

1 Introdução

A matriz energética mundial ainda é muito dependente do petróleo. Cerca de 33,2% da oferta de energia global¹ é oriunda dos hidrocarbonetos. No Brasil, embora a energia hidráulica possua a maior oferta, os derivados de petróleo desempenham papel fundamental tendo apresentado constante crescimento nos últimos anos. As recentes descobertas do pré-sal apontam para uma produção de óleo e gás no país cada vez maior no futuro.

A produção *offshore* corresponde a 91,2% da produção de petróleo no Brasil². As principais bacias produtoras de petróleo no mar brasileiro são a bacia de Campos, a bacia do Espírito Santo e a bacia de Santos, que contêm as mais recentes descobertas do pré-sal.

Uma das principais dificuldades encontradas atualmente no ramo da exploração e produção de petróleo é a deposição da parafina ao longo das tubulações e nos equipamentos, tanto naqueles que conduzem o petróleo do reservatório até a superfície como nos dutos que transportam óleo cru (não refinado) entre diferentes instalações industriais, os oleodutos.

Este fenômeno é mais crítico produção de petróleo *offshore*, onde o fluido quente deixa o reservatório e chega ao fundo do mar conduzido por tubulações de aço ainda quente (com temperaturas que variam de 40° a 80°C aproximadamente). Porém ao ser conduzido do fundo do mar até a superfície este fluido fica sujeito a um ambiente mais frio. A temperatura do mar cai com a profundidade, sendo que a partir de 1000 metros de profundidade a mesma torna-se constante por volta de 4°C. A troca térmica entre o óleo quente e o ambiente submarino resulta em perda de calor pelo fluido e conseqüente queda da temperatura.

As parafinas constituem uma fração do petróleo composta basicamente de hidrocarbonetos saturados que se encontram dissolvidos na fase líquida nas condições de reservatório e tornam-se sólidos à temperatura ambiente. O petróleo brasileiro, em geral, contém grandes quantidades de parafina, podendo chegar até 30% em massa em alguns campos. A solubilidade das parafinas diminui com a

temperatura, o que pode levar à sua saída da solução e deposição nas paredes da tubulação onde a temperatura é mais baixa. A precipitação de parafinas no fluido, assim como sua deposição nas paredes, são efeitos que tendem a reduzir a produção de petróleo. Enquanto a precipitação pode levar ao aumento de viscosidade do fluido ou provocar sua gelificação, a deposição nas paredes reduz a área da seção transversal do duto disponível para o escoamento, podendo, em casos extremos, promover o bloqueio total da tubulação.

Com a produção de petróleo avançando cada vez mais para lâminas d'água profundas e ultraprofundas, como no caso dos campos do Pré-Sal brasileiro, a preocupação com este fenômeno, que prejudica diretamente o escoamento da produção, tem aumentado significativamente.

O principal impacto da deposição de parafina reside na diminuição da área da seção transversal da tubulação que pode até mesmo provocar a progressiva obstrução total da tubulação. Isto implica em diminuição da capacidade das tubulações, maior energia para transferência de fluidos, horas de parada de produção para limpeza das linhas, custos com produtos químicos e até substituição das linhas completamente obstruídas. A Figura 1-1 ilustra alguns dos impactos causados pela deposição de parafina.



Figura 1-1 - Exemplos de problemas operacionais em decorrência da deposição de parafina (fonte: PETROBRAS).

Atualmente há técnicas e mecanismos empregados para a remoção de depósitos de parafina, sendo a mais utilizada a passagem periódica de *pigs* nas tubulações. *Pigs* são dispositivos de borracha, matéria plástica ou espuma, inseridos com interferência na tubulação e deslocados pelo próprio escoamento. As forças de contato entre o *pig* e a parede da tubulação são responsáveis pela

remoção dos depósitos de parafina. A circulação de fluido quente e o aquecimento elétrico das linhas são formas também utilizadas de remoção de depósitos, onde o calor é utilizado para fundir a parafina cristalizada promovendo sua remoção. O tratamento conhecido como *soaking* consiste no preenchimento das linhas com solvente para dissolver a parafina, seguido de deslocamento da mesma até a superfície.

Mesmo diante das soluções de remoção existentes, as ações preventivas ainda são preferidas, uma vez que os custos envolvidos nas operações de remoção são muito mais elevados e ainda há o risco de que a remoção não seja eficiente a depender da quantidade de parafina depositada. O custo com remoção aumenta com aumento da lâmina d'água. Por exemplo, quando se passa de uma lâmina d'água de 100 metros para 400 metros, o custo com remoção aumenta cinco vezes³.

A ocorrência de deposição da parafina depende primordialmente de dois fatores: o fluido deve atingir a TIAC (Temperatura Inicial de Aparecimento de Cristais) e deve haver fluxo de calor do fluido quente para o ambiente frio⁴.

A principal ação preventiva para evitar a deposição de parafina ocorre ainda na fase de projeto do sistema de produção. Trata-se basicamente de projetar isolamento térmico adequado para as linhas de produção de modo a impedir que a temperatura do óleo atinja a TIAC em qualquer posição ao longo do escoamento. Porém esta ação muitas das vezes não é suficiente em condições *offshore*, uma vez que as linhas de produção percorrem longos trechos horizontais para interligar a árvore de natal até a base do *riser* estando submetida na maior parte do tempo a temperaturas externas da ordem de 4°C. O *riser* por sua vez conduz a produção de petróleo do fundo mar até a plataforma de produção. O tamanho do *riser* é proporcional à lâmina d'água sendo muitas vezes alvo também de deposição de parafina. Além disso, quanto maiores as distâncias entre a plataforma e o poço produtor de petróleo maior o custo com isolamento. Para os casos onde o isolamento não é capaz de evitar que a temperatura do fluido atinja a TIAC pode se utilizar aquecimento elétrico, entretanto esta é uma tecnologia cara e que demanda grande quantidade de energia elétrica disponível, o que incorre num alto custo de operação para a plataforma. Outra possibilidade é a utilização de tubos *pipe-in-pipe* que apresentam isolamento térmico bastante superior em relação aos convencionais, porém com custo também superior.

Além destas ações, em casos mais críticos, pode-se optar pelo uso de injeção contínua de inibidores químicos. Estes inibidores agem impedindo que os cristais de parafina se aglutinem e depositem nas paredes, permitindo seu fluxo conjunto com o óleo produzido ou transportado. Entretanto esta também é uma estratégia com forte reflexos nos custos operacionais.

Outra linha de pesquisa que vem ganhando importância é a dos revestimentos das superfícies dos tubos. O princípio se baseia no revestimento interno da tubulação com uma superfície que seja repelente à parafina. Vários revestimentos têm sido testados diretamente em campo, assim como há pesquisas de laboratório nesta área, porém esta tecnologia ainda não é completamente conhecida e é vista com ceticismo por alguns especialistas da área. O uso de revestimentos se iniciou com o objetivo de impedir a corrosão dos dutos, área na qual o assunto já é bem conhecido e disseminado. O mesmo conceito tem sido estudado para o combate não só à deposição de parafina, como também contra incrustações inorgânicas e bloqueios por hidratos nas tubulações. Além das pesquisas que tratam de revestimentos comerciais, há ainda a busca por superfícies híbridas que passam a combinar características de dois ou mais materiais diferentes e que apresentam as características antiaderentes combinadas com resistência mecânica e à abrasão.

O presente trabalho tem como objetivo conduzir experimentos de laboratório para avaliar o comportamento de revestimentos comerciais, em diferentes condições de operação, na prevenção da deposição de parafina. O experimento foi projetado para operar com fluidos com propriedades conhecidas e permitir o controle das condições de contorno a serem impostas. Nos capítulos a seguir serão apresentadas a revisão bibliográfica realizada, seguida da metodologia experimental empregada, os resultados obtidos e, finalmente, a conclusão do presente trabalho.