

1 Introdução

Uma grande quantidade do petróleo produzido nas bacias sedimentares brasileira é localizada no mar a grandes distâncias da costa em águas profundas. O petróleo escoou a partir de um reservatório por linhas flexíveis ou rígidas horizontais ou inclinadas até a superfície para ser processado em unidades estacionárias de produção, como ilustrado esquematicamente na Figura 1.1. Durante o trajeto, o petróleo quente proveniente do reservatório perde calor para o ambiente marinho, que se encontra a baixa temperatura. Frequentemente o escoamento ao longo das linhas apresenta mais de uma fase (líquida e gasosa).

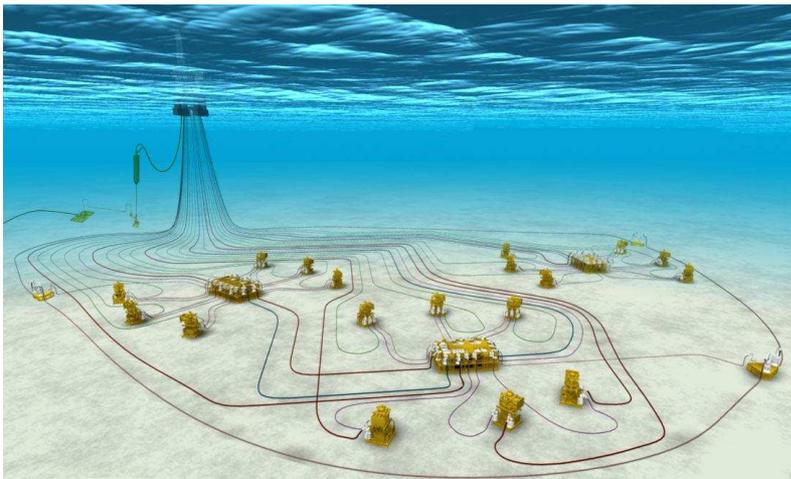


Figura 1.1: Arranjo Submarino para produção de petróleo no mar

O petróleo é formado basicamente por um conjunto de hidrocarbonetos. Estes podem ser compostos orgânicos tão leves quanto o metano ou tão pesados quanto substâncias orgânicas naftênicas e aromáticas formadas por cadeia de carbono acima de C_{17} . Adicionalmente, resinas, asfaltenos e pequenas quantidades de compostos contendo oxigênio, nitrogênio e enxofre também podem estar presentes. No reservatório, a alta pressão (100-500 bar) e altas temperaturas (70-200 °C), os hidrocarbonetos normalmente encontram-se na forma líquida e os compostos parafínicos são mantidos em solução resultando em um fluido de baixa viscosidade e com comportamento newtoniano. Conforme o petróleo é produzido

através das tubulações localizadas no leito marinho, a pressão cai ao longo da tubulação, e a temperatura média do escoamento decresce devido à troca de calor com o ambiente mais frio do fundo do mar e ao efeito Joule-Thomson provocado pela expansão do gás livre devido à queda de pressão no escoamento. Com a diminuição da pressão, o gás dissolvido no petróleo é liberado e o escoamento passa a ser bifásico. Dependendo das velocidades superficiais e da inclinação da tubulação, diferentes padrões de escoamento podem ser encontrados. Adicionalmente, com o decréscimo da temperatura, os hidrocarbonetos constituídos principalmente por parafinas (alcanos lineares de cadeia ramificada) cristalizam-se formando uma fase sólida depositando-se na parede interna das tubulações.

A temperatura do início de cristalização é conhecida como ponto de névoa ou temperatura inicial de cristalização (TIAC). A precipitação dos cristais depende de diversos mecanismos (Burger *et al.*, 1981), sendo uma função complexa do perfil de temperatura, do arranjo de fases e das propriedades dos fluidos. Esses processos não são ainda completamente entendidos e outros efeitos, como o envelhecimento do depósito e propriedades de superfície podem ter influência nas taxas de deposição. À medida que o tempo passa, os cristais precipitados são depositados nas paredes do duto, reduzindo o diâmetro interno e, eventualmente, bloqueiam o sistema. A Figura 1.2 apresenta uma fotografia de um duto obstruído por deposição de parafina. A presença de cristais leva ainda a um aumento da viscosidade efetiva do petróleo, o que pode vir a requerer energia de bombeio adicional, ou causar a redução da vazão e no caso de uma eventual parada, pode causar sérios problemas para o reinício do escoamento. As parafinas depositadas aumentam a rugosidade da tubulação, provocando aumento nas perdas de carga por atrito, restringindo a produção. Logo, a presença dos cristais pode induzir a sérios problemas operacionais, mesmo sem bloquear a tubulação. Todos esses problemas podem resultar em paradas não programadas e condições arriscadas de operação com perdas na produção e possibilidade de danos irreparáveis nos dutos e nos equipamentos a submarinos requerendo o abandono ou substituição.

A compreensão do processo de deposição, assim como capacidade de predição deste fenômeno é de extrema importância para minimizar custos de operação e de segurança das linhas, sendo objeto do presente trabalho de pesquisa.



Figura 1.2: Bloqueio do duto por deposição de parafina. Cortesia do CENPES/Petrobras.

A seguir, uma rápida descrição de escoamentos multifásicos e dos mecanismos de deposição é apresentada.

1.1 Escoamento Multifásico

O escoamento multifásico ocorre quando uma mistura de duas ou mais fases (sólido, líquido ou gás), escoam simultaneamente numa dada geometria. Se somente duas fases (gás e líquido, por exemplo) estiverem presentes, o escoamento é denominado de escoamento bifásico. O escoamento pode ocorrer em diferentes padrões (bolhas, anular, caótico, golfadas, estratificado), os quais encontram-se ilustrados de forma esquemática na Fig. 1.3, para escoamentos horizontais e verticais. Note que o padrão estratificado não existe em escoamentos verticais. A existência de um determinado padrão depende de diversos parâmetros, como diâmetro e inclinação da tubulação, frações volumétricas de líquido e gás, propriedades termodinâmicas e velocidades superficiais das fases.

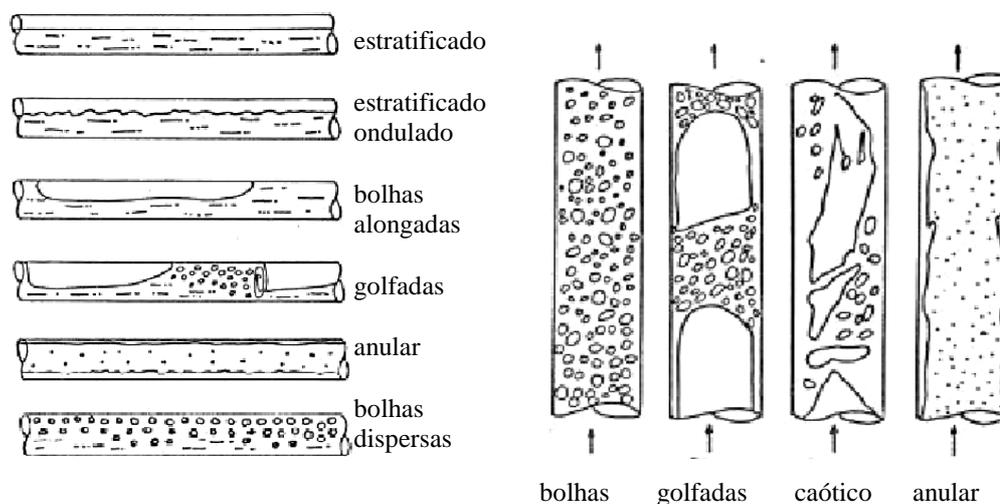


Figura 1.3: Esquema gráfico representativo dos padrões de escoamento

Os padrões de escoamento dependem fortemente das velocidades superficiais de cada fase. A Figura 1.4 apresenta um mapa de arranjo de fases típico para uma tubulação horizontal em função das velocidades superficiais de líquido e de gás. Para altas velocidades do líquido e baixas relações gás/líquido, pode ser observado o fluxo de bolhas dispersas. Para baixas velocidades de líquido e gás temos o padrão de estratificado liso ou ondulado e para velocidade de gás muito alta, ocorre o regime anular.

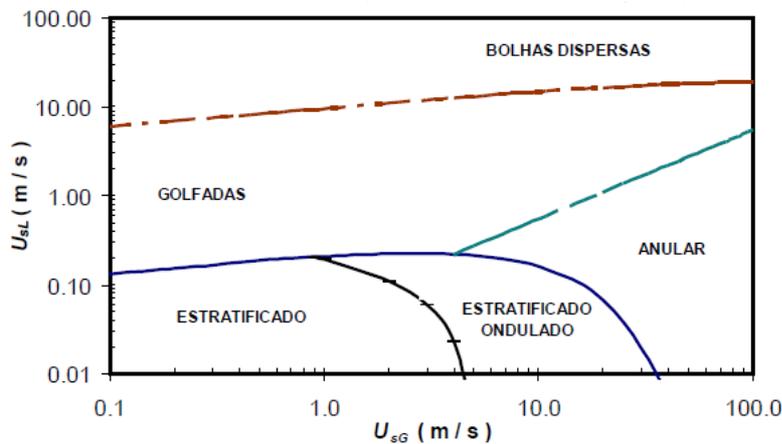


Figura 1.4: Esquema gráfico representativo dos padrões de escoamento.

No caso particular da indústria de extração de petróleo, o escoamento multifásico envolve o transporte de fluidos nas fases líquido (óleo e água) e gasoso, eventualmente apresentando partículas de areia dispersas. O escoamento multifásico se dá desde a coluna do poço até a estação coletora, onde as fases são separadas. Ao longo do caminho entre o poço e a plataforma, as fases podem se arranjar em diversas configurações, passando de um padrão de escoamento para outro, ou seja, pode haver uma sucessão de padrões. Cada padrão tem influência direta sobre parâmetros relevantes na previsão de um escoamento, tais como a perda de carga e a transferência de calor para o meio ambiente.

Para modelar escoamentos bifásicos existem diversas metodologias. Pode-se empregar modelagens detalhadas tridimensionais, com algoritmos de captura da interface, como por exemplo, o método VOF (*Volume of Fluid*), *Level-Set*, Método de Fronteira Imersa (*Immerse Boundary Method*), entre outros. Em geral, estes métodos apresentam alto custo e alta demanda computacional. Uma metodologia alternativa consiste em avaliar grandezas médias na seção transversal, como por exemplo, o Modelo de Dois Fluidos ou o Modelo de

Deslizamento (*Drift*). Estes métodos são mais simples, porém, necessitam de equações empíricas de fechamento. Na indústria do petróleo, quando se deseja investigar o escoamento ao longo de tubulações muito longas, com frequência esta segunda metodologia é empregada, associada ainda com a aproximação unidimensional.

1.2 Mecanismo de Deposição

Um óleo pode possuir uma determinada quantidade de parafina dissolvida na solução. A máxima concentração de parafina dissolvida depende da temperatura, sendo definida pela curva de solubilidade, a qual é função decrescente da temperatura. Quando um óleo escoar em uma tubulação resfriada, ocorre um gradiente de temperatura na seção transversal. Se a parede da tubulação estiver abaixo da temperatura inicial de cristalização (TIAC), como a solubilidade da parafina no óleo é função decrescente da temperatura, o diferencial de temperatura entre o fluido e parede da tubulação produz um gradiente de concentração de parafina na solução. Este gradiente provocará um fluxo de parafina em direção à parede por difusão molecular, cuja taxa de transporte de massa pode ser estimada pela Lei de Fick (Bird et al., 2006). A Figura 1.5 ilustra o processo de deposição por difusão molecular, formada pelo óleo escoando sob condição turbulenta e um filme laminar próxima a parede.

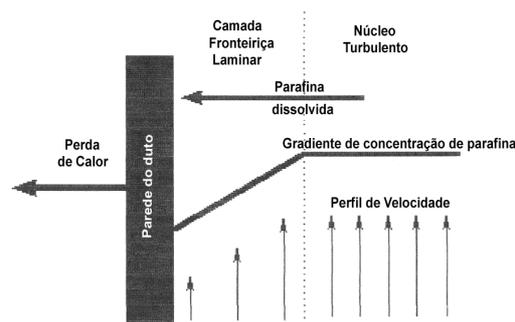


Figura 1.5: Esquema gráfico do processo de difusão molecular

Se a temperatura do óleo com uma determinada concentração de parafina dissolvida for inferior a (TIAC), cristais de parafina saem de solução criando duas fases, uma líquida e outra sólida em equilíbrio termodinâmico. Uma vez fora de solução, estas partículas formadas suspensas no fluido colidem continuamente

com moléculas do fluido termicamente agitado produzindo um movimento randômico dos cristais. Com o surgimento de uma concentração de cristais sólidos haverá um transporte destes cristais devido ao gradiente de concentração de partículas sólidas, induzindo a um depósito. Este mecanismo de deposição é denominado de Difusão Browniana e também pode ser avaliado com a lei de Fick.

A dispersão por cisalhamento é outro possível mecanismo de deposição de parafina, associado ao transporte lateral de partículas sólidas em suspensão. As partículas existentes na região central da tubulação são levadas pelo fluido. Porém, o cisalhamento que ocorre próximo à parede pode induzir a um movimento rotacional das partículas, o qual é responsável pelo transporte da parafina precipitada no seio do fluido para a parede onde se unem aos depósitos já existentes devido à difusão molecular. Naturalmente que a dispersão por cisalhamento não ocorre na ausência de escoamento, ou seja, quando fluido está parado.

Diversos trabalhos experimentais em deposição de parafinas foram feitos sobre as condições de fluxo de calor nulo (Leiroz, 2004; Todi, 2005; Plasencia, 2006). Observou-se a inexistência de depósito nestas experiências, indicando que este mecanismo de deposição é irrelevante.

Uma vez fora de solução, os cristais de parafina poderiam se depositar devido ao efeito gravitacional. No entanto, o mecanismo de deposição gravitacional foi identificado como desprezível por Brown *et al.* (1993) e Leiroz, (2004), entre outros.

Outros mecanismos de deposição encontram-se ilustrados na Fig. 1.6, como apresentado por Merino-Garcia *et al.* (2007): difusão Soret, Termoforesis, Turboforesis, efeito Saffman, remoção por cisalhamento (*sloughing*).

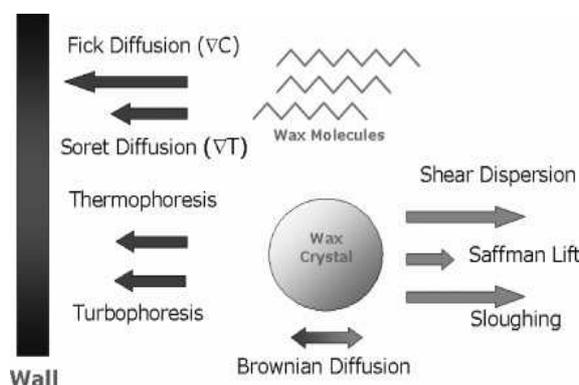


Figura 1.6: Mecanismos de transporte de parafinas. Merino-Garcia *et al.*(2007)

O mecanismo de deposição de Soret consiste no transporte de massa por difusão térmica. O fluxo de massa de parafina é diretamente proporcional ao gradiente de temperatura e ao coeficiente de difusão de Soret. O processo de deposição por Termoforesis também é proporcional ao gradiente de temperatura. É um fenômeno observado em sistemas com a presença de sólido e gás em equilíbrio termodinâmico e em alguns sistemas sólido-líquido. Na presença de diferencial de temperatura os cristais de parafinas presentes no fluido tendem a migrar da região quente para a região mais fria do escoamento. A magnitude e a direção da velocidade das partículas são proporcionais ao gradiente de temperatura.

O mecanismo de deposição de parafina devido a variação do nível de turbulência na seção transversal é chamado de Turboforesis. Este fenômeno tende a segregar as partículas provocando uma distribuição não uniforme na seção transversal do duto. A deposição de parafina por turboforesis ocorre pelo fluxo dos cristais das regiões turbulentas com alta flutuação da velocidade no escoamento para regiões de baixa flutuação de velocidade que no caso de tubulações é próximo a parede.

Outro mecanismo que influencia a deposição quando há partículas fora de solução é chamado de efeito Saffman ou Sustentação. A presença do gradiente de velocidade induz uma distribuição de pressão não uniforme na partícula, fazendo com que surja na partícula uma força perpendicular a direção do escoamento. Este efeito é similar ao da dispersão por cisalhamento em sistemas sólido-gás. Segundo Merino- Garcia (2007) o coeficiente de deposição por efeito Saffman é uma ordem de magnitude acima da dispersão por cisalhamento, sendo portanto mais relevante que este último. Finalmente, a espessura do depósito pode diminuir por remoção por cisalhamento, com o arrancamento da parafina da parede devido às altas taxas de cisalhantes (*sloughing*).

Outro item importante a ser considerado é a difusão que ocorre dentro do depósito de parafina e que provoca o envelhecimento deste sendo relevante para a determinação da composição e porosidade do depósito (Banki *et al*, 2008a).

A grande variedade de mecanismos que influenciam na taxa de deposição da parafina é mais um fator que dificulta este estudo. Apesar de existir controvérsia na literatura com relação aos mecanismos dominantes (Azevedo e Teixeira, 2003), a grande maioria dos trabalhos encontrados na literatura utiliza o mecanismo de

Difusão Molecular para prever a espessura do depósito de parafina, uma vez que este está sempre presente e apresenta uma contribuição significativa.

1.3 Objetivos

Para evitar ou mitigar problemas operacionais causados pela deposição de parafinas e identificar os problemas logo na fase inicial do projeto devemos contar com uma ferramenta para auxiliar no dimensionamento dos equipamentos, avaliar a taxa de deposição e planejar as ações necessárias para evitar o bloqueio da tubulação.

A importância do fenômeno de deposição de parafina e a complexidade na modelagem do mesmo são os grandes motivadores para o desenvolvimento do presente trabalho. Desta forma, o objetivo deste trabalho consiste em avaliar numericamente a taxa de deposição de parafina em escoamento multifásico em dutos com parafina dissolvida no óleo. Tanto escoamentos simples controlados em laboratório em regime de fluxo intermitente, bolhas e estratificado são avaliados, como o escoamento de petróleo com a presença de óleo, água e gás em um poço real é investigado. Em ambos os casos, os resultados das simulações são comparados com dados experimentais.

Para alcançar este objetivo foi necessário adaptar um programa existente para prever escoamento multifásicos uni-dimensional com o Modelo de Deslizamento, denominado TRANSFLUX (Stuckenbruck, 1994), para ser capaz de prever a deposição de parafina utilizando o mecanismo de Difusão Molecular.

1.4 Revisão Bibliográfica

Nesta seção é apresentada uma rápida revisão bibliográfica dos estudos desenvolvidos para modelar a taxa de deposição de parafina em um duto transportando petróleo. Inicialmente será apresentada uma revisão dos modelos de deposição e os estudos desenvolvidos por diversos autores avaliando a influência de cada mecanismo no processo de deposição. Em seguida são apresentadas revisões de trabalhos experimentais e numéricos de modelagem de deposição na presença de escoamento multifásico.

1.4.1 Modelos de Deposição

Diversos autores avaliaram a influência de alguns dos mecanismos descritos anteriormente no perfil do depósito e na taxa de deposição de parafina. O trabalho pioneiro nesta área foi apresentado por Burger *et al* (1981), que investigaram diversos mecanismos e concluíram que o mecanismo de difusão molecular é o mecanismo dominante e que o movimento browniano contribui com a formação de uma pequena camada de parafina. No entanto, Azevedo e Teixeira (2003) apresentaram uma excelente revisão bibliográfica relativa aos diferentes mecanismos de deposição e mostraram que ainda não está claro qual mecanismo é o principal responsável pela deposição e qual a porcentagem de contribuição de cada mecanismo.

Todi e Deo (2004) investigaram experimentalmente o transporte de cristais. Relataram que o mecanismo de termoforesis é de baixa intensidade, que a dispersão por cisalhamento contribui para aglomeração das partículas e que a deposição por difusão browniana influencia na uniformização do depósito nas tubulações.

Leiroz (2004) investigou o fenômeno de deposição utilizando uma experiência simples e controlada e mediu a evolução temporal e espacial do depósito. Concluiu que o efeito gravitacional é irrelevante no processo de deposição. Romero *et al.* (2006) e Minchola *et al* (2007) simularam numericamente o escoamento medido por Leiroz (2004) considerando deposição por difusão molecular. Em ambos os trabalhos, a espessura do depósito concordou bem com os dados experimentais no regime permanente, mas grandes discrepâncias foram observadas durante o transiente, indicando que outros mecanismos devem possuir papel significativo no processo de deposição. Em 2008, Minchola *et al.* simularam novamente o mesmo experimento e concluíram que o mecanismo de difusão browniana não influencia o processo de deposição.

Um estudo experimental conduzido por Bidmus e Mehrotrav (2008) avaliou a contribuição do mecanismo de difusão molecular no processo de deposição, utilizando uma mistura óleo-parafina em regime estacionário. Observaram que a temperatura da interface do depósito permanecia constante, igual à TIAC.

Sugeriram que a aplicação do balanço térmico seria a melhor opção para se determinar a espessura do depósito.

Banki e Firoozabadi (2002) e Banki *et al* (2008b) constataram que a maioria dos modelos utiliza correlações empíricas ou semi-empíricas para determinar as perdas de carga na linha e a temperatura média do escoamento, juntamente com a lei de Fick para descrever o fluxo difusivo de massa. Banki *et al* (2008b) propuseram um modelo numérico para previsão transiente da deposição de cada componente a partir da solução das equações de balanço de quantidade de movimento, energia, balanço das espécies químicas e equilíbrio das fases líquida e sólida. No estudo teórico foi considerado o mecanismo de difusão molecular e de Soret com fluxo convectivo radial aplicado ao modelo composicional. A região sólida é representada como um meio poroso e observaram que a influência da difusão Soret é significativa no cálculo da espessura de deposição. Os resultados simulados foram comparados com dados experimentais, obtendo boa aproximação temporal da deposição para diferentes vazões.

Akbarzadeh e Zougari (2008) empregaram os mecanismos de difusão molecular das partículas, remoção e dispersão por cisalhamento para avaliar a taxa de deposição em um sistema Taylor-Couette, e compararam os resultados numéricos obtidos com dados experimentais. Assumiram escoamento quase permanente, fluido newtoniano e dimensões e distribuições de partículas constantes durante o experimento. Concluíram que o mecanismo de difusão molecular é que mais contribuiu para a formação do depósito.

Guha (2008) apresentou uma revisão dos processos físicos responsáveis pelo transporte e deposição das partículas sólidas. Utilizou uma formulação Lagrangeana, considerando diversas forças atuando nas partículas, visando representar os mecanismos de difusão Browniana, turboforesis, termoforesis, impacto inercial, forças gravitacionais e forças elétricas atuando nas partículas. Afirmou que o mecanismo de termoforesis é muito importante para pequenas partículas mesmo na presença de pequenos gradientes de temperatura.

Huang *et al.* (2009) fizeram um estudo experimental para diferentes condições de vazão, diferenças de temperatura entre fluido e parede, e concentrações de parafina. Os autores procuram relacionar a tensão cisalhante, o gradiente de temperaturas e de concentração de parafina com as propriedades do depósito e com a temperatura de aparecimento dos cristais. Concluíram que a

concentração de parafina no depósito aumenta com o aumento da tensão cisalhante na parede para diferentes tipos de óleo e temperaturas na parede.

Fasano *et al.* (2009) acreditam que a gelificação junto à interface combinada com a difusão molecular são os principais mecanismos de deposição Minchola *et al.* (2010) investigaram a influência do comportamento não newtoniano do óleo para temperaturas abaixo da TIAC, quando uma geleificação do óleo ocorre. Os resultados obtidos mostraram uma melhora na previsão da espessura do depósito durante o regime transiente.

Mehotra e Bhat (2010) investigaram a deposição de parafina em um escoamento turbulento. Avaliaram o envelhecimento do depósito utilizando um modelo viscoplástico.

Hoffmann e Amundsen (2010) realizaram um experimento utilizando uma técnica com laser para investigar o processo de deposição e concluíram que a difusão molecular parece ser o mecanismo dominante e que os efeitos da tensão cisalhante devem ser considerados.

1.4.2 Deposição em Sistema Multifásico

Como apresentado nas seções anteriores, a modelagem da deposição de parafina é muito complexa. Conseqüentemente, os trabalhos encontrados na literatura, relacionados à deposição de parafina na presença de um escoamento multifásico, apresentam comparação dos resultados de modelos teóricos com dados obtidos no campo e analisam a evolução da perda de carga em dutos de petróleo devido à diminuição do diâmetro interno, causado pelos depósitos de parafina.

Rygg *et al* (1998) apresentaram um estudo para previsão da deposição em poços e dutos utilizando o mecanismo de difusão molecular na camada laminar próxima à parede associado ao efeito da dispersão por cisalhamento, assumindo que toda a parafina encontrava-se dissolvida na solução. Correlações empíricas baseadas no padrão de fluxo e do *holdup* líquido foram utilizadas para avaliar a transferência de calor. Apesar dos bons resultados obtidos para várias situações operacionais, comprovando a aplicabilidade e flexibilidade do código utilizado, reconheceram a necessidade de realizar ajustes na avaliação da porosidade e rugosidade do depósito.

Matzain (1999) e Matzain *et al.* (2002) conduziram um estudo experimental para verificação de deposição de parafina em escoamento bifásico para diferentes velocidades superficiais de óleo e gás e apresentaram uma proposta de modelagem matemática baseado no modelo de difusão molecular para prever a espessura do depósito. Segundo Matzain (1999), a difusão molecular pode ser considerada como mecanismo dominante, e o efeito do mecanismo de deposição por dispersão por cisalhamento pode ser desconsiderado. Matzain propôs uma correlação para determinação da porosidade baseada no número de Reynolds, e apresentou ajustes para a condutividade térmica da parafina baseado em dados experimentais. Através do uso de constantes empíricas, o modelo numérico foi ajustado aos dados experimentais apresentando boa concordância. Matzain (1999) fez um levantamento da distribuição da espessura de depósito na seção transversal em função do padrão de escoamento. A Figura 1.7 apresenta um resultado típico obtido, correspondendo a um escoamento horizontal.

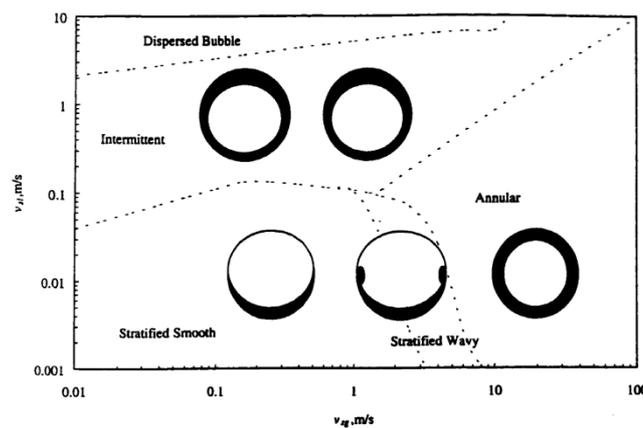


Figura 1.7: Mapa de padrão de escoamento, representando a espessura do depósito de parafina. Matzain (1999).

Lindeloff e Krejbjerg (2002) apresentaram um modelo numérico para calcular a deposição de parafina em escoamento multifásico. Observaram que a composição química do depósito de parafina varia com o tempo e com a distância na tubulação. Verificaram que o peso molecular da parafina no depósito decresce ao longo do duto, indicando que os cristais de parafina mais pesados se depositam no início da tubulação. O diferencial de pressão e as frações de líquido e gás ao longo do duto são resolvidos utilizando um modelo quase-permanente. As transições das fases vapor-líquido e líquido-sólido foram obtidas através de um balanço de energia. Para a estimativa da taxa de deposição foram utilizados os

modelos de difusão molecular e de dispersão por cisalhamento. A composição do fluido e a geometria foram os mesmos utilizados no experimento Rygg *et al.* (1998), e as comparações obtidas foram razoáveis.

Labes-Carrier *et al.* (2002) apresentaram um modelo para previsão de deposição de parafina comparando dados operacionais para dois campos de petróleo. Utilizaram para o estudo o módulo de deposição do OLGA 2000 (Scandpower) e avaliaram as propriedades físicas e termodinâmicas do fluido e seu impacto nos resultados. Concluíram ser muito importante um bom ajuste das propriedades do fluido, composição molar, TIAC e concentração de parafina.

Oliveira (2005) conduziu um estudo experimental para investigação da taxa de deposição de parafina no escoamento bifásico de óleo e água para diversas frações de água, com determinados padrões de fluxo. Concluiu que a água previne a fixação das partículas de parafina na parede do duto, e que a camada de depósito na parede é reduzida pela presença de frações de água na corrente. Posteriormente, Bordalo e Oliveira (2007) reanalisaram os dados e indicaram que a presença de água tinha efeito sensível, afetando tanto a magnitude quanto o padrão da deposição. A presença de água no escoamento de óleo pode conduzir à formação de emulsão estável na corrente, afetando a viscosidade do fluido e suas características reológicas.

Couto *et al.* (2008) investigaram o fenômeno de deposição para diferentes concentrações de óleo e água em uma emulsão. Analisaram as propriedades físicas da mistura como função das frações de água e avaliaram os efeitos do gradiente de temperatura e salinidade. O modelo proposto foi baseado nos modelos de deposição de parafina desenvolvidos para sistema monofásico por Matzain (1996) e Hernandez (2002). Concluíram que a presença de sal não modifica as taxas de deposição e que a presença de água provoca a diminuição da taxa de deposição. Todavia, os autores sugerem a necessidade de um estudo detalhado para os efeitos das características reológicas e propriedades físico-químicas da mistura óleo-água.

Para escoamento multifásico de gás e condensado, Leontaritis (1998) descreveu que os fatores mais importantes para a deposição de parafina são a difusão e aderência na parede. A adesão dos cristais é dominada pela diferença de temperatura entre fluido e parede, sendo a taxa de transporte de massa dependente da vazão, do padrão de escoamento e das propriedades físico-químicas.

Vários programas de computador têm em seus módulos os mecanismos de difusão molecular e dispersão por cisalhamento para previsão da taxa de deposição e estimativa da espessura de depósito de parafina. Segundo Bagatin (2008) podemos encontrar no módulo de cálculo do programa OLGA 2000 (Scandpower) os modelos: *RRR model*, *Heat Analogy model* e *Matzain model*. Todos os modelos utilizam o mecanismo de difusão molecular e dispersão por cisalhamento. Bagatin (2008) comparou os resultados de diversos programas com o modelo proposto por Singh *et al.* (2000). Concluiu em seus estudos, em concordância com os resultados de Labes-Carrier *et al.* (2002), que as previsões de volume de depósito obtidas pelo OLGA 2000 (Scandpower) são inferiores aos volumes reais removido após passagem de *pigs* em oleodutos que escoavam óleo parafínico. Bagatin (2008) também avaliou o modelo proposto por Singh *et al.* (2000) e concluiu que os volumes preditos de parafina depositada, assim como a espessura do depósito foram sub-estimados, necessitando de investigações adicionais.

Benallal *et al.* (2008) utilizaram um modelo baseado na lei de Fick para prever a deposição de parafina em dutos de petróleo, acoplado com modelos para fluidos viscoplásticos para avaliar as propriedades termodinâmicas dos fluidos em escoamento. Definiram vários parâmetros para ajuste dos resultados numéricos com os dados experimentais. No estudo foi demonstrado que a taxa de deposição seria função de fatores reológicos e dos padrões de fluxo. Concluíram que o depósito formado é poroso e dependente do diferencial de temperatura entre o fluido e parede do duto e do tempo de operação.

Recentemente, Zhang (2011) avaliou o impacto da formação de emulsão na taxa de deposição e concluiu que esta diminui com decréscimo do gradiente radial de temperatura e com o aumento da fração de água.

1.5

Organização do Manuscrito

Para avaliar o fenômeno da deposição, implementou-se um algoritmo numérico, baseado no modelo de deslizamento, considerando que o mecanismo de deposição é governado pela difusão molecular.

O módulo para prever a deposição foi implementado no programa TRANSFLUX (Stuckenbruck, 1994) que prevê o escoamento em diversos padrões.

O Capítulo 2 apresenta o modelamento matemático utilizado para a previsão de deposição de parafina em escoamento multifásico. O método numérico é descrito no Capítulo 3.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados de diversas simulações. Inicialmente, compara-se com as medidas experimentais bem controladas obtidas por Matzain (1999) para diferentes padrões de escoamento e inclinações da tubulação.

No Capítulo 5 é apresentada uma análise de um caso real, com comparação com dados de campo.

Finalmente as conclusões do presente trabalho e recomendações de trabalhos futuros encontram-se no Capítulo 6.