

6 Conclusão

O presente trabalho teve por objetivo analisar o fenômeno de deposição na presença do regime turbulento de escoamento, utilizando o modelo entalpia-porosidade. Para avaliar o desempenho do modelo, comparações foram realizadas com dados experimentais obtidos em uma bancada com geometria simples e bem definida, utilizando fluido com propriedades bem caracterizadas.

Para realizar a análise do escoamento nas mesmas condições que os experimentos são realizados, um modelo de turbulência foi incorporado a um programa baseado no modelo entalpia-porosidade, desenvolvido para coordenadas cartesianas para escoamento no regime laminar. Além da turbulência, no presente trabalho atualizou-se a geometria do domínio, tendo em vista que o experimento foi modificado de sua configuração retangular original para uma nova bancada cujo escoamento ocorre entre um cilindro de acrílico e um tubo de cobre, cuja parede é resfriada.

Para alcançar o objetivo proposto, as equações de conservação foram modificadas. Primeiramente, coordenadas cilíndricas foram introduzidas no programa. O programa foi validado comparando-se com a solução exata de escoamento hidrodinamicamente desenvolvido na ausência do fenômeno de deposição e através da comparação com dados experimentais de deposição obtidos na geometria cilíndrica. A seguir, ocorreu a incorporação de um modelo de turbulência. Para este último, de acordo com a metodologia de média de Reynolds, incorporou-se uma difusão turbulenta adicional nas equações de conservação de quantidade de movimento, energia e de conservação das espécies. A difusão turbulenta adicional foi modelada adotando o modelo de duas equações diferenciais $k-\omega$. Dessa forma, foi necessário introduzir a solução das equações de conservação da energia cinética turbulenta e dissipação específica para determinar o escoamento. Essa metodologia foi validada através da comparação com *software* comercial FLUENT, considerando um caso hipotético no qual, apesar do fluido resfriar, nenhum modelo de deposição foi introduzido e, portanto, nenhum depósito é formado.

A atualização das equações de conservação para a nova geometria ocorreu de forma que as previsões numéricas coincidem com os dados

experimentais e preservam o comportamento já verificado na bancada anterior para o regime laminar. Não só as equações de conservação foram modificadas da forma apropriada para a geometria cilíndrica, como a incorporação da turbulência na modelagem manteve o comportamento da evolução temporal e espacial do depósito, conforme já observado nos experimentos para fluxos em regime laminar.

Para acoplar o modelo de turbulência ao modelo entalpia-porosidade, a modelagem da viscosidade turbulenta dentro do depósito foi abordada de três formas distintas: (1) conforme a recomendação de Pedras e Lemos (2001) para escoamento turbulento em meio poroso, (2) considerando o termo de Darcy relacionado ao meio poroso após realizar a média temporal nas equações originais do modelo e (3) desprezando fenômenos de turbulência na região do depósito conforme Anothe e Lages (1997).

Os dois primeiros modelos são baseados na introdução de uma resistência adicional nas equações das grandezas turbulentas, a qual é dependente da estrutura do depósito. Estes modelos não se mostraram adequados, resultando em perfis análogos do depósito, com topologia irregular, fisicamente inadequada. No terceiro modelo, a turbulência foi desprezada no interior do depósito. Este modelo apresenta a desvantagem de necessitar a definição *a priori* da percentagem de sólido necessária para se considerar a existência do depósito. Porém, resultados fisicamente realistas e com boa concordância com dados experimentais foram obtidos.

Investigou-se a influência do número de Reynolds na evolução temporal e espacial do depósito de parafina. Os principais comportamentos observados com relação à forma do depósito de parafina para regimes de turbulência foram verificados com o modelo proposto tais como a redução da espessura com o aumento da taxa de cisalhamento. Este fato foi corroborado pelo perfil térmico também apresentado. Quando comparados com dados experimentais, contudo, os resultados superestimam o valor da espessura do depósito durante o transiente, mas apresentam uma boa concordância com a espessura do depósito no regime permanente. Os resultados apresentados no Apêndice A2, assim como no trabalho de Souza (2014), mostraram um comportamento análogo para o regime laminar. Pode-se especular que o efeito do cisalhamento do gel de parafina seja um mecanismo relevante que atue no sentido de conter o crescimento do depósito para ser ignorado, conforme sugerem os autores revisitados na Revisão Bibliográfica. Outra possibilidade pode ser a mudança no comportamento reológico do fluido devido à presença de partículas fora de

solução. Minchola *et. al* (2011) mostraram, para escoamentos em regime laminar, que a incorporação de um comportamento não-Newtoniano para o fluido aproxima as previsões numéricas dos dados experimentais.

Outro fator que influencia a previsão do fenômeno de deposição é o modelo de turbulência utilizado. A dissipação específica, que é função da rugosidade da parede onde o escoamento está ocorrendo, assume valores elevados para o depósito. Sendo este uma mistura de sólido e líquido, estimar o valor de rugosidade é um processo complexo, tendo em vista que tal valor somente é tabelado para superfícies sólidas. Além da complexidade, a dissipação específica influencia todo o resultado do modelo: se muito alta, contribui para reduzir a viscosidade turbulenta, subestimando a influência do fenômeno nas equações de transporte.

6.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

O presente trabalho teve por finalidade modelar o fenômeno de deposição de parafina para regimes turbulentos. Para tal, considerou o escoamento livre como sendo turbulento, desprezando, contudo, eventuais fenômenos de turbulência dentro do depósito. Investigar melhor a consistência desta hipótese, considerando inclusive incorporar modelos de escoamento turbulento em meios porosos outros além dos propostos nesta dissertação pode aprimorar ainda mais os resultados obtidos.

O modelo $\kappa-\omega$ selecionado é adequado para baixos números de Reynolds, como os investigados no presente trabalho, e não necessita da especificação *ad-hoc* de leis de parede. Porém, a condição de contorno da dissipação específica depende da rugosidade da superfície. Uma análise de sensibilidade do valor da rugosidade do depósito deve ser conduzida para verificar a sua influência sobre as grandezas investigadas e, em se constatando sua influência, buscar formas mais robustas de se estimá-la. A avaliação do desempenho de outros modelos de turbulência é outro caminho recomendado a ser seguido.

Assim como Souza (2014), observou-se que a constante empírica C que depende da morfologia do depósito, influencia de forma significativa o escoamento. Sugere-se então investigar melhor a constante C . Eventuais formas de se medir diretamente a permeabilidade poderia abolir a dependência deste parâmetro e eliminar fontes de dúvida.

O modelo entalpia-porosidade é baseado em um equilíbrio termodinâmico para identificar quais as espécies saem de solução. Melhorias no modelo termodinâmico para tornar o programa numérico mais robusto também são desejáveis.

Visando aperfeiçoar a modelagem, recomenda-se incorporar ao modelo o mecanismo de cisalhamento do gel de parafina, o qual poderá levar a um achatamento do depósito, culminando com a obtenção de depósitos menos espessos para vazões maiores. Sugere-se ainda considerar um modelo reológico que introduza a influência no escoamento das partículas fora de solução, com um aumento da viscosidade devido à tensão limite de escoamento, a qual pode ser função da concentração das partículas sólidas.

Finalmente, visando tornar o código mais robusto e mais eficiente, recomenda-se a reformulação do código atual, utilizando abordagens orientadas a objeto e a divisão das soluções em bibliotecas específicas, o que contribuirá para facilitar a implementação conjunta de modificações além de conferir manutenibilidade ao programa. Tratamento de exceções e testes modulares destas bibliotecas permitirão o emprego das mesmas para quaisquer melhorias que venham a ser incorporadas posteriormente ao código.