

1. INTRODUÇÃO

A utilização do petróleo pelo homem é reconhecidamente uma realidade bastante antiga e seu registro remonta a tempos bíblicos. O livro de Gênesis que apresenta a narrativa dos primórdios da formação do povo hebreu faz referência à utilização de betume para calafetagem de embarcações. Há registros históricos segundo os quais os fenícios também seguiam essa prática. Na antiga Babilônia os tijolos eram assentados com asfalto. Os egípcios utilizaram o petróleo na pavimentação de estradas, bem como para embalsamar mortos e na construção das pirâmides. Durante a expansão do império grego e posteriormente do império romano, o petróleo foi utilizado para fins bélicos. Nas américas, antes da chegada dos conquistadores europeus, os índios já utilizavam petróleo para decoração e impermeabilização de potes de cerâmica, sendo que importantes civilizações das américas como os incas e os maias utilizaram o petróleo em diversas aplicações. O petróleo era retirado em afloramentos naturais existentes em todos os continentes (Thomas, 2001).

Ao longo dos séculos o petróleo esteve presente entre as diversas civilizações, sendo utilizado de diferentes formas. No entanto, nos últimos séculos, sua utilização tornou-se cada vez maior. Na segunda metade do século XIX iniciou-se a exploração comercial nos Estados Unidos, logo após a célebre descoberta do Coronel Drake, em Tittusville, Pensilvânia, com um poço de apenas 21 metros de profundidade, perfurado com um sistema de percussão movido a vapor, que produziu 2 m³/dia de óleo. Nesse tempo, descobriu-se que a destilação do petróleo resultava em produtos que substituíam, com grande margem de lucro, produtos até então largamente utilizados para iluminação, com o querosene obtido a partir do carvão e o óleo de baleia.

Após a invenção dos motores a gasolina e a diesel, o petróleo e seus derivados passou a exercer uma importância ainda maior sobre o crescimento da indústria e para o desenvolvimento econômico mundial. O

petróleo passou a ocupar importante papel na economia se impondo como fonte de energia principal. Com o advento da indústria petroquímica, além da grande utilização dos derivados de petróleo, centenas de novos compostos são produzidos, muitos deles diariamente utilizados, como plásticos, borrachas sintéticas, tintas, corantes, adesivos, solventes, detergentes, explosivos, produtos farmacêuticos, cosméticos, etc. Em suma, além de produzir combustível, o petróleo passou a ser imprescindível para a manutenção das comodidades da vida moderna.

A busca pelo petróleo levou a importantes descobertas nos Estados Unidos, Oriente Médio, Venezuela, Trinidad, Argentina, México, Rússia, Irã e Iraque. Com o passar dos anos e com as descobertas de grandes campos de petróleo em ambiente marinho, houve um grande desenvolvimento de estruturas marítimas, incluindo navios e plataformas, para portar os equipamentos de perfuração e produção.

Grandes partes das bacias sedimentares do mundo que oferecem probabilidade de existência de petróleo estão localizadas em pontos distantes da costa marítima, em áreas *offshore*. Algumas dessas áreas estão localizadas em regiões como: Golfo do México, Mar do Norte, Golfo Árabe, África Ocidental e Mar da China.

No Brasil, nos últimos anos, as maiores e mais importantes descobertas em termos de reservas de petróleo têm ocorrido na área *offshore*, principalmente na Bacia de Campos no Estado do Rio de Janeiro, em águas cada vez mais profundas. As condições adversas encontradas no ambiente marinho sempre representaram grandes desafios nas atividades de exploração e produção. Tais condições tornam-se ainda mais severas em se tratando de campos situados em grandes profundidades, que podem ultrapassar a marca dos 3000 metros de lâmina d'água. Esse crescente desafio tem levado as empresas de petróleo a promoverem atividades de pesquisa e desenvolvimento, contando com a participação não apenas de pesquisadores ligados à indústria petrolífera, mas também daqueles ligados às universidades. Tais iniciativas têm contribuído para o alcance de

importantes desafios tecnológicos existentes nas atividades ligadas à produção e ao transporte de petróleo, principalmente no ambiente *offshore*.

Entre os principais problemas operacionais existentes na indústria do petróleo que devem ser objetos de pesquisa, pode ser citada a ocorrência da deposição de materiais orgânicos ou inorgânicos no interior dos dutos. Essa deposição pode variar de acordo com as características do produto. Por exemplo, o transporte de alguns tipos de petróleo com alto teor de frações pesadas (parafinas) pode em muito acentuar a obstrução dos dutos, principalmente em condições de baixas temperaturas, semelhantes às aquelas encontradas em águas profundas, onde a temperatura pode chegar a 4°C. Essas condições favorecem a formação de bloqueios no interior das linhas de produção de petróleo. Nas linhas instaladas entre as cabeças dos poços no fundo do mar (onde são posicionadas as árvores de natal molhadas - ANM) e as plataformas de produção, pode ocorrer precipitação e deposição de cristais de parafina.

A existência de bloqueio parcial ou mesmo total de um duto pode levar a ocorrências indesejáveis, tais como: maior consumo de energia para transporte de petróleo e derivados, danos em equipamentos e instalações, perda de produção, além do aumento significativo dos riscos operacionais, podendo gerar perdas materiais e de vidas humanas.

Entre os métodos atualmente conhecidos para promover a remoção de depósitos parafínicos no interior de dutos, o que mais tem sido utilizado é o método de passagem de *pigs*. Embora seja bastante comum a realização de operações com *pigs* na indústria de petróleo, há ainda poucos trabalhos de valor acadêmico disponíveis na literatura a respeito desse assunto. Na maioria das vezes, o planejamento e a execução dessas operações baseiam-se meramente em experiências práticas adquiridas pelas empresas operadoras. O pouco conhecimento a respeito de alguns dos aspectos envolvidos nas operações com *pigs* acaba favorecendo a ocorrência de situações indesejáveis semelhantes às mencionadas acima.

A passagem de pigs para a remoção de depósitos de parafina é, muitas vezes, uma operação associada a um considerável risco, pois existe a possibilidade de aprisionamento do pig na linha. Isso pode ocorrer porque a força necessária para mover o pig e para remover um depósito de parafina pode ser muitas vezes superior àquela que pode ser gerada pelo fluido que impulsiona o pig.

Apesar de sua importância, e talvez pela complexidade física inerente ao problema, as operações de passagem de pigs têm sido projetadas e realizadas com base em experiência prévia de campo e com pouco apoio nos fundamentos físicos que governam a passagem do pig pelo duto e sua interação com o depósito de parafina.

A revisão bibliográfica realizada no âmbito deste trabalho demonstra que, os esforços de pesquisa voltados para melhor entender a interação entre pigs e depósitos de parafina são ainda muito pequenos, apesar da importância econômica do problema. No presente trabalho o tema relacionado com a interação entre pigs e depósitos de parafina é retomado. Todo o trabalho experimental desenvolvido teve por finalidade gerar dados que permitissem a validação dos modelos de força desenvolvidos anteriormente.

1.1 Motivação

Grandes esforços têm sido empregados na solução de problemas operacionais, incluindo aqueles ligados à garantia de escoamento, entre os quais pode-se destacar a deposição de parafinas nas paredes internas dos dutos. Alguns trabalhos têm sido realizados, tanto em centros de pesquisa ligados à indústria quanto em universidades, visando obter um maior conhecimento sobre os mecanismos de formação desses depósitos. Tais trabalhos possibilitam, por exemplo, o desenvolvimento de processos químicos para remoção dos depósitos. No entanto, muitas vezes as soluções

representadas por esses processos químicos apresentam custos bastante elevados, quando comparados com processos mecânicos que podem ser utilizados com o mesmo objetivo.

Atualmente no Brasil, a região produtora que apresenta maior potencial produtivo está localizada na Bacia de Campos no litoral norte do Estado do Rio de Janeiro, onde as mais recentes e promissoras descobertas têm ocorrido em áreas de águas cada vez mais profundas. Nesse ambiente, comumente são instalados dutos submarinos ligando as árvores de natal molhadas às plataformas, ficando esses dutos expostos a baixas temperaturas, em condições plenamente favoráveis à formação de depósitos de parafina.

Por serem atividades realizadas em ambiente operacional bastante adverso e de alta periculosidade, as operações ligadas à tecnologia de *pigging* necessitam ser muito bem planejadas e bem executadas. É preciso que se tenha um maior conhecimento a respeito da influência de algumas variáveis envolvidas nessas operações, como por exemplo, as forças de contato entre o pig e o duto, e as forças necessárias para a quebra e a remoção dos depósitos parafínicos.

Pesquisadores do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio vêm há algum tempo seguindo uma linha de pesquisa que, num primeiro momento, visava desenvolver a modelagem da interação entre o pig e a parede do tubo, não considerando inicialmente a força necessária para remoção e transporte de depósitos de parafina. Posteriormente, os mesmos pesquisadores desenvolveram um estudo sobre as forças necessárias para remoção desses depósitos. Esse estudo, aparentemente o primeiro trabalho voltado para o tema, produziu modelos que se propunham a estimar as forças necessárias para remoção de depósitos de parafina, tentando identificar os parâmetros físicos que controlam o problema. Porém, não houve durante sua realização uma tentativa de se comprovar experimentalmente as previsões dos modelos propostos. Por essa razão o

programa de simulação de deslocamento de pigs desenvolvido não incorporou tais modelos de força para remoção de parafina.

O presente trabalho se propõe a apresentar comparações entre dados levantados em laboratório para medição das forças mencionadas acima, com valores obtidos através de modelos numéricos desenvolvidos por pesquisadores da PUC-Rio. Foram realizados testes para remoção de depósitos de parafina com diferentes tipos de *pigs* utilizando um aparato experimental projetado e montado no Laboratório de Termociências da PUC-Rio.

Espera-se que este trabalho possa contribuir para a melhoria dos procedimentos relativos ao planejamento e à execução de operações com pigs para remoção de depósitos de parafina, com base no conhecimento prévio das condições desses depósitos, dos tipos de pigs mais comumente encontrados no mercado e das condições operacionais existentes nas regiões produtoras.