

7 Conclusões

O objetivo principal do presente trabalho foi contribuir para a melhoria da capacidade de previsão do fenômeno de deposição de parafina em dutos, com foco no melhor entendimento dos mecanismos que induzem a deposição de parafina, a formação dos depósitos e seu envelhecimento. Desenvolveram-se tanto atividades experimentais quanto de simulação numérica, seguindo-se a filosofia adotada que enfatiza a realização de experimentos simples, permitindo avaliar a importância relativa dos possíveis mecanismos de deposição. Esta estratégia visa a gerar dados de qualidade, a partir de experimentos bem controlados utilizando fluidos de laboratório, que possam ser comparados com as simulações computacionais. Esta metodologia opõe-se àquelas que buscam reproduzir as condições de campo em laboratório, o que pode ser a razão do desconhecimento dos mecanismos mais relevantes.

Para alcançar o objetivo proposto, os experimentos utilizaram uma seção de testes que permitia a visualização e a medição da evolução espacial e temporal de depósitos de parafina formados para diferentes valores do número de Reynolds, abrangendo escoamentos laminares e turbulentos. Numericamente, foi desenvolvido um modelo multicomponente, chamado de entalpia-porosidade, que considera a difusão molecular e o efeito Soret para estimar a quantidade de parafina transportada e depositada ao longo do tempo em escoamento laminar. Tanto a espessura quanto a composição do depósito são determinadas, como uma função do tempo e da posição, através de um modelo termodinâmico acoplado às equações de conservação de massa, de quantidade de movimento linear, de energia e de concentração de espécies que descrevem o escoamento.

Os resultados do modelo entalpia-porosidade mostraram que espessuras maiores são obtidas quando apenas dois pseudocomponentes são considerados, comparado aos casos em que a solução era composta por 12 espécies. Confrontando-se os resultados com dados experimentais, observou-se que as simulações com um número maior de espécies geraram depósitos com espessuras quantitativamente mais próximas às espessuras medidas nos experimentos. Assim, os resultados sugerem que para uma melhor previsão do processo de

deposição de parafina é importante considerar o maior número de componentes possível, apoiando estudos anteriores da literatura.

Atendendo ao principal objetivo do trabalho, em seguida foi testado o efeito Soret como mecanismo de transporte de espécies parafínicas, através da comparação dos resultados. Nenhuma diferença significativa na espessura ou na saturação de sólidos foi encontrada entre os resultados obtidos com os mecanismos combinados e com difusão molecular somente, o que indicou que o efeito Soret não influencia a espessura nem a saturação de sólidos dos depósitos de parafina formados.

De uma maneira geral, obteve-se boa concordância entre os resultados para as espessuras dos depósitos em regime permanente do presente modelo com os resultados do modelo de Minchola (2007) e com os dados experimentais obtidos por Yupa (2010). No regime transiente, no entanto, grandes discrepâncias foram observadas, sendo que os resultados do modelo entalpia-porosidade superestimaram a evolução temporal das espessuras experimentais de depósito.

Desta forma, os resultados do presente trabalho indicam que o mecanismo de difusão molecular parece ser suficiente para prever a espessura dos depósitos após o regime permanente ser alcançado, sendo que outros mecanismos precisam ser avaliados para melhor prever o comportamento transiente da formação do depósito. No trabalho desenvolvido por Minchola (2007), tanto a difusão Browniana como o efeito Soret não se mostraram importantes nos casos testados. No presente estudo, a pouca influência do efeito Soret na taxa de deposição também foi constatada. Observou-se que os depósitos recém-formados são altamente porosos e conseqüentemente frágeis, logo, a remoção por cisalhamento poderia ser incorporada no atual modelo e avaliada como mecanismo para tentar prever com maior precisão os depósitos formados no regime transiente.

Um dos resultados relevantes do presente trabalho foi a determinação da temperatura inicial de aparecimento de cristais, TIAC, a partir do equilíbrio termodinâmico. Modelos como o empregado por Minchola (2007), por exemplo, dependem diretamente da especificação desta variável, que normalmente é fornecida a partir de dados de laboratório apresentando variações apreciáveis, dependendo da metodologia empregada em sua determinação.

Os resultados mostraram que o modelo numérico desenvolvido pode prever a TIAC do sistema com grande precisão. Comparando-se os valores das temperaturas nas quais observa-se numericamente uma saturação de sólido de 2% com os valores de TIAC experimentais medidas pelo método da viscosime-

tria para as soluções de querosene com 20% e 15% de parafina, a diferença percentual encontrada foi inferior a 1%.

Os efeitos da temperatura de resfriamento do canal, assim como do número de Reynolds (e conseqüentemente da taxa de cisalhamento) na espessura e no envelhecimento do depósito também foram investigados com a modelagem desenvolvida no presente trabalho. Os resultados apresentados indicaram que tanto uma maior taxa de cisalhamento quanto uma maior temperatura da parede produzem depósitos menos espessos. Mostrou-se que depósitos mais densos são obtidos para maiores taxas de cisalhamento, isto é, quanto maior o número de Reynolds, maior a saturação de sólido no depósito. Com relação à temperatura da parede fria, os resultados mostraram que a saturação de sólido tende a diminuir na região adjacente à parede para temperaturas maiores, enquanto que na região intermediária do depósito a mesma tende a crescer.

Além da distribuição espacial e temporal da espessura de depósitos de parafina formados sob a condição de escoamento laminar, o modelo multicomponente desenvolvido é capaz de prever o número de carbono crítico (NCC) do sistema, e de determinar o campo de concentração das espécies de hidrocarbonetos presentes na solução como uma função do espaço e do tempo, fornecendo informações relevantes sobre o envelhecimento dos depósitos.

7.1

Sugestões para Trabalhos Futuros

A principal meta do presente estudo foi contribuir para a melhoria da capacidade de previsão do fenômeno de deposição de parafina nas paredes internas de linhas de petróleo, com foco no melhor entendimento dos mecanismos que induzem a deposição, a formação dos depósitos e seu envelhecimento. Para atingir este objetivo, estudos experimentais e numéricos foram conduzidos através da metodologia já consolidada de realização de testes simples de visualização de uma solução de parafina sob escoamento, cujos dados podem ser comparados com os resultados dos modelos numéricos desenvolvidos.

Pertinente ao principal objetivo, o trabalho realizado apontou em especial que o efeito Soret não têm influência sobre a deposição de parafina. Adicionalmente, através das comparações dos dados experimentais com os resultados numéricos, permaneceu evidente que para uma modelagem satisfatória do fenômeno de deposição em regime transiente - sem que fatores de correção sejam utilizados - ainda existe a necessidade de se estudar e considerar outros meca-

nismos físicos. Com o estudo realizado, pôde-se ainda analisar o efeito de importantes condições de operação no processo de deposição. Cumpre ressaltar que o modelo entalpia-porosidade desenvolvido no presente trabalho acrescenta valiosas informações sobre a composição e o envelhecimento dos depósitos.

Tendo isso posto, pode-se enumerar uma série de caminhos futuros de pesquisa, detalhados a seguir, que resultam em melhorias metodológicas para o avanço da pesquisa em questão.

A primeira linha de ação proposta está associada à evolução dos experimentos laboratoriais. Buscando contornar o problema da perda de calor para o ambiente externo pelas paredes inativas da seção de testes retangular, uma nova seção experimental foi projetada, construída, e encontra-se em operação no Laboratório de Engenharia de Fluidos do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio. A nova seção com geometria anular permite um melhor controle das temperaturas interna e externa das fronteiras que limitam o escoamento da solução de testes em escoamento. Espera-se que com esta nova seção de testes, dados experimentais de melhor qualidade sejam produzidos, permitindo uma melhor avaliação da deposição de parafina.

Além dos dados de espessura a serem obtidos na seção anular (os quais poderão ser comparados com os resultados do modelo numérico), a nova seção de testes construída permitirá a retirada de amostras dos depósitos formados. Estas amostras poderão ser caracterizadas por cromatografia gasosa, gerando dados da composição média na direção radial do depósito em uma dada posição axial, ao longo do tempo, os quais poderão ser comparados com os resultados numéricos do modelo entalpia-porosidade.

Além de estudos com faixas de números de Reynolds mais amplas, sugere-se a realização de testes com diferentes temperaturas da parede fria.

Ainda no campo experimental, e de acordo com a filosofia da linha de pesquisa desenvolvida que busca estudar configurações simples, sugere-se a realização de experimentos de deposição utilizando fluidos produzidos em laboratório a partir de misturas binárias ou ternárias de solvente e parafina. A condução de experimentos com fluidos de composição precisamente conhecida permitirá a perfeita caracterização numérica dos mesmos, facilitando a interpretação dos resultados sobre deposição e envelhecimento dos depósitos.

Visando à obtenção de informações relevantes sobre o desprendimento de cristais de parafina a partir do depósito por ação cisalhante, e quiçá o movimento e a agregação de cristais já formados ao depósito, sugere-se a utilização de uma

câmara de vídeo de alta taxa de aquisição de imagens para registrar o processo de formação dos depósitos.

A segunda linha de ação sugerida para trabalhos futuros está relacionada à modelagem e aos aspectos numéricos do programa desenvolvido. Como propostas para a continuação do modelo entalpia-porosidade, sugere-se, em primeiro lugar, o seu aprimoramento com a incorporação de um modelo de turbulência, o que permitirá ampliar o leque de comparações com os dados experimentais para regime turbulento, como aqueles já disponíveis para a seção retangular.

Sugere-se também a adaptação do código existente para resolver as equações de conservação em coordenadas cilíndricas, de forma a comparar os resultados obtidos com aqueles oriundos da nova seção de testes que apresenta geometria anular.

Experimentos de visualização realizados anteriormente por outros pesquisadores da PUC-Rio mostraram claramente que, sob certas condições termodinâmicas, cristais formados em regiões centrais do escoamento contribuem significativamente para a formação do depósito. Por essa razão, sugere-se que mecanismos responsáveis pelo aprisionamento destes cristais sejam investigados e incorporados aos modelos de simulação. Em especial, sugere-se que seja dada continuidade ao trabalho de inclusão de modelos de fluidos não-Newtonianos para melhor representar a geleificação na região adjacente ao depósito, combinando estes modelos com as simulações aqui desenvolvidas.

Recomenda-se avaliar outros efeitos relevantes para a modelagem de um meio poroso, como a sua tortuosidade, além da permeabilidade efetiva função da porosidade considerada atualmente. Desta forma, o modelo se tornaria menos simplificado com relação à suposição do meio pseudo-poroso. Outra recomendação é testar outros modelos para a condutividade térmica efetiva do depósito, como, por exemplo, a teoria do meio efetivo, brevemente comentada no trabalho.

Para uma efetiva investigação do processo de envelhecimento, e para uma boa comparação dos resultados numéricos com futuros dados experimentais de composição de depósitos, entende-se que é essencial que se permita um maior tempo de simulação, de forma a ter os efeitos do envelhecimento do depósito mais pronunciados.

Por fim, é sempre recomendável investir em aprimorar o modelo numérico de forma a aumentar sua precisão, eficiência e robustez. Pode-se implementar esquemas de 2ª ordem para avaliar tanto as integrações temporais como espaciais. Recomenda-se ainda introduzir uma paralelização do código existente, de

forma a aumentar significativamente a malha, mantendo uma velocidade de processamento razoável.