

PRINCIPAIS SISTEMAS DE BANCADA DE TESTES PARA PERFURAÇÃO DE EXTRATO ROCHOSO

Fernando Cezar Mariano Diniz

Paulo André de Camargo Beltrão

Admilson Teixeira Franco

Carlos Cziulik

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) - Rua Deputado Heitor Alencar Furtado 5000, Ecoville, 81280-340, Curitiba, Paraná, Brasil.

fernandodiniz@alunos.utfpr.edu.br

beltrao@utfpr.edu.br

admilson@utfpr.edu.br

cziulik@utfpr.edu.br

Resumo. O monitoramento da eficiência de perfurações de poços de óleo e gás é um grande desafio de engenharia. Para maior domínio do processo é fundamental a realização de ensaios experimentais para avaliar a influência dos principais parâmetros de perfuração na taxa de penetração da broca, tais como: a velocidade de rotação da coluna de perfuração, o peso sobre a broca, o tipo de rocha perfurada, entre outros. Os testes em plataformas reais têm custos elevados e disponibilidade restrita, já a utilização de modelagem matemática apresenta imprecisão, devido às diversas variáveis contidas no processo. Assim, os dispositivos de perfuração em escala reduzida tornam-se a solução mais acessível. O objetivo desse estudo é desenvolver as diretrizes para a execução do projeto mecânico conceitual de bancada de testes para investigar o processo de perfuração em extrato rochoso. Para isso, é realizada uma análise detalhada de trabalhos recentes que abordam os principais sistemas e sensores que as bancadas de perfuração devem ter para a realização de testes. Além disso, são fornecidas as equações para cálculos preliminares de força e taxa de penetração em brocas PDC, uma das ferramentas mais versáteis empregadas em perfurações de poços de óleo e gás no mundo.

Palavras chave: Perfuração de poços, projeto conceitual, bancada de testes, similaridade, broca PDC.

1. INTRODUÇÃO

Diversos problemas são comuns em perfurações de poços de óleo e gás, como: baixo desempenho da taxa de penetração, excesso de vibração na coluna de perfuração, atrito excessivo entre a coluna e a parede do poço, problemas de circulação do fluido de perfuração e incapacidade ou falha da broca. O maior conhecimento sobre o processo de perfuração tem se tornado cada vez mais necessário para que se atinja o máximo de eficiência e rapidez nas operações em campo (Hareland e Rampersad, 1994).

Bancadas de perfuração têm sido empregadas em laboratórios ao redor do mundo, para simular de forma aproximada os fenômenos comuns em plataformas reais, principalmente na representação do processo de corte e vibração. Somente alguns projetistas de bancadas utilizaram a análise dimensional para a correta redução de escala de plataformas de perfuração (Srivastava e Teodoriu, 2019). A pesquisa de Westermann *et al.* (2015) abordou a redução da parte inferior de uma coluna de perfuração para análise de vibrações em uma estrutura horizontal. A lacuna que existe nos testes em bancadas não submetidas à redução de escala tende a dificultar a replicabilidade dos resultados para plataformas reais.

O desenvolvimento de um protótipo de bancada de testes, em escala reduzida, é essencial para a avaliação da influência da velocidade de rotação da coluna, da vazão do fluido de perfuração, do peso aplicado sobre a broca para perfurar (WOB), do tipo de rocha, do modelo de broca e do torque no desempenho de perfuração, de forma mais acessível.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As plataformas são estruturas de grande porte que tem como função rotacionar a coluna de perfuração e fazer um buraco no solo para localizar poços de óleo e gás (Hossain e Al-Majed, 2015). Os componentes de uma plataforma rotativa convencional de perfuração são mostrados na Fig. 1, composta de três sistemas principais: sistema de movimentação de cargas, sistema de circulação e sistema rotativo.

2.1. Sistemas em plataformas de perfuração

O sistema de movimentação de cargas, ou de içamento, é responsável por elevar e abaixar a coluna de perfuração. O sistema é formado por guinchos, bloco viajante, bloco de coroamento, ganchos e cabos (Hyne, 2012).

O sistema de circulação é composto de mecanismos que possibilitam o escoamento e o tratamento do fluido no processo de perfuração. O ciclo se inicia com o bombeamento do fluido até a extremidade da broca. Na segunda etapa, o fluido regressa por meio do anular, que é o espaço entre a coluna e a parede do poço, até a superfície da plataforma, trazendo os cascalhos procedentes das rochas perfuradas. Então, o fluido é tratado e o ciclo é reiniciado (Hossain e Al-Majed, 2015).

A função do sistema rotativo é girar a coluna de perfuração a partir da superfície da plataforma. O sistema de equipamentos rotativos inclui a junta rotativa, o mecanismo que transmite rotação, a coluna e a broca. A junta rotativa é o dispositivo que possibilita a separação entre os elementos estacionários dos rotativos, além de ter a função de ser o mecanismo no qual o fluido é introduzido para o interior da coluna.

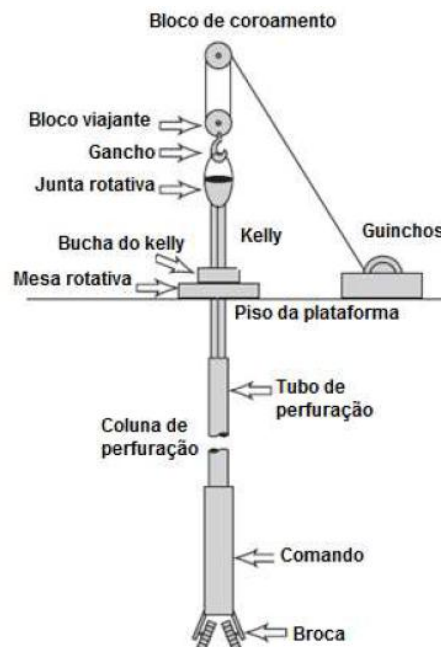


Figura 1. Plataforma rotativa convencional de perfuração
(Hyne, 2012)

Nos últimos anos, o mecanismo que transmite rotação mais popular tem sido o *Top Drive*, que é o motor acoplado que se conecta ao topo da coluna. A coluna está localizada abaixo do *Top Drive*, sendo constituída de tubos de perfuração, tubos pesados, comando e estabilizadores. A coluna tem como função primordial a transferência de rotação à broca, fornecer peso sobre a broca, além de servir de acesso para o fluido até a extremidade de perfuração (Lyons, 1996; Gao, 2017).

2.2. Desempenho do sistema de perfuração

O peso sobre a broca, a velocidade de rotação da coluna, a vazão do fluido de perfuração, a litologia (características de textura, cor e composição mineralógica da rocha) são parâmetros de perfuração muito relevantes e afetam a taxa de penetração e o torque. A combinação inadequada desses parâmetros pode gerar gastos desnecessários de energia, além da diminuição da vida útil da broca e dos componentes de fundo de poço devido, principalmente, ao desgaste resultante das vibrações excessivas na estrutura (Gandelman, 2012).

A taxa de penetração, ou ROP, é a medida da velocidade com a qual a broca atravessa as rochas. Quanto maior for a ROP, menor o tempo do processo e consequentemente menor o custo operacional. O objetivo dos engenheiros é alcançar alta efetividade de penetração da broca sem comprometer sua capacidade técnica.

O torque é o momento necessário para girar a coluna de perfuração e é gerado a partir da interação entre a broca e a superfície perfurada. O aumento exagerado do torque pode ocorrer devido ao atrito lateral com a parede do poço, já a

redução do torque é geralmente causada pelo encerramento, que ocorre quando sedimentos moles e pegajosos envolvem a broca, restringindo a sua capacidade de corte.

O peso sobre a broca, ou WOB, representa a quantidade de peso aplicada à broca para perfurar. É calculado a partir da carga no gancho. Um sensor medidor de tensão mede o peso total sustentado pelo gancho, incluindo o peso da coluna, dos componentes localizados na extremidade inferior da coluna (BHA) e do *Top Drive*, que são subtraídos, alcançando-se o peso efetivo na broca. Quanto maior o peso aplicado, maior será a pressão exercida sobre a superfície perfurada, mas se for excessivo, reduz a vida útil da broca devido ao aumento da taxa de desgaste (Lyons *et al.*, 2015).

A velocidade de rotação representa a velocidade angular da coluna de perfuração sobre o seu próprio eixo. Normalmente, quanto maior for a rotação empregada, maior é a ROP, ao mesmo tempo em que se aumentará o desgaste da broca (Hossain e Al-Majed, 2015).

O bombeamento de fluido de perfuração para o interior do poço é de suma importância para o equilíbrio e segurança do processo. O fluido tem como função principal a movimentação dos cascalhos gerados durante a perfuração das rochas até a superfície da plataforma. Segundo Lyons *et al.* (2015), o fluido de perfuração também desempenha outros papéis importantes na eficiência operacional e na vida útil do conjunto de componentes localizados na extremidade inferior da coluna, como: lubrificação e consolidação das paredes do poço.

A litologia é fator essencial na perfuração. O conhecimento das características e da composição da formação rochosa que se pretende perfurar é fundamental para que se atinja a maior eficiência.

2.3. As Forças nas brocas PDC

As brocas de diamante policristalino compacto (PDC) se popularizaram na indústria petrolífera, porém ainda apresentam limitações de baixa taxa de penetração e de desgaste acentuado em superfícies duras. São comuns os ajustes na geometria das brocas PDC, principalmente, na quantidade de cortadores, dimensões, ângulo de ataque, entre outros aspectos (Hareland *et al.*, 2009; Gao, 2017).

Rajabov *et al.* (2012) desenvolveram o modelo para prever a força de corte horizontal para determinada força normal, com os dados de ângulo de ataque (alfa), de ângulo de saída lateral (beta) e o coeficiente de atrito (μ) do cortador com a rocha conhecidos, conforme a Fig. 2. O modelo pode ser adaptado para toda broca PDC para a avaliação do torque para um dado WOB durante a perfuração.

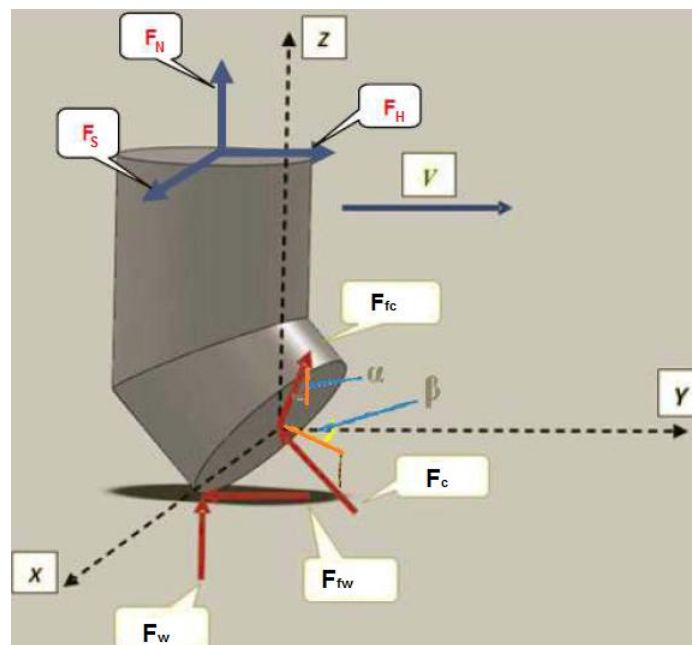


Figura 2. Forças atuando no cortador PDC em três dimensões
(Rajabov *et al.*, 2012)

O modelo proposto por Rajabov *et al.* (2012) é baseado no equilíbrio estático das forças que agem no cortador PDC na interação com a rocha. As seguintes forças externas atuam no cortador durante a perfuração, são elas: força de corte perpendicular à superfície do cortador (F_c), força de atrito na interface cortador/rocha (F_{fc}), força de desgaste atuando

perpendicularmente ao cortador (F_w) e a força de atrito em decorrência do desgaste entre o plano de desgaste e a rocha (F_{fw}).

Caso não haja desgaste no cortador PDC, a força horizontal F_H atuante pode ser definida pela Eq. (1) com os valores conhecidos da força normal F_N (WOB), do ângulo de ataque, do ângulo de saída lateral e do coeficiente de atrito. Considerando a geometria da ferramenta em três dimensões:

$$F_H = F_N \cos \beta \frac{(1 - \mu \tan \alpha)}{(\mu + \tan \alpha)} \quad (1)$$

2.4. Modelo para Previsão de ROP

Hareland e Rampersad (1994) desenvolveram o modelo empírico para previsão de taxa de penetração em um cortador PDC. A taxa de penetração (pés/h) ficou determinada pela Eq. (2):

$$ROP = \frac{14,14 NC n A_v}{d} \quad (2)$$

Sendo:

NC = número de cortadores;

A_v = área comprimida da rocha (polegada quadrada);

d = diâmetro da broca (polegada);

n = velocidade de rotação da broca (rotações por minuto).

A Equação (3) calcula a área comprimida da rocha:

$$A_v = \cos \beta \sin \alpha \left[\left(\frac{d_c}{2} \right)^2 \cos^{-1} \left(1 - \frac{2a_p}{\cos \alpha d_c} \right) - \left(\frac{d_c a_p}{\cos \alpha} - \frac{a_p^2}{\cos \alpha^2} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{d_c a_p}{2 \cos \alpha} \right) \right] \quad (3)$$

Já a Equação (4) determina a profundidade de corte da broca (em polegadas):

$$a_p = \frac{2WOB}{\pi R_p d_c} \quad (4)$$

Sendo:

d_c = diâmetro do cortador (polegada);

R_p = UCS da superfície perfurada (libra-força por polegada quadrada).

UCS (*unconfined compression strength*) é a máxima resistência à compressão que a estrutura pode suportar na pressão atmosférica (Aadnoy e Looyeh, 2011).

3. ANÁLISE DE TRABALHOS RECENTES

O método de pesquisa adotado é de caráter exploratório e bibliográfico no qual são analisados projetos da última década de bancadas de testes, a fim de entender os atributos geométricos, técnicos e operacionais de diferentes dispositivos de perfuração.

a) **Sistema de rotação e içamento:** o *Top Drive* de dispositivos em escala de laboratório consiste no motor elétrico e no mecanismo para fornecer peso sobre a broca. O motor de corrente contínua é frequentemente utilizado por possuir a tensão de saída constante dentro do limite de corrente permitido, fornecendo assim transferência de torque suave do motor para a coluna de perfuração (Srivastava e Teodoriu, 2019). Uma das dificuldades na construção de protótipos está na transmissão de peso para a extremidade inferior da coluna, decorrente, principalmente, da massa reduzida dos componentes das bancadas de testes. Para não inviabilizar a perfuração, a adição de discos no eixo da coluna pode auxiliar no aumento do peso sobre a broca (Kapitaniak *et al.*, 2015). As configurações de Franca (2010) e

Kovalyshen *et al.* (2014) utilizaram servomotores nos seus experimentos, tendo como principal vantagem a precisão e o maior controle na aplicação de peso sobre a broca.

b) **Coluna de perfuração:** a redução da coluna em escala de laboratório, bem como a escolha do material empregado na fabricação, tem grande importância no objetivo dos testes. Na revisão são observados dispositivos fabricados em três materiais: aço, alumínio e PVC. Se a preocupação for a determinação das características mecânicas da broca usada, uma coluna de perfuração de aço rígido é a escolha apropriada, principalmente, pela alta resistência mecânica, replicando o material empregado em colunas de plataformas reais. Materiais mais flexíveis são recomendados se o objetivo for a análise do comportamento dinâmico da coluna. Nos últimos anos, o alumínio foi o material escolhido em colunas de perfuração em escala, devido à baixa densidade em comparação com o aço. As vibrações torcionais se tornam visíveis apenas se a rigidez do modelo atingir índices de rigidez comparáveis ou inferiores ao real. Assim, se objetivo é avaliar as vibrações torcionais na coluna, o ideal é utilizar PVC rígido ou a fibra de vidro ao invés de materiais como aço ou alumínio (Marquez e Teodoriu, 2017).

c) **Sistema de circulação:** o efeito do estudo da vazão do fluido é muito importante em perfurações de poços de óleo e gás. Poucas configurações relatam o uso de algum fluido de corte focado na vazão como parâmetro de investigação e na estrutura de circulação do espaço anular. Uma das propostas da pesquisa de Tingey (2015) foi medir a influência do fluido na vibração da coluna de uma bancada horizontal, utilizando um sistema com drenagem, filtragem e bombeamento de fluido. Smith (2017) adicionou um tanque reserva para suprir a perda de fluido durante o processo de perfuração e de filtragem. Outras pesquisas usaram o escoamento de água ou ar comprimido, com objetivo de facilitar a penetração da broca e para a limpeza da região de corte (Franca, 2010; Kovalyshen *et al.*, 2014; Kapitaniak *et al.*, 2015; Bavadiya *et al.*, 2017).

d) **Redução de escala:** a possibilidade de conversão de dados de uma bancada para a obtenção de informações de plataformas é um dos benefícios da análise dimensional. Bancada e plataforma possuem semelhança geométrica se todas as dimensões superficiais da bancada tiverem o mesmo fator de redução (n_L) em comparação com a plataforma. Comprimentos, áreas e volumes da plataforma, portanto, podem ser reduzidos em escalas n_L , n_L^2 e n_L^3 , respectivamente, para a concepção da bancada. Para a completa similaridade geométrica, todos os ângulos da plataforma devem ser preservados na bancada. A semelhança cinemática é atingida quando as duas estruturas detêm a similaridade geométrica e a similaridade dos movimentos, como: tempo, velocidade e aceleração. A semelhança dinâmica é alcançada quando os dois corpos possuem as similaridades geométrica, cinemática além de equivalentes razões de forças atuando em ambas as estruturas (Birk, 2019).

Apenas alguns autores mencionam considerar a redução de escala nos seus projetos. Embora o objetivo de cada experimento fosse reduzir o comprimento total da coluna de perfuração, a redução de diâmetro da coluna real para a escala da bancada é o fator limitante, principalmente para colunas de plataformas com vários quilômetros de comprimento. A pesquisa de Westermann *et al.* (2015) concebeu uma bancada horizontal preservando as semelhanças geométricas, cinemáticas e dinâmicas com uma seção de 20 metros de comprimento de uma coluna de perfuração. A redução de escala de Westermann *et al.* (2015) preservou o número de Cauchy, um parâmetro adimensional que relaciona as forças de inércia e elásticas que atuam na coluna de perfuração. A Tabela 1 apresenta a conversão dos principais parâmetros de perfuração de plataformas para bancadas. Nesse caso, ambas as estruturas são fabricadas com o mesmo material.

Tabela 1. Parâmetros para conversão de escala (Pahl, G. *et al.*, 2007)

Parâmetros	Conversão de escala
Velocidade de rotação	n_L^{-1}
ROP	$n_L^0 = 1$
Comprimento e Diâmetro	n_L^1
Área, Forças, Potência e Vazão do fluido	n_L^2
Volume, Torque e WOB	n_L^3

e) **Sensores:** os sensores são dispositivos de aquisição de dados que fornecem informações essenciais para a medição e o monitoramento contínuo dos parâmetros de perfuração (Laik, 2018). A calibração dos sensores, além de instalação adequada, é importante para que o sistema proporcione leituras precisas (Dally *et al.*, 1984). Os sensores mais comuns em bancadas de testes são discutidos a seguir (Kovalishen *et al.*, 2014; Bavadiya *et al.*, 2015; Gao, 2015):

Velocidade de rotação e torque dos motores: normalmente, os dados de velocidade de rotação e torque são fornecidos diretamente pelo motor. Em algumas pesquisas, o tacômetro, ou o codificador rotativo, é empregado na medição da velocidade de rotação da coluna;

Célula de carga: a célula de carga é um transdutor utilizado para medir o peso sobre a broca;

Transdutores de pressão: os transdutores de pressão são dispositivos que convertem pressão em um sinal elétrico analógico. São utilizados para monitoramento das bombas;

Medidor de vazão: o medidor é utilizado para medir a vazão de fluido que é bombeado para a região de perfuração;

Sensor de deslocamento: o sensor de deslocamento é o dispositivo que mede o deslocamento vertical da coluna de perfuração, fornecendo dados para o cálculo da taxa de penetração da estrutura;

Acelerômetro: o acelerômetro é utilizado para mensurar os níveis de vibração na coluna de perfuração;

Sensor de corrente: o sensor de corrente mede a corrente que entra nos motores, propiciando a definição da potência em cada componente.

A Figura 3 apresenta o diagrama de sensores da pesquisa de Bavadiya *et al.* (2015), onde o WOB é efetuado por um sistema de ar comprimido.

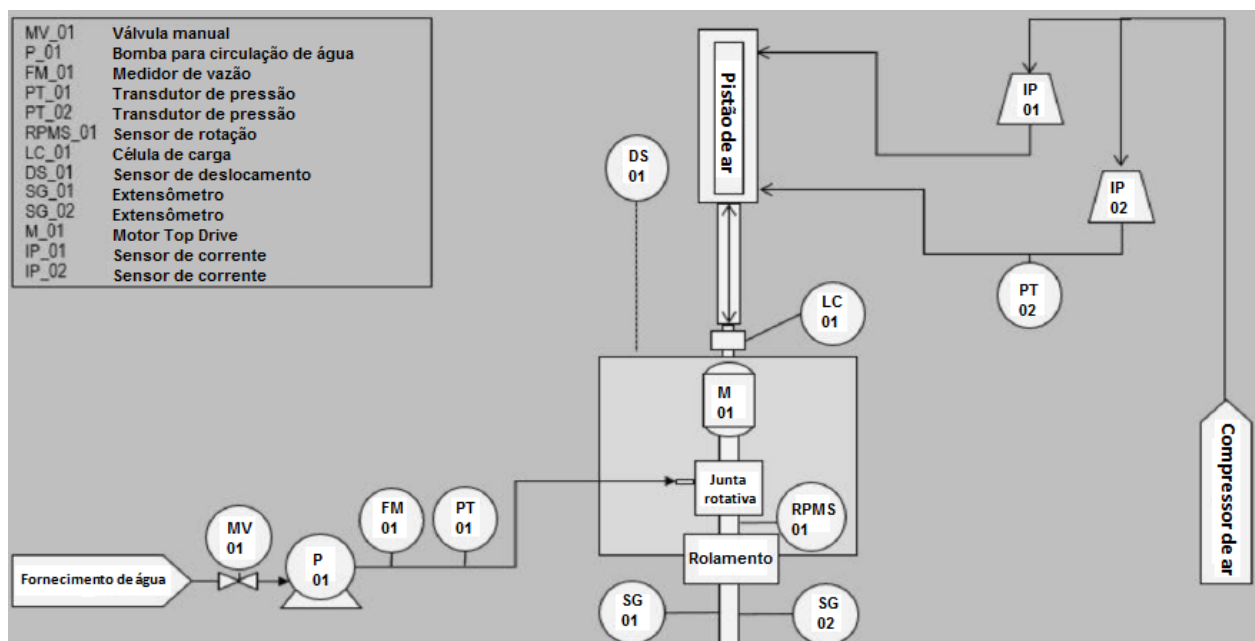


Figura 3. Diagrama de bancada de testes com sensores
(Bavadiya, V. A. *et al.*, 2015)

4. CONCLUSÃO

A busca dos engenheiros por melhores combinações de parâmetros de perfuração, sem prejudicar a vida útil das brocas, se depara com os desafios que a indústria petrolífera enfrenta, perfurando poços em profundidades de vários quilômetros abaixo do nível do mar, com custos operacionais milionários.

A realização de testes em plataformas reais é muito onerosa. Ademais, devido ao empirismo do processo, qualquer variação nos principais parâmetros de perfuração tende a gerar interpretações imprecisas dos resultados. Assim, as simulações de perfuração em bancadas proporcionam a captura de parâmetros de modo mais efetivo e barato.

Da análise de estudos recentes envolvendo dispositivos de perfuração em escala reduzida, foi possível constatar os principais sistemas e funções que a estrutura de perfuração deve ter: torre de suporte, coluna de perfuração, peso sobre a

broca, sistema de içamento da coluna, sistema de circulação e tratamento de fluido, sistema de rotação da coluna e sensores de aquisição de dados.

Devido às características estruturais delgadas e leves, é fundamental que o motor que gira a coluna de perfuração da bancada tenha auxílio de um peso externo sobre a estrutura para facilitar a penetração da mesma sobre a rocha. Uma estrutura mais rígida pode ser a solução indicada para que se replique uma situação real em campo. Como o objetivo do projeto é que a bancada seja independente, o sistema de circulação precisa ser projetado para que o dispositivo de perfuração seja autossuficiente. Os sensores são dispositivos fundamentais para o controle dos parâmetros e a segurança operacional da bancada, fornecendo dados atualizados de maneira contínua dos mecanismos.

Para o correto dimensionamento dos motores e estruturas que suportam a bancada de testes, os cálculos preliminares de força e taxa de penetração das brocas PDC, utilizando os modelos de Rajabov *et al.* (2012) e Hareland e Rampersad (1994), fornecem informações importantes para as simulações iniciais de perfuração. Além disso, a conversão de escala possibilita a comparação entre dispositivos de tamanhos diferentes, visando à obtenção de correlações que melhor representem os problemas relacionados à perfuração.

5. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

6. REFERÊNCIAS

- Aadnoy, B. e Looyeh, R., 2011. *Petroleum rock mechanics: drilling operations and well design*. Gulf Professional Publishing, Oxford, 1ª edição.
- Bavadiya, V. A., Aljubran, M.J., Kibe, J.M., Christy, S.M., Le, H.N., Ahmed, R. e Florence, F., 2015. "Design, construction and operation of an automated drilling rig for the DSATS university competition". In *SPE annual technical conference and exhibition*. Society of Petroleum Engineers. Houston, United States of America.
- Bavadiya, V. A., Alsaihati, Z., Ahmed, R. e Gustafson, K., 2017. "Experimental investigation of the effects of rotational speed and weight on bit on drillstring vibrations, torque and rate of penetration". In *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference*. Society of Petroleum Engineers. Abu Dhabi, United Arab Emirates.
- Birk, L., 2019. *Fundamentals of ship hydrodynamics: fluid mechanics, ship resistance and propulsion*. John Wiley & Sons, Hoboken, 1ª edição.
- Dally, J. W., Riley, W. F. e McConnell, K. G., 1984. *Instrumentation for engineering measurements*. John Wiley & Sons, New York.
- Franca, L. F. P., 2010. "Drilling action of roller-cone bits: modeling and experimental validation". *Journal of Energy Resources Technology*, Vol. 132, n. 4.
- Gandelman, R. A., 2012. *Predição da ROP e otimização em tempo real de parâmetros operacionais na perfuração de poços de petróleo offshore*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Gao, Q., 2015. *Development of laboratory and field drilling tools to measure bit operating conditions and drill string motion*. Dissertação de mestrado, Memorial University of Newfoundland, St. John's.
- Gao, C., 2017. *Petroleum drilling technology*. Science Press, Beijing.
- Hareland, G. e Rampersad, P. R., 1994. "Drag-bit model including wear". In *SPE Latin America/Caribbean Petroleum Engineering Conference*. Society of Petroleum Engineers. Buenos Aires, Argentina, p. 657-667.
- Hareland, G., Yan, W., Nygaard, R. e WISE, J. L., 2009. "Cutting efficiency of a single PDC cutter on hard rock". *Journal of Canadian Petroleum Technology*, Vol. 48, n. 06, p. 60-65.
- Hossain, M. E. e Al-Majed, A. A., 2015. *Fundamentals of sustainable drilling engineering*. John Wiley & Sons, Hoboken.

- Hyne, N. J., 2012. *Nontechnical guide to petroleum geology, exploration, drilling, and production*. PennWell Books, Tulsa, 3ª edição.
- Kapitaniak, M., Hamaneh, V. V., Chávez, J. P., Nandakumar, K. e Wiercigroch, M., 2015. “Unveiling complexity of drill–string vibrations: Experiments and modeling”. *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 101, p. 324-337.
- Kovalyshen, Y., 2014. “Experiments on stick-slip vibrations in drilling with drag bits”. In *48th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*. American Rock Mechanics Association. Minneapolis, United States of America.
- Laik, S., 2018. *Offshore petroleum drilling and production*. CRC Press, Boca Raton.
- Lyons, W. C., 1996. *Standard handbook of petroleum and natural gas engineering*. Gulf Publishing Company, Houston, Vol. 1.
- Lyons, W. C., Plisga, G. J. e Lorenz, M. D., 2015. *Standard handbook of petroleum and natural gas engineering*. Elsevier, Waltham, 3ª edição.
- Marquez, A. e Teodoriu, C., 2017. “A novel drillstring dynamics experimental setup to be integrated into hardware in the loop capable drilling simulators”. In *ASME 2017 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. American Society of Mechanical Engineers. Trondheim, Norway.
- Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J. e Grote, K.H., 2007. *Engineering design: A systematic approach*. Springer, London, 3ª edição.
- Rajabov, V., Miska, S., Mortimer, L., Yu, M. e Ozbayoglu, E., 2012. “The effects of back rake and side rake angles on mechanical specific energy of single PDC cutters with selected rocks at varying depth of cuts and confining pressures”. In *IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers. San Diego, United States of America.
- Smith, C., 2017. *Design, construction, and analysis of a pilot-scale automated drilling platform*. Dissertação de mestrado, West Virginia University, Morgantown.
- Srivastava, S. e Teodoriu, C., 2019. “An extensive review of laboratory scaled experimental setups for studying drill string vibrations and the way forward”. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 182.
- Tingey, D. J., 2015. *Design, fabrication and preliminary testing of experimental rock drilling rig*. Dissertação de mestrado, Texas A&M University, Riverside.
- Westermann, H., Gorelik, I., Rudat, J., Moritz, C., Neubauer, M., Wallaschek, J. e Hohn, O., 2015. “A new test rig for experimental studies of drillstring vibrations”. *SPE Drilling & Completion*, Vol. 30, n. 02, p. 119-128.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.