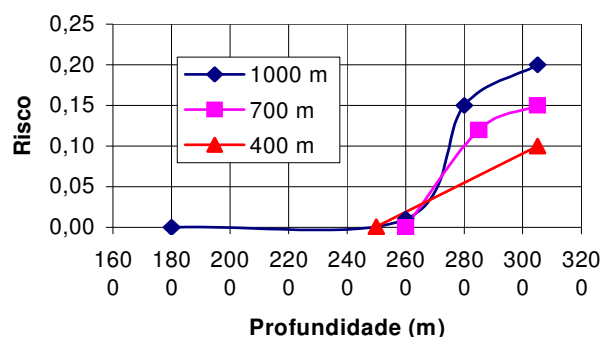


Figura 6. Risco vs Profundidade final para lâminas d'água de 1000, 700 e 400 m e um comprimento do *kick* de 213m.

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho representa uma iniciativa para calcular o risco envolvido na determinação da profundidade de assentamento da sapata em águas profundas.

A análise quantitativa de riscos permite considerar as incertezas envolvidas nas variáveis de entrada, e apresentar o resultado como uma função de densidade de probabilidade.

É importante ressaltar o fato que é necessário o conhecimento especialista para assumir as incertezas nas variáveis de entrada, a fim de ter uma análise de riscos mais próxima da realidade.

A técnica de análise quantitativa de riscos avaliou o risco da seleção da profundidade da sapata no caso de poços exploratórios, na qual as incertezas são maiores em comparação aos poços de desenvolvimento.

A lâmina d'água faz com que a densidade de sobrecarga seja menor que a correspondente densidade de sobrecarga para poços perfurados em terra. Isto porque a camada d'água é de menor densidade comparada com a densidade dos sedimentos. Sendo a densidade de fratura fortemente dependente da densidade de sobrecarga, a densidade de fratura é menor quanto maior for a lâmina d'água.

A lâmina d'água e o comprimento de *kick* são de muita influência nos cálculos das profundidades de assentamento da sapata e no número dos mesmos. Quanto maior o comprimento de *kick*, maior o número de revestimentos a serem descidos.

Quanto maior a lâmina d'água, mantendo constante a profundidade final do poço e o comprimento de *kick*, maior o risco envolvido na seleção da profundidade de assentamento da sapata

A simulação de Monte Carlo permite considerar os dados de entrada como informação carregada de incertezas e simular os dados como variáveis pseudo-aleatórias, isto é, uma situação mais realista que simplesmente considerando os dados de entrada como variáveis determinísticas.

6. AGRADECIMENTOS

O autor gostaria de agradecer à CAPES pelo apoio financeiro para o desenvolvimento da tese de mestrado na UNICAMP, ao Prof. Dr. Celso K. Morooka e ao Prof. Dr. José Ricardo P. Mendes pela orientação. Ao Prof. Dr. Sérgio Fontoura e à ANP pelo apoio financeiro para a publicação deste artigo.

7. REFERÊNCIAS

- AADNOY, B. Modern Well Design. Houston: Gulf Publishing, 1997. 238p.
- ADAMS, N. Drilling Engineering: A Complete Well Planning Approach. Tulsa: Penn Well Publishing, 1985. 960p.
- ADASANI, I.; AZAR, J.J.; ESCORIHUELA, F.; SANTOS, O. Determination of casing setting depth using kick tolerance concept. In: Petroleum Computer Conference **Society of Petroleum Engineers**. Tulsa, June 1995.
- LIANG, Q. Application of quantitative risk analysis to pore pressure and fracture gradient prediction. In: SPE Annual Technical Conference and Exhibition. **Society of Petroleum Engineers**. Texas, May 2002.
- PERDOMO, P. Metodologia para determinar a profundidade de assentamento das sapatas dos revestimentos de poços de petróleo em águas profundas. Out. 2003. 120p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Petróleo). Orientador: Morooka, C.K. Dpto. de Engenharia de Petróleo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

METHODOLOGY FOR DETERMINING THE CASING SETTING DEPTH OF PETROLEUM WELLS IN DEEP WATERS

One of the most important steps in the well drilling planning stage is the casing setting depth. More operational and technological challenges come associated with the news discoveries of petroleum reservoirs located in deep water. In this scenario, it is important to know the formation properties in order to make the best casing setting depth. However, it is important to know the uncertainties linked to these properties or variables and quantify them, so the risk can be evaluated in the selection of the casing setting depth. It was used the quantitative risk analysis to assess the risk.

The quantitative risk analysis allows to consider the uncertainty involved in the input variables, and yield the output as a probability density function. It is necessary to have the knowledge of the expert to know the uncertainty of the variables. The quantitative risk analysis assessed the risk of setting casing shoe in exploratory wells, where there are more uncertainty. The deeper the water depth, the lesser the overburden pressure gradient and the lesser the fracture pressure gradient, because the water sea is lighter than sediments. The water depth and the kick length are very important in the casing setting depth; the deeper the water depth and the kick length, the greater the risk in the casing point selection. The Monte Carlo simulation allows to consider the uncertainties involved in the input data, so it more realistic than the deterministic approach.

In the present work it was possible to calculate the risk involved in that selection.

Well Planning, Casing Setting Depth, Deep Water, Drilling, Quantitative Risk Analysis.

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste artigo.