



ESTUDO DA PERFURAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO UTILIZANDO A TÉCNICA PRESSURIZED MUD CAP DRILLING: SIMULAÇÃO E EXPERIMENTOS

L. B. ROMUALDO¹, L. M. ARAUJO¹, M. A. D. CARVALHO¹, G. F. M. OLIVEIRA¹ e M. P. VEGA¹

¹ Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia Química,
Departamento de Engenharia Química
E-mail para contato: vega@ufrj.br

RESUMO – A técnica *Pressurized Mud Cap Drilling* (PMCD) tem sido muito utilizada na perfuração de poços altamente fraturados, visto que esta técnica apresenta um controle preciso frente a extremas perdas de circulação e *kicks*, em comparação com as técnicas convencionais. O PMCD se dá por meio da injeção de um fluido viscoso na região anular e um fluido de sacrifício na coluna de perfuração. Esta operação não possui retorno para a superfície, o que possibilitou a perfuração de poços antes inviáveis. As principais etapas do PMCD, em um poço que sofreu um *kick* de gás, consistem, em linhas gerais, na migração de gás com o poço fechado e posterior indução deste fluido invasor para a formação rochosa através da etapa chamada de *Bullheading*. O *Bullheading* consiste na injeção de um fluido em contracorrente, para forçar o retorno do gás invasor de volta para o reservatório. O presente trabalho tem como objetivo o estudo da operação de *Bullheading* durante o uso da técnica PMCD, apresentando resultados de simulação e validação através de experimentos.

1. INTRODUÇÃO

A fase mais custosa da exploração de petróleo é, geralmente, a perfuração (Vega *et al.*, 2007). Esta etapa necessita de uma operação complexa e robusta para tornar o processo economicamente viável. Para isso, tecnologias precisam ser desenvolvidas constantemente para proporcionar avanços na área, principalmente com a crescente necessidade de se obter petróleo a partir de formações rochosas complexas e desafiadoras (Helgeland, 2014). Os principais avanços nesse quesito foram no conjunto de técnicas MPD (*Managed Pressurized Drilling*), que procura controlar a pressão anular do poço, baseando-se nos limites de segurança estabelecidos para a operação (Setiawan *et al.*, 2013).

O controle da pressão na região do anular é de extrema importância para o sucesso da perfuração dos poços de petróleo, tendo em vista que o desequilíbrio entre as pressões de fundo do poço, de poros e de fratura do reservatório acarretam em diversos tipos de problemas (Waldmann, 2006). Se a pressão anular de fundo for maior que a pressão de fratura, o fluido terá a tendência de migrar para o reservatório, podendo aumentar as fraturas já existentes. Já o inverso, quando a pressão da formação rochosa é maior que a pressão de fundo, os fluidos nativos do reservatório podem invadir o poço. Esse influxo de fluidos é denominado *kick* e pode

ser controlado ou de dano permanente, podendo levar à desativação do poço ou provocar um *blowout* (Nygaard, 2006).

A técnica *Pressurized Mud Cap Drilling* (PMCD) que, como por definição do termo segundo a IADC, é uma variação do *Managed Pressurized Drilling* (MPD), permite perfurar poços altamente fraturados de forma otimizada, e reduz os riscos ao se trabalhar com os problemas ocasionados por essas fraturas (Setiawan *et al*, 2013). A operação pode ser definida como um controle da pressão anular de fundo enquanto o poço sofre perdas de circulação e *kick*, através da injeção de um fluido viscoso na região anular. Este fluido é chamado de lama ou *Ligth Annular Mud* (LAM), e tem o intuito de impedir a migração do influxo invasor e impulsionar o retorno do mesmo para a formação rochosa. Na coluna de perfuração, bombeia-se um fluido de sacrifício (SAC), geralmente água do mar, de forma que este fluido carregue também os cascalhos em direção a formação rochosa (Ghauri, 2014).

O presente trabalho tem como objetivo o estudo sobre a técnica *Pressurized Mud Cap Drilling* (PMCD) na perfuração de poços de petróleo, apresentando resultados experimentais e simulações.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A unidade experimental foi construída no Laboratório de Escoamento de Fluidos Giulio Massarani (LEF) do Departamento de Engenharia Química (DEQ), no Instituto de Tecnologia (IT) da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), em parceria com a Petrobras.

A unidade experimental dispõe de um tanque com sensor de nível, bomba de deslocamento positivo, tanque de pressão, transdutores de pressão (manométricos e diferenciais), medidor de vazão, válvula de controle *choke* e outras válvulas manuais e automáticas. Para simular toda a etapa de perfuração utilizou-se somente água como fluido de perfuração e o *kick* de gás foi simulado utilizando-se ar comprimido. A Figura 1 apresenta o fluxograma da unidade experimental contendo todos estes aparatos citados e a trajetória do fluido no modo convencional MPD (setas azuis), na etapa de *bullheading* (PMCD) (setas vermelhas) e também a trajetória do gás apresentada pelas setas brancas.

A bomba desloca o fluido do tanque de lama em direção a região anular, quando no meio da trajetória o fluido passa por uma válvula gaveta, que tem como objetivo simular a perda de carga fornecida pela broca numa perfuração real. Assim, o caminho do tanque até a válvula gaveta representa a coluna de perfuração e desta válvula até a válvula *choke* caracteriza-se a região anular.

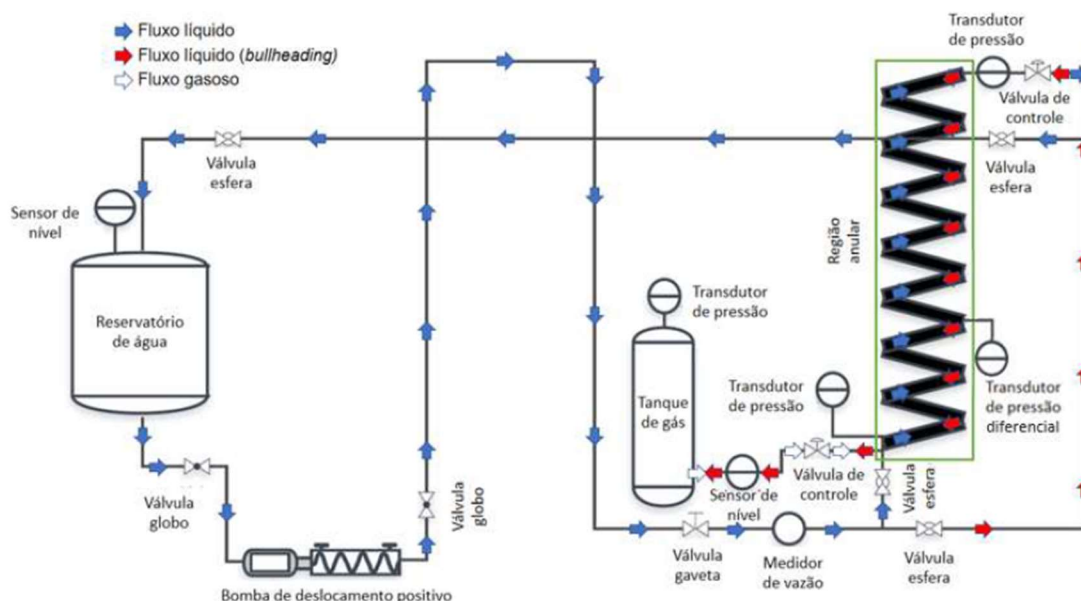
O tanque de pressão simula a formação rochosa, e a conexão deste tanque com a região anular se dá pela válvula de permeabilidade, a qual pode-se escolher a abertura de 0 a 100%, possibilitando a simulação de uma formação rochosa com diferentes permeabilidades. A região anular foi construída de forma helicoidal, com angulação diferente de zero para possibilitar a migração de gás, ou seja, evitar que as bolhas ao ascenderem ficassem presas em certas regiões. A unidade experimental representa um poço de 270 metros de profundidade.

A modelagem da operação PMCD foi feita baseada no estudo realizado por Ghauri (2014). O modelo utilizado foi o DFM (*Drift flux model*), que consiste em um modelo bifásico



formado pela combinação da equação de conservação de momento da mistura e pelas equações de conservação de massa do gás e do líquido, apresentadas na Equação 1-3, respectivamente (Carvalho, 2018).

Figura 1 – Fluxograma da Unidade Experimental.



Conservação de momento da mistura:

$$\partial_t [A(\alpha_l \rho_l v_l + \alpha_g \rho_g v_g)] + \partial_x [A(\alpha_l \rho_l v_l^2 + \alpha_g \rho_g v_g^2)] + A \partial_x p = -Aq \quad (1)$$

Conservação de massa da fase gasosa:

$$\partial_t [A \alpha_g \rho_g] + \partial_x [A \alpha_g \rho_g v_g] = A \Gamma_g \quad (2)$$

Conservação de massa da fase líquida:

$$\partial_t [A \alpha_l \rho_l] + \partial_x [A \alpha_l \rho_l v_l] = A \Gamma_l \quad (3)$$

Sendo A a área de escoamento em m^2 , α_l , α_g a fração volumétrica de líquido e gás, ρ_l , ρ_g a densidade do líquido e do gás em $\frac{kg}{m^3}$, v_l , v_g a velocidade do líquido e do gás em $\frac{m}{s}$, Γ_l , Γ_g a transferência de massa entre as duas fases em $\frac{kg}{m^3 s}$, p a Pressão em Pa e q representa as forças de atrito e gravitacional em $\frac{kg}{m^2 s^2}$.

O modelo é resolvido pelo método numérico AUSMV (*Advection Upstream Splitting Method*), que consiste em dividir o poço em um conjunto de células, de forma que cada segmento tenha influência nos demais adjacentes. Admite-se então que a célula número 1 representa o fundo do poço e a célula N o topo do poço, deste modo todas as entradas e saídas se dão nestas células, respectivamente (Carvalho, 2018).

O modelo DFM resulta em equações diferenciais parciais (EDPs) e para a sua resolução o método AUSMV define que os fluxos entre as células dependem do tempo. Segundo Courant, Friedrichs e Lewy para garantir a estabilidade de um método numérico, este deve obedecer a uma condição, que ficou conhecida como condição CFL e está apresentada na Equação 4, e esta deve ser sempre menor que 1 (Carvalho, 2018).

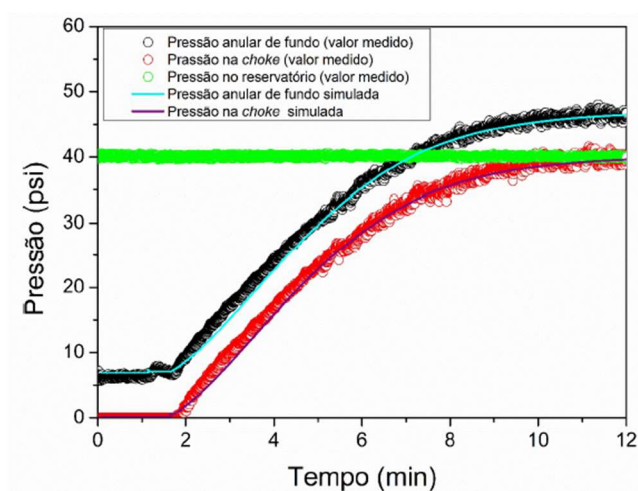
$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{\max(|\lambda_1| |\lambda_2| |\lambda_3|)} \quad (4)$$

3. RESULTADOS

Ghauri (2014) apresenta em seu trabalho estudos da discretização de um poço de 2000 metros de profundidade, mantendo-se satisfeita a condição CFL. Portanto, baseado em seus estudos, nas simulações deste trabalho, o poço foi discretizado em 50 células e fixou-se o intervalo de tempo $\Delta t = 0,0005$ segundos.

Primeiro, realizou-se simulações de injeção de gás para análise do comportamento da pressão anular de fundo e da pressão na *choke*, frente a migração do gás, e validou-se tais simulações a partir de testes experimentais. Os experimentos foram realizados com o índice de abertura da válvula de permeabilidade em 23% e a pressão do tanque do reservatório controlada em 20 psi, 30 psi, 40 psi, 50 psi, 60 psi, 70 psi, 80 psi e 90 psi, por meio de um controlador feedback PI. Na Figura 2 apresenta-se um resultado típico desta etapa de migração.

Figura 2 - Teste típico para a simulação da etapa de migração.



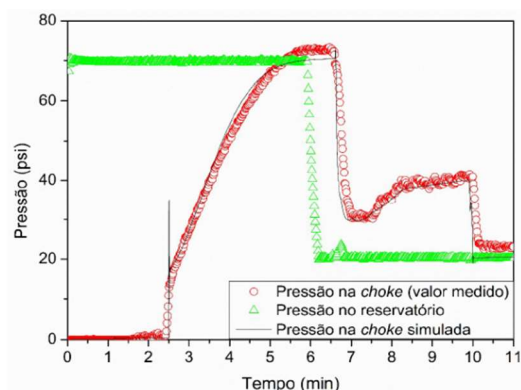
No experimento apresentado na Figura 2, o poço encontra-se aberto e preenchido por água e em 1,15 minuto sofre uma perturbação, um *kick* de gás, e em 1,65 minuto o poço é fechado. Verifica-se então que a migração de gás após o poço fechado provoca um aumento significativo tanto na pressão na *choke* quanto na pressão anular de fundo. Além disso, observa-se que as pressões chegam em um estado estacionário quando a pressão anular se iguala a pressão do reservatório.

Com o intuito de entender melhor o comportamento da pressão na *choke* durante toda a operação PMCD, realizou-se simulações com injeção e migração de gás e posterior controle



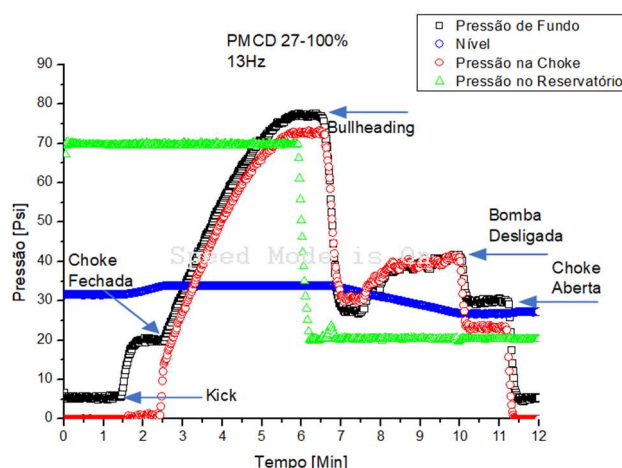
de *kick* através da operação de *Bullheading*. Um resultado típico pode ser observado na Figura 3, na qual o distúrbio *kick* de gás foi implementado em 1,15 min, seguido do fechamento do poço em 2,5 min. O *Bullheading* se iniciou no minuto 6,6, e terminando no minuto 10, com frequência da bomba mantida em 13 Hz.

Figura 3 - Validação da simulação da pressão na superfície durante a técnica PMCD.



Em seguida, realizou-se testes simulando toda a operação de PMCD. Os experimentos da operação *Bullheading* foram realizados com injeção de gás, por meio da válvula de permeabilidade, com índice de abertura em 27% e o tanque reservatório pressurizado em 60 psi, 70 psi ou 80 psi. A implementação do *Bullheading*, utilizou a frequência da bomba em 13 Hz, 15 Hz, 17 Hz ou 20 Hz. A Figura 4 apresenta um típico resultado para um teste experimental da técnica PMCD empregando o tanque reservatório pressurizado em 70 psi.

Figura 4 - Simulação experimental do PMCD.



Observa-se na Figura 4 que no instante 1,5 min ocorre o *kick* de gás, em seguida a migração deste ao longo do anular. Quando atinge certa estabilidade, cerca de 7 minutos, inicia-se a etapa de *Bullheading* com frequência da bomba mantida em 13 Hz, evidenciando uma queda brusca na pressão anular gerada pela expulsão do gás. Entretanto, conforme o anular começa a ser preenchido por líquido novamente, as perdas por atrito aumentam, logo a pressão de fundo sofre um pequeno aumento. Em 10 minutos termina-se o *Bullheading*, desligando-se



a bomba e em 11 minutos abre-se a *choke*, ou seja, o poço é aberto e verifica-se que não há mais gás na unidade devido à queda da pressão após a abertura. Se houvesse a presença de gás na unidade, a pressão aumentaria após a abertura da *choke*.

4. CONCLUSÃO

O modelo matemático bifásico desenvolvido conseguiu representar satisfatoriamente toda a operação de *Bullheading*, apresentando um erro dentro da faixa de $\pm 10\%$ para a maioria dos valores simulados. As simulações e experimentos conseguiram representar desde o fechamento do poço, após a identificação do *kick* de gás, a sua posterior migração e seu controle via injeção de fluido em contra fluxo. Através dos dados gerados, foi possível validar o comportamento da pressão de fundo e na *choke*.

5. REFERÊNCIAS

- CARVALHO, M. A. D., Estudos Experimentais, de Simulação e de Controle na Perfuração de poços de petróleo utilizando a técnica Pressurized Mud Cap Drilling. *Dissertação de Mestrado Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química/ UFRRJ*. Seropédica, 2018.
- COHEN, G.H.; COON, G.A. (1953). Theoretical considerations of retarded control. *A.S.M.E.*, p. 827-834.
- GHAURI, A. A. (2014). Use of the AUSMV scheme for simulation of gas migration, bullheading and Pressurized Mud Cap Drilling, *Master's dissertation*.
- HELGELAND, L.R. (2014). Drilling of Deep-set Carbonates Using Pressurized Mud Cap Drilling. *Master's dissertation*.
- NYGAARD, G., NAEVDAL, G., Nonlinear model predictive control scheme for stabilizing annulus pressure during oil well drilling. *Journal of Process Control*, 16, 719-732, 2006.
- SETIAWAN, B. O., BIN S., BIN, M., FADZLI, N., WUEST, T., (2013). Managed Pressure Drilling with Solids-Free Drilling Fluid Provides Cost-Effective Drilling Solution for Subsea Carbonate Gas Development Wells. IADC/SPE Managed Pressure Drilling and Underbalanced Operations Conference and Exhibition. *Society of Petroleum Engineers, IADC/SPE 164573*.
- VEGA, M.P., MANCINI, M.C., SCHEID, C.M., CALÇADA, L.A., MARTINS, A.L. "Fundamentos de Controle Aplicados à Hidráulica de Perfuração" – *ENAHPE*, 2007.
- WALDMANN, A.; ANDRADE, A.R.; MARTINS A.L.; LOMBA, R.F.T.; ARAGÃO, A.F.L, Sobre os mecanismos responsáveis por minimizar a invasão do fluido de perfuração na rocha reservatório, *ENAHPE*, Pedra Azul, 2006.
- ZIEGLER, J. G. NICHOLS, N. B. Optimum Settings for Automatic Controllers. *A.S.M.E.* V. 64, p. 759-768, 1942.