

Análise experimental de efeitos térmicos na estabilização da pressão

Experimental analysis of thermal effects on pressure stabilization

RESUMO

Alexandre Yuji Imano
imano.cernn@gmail.com
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil

Cezar Otaviano Ribeiro Negrão
negrao@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil

Recebido: 04 set. 2020.

Aprovado: 01 out. 2020.

Direito autoral: Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

A fim de garantir a segurança durante as operações de perfuração de poços para exploração de petróleo, testes de estanqueidade dos equipamentos são constantemente realizados. Para isso, pressurizam-se os equipamentos através do bombeio de fluido pelas linhas conectoras e monitora-se a pressão com o fluido confinado. Se a pressão permanece estável o teste é aprovado. Efeitos térmicos e reológicos podem fazer com que a pressão se altere indicando um falso vazamento. O presente trabalho analisa experimentalmente os efeitos térmicos durante a circulação e confinamento do fluido. O monitoramento da temperatura ao longo da direção radial permitiu a observação dos efeitos da dissipação viscosa. Enquanto os testes com fluido confinado mostraram que um incremento de temperatura de 1°C proporciona um aumento de pressão de aproximadamente 4,5 bar. Os estudos realizados revelam a forte dependência dos efeitos térmicos na estabilização de pressão e mostram que a circulação de fluido favorece a formação de um sistema termicamente não homogêneo. Destaca-se assim a necessidade de dar mais atenção à relação entre pressão e temperatura durante testes de estanqueidade.

PALAVRAS-CHAVE: Relação pressão e temperatura. Perfuração de poços. Testes de estanqueidade.

ABSTRACT

In order to ensure the safety during the well drilling operations for oil exploration, equipment tightness tests are constantly carried out. In order to make this, the equipment is pressurized by pumping fluid through the connector lines and the confined fluid pressure is monitored. If pressure remains stable the test is approved. Thermal and rheological effects can cause the pressure to change indicating a false leak. The present work analyzes experimentally the thermal effects during the circulation and confinement of the fluid. The monitoring of the temperature along the radial direction allowed the observation of the effects of viscous dissipation. Meanwhile the tests with confined fluid showed that a temperature increase of 1 ° C provides a pressure increase of approximately 4.5 bar. The studies carried out reveal the strong dependence of thermal effects on pressure stabilization and show that the circulation of fluid favors the formation of a thermally inhomogeneous system. This highlights the need to pay more attention to the relation between pressure and temperature during tightness tests.

KEYWORDS: Pressure and temperature relation. Well Drilling. Tightness tests.

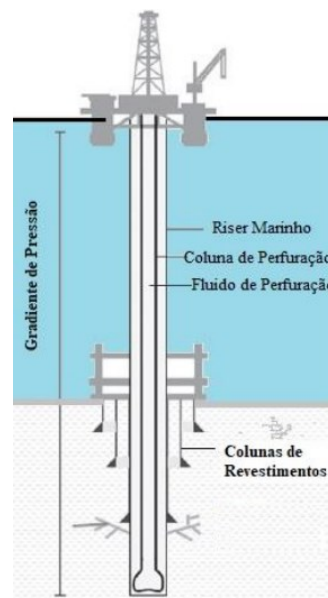


INTRODUÇÃO

O processo de perfuração em ambiente marinho ocorre basicamente através do bombeio fluido por dentro de uma coluna de perfuração. Essa coluna possui uma broca na extremidade, e, a partir de seu movimento rotacional e da injeção de fluido de perfuração, o poço gradativamente vai sendo perfurado. Para não ocorrer a contaminação do mar e garantir sustentabilidade ao processo os cascalhos originados durante a perfuração, bem como o fluido utilizado, devem retornar à superfície da sonda de perfuração para serem tratados, reutilizado/descartados de forma correta. Para este fim, conecta-se o poço com a superfície através de uma outra tubulação concêntrica, de maior diâmetro em relação a coluna, conhecida como riser. O espaço anular formado entre o riser e coluna permite que o fluido retorne a plataforma. A Figura 1 ilustra esquematicamente este processo. Para dar integridade ao poço perfurado colunas de revestimento são inseridas no poço ao longo das fases de perfuração.

Um *blow-out* acontece quando um vazamento de óleo ou gás do reservatório natural adentra o poço ainda na fase de perfuração, causando fluxo descontrolado e trazendo o risco do contato entre gás e oxigênio (Costa e Castro, 2011). A ocorrência de *blow-out* em poços de petróleo causa danos irreversíveis. Para garantir a segurança dos poços, é fundamental a presença do equipamento de segurança denominado BOP (*Blow-Out Preventor*), um conjunto mecânico de válvulas, localizado na cabeça do poço, que é acionado hidráulicamente (Matos, 2017). O BOP se encontra ligado à sonda através da linha de riser e de linhas paralelas, conhecidas por linhas de *kill* ou *choke*.

Figura 1 – Esquema poço de petróleo



Fonte: Alves (2008) (Adaptado).

Para garantir que o dispositivo de segurança esteja funcionando adequadamente, é necessário que ele seja submetido a testes de estanqueidade. Durante esses testes as linhas são pressurizadas utilizando o fluido de perfuração. Dessa forma, evita-se a necessidade da troca de fluido das linhas, otimizando o

tempo da realização do teste. Quando as linhas se encontram pressurizadas, com o fluido confinado monitora-se a pressão de acordo com a norma vigente do teste. Vazamentos são descartados quando há estabilização de pressão nas linhas.

Visando assegurar a confiabilidade do BOP, a periodicidade limite entre dois testes do equipamento é de 21 dias, segundo a API RP 53 (Carbognin, 2017). Como os testes demandam a parada do processo de perfuração eles são contabilizados como tempo não produtivo e ocasionam aumento do custo do processo (Colombo et al, 2019). Um problema relatado por engenheiros é de que a estabilização da pressão demora um tempo maior do que o desejado, prolongando o tempo ocioso do poço. Entretanto, oscilações de pressão em um fluido confinado nem sempre são referentes a vazamentos. Fatores como mudanças reológicas e trocas de calor também podem proporcionar a variação da pressão na linha.

A primeira variável citada é a reologia. O fluido de perfuração, possui várias formulações diferentes, cada uma composta de distintas fases contínuas (aquosa, oleofinica, sintética, etc) e aditivos, que as conferem propriedades únicas. Fluidos de perfuração possuem comportamento não-newtoniano, ou seja, sua viscosidade é função da taxa de cisalhamento. O fato de não possuir viscosidade constante é desfavorável a uma rápida estabilização de pressão durante os testes (Knesebeck et al, 2019), (Oliveira et al, 2015).

A segunda variável, que consiste em trocas térmicas, é o alvo da discussão do presente trabalho. Podemos dividir os fenômenos térmicos que ocorrem em testes de BOP em duas partes. A primeira é durante a circulação inicial do fluido pela linha. A segunda, durante o confinamento do fluido, quando os dados de pressão serão analisados.

Durante o escoamento ao longo da tubulação, o cisalhamento entre fluido e parede resulta em geração de calor no sistema. Isso caracteriza o fenômeno conhecido por dissipação viscosa, no qual o fluido dissipa parte da energia mecânica da sua velocidade em energia térmica na forma de calor (Da Silva, 1977). Logo, a região da parede tende a ser mais quente em instantes iniciais, e o calor gerado tende a ser convecionado para o centro. Isso contribui para um perfil radial de temperatura não homogêneo. Essa variável, porém, é muitas vezes desconsiderada por ser de baixa magnitude (Khan e May, 2016).

Em um ambiente marinho, com o decréscimo da temperatura em direção ao fundo do mar, o gradiente de temperatura entre a água do mar e a tubulação por onde escoar o fluido de perfuração, faz com que calor seja extraído do fluido ainda durante o escoamento. Assim, a tendência é obter um perfil radial mais quente no centro. (INCROPERA, 2011).

Para a situação de confinamento o efeito térmico presente no sistema é causado pela diferença de temperatura entre a superfície, a aproximadamente 25°C, e o leito marinho, que se encontra próximo de 4°C (Khan e May, 2016), induzindo maior perda de calor do fluido para o ambiente.

De toda forma, o efeito térmico na mudança de pressão é pouco discutido em testes de BOP. Entretanto, um coeficiente de expansão térmica (Ellis et al, 2002) rege que para toda mudança de temperatura haverá uma mudança de volume, e, quando em um fluido confinado, isso acarreta em mudanças de pressão.

Alguns resultados experimentais para análise de efeitos térmicos são vistos em casos de APB (*Annular Pressure Build-up*)(Peliano, 2017)(Azzola et al, 2007), onde a expansão térmica do fluido pode causar dano às tubulações ou ao revestimento (Oudeman e Kerem, 2006) devido ao incremento de pressão.

Dessa maneira, utilizando um sistema experimental construído no CERNN (Centro de Pesquisas em Reologia e Fluidos não-Newtonianos), projetado inicialmente para avaliar os processos de reinício e transmissão de pressão, (Mitishita, 2015), o presente artigo visa analisar experimentalmente as variáveis térmicas durante testes de estanqueidade, suprimindo a falta dessa aplicação na literatura.

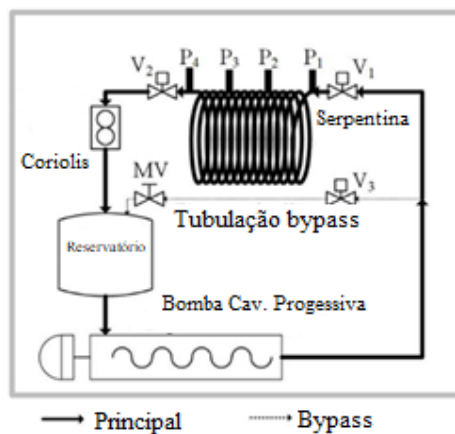
MATERIAL E MÉTODOS

APARATO EXPERIMENTAL

A unidade experimental, mostrada na Figura 2, é composta por um reservatório de fluido, uma bomba helicoidal de cavidade progressiva e duas linhas de circulação (principal e bypass). A primeira linha conta com uma tubulação helicoidal (serpentina), de aproximadamente 50 metros. Em sua entrada e saída, encontram-se, respectivamente, V1 e V2, válvulas eletropneumáticas que regulam o escoamento na linha. Para a realização das medidas de pressão 4 transdutores são acoplados ao longo da serpentina. Adjacentes as tomadas de pressão, visando a medição de temperatura, termopares do tipo T podem ser acoplados por meio de conexões roscadas à serpentina. Posterior a serpentina, com o objetivo de mensurar a vazão, encontra-se um medidor do tipo Coriolis. A segunda linha consiste em uma tubulação que retorna diretamente para o reservatório, possui uma válvula eletropneumática (V3) e uma válvula manual que permite o estrangulamento gradativo do escoamento.

Para controle de temperatura do ambiente, todo o esquema hidráulico permanece no interior de uma câmara isolada. O controle é então realizado por um sistema tipo PID, uma unidade consensadora e resistores elétricos, que atuam com base nas leituras das temperaturas medidas por 8 termopares adesivos.

Figura 2 – Esquema da unidade experimental



Fonte: Mitishita (2018) (adaptado).

FLUIDO EMPREGADO

Para realização dos testes foi elaborado um fluido de perfuração com base aquosa (FAA). O fluido foi formulado através da mistura de 55L de água; 25kg de calcário; 493,52g de goma xantana; 171,4g de antiespumante e 165g de bactericida (glutaraldeído). O FAA pode ser considerado uma base simplificada se comparado aos fluidos empregados nas operações de campo, porém representa de forma satisfatória as principais características não newtonianas. Testes reológicos realizados no Multilab LabReo-CERNN/UTFPR comprovaram estas características.

METODOLOGIA

Para analisar os fenômenos presentes em um teste de estanqueidade, os experimentos possuem o objetivo de verificar um sistema termicamente não homogêneo durante o escoamento, além da relação entre temperatura e pressão no fluido de perfuração confinado. Os testes foram feitos em duplicata, com o intuito de assegurar a repetibilidade dos dados.

Diferença de Temperatura Radial

Inicialmente, será investigada a existência do sistema termicamente não homogêneo durante o escoamento. Para essa finalidade, serão utilizados dois termopares tipo T que medem temperatura em diferentes posições radiais. Posicionados no final da serpentina por meio de uma conexão roscada (a 50 metros do início da linha helicoidal).

Um termopar, chamado de TR, possui a finalidade de medir a temperatura do centro da tubulação. Já o outro, conhecido por TW, mede a temperatura próximo à parede. As partes dos termopares que permanecem fora da tubulação estão isoladas. Já em TR, o corpo foi isolado com polímeros até a medida do centro da tubulação. Assim acoplados, o teste seguirá o seguinte procedimento:

- a) Estabilização da temperatura externa da unidade em 20°C;
- b) Pré-circulação do fluido por 10 minutos (homogeneidade da mistura);
- c) Desligamento da bomba;
- d) Repouso do sistema até a estabilização da temperatura do termopar dentro da linha;
- e) Iniciada a gravação de dados;
- f) Ligada a bomba em vazão teórica de 1 m³/h;
- g) Circulação por 10 minutos.

Relação PxT Para Fluidos de Perfuração Confinados

O procedimento adotado, visando obter a relação entre pressão e temperatura para o fluido aquoso aditivado (FAA) foi o seguinte:

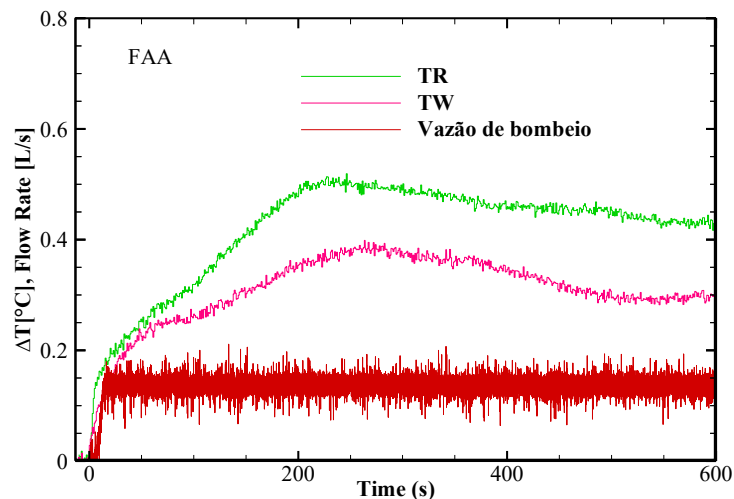
- a) Estabilização da temperatura da câmara em 20°C;
- b) Pré-circulação do fluido por 5 minutos com vazão baixa;
- c) Fechamento de V2 e V1;
- d) Início da aquisição de dados;
- e) Aumento da temperatura da câmara para 26°C;
- f) Estabilização da temperatura da câmara em 26°C.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

DIFERENÇA DE TEMPERATURA RADIAL

Para analisar os efeitos da dissipação viscosa durante a circulação de fluido de perfuração foi empregado a metodologia descrita anteriormente. A Figura 3 ilustra a evolução temporal da variação das temperaturas, no centro da direção radial da tubulação (TR) e na parede (TW), em relação a temperatura inicial em cada um dos termopares. Além das temperaturas, a vazão aferida pelo medidor coriolis também é apresentada. O momento em que a bomba foi acionada corresponde ao instante zero dos gráficos. Analisando a Figura 3 é possível notar uma clara variação entre TR e TW, onde a temperatura do centro é mais acentuada do que a da parede. Essa variação ($\Delta TR > \Delta TW$) era esperada conforme os fenômenos descritos previamente.

Figura 3 – Variação de temperatura durante circulação do FAA



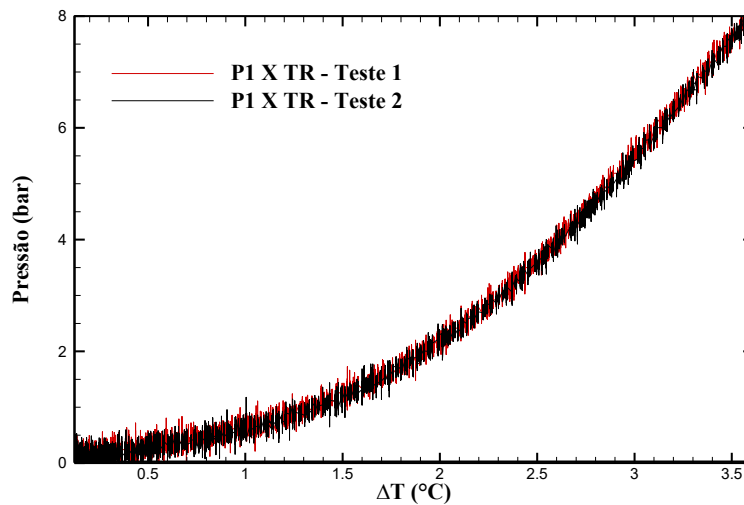
Fonte: Autoria Própria (2020).

RELAÇÃO ENTRE PRESSÃO E TEMPERATURA

Aplicando o último procedimento descrito, foi possível relacionar a variação de temperatura e pressão na linha. A Figura 4 ilustra esta relação, sendo apresentado no eixo das abcissas a variação de temperatura do fluido, e no das ordenadas, a variação de pressão consequente no interior da tubulação fechada.

O comportamento inicial observado não apresenta comportamento linear devido principalmente aos efeitos de expansão volumétrica da tubulação helicoidal. Após a estabilização desse fenômeno, em torno de 2,6 °C de variação, verifica-se que para cada 1°C de acréscimo na temperatura a pressão aumenta em aproximadamente 4,5 bar. A excelente repetibilidade do teste também pode apresentada na Figura 4.

Figura 4 – Gráfico Pressão x Variação de Temperatura em Fluido Confinado



Fonte: Autoria Própria (2020).

CONCLUSÃO

Considerando o cenário nacional de perfuração marinha com elevados custos operacionais, destaca-se que é fundamental desenvolver estudos que permitam a redução do tempo não operacional. Neste sentido, o presente trabalho investigou dois efeitos térmicos que podem afetar a estabilização da pressão em testes de estanqueidade. Com principais conclusões foi observado:

- Por meio dos experimentos realizados, torna-se evidente a existência de um sistema termicamente não homogêneo durante o confinamento de fluidos de perfuração;
- O fato de estudar a etapa de pressurização possibilita-nos de conhecer a situação térmica inicial do fluido no momento do teste;
- A partir dos resultados obtidos com o gráfico PxT, é possível compreender a necessidade de dar mais atenção à relação entre pressão e temperatura durante testes de BOP.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico CNPq – Brasil, da PETROBRAS e da ANP. Os autores agradecem ao Multilab LabReo-CERNN/UTFPR pelas caracterizações reológicas realizadas dando suporte aos testes conduzidos.

REFERÊNCIAS

- ALVES, D. G. (2019). **Hidrociclones aplicados à separação sólido-líquido de suspensões contendo areia, esferas ocas de vidro e fluido não newtoniano**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/27284/1/HidrociclonesAplicadosSepara%C3%A7%C3%A3o.pdf>. Acesso em: 17 ago. 2020.
- AZZOLA, J.; TSELEPIDAKIS, D.; PATTILLO, P. D.; RICHEY, J. F.; TINKER, S. J.; MILLER, R.; & SEGRETO, S. J. (2007). Application of vacuum insulated tubing to mitigate annular pressure buildup. **SPE DRILLING & COMPLETION**, 22(01), 46–51.
- CARBOGNIN, B. **Metodologia de verificação de sequência operacional em completção de poços baseada em interdependências**. 2017. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Engenharia de Petróleo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017.
- COLOMBO, D.; ABREU, D. T. M. P.; MARTINS, D. E. A.; DUIM, F. A. C.; MARTINS, F. B.; TAMELLA, I.; CARDOSO, R. (2019). Análise do impacto da frequência de testes na disponibilidade do BOP. Em **ENCONTRO NACIONAL DE CONSTRUÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO E GÁS**. 2019 – 128. Disponível em: <http://enahpe2019.ipt.br/Arquivos%20Anais%20do%20evento/128.pdf?Mobile=1>. Acesso em: 18 ago. 2020.
- COSTA, D. O. L.; CASTRO, J. **Tecnologia dos métodos de controle de poço e blowout**. 2011. Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia do Petróleo, 2011. Disponível em: <http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10001565.pdf>. Acesso em: 18 ago. 2020.
- DA SILVA, L. A. G. (1977). **Influência da Dissipação Viscosa na Transferência de Calor em Tubos Concêntricos no escoamento Turbulento**. Dissertação (mestrado) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/3588/1/146180.pdf>. Acesso em: 19 ago. 2020.
- ELLIS, R. C.; FRITCHIE, D. G.; GIBSON, D. H.; GOSCH, S. W.; & PATTILLO, P. D. (2004). Marlin failure analysis and redesign: part 2 - redesign. **SPE DRILLING & COMPLETION**, 19(02), 112–119.

INCROPERA, F.P.; BERGMAN, T.L.; DEWITT, D.P. (2008). **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 6ª ed., Editora LTC, Rio de Janeiro-RJ, 643p.

KHAN, N. U.; & MAY, R. (2016). **A generalized mathematical model to predict transient bottomhole temperature during drilling operation**. Journal of Petroleum Science and Engineering, 147, 435–450.

KNESEBECK, R.; PORTELA, A. G.; NEIA, O. A. F.; OLIVEIRA, G. M.; & NEGRÃO, C. O. R. (2019). Numeric and experimental study of pressure transmission in drilling fluid. Em **ENCONTRO NACIONAL DE CONSTRUÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO E GÁS**. 2019 – 073.

MATOS, J. H F. **Análise de riscos para a ocorrência de blowouts no processo de perfuração de poços de petróleo offshore**. 2017. 101 f. Tese (Graduação em Engenharia de Produção), Universidade Federal Fluminense, Rio das Ostras, 2017.

MITISHITA, R. S. **Avaliação experimental da transmissão de pressão em tubulações preenchidas por fluidos viscoplásticos**. 2015. 184 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Industrial Mecânica, PPGEM, UTFPR, Curitiba, 2015.

OLIVEIRA, G. M.; SANTOS, T. G. M.; FRANCO, A. T.; NEGRÃO, C. O.R. (2015). Pressure transmission in visco and pseudoplastic fluids during closed well operations. In: **VII BRAZILIAN CONFERENCE ON RHEOLOGY**, BCR 2015, Curitiba.

OUDEMAN, P.; KEREM, M. (2006). transient behavior of annular pressure build-up in HP/HT wells. **SPE DRILLING & COMPLETION**, 21(04), 234–241.

PELIANO, S. V. **Mitigação de APB pelo método da sapata aberta**. 2017. 82 f. Tese (Graduação em Engenharia de Petróleo), Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2017.