

# 1

## Introdução

A economia mundial ainda depende fortemente da produção de petróleo. Aproximadamente metade das bacias sedimentares que oferecem boas possibilidades de produção de petróleo encontram-se no mar, a grandes distâncias das costas. Hoje as áreas de produção offshore mais ativas são o Golfo do México, Mar do Norte, Mar da China, costa oeste da África e a costa do Brasil. A tendência de produção offshore em águas cada vez mais profundas pode ser avaliada pela evolução dos recordes de produção submarina. Em 1983 o recorde de produção correspondia a uma lâmina de água de 208 metros. Em 2000 a produção havia atingido a marca de 1853 metros [38]. A produção em águas tão profundas exige a utilização de equipamentos especialmente projetados e operações complexas e de custo elevado. Ainda assim, devido aos constantes investimentos realizados no desenvolvimento de tecnologia, o custo de produção do barril de petróleo tem caído constantemente. Por exemplo, na Bacia de Campos na costa do Brasil, o custo do barril de petróleo produzido caiu de US\$ 16,74 em 1989 para US\$ 5,92 em 1997 [38].

Dentre os diversos desafios relacionados com a produção de petróleo em águas profundas, a deposição de parafinas nas paredes internas de linhas de transporte e produção é um dos problemas mais críticos da indústria. O petróleo escoado do reservatório entrando nas linhas de produção a uma temperatura de cerca de 60 – 70°C. Estas linhas carregam o petróleo para as plataformas e das plataformas para as instalações em terra. Em águas profundas, a temperatura da água do mar é da ordem de 5°C. A solubilidade da parafina no óleo é uma função decrescente da temperatura. À medida que o óleo escoado, troca calor com a água do mar. Devido a este fato, hidrocarbonetos pesados precipitam ao longo da linha [52]. O acúmulo do material depositado pode acarretar em aumento da potência de bombeamento requerida, diminuição da vazão, ou mesmo o bloqueio completo da linha com perda de produção e de investimentos. Os depósitos são constituídos principalmente por n-parafinas (alcanos lineares) e pequenas quantidades de parafinas de

cadeia ramificada e compostos aromáticos. A indústria dispõe de métodos tradicionais para a prevenção ou remoção de depósitos de parafina. Estes métodos incluem, entre outros, a utilização de inibidores químicos, aquecimento elétrico ou químico das linhas ou remoção mecânica [42, 17]. O custo de utilização destes métodos cresce significativamente com a profundidade da lâmina d'água, podendo vir a ser um fator de peso na viabilidade econômica de um campo de produção *offshore* [65].

A Figura 1.1 mostra uma fotografia de uma obstrução quase que total de uma linha de um campo localizado na Bacia de Campos.



Figura 1.1: Exemplo de uma Linha Bloqueada por Depósito de Parafina (Cortesia do CENPES/Petrobras).

A deposição de parafina pode ainda produzir outros problemas operacionais. Durante a precipitação o aumento da viscosidade do petróleo faz com que este mude seu comportamento de um fluido Newtoniano para não-Newtoniano [39, 25].

A presença dos cristais de parafina levam a um aumento da viscosidade efetiva do petróleo o que pode vir a requerer energia adicional de bombeamento ou causar a redução da vazão. No caso de uma eventual parada do escoamento por razões operacionais, a geleificação do petróleo causada pela precipitação de cristais, pode causar sérios problemas para o re-início do escoamento.

Um considerável esforço de pesquisa tem sido direcionado para o entendimento e modelagem dos mecanismos básicos responsáveis pela deposição de parafina em dutos. Trata-se de um problema complexo que

envolve diversas disciplinas como equilíbrio e transição de fases, termodinâmica, transferência de calor e de massa e mecânica dos fluidos. A capacidade de realizar previsões acuradas das taxas de deposição de parafina no interior de dutos seria de fundamental importância para auxiliar nas etapas de projetos de produção de novos campos, assim como na programação de intervenções para remoção de depósitos acumulados [43].

Como em qualquer fenômeno físico, a previsão do comportamento depende do conhecimento dos mecanismos básicos que controlam este fenômeno. Quanto melhor for este conhecimento, melhor será a capacidade preditiva do modelo desenvolvido.

Como já foi mencionado, a deposição de parafina no interior de dutos é um fenômeno complexo que envolve várias disciplinas. Aliada a esta complexidade física do problema existem incertezas significativas nas propriedades da mistura óleo-gás (e água) escoando, no regime de escoamento (laminar / turbulento) e no padrão de escoamento multifásico, o que dificulta ainda mais a previsão do fenômeno de deposição. Como poderá ser observado a seguir, existe um significativo número de trabalhos na literatura aberta voltados para o estudo da deposição de parafina em dutos, realizados por pesquisadores acadêmicos ou industriais. Diversos tipos de abordagem são empregadas, desde aquelas enfocando os fenômenos básicos até compilações de dados de campo. A revisão bibliográfica realizada no presente trabalho revelou que apesar do grande número de trabalhos existentes ainda não há uma visão clara de quais são os mecanismos básicos responsáveis pelo processo de deposição da parafina no interior dos dutos. Na verdade, vários dos trabalhos publicados utilizam algum modelo de deposição e procedimentos de ajuste aos dados experimentais disponíveis o que, normalmente, produz previsões com alcance limitado.

No presente trabalho optou-se por realizar estudos numéricos e experimentais básicos que pudessem contribuir para o melhor entendimento dos mecanismos de deposição. Para isso, foram projetados experimentos simples, operando com fluidos com propriedades conhecidas e submetidos a condições de contorno controladas. A metodologia empregada neste estudo contrasta com aquelas empregadas nos estudos que buscam reproduzir em laboratório as condições de campo. Apesar de considerar ambas as metodologias relevantes e complementares, acredita-se que no caso do problema de deposição de parafina em estudo trabalhos baseados no segundo tipo de metodologia tenham prevalecido, o que ajuda a explicar a razão da indefinição dos mecanismos mais relevantes no problema.

No Capítulo 2 é apresentada uma extensa revisão bibliográfica sobre

deposição de parafina em dutos. As conclusões obtidas desta revisão foram fundamentais para determinar o enfoque do trabalho experimental realizado.

Os detalhes construtivos dos experimentos projetados e montados para a realização dos testes são apresentados no Capítulo 3.

No Capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados experimentais obtido, enquanto no Capítulo 5 é apresentado o modelo numérico desenvolvido para a simulação da deposição da parafina em cavidade fechada.

Finalmente, no Capítulo 6, são apresentados as principais conclusões do trabalho, bem como sugestões para trabalhos futuros.