4. Resultados

No presente capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir da visualização do fenômeno de deposição de parafinas sob condições de escoamento laminar. Como observado no Capítulo 2, verificou-se ainda existir dúvidas sobre a dependência do processo de deposição de parafina com as possíveis condições de fluxo de calor (positivo, negativo e nulo). Em particular, sobre o comportamento dos cristais de parafina quando o fluido de trabalho penetra no canal com temperatura inferior à TIAC. Como sugerido por Leiroz [14], o acompanhamento visual com lentes de aproximação do movimento destes cristais pode revelar algum mecanismo de transporte lateral de cristais.

A seção de testes usada, detalhada no Capítulo 3, resultou de algumas modificações feitas no aparato experimental projetado e construído por Leiroz [14]. Assim, foi considerado necessário explicar e justificar as diferentes mudanças realizadas, além de repetir alguns experimentos realizados anteriormente para avaliação do impacto das mudanças introduzidas. Por esta razão, são apresentados primeiramente os dados gerados com a nova configuração do aparato experimental, comparando-os com aqueles obtidos por Leiroz [14].

4.1. Validação dos experimentos

As experiências realizadas no presente trabalho são baseadas na medição e visualização do fenômeno de deposição de parafina. A visualização do crescimento do depósito de parafina ao longo do canal foi realizada com a ajuda de uma câmara digital montada sobre um trilho. Para a obtenção da espessura do depósito, nas diferentes condições de estudo, utilizou-se a mesma técnica apresentada em Leiroz [14]. Esta técnica baseia-se na análise digital de seqüências de imagens em intervalos de tempo fixos. A capacidade de enquadramento da câmara digital, limitada pelas diferentes lentes de aumento usadas, impossibilitava o enquadramento total dos 300 mm de comprimento do canal com as resoluções desejadas. Devido a este fato, o canal era subdividido em uma série de posições sucessivas para a câmera, cobrindo assim todo o comprimento do canal.

Após posicionado o conjunto câmera e lente, era feita uma calibração da imagem utilizando marcações na parede do canal. Esta calibração possibilitava conhecer a dimensão horizontal e vertical de cada imagem, calculando assim o número de posições que a câmera deveria percorrer na direção axial do canal para cobrir toda sua extensão. Em cada posição era registrada uma seqüência de imagens (em intervalos de 1 minuto), com a evolução temporal da camada de depósito, desde a condição inicial sem depósito até o tempo de 10 minutos. A condição inicial era marcada pelo acionamento das válvulas dos banhos termostáticos, que permitiam a circulação de água fria pelas paredes de cobre produzindo o início da deposição. Após o término do registro das imagens, as paredes de cobre eram aquecidas mediante a circulação de água quente proveniente dos banhos termostáticos até que todo o depósito fosse removido. Antes de realizar a seqüência de imagens na posição seguinte, era garantida a condição de regime permanente do escoamento mediante a estabilidade das temperaturas controladas. Após ser estabelecida esta condição, a câmera era deslocada para a posição seguinte para iniciar um novo registro de seqüência de imagens.

Durante o procedimento de registro de imagens para a medição de espessura do depósito em condições de regime permanente, as condições de vazão e temperatura eram ajustadas previamente e o crescimento do depósito acompanhado. O regime permanente era alcançado quando a camada de espessura de equilíbrio. Experiências depósito atingia uma previas determinaram que esta condição estável em que a espessura da camada de parafina depositada não variava com o tempo era atingida em 4 horas. Assim, dada esta condição de equilíbrio, a câmara era movimentada percorrendo todo o canal, posição a posição, registrando as diferentes imagens. A Figura 4.1 mostra um esquema das diferentes posições da câmera nas experiências de visualização e medição da espessura de depósito. Pode ser observado que as medições de espessura da camada são uma justaposição de várias imagens obtidas de replicações distintas do experimento.



Figura 4.1: Esquema das diferentes posições da câmera para cada experiência.

Para o emprego desta metodologia de medição da espessura de depósito, deveria ser garantida a repetibilidade de cada experiência. Isto quer dizer que para as mesmas condições de temperatura e vazão, diferentes testes para uma mesma posição deveriam resultar em espessuras do depósito iguais dentro de uma faixa de incerteza aceitável. Esta repetibilidade garantiria que a medição de espessura de uma determinada posição tivesse concordância com a medição da posição seguinte, formando em conjunto o perfil de espessura de depósito para todo o canal.

Os testes de repetibilidade realizados por Leiroz resultaram em desvios na faixa de ± 5%. Este desvio foi considerado aceitável para as exigências do experimento, considerando-se as incertezas dos instrumentos de medição usados.

4.1.1. Comparação com os Resultados de Leiroz [14]

O presente estudo sobre a deposição de parafina em um canal retangular é uma continuação do trabalho de pesquisa realizado por Leiroz [14]. Com o objetivo de possibilitar diferentes condições de teste foram realizadas algumas mudanças no aparato experimental usado por Leiroz. Uma destas mudanças consistiu em modificar o posicionamento da bomba e do canal no sistema. A disposição da seção antiga consistia na localização do canal imediatamente na saída do tanque de alimentação, antes da bomba. Isto significava que o fluido escoava pelo canal nas condições de baixa pressão da bomba (pressão de sucção). A Figura 4.2 mostra esquematicamente a disposição antiga dos elementos principais que formavam a seção de testes (tanque, canal e bomba).



Figura 4.2: Esquema da disposição do tanque, canal e bomba na seção de testes usada por Leiroz [14].

O novo sistema possui a bomba instalada na saída do tanque de alimentação impulsionando o fluido na direção do canal localizado a jusante. A nova disposição do sistema pode ser observada na Figura 3.1 do capítulo em que foi detalhada a montagem experimental do presente trabalho. Esta nova disposição permite realizar os testes nas condições de pressão de recalque da bomba. Na montagem anterior com o canal ligado à sucção da bomba foi verificada a formação de bolhas de gás devido ao abaixamento da pressão, quando o experimento era operado com as vazões mais elevadas. A mudança efetuada solucionou este problema.

Outra modificação introduzida na seção de testes foi a substituição do canal de entrada de acrílico por outro com comprimento 50 % superior àquele utilizado anteriormente. Este novo canal permitiu uma melhor visualização do escoamento na parte não aquecida do canal. Também foi realizada uma alteração no material da junta de vedação utilizada entre o canal de acrílico e o de cobre. O novo material utilizado, com espessura significativamente inferior àquele utilizado nos ensaios de Leiroz [14], permitiu a obtenção de uma transição suave entre os dois canais, evitando a formação de zonas de recirculação de escoamento que poderiam vir a afetar o perfil do depósito de

parafina naquela região de entrada do canal de cobre. Devido a estas mudanças na seção de testes, novos dados foram gerados para a evolução espacial e temporal da espessura de deposição. Estes dados foram comparados com os dados experimentais obtidos por Leiroz [14].

Como uma verificação do procedimento experimental adotado e da seção de testes construída, Leiroz realizou testes para avaliar a simetria da espessura do depósito obtido. Os resultados deste teste resultaram em camadas simétricas de depósito para as paredes superior e inferior. Isto, além de corroborar com a hipótese que a deposição por gravidade não é um mecanismo de deposição importante em condições de escoamento, evidenciou uma boa simetria dos perfis de temperatura e velocidade com que foram desenvolvidos os testes. Dada a importância deste teste, a simetria do depósito obtido também foi avaliada para esta nova configuração da seção de teste utilizada no presente trabalho.

A Figura 4.3 mostra o resultado do teste de simetria realizado. Levando-se em conta o nível de incertezas esperado para o experimento, pode-se confirmar que as camadas de depósito formadas nas paredes superior e inferior são iguais. Assim como em Leiroz [14], pode ser afirmado, uma vez mais, que os perfis de temperatura e velocidade gerados no canal que influenciam na formação de depósito, também são simétricos.

As Figuras 4.4 a 4.6 apresentam a comparação entre os resultados experimentais obtidos no presente trabalho e aqueles obtidos por Leiroz [14] para a evolução espacial e temporal da espessura de parafina. Nas figuras os valores de número de Reynolds investigados foram, respectivamente, 368, 519 e 863, sendo os testes realizados com as mesmas condições de temperatura de entrada da solução T_e =40°C, e da temperatura das paredes de cobre, T_p =15°C, que aquelas utilizadas por Leiroz [14]. A mesma solução de parafina com óleo spindle foi empregada. Os intervalos de tempo entre cada medição foram de 1 minuto em um total de 10 intervalos de tempo. Adicionalmente, foi medida também a espessura para a condição de regime permanente da deposição. Nas figuras, a espessura do depósito, dada em milímetros, é apresentada em função da coordenada axial do canal, também dada em milímetros. Para evitar uma superposição dos dados experimentais são apresentados somente os perfis de espessura de depósito para os tempos de 1, 5 e 10 minutos, além dos

resultados para regime permanente (4 horas). Os dados de Leiroz [14] são representados por símbolos abertos enquanto os dados do presente trabalho são representados por símbolos cheios.



Figura 4.3: Teste para avaliar da simetria das camadas de depósito nas paredes superior e inferior do canal (Re=863).

Uma análise geral das figuras mostra que a concordância entre os resultados do presente trabalho com aqueles produzidos por Leiroz [14] é satisfatória. Nota-se uma ótima concordância entre os resultados no primeiro terço do comprimento do canal e também para maiores valores do número de Reynolds. Este processo de medição está associado a um nível de incerteza elevado devido à dificuldade em estimar-se a posição da interface sólido-líquido nas imagens digitalizadas. A partir do primeiro terço do canal, nota-se a formação de depósitos de parafina na parede interna do vidro que não representam a verdadeira posição da interface, necessitando de uma interpretação, até certo ponto subjetiva, por parte do observador. O problema de deposição no vidro é minimizado para os maiores valores do número de Reynolds, onde a parede de vidro mantém-se mais aquecida pelo escoamento. A influência da formação de depósitos na parede interna na avaliação da espessura de parafina depositada levou à instalação de jatos de ar aquecido

incidindo na parte externa das paredes de vidro, como será comentado mais adiante. Acredita-se que o nível de concordância obtido com os experimentos de Leiroz [14] seja satisfatório. Além disto, nas situações onde prevalecem discrepâncias maiores entre os dois experimentos, os resultados do presente trabalho parecem mais consistentes fisicamente não apresentando as variações abruptas encontrada em algumas regiões dos experimentos de Leiroz [14]. Credita-se este melhor desempenho à melhoria no procedimento experimental e, principalmente, à melhor qualidade da monitoração das temperaturas do experimento. Com estes dados era possível descartar-se experimentos que apresentassem variações excessivas de temperatura na parede externa de vidro fruto, possivelmente, de alterações na temperatura do laboratório. Diante dos resultados obtidos, a nova seção de testes foi considerada apta para a realização dos testes programados.



Figura 4.4: Comparação dos testes com os realizados por Leiroz para Re=368.



Figura 4.5: Comparação dos testes com os realizados por Leiroz para Re=519.



Figura 4.6: Comparação dos testes com os realizados por Leiroz para Re=863.

Além da finalidade de qualificar a seção de testes construída, os resultados apresentados nas Figuras 4.4 a 4.6 mostram tendências interessantes do processo de deposição de parafina. Verifica-se que existe uma tendência à obtenção de menores espessuras de depósitos para maiores valores do número de Reynolds. Esta tendência está associada às menores espessuras da camada limite térmica formada no canal, o que limita a região onde a temperatura do líquido está abaixo da TIAC. Existe a possibilidade, não comprovada nestes experimentos, que as maiores taxas de cisalhamento associadas aos maiores valores do número de Reynolds.

Os resultados também mostram que elevadas taxas de deposição são geradas no início do resfriamento e que estas vão diminuindo com o transcorrer do tempo até que uma espessura de equilíbrio seja atingida. Pode-se observar nos resultados que os 10 primeiros minutos são responsáveis pela maior parte do material depositado. Por exemplo, a Figura 4.4 mostra que para Re=368 os 10 primeiros minutos de acumulação de depósito são responsáveis por cerca de 50% do valor da espessura final da camada obtida em regime permanente (4 horas).

4.1.2. Comparação dos Testes Realizados Com e Sem o Uso do Sistema de Jatos de Ar

Como já comentado, as imagens obtidas nos experimentos que geraram os dados de crescimento do depósito apresentadas não permitiam observar com clareza a interface sólido-líquido devido à formação de depósito de parafina na superfície de vidro. Para uma melhor visualização do fenômeno de deposição, algumas modificações foram realizadas na seção de testes. Primeiramente, construiu-se um aquecedor de ar para manter o controle da temperatura das paredes de vidro. Este sistema era baseado no escoamento de ar quente em canal formado pela instalação de uma segunda parede de vidro paralela a cada parede do canal. Esperava-se que o ar quente escoando no espaço entre as paredes fosse capaz de manter a parede de vidro do canal em uma temperatura que fosse razoavelmente uniforme na direção axial e, ao mesmo tempo, mantivesse a parede livre dos depósitos de parafina que prejudicavam a observação da deposição no interior do canal. Este arranjo não funcionou como

74

esperado, produzindo variações significativas de temperatura da parede ao longo do comprimento do canal.

Para contornar este problema, foi projetado um sistema de aquecimento da parede de vidro por jatos de ar. Como descrito no capítulo anterior, este sistema consistia em 6 jatos de ar dispostos de cada lado do canal, ao longo do seu comprimento, apontando na linha central das paredes de vidro. Além do sistema de distribuição de ar, o conjunto possuía um soprador de ar e uma caixa de resistências elétricas. O ar, impulsionado pelo soprador e aquecido na caixa de resistências, era distribuído em ambos dos lados do canal apontando ortogonalmente para as paredes de vidro. O desenho deste sistema é apresentado em detalhe no Capítulo 3. A idéia que motivou a utilização deste sistema de aquecimento foi baseado na constatação que sempre há perdas de calor da parede de vidro para o ambiente do laboratório, e que estas perdas afetam a espessura de parafina depositada. Como as perdas são inevitáveis, optou-se por controlá-las, isto é, por produzir um sistema de aquecimento por meio de jatos onde os coeficientes de troca de calor externos à parede de vidro pudessem ser muito bem estimados. Assim, no caso dos jatos empregados, o conhecimento da vazão de ar em cada jato, seu diâmetro, a distância da parede, bem como a temperatura do ar e da parede de vidro, permitiam uma excelente estimativa para o calor perdido pelas paredes de vidro que pode ser usada, por exemplo, em estudos de simulação numérica para fins de comparação com os resultados aqui reportados.

O resultado obtido com este novo sistema de aquecimento por jatos de ar pode ser observado na Figura 4.7 As três imagens foram obtidas para uma mesma posição da câmera em relação ao canal e com as mesmas temperaturas de resfriamento das paredes de cobre.

A primeira imagem, Figura 4.7.a, mostra as paredes superior e inferior de cobre sem depósito, em instantes anteriores ao início do resfriamento, portanto sem deposição de parafina. A imagem da Figura 4.7.b mostra um instante após o início do resfriamento onde podem ser observadas espessas camadas de depósito denso (cor escura) nas paredes superior e inferior. Junto aos depósitos, na direção do centro do canal observam-se regiões de coloração branca intensa correspondente à porção da camada depositada menos densa. Esta região que caracteriza a interface sólido-líquido está sobreposta na imagem

ao depósito de parafina formado na parede do vidro. Esta sobreposição dificulta a determinação da espessura de depósito, como já comentado. Prosseguindo na observação da imagem, verifica-se uma região central do canal onde uma fina camada de parafina depositada no vidro é verificada. No experimento que deu origem a esta imagem não foi utilizado o sistema de aquecimento por jatos.

A imagem apresentada na Figura 4.7.c mostra um teste com o uso do sistema de jatos de ar nas mesmas condições de resfriamento da imagem da Figura 4.7.b. A parte central da parede de vidro, com muita menor quantidade de parafina depositada, é uma indicação do nível de melhoria obtido com a utilização dos jatos. A interface sólido-líquido pode ser agora identificada com maior facilidade, fornecendo assim medições do depósito com menores níveis de incerteza experimental. No entanto, é notória uma diminuição da espessura da camada de depósito de parafina, o que indica uma leve influência do aquecimento do vidro mediante o uso dos de jatos ar. Para caracterizar a influência das perdas de calor introduzidas pelos jatos, foram instalados termopares na superfície externa do vidro. Como foi descrito no Capítulo 3, foram colados nove termopares na linha central das paredes de vidro, na parte exterior do canal. Deste modo o leve aquecimento das paredes de vidro é levado em conta conhecendo-se os perfis de temperatura gerados e influenciados pelo sistema de aquecimento por jatos de ar.



Figura 4.7: Efeito da utilização de aquecimento por jatos na deposição de parafina no interior do canal. (a) Sem deposição de parafina. (b) Depósitos de parafina obtidos sem a utilização de jatos de aquecimento. (c) Depósitos de parafina obtidos com a utilização de jatos de aquecimento.

A Figura 4.8 explica com maior detalhe as observações realizadas nas imagens da Figura 4.7. A Figura 4.8.a mostra a seção transversal do canal com uma camada de depósito obtida sem o uso de aquecimento por jatos de ar,

76

onde é observada uma camada de depósito nas paredes de vidro. Por outro lado, a Figura 4.8.b representa um teste nas mesmas condições de resfriamento, mas com o uso do aquecimento por jatos. Neste esquema também pode ser observada a consistência típica que possui a camada de depósito nas experiências realizadas. Esta é caracterizada por uma textura mais densa na base do depósito junto à parede de cobre e uma mais porosa na superfície.



Figura 4.8: Visão esquemática da seção transversal do canal com depósito gerado para as mesmas condições de resfriamento das paredes de cobre. (a) Formação típica do depósito sem o uso de sistema de jatos por ar. (b) Formação típica do depósito com o uso de sistema de jatos por ar.

A redução da camada depositada de parafina provocada pelos jatos de aquecimento pode causar problemas, caso o aquecimento não seja bem controlado. Valores elevados da temperatura de aquecimento, ou de sua vazão, podem provocar altas taxas de aquecimento localizados na região de estagnação de cada jato, produzindo um efeito indesejável de vales e picos no perfil de espessura do depósito. Para evitar este problema, diversos testes foram realizados até obter-se uma combinação ideal entre os parâmetros que controlam o aquecimento por jatos. A situação ideal era representada por um depósito de espessura uniforme, sem a presença de depósitos na parede e que fosse obtida pelo menor valor possível da temperatura e vazão do jato.

A configuração de aquecimento considerada ideal e utilizada nos experimentos realizados foi formada por um conjunto de 6 jatos incidindo ortogonalmente sobre cada parede lateral de vidro da seção de testes, espaçados de cerca de 50 mm. O diâmetro de cada jato era de 6 mm com um

afastamento do vidro de 24 mm. A vazão mais apropriada foi ajustada em 0,035 m³/min por jato, que era pequena o suficiente para não gerar picos de temperatura na região de incidência do ar provocando deformação do depósito. A temperatura considerada apropriada para a saída do jato foi de T_j=35°C, produzindo uma razoável uniformidade na parede, como será visto adiante nos resultados dos perfis de temperatura resultantes das experiências.

Como uma verificação da nova configuração da seção de testes equipada com os jatos de aquecimento, foram realizados experimentos para avaliar a simetria da espessura do depósito obtido. Leiroz [14] mostrou que os testes realizados sem a utilização do sistema de aquecimento por jatos de ar da parede de vidro geravam camadas simétricas de depósito para as paredes superior e inferior. Para garantir a simetria dos depósitos utilizando jatos de aquecimento foi necessário realizar um cuidadoso posicionamento vertical dos jatos em relação às paredes de cobre.

A Figura 4.9 mostra o resultado do teste de simetria realizado. A cuidadosa distribuição dos jatos gerou distribuições de temperatura homogêneas tanto vertical como horizontalmente, que foram manifestadas em camadas simétricas de depósito.



Figura 4.9: Teste para avaliar da simetria das camadas de depósito nas paredes superior e inferior do canal, com o uso do sistema de jatos de ar (Re=519).

Após de realizado o teste de simetria foi considerado importante repetir as primeiras experiências realizadas, que foram comparadas com os resultados obtidos por Leiroz [14], Estes testes foram realizados para os mesmos números de Reynolds (Re=368, 519 e 863) e nas mesmas condições de temperatura (T_e =40°C, T_p =15°C). As Figuras 4.10 a 4.12 mostram a comparação entre os resultados obtidos sem sistema de jatos de ar e com o uso do mesmo, para tempos de 1, 3, 5, 10 minutos e 4 horas. O eixo das ordenadas representa a espessura do depósito dada em milímetros, enquanto o eixo das abscissas representa o comprimento do canal dado também em milímetros.

Como é observado nas figuras, desde o primeiro até o terceiro minuto não existe grande influência do aquecimento do vidro na espessura da camada de depósito. Isto é mais evidente para os números de Reynolds mais elevados, onde as camadas de depósito formadas são menores. Com o transcorrer do tempo, e com a espessura das camadas mais perto da linha central, a influência do aquecimento do vidro é maior, causando espessuras de depósito levemente menores. A diferença de espessura de depósito é mais notória para a condição de regime permanente (4 horas) devido à sua maior proximidade da linha central do canal onde o aquecimento é mais pronunciado.



Figura 4.10: Comparação dos testes realizados com e sem jatos de ar (Re=368).



Figura 4.11: Comparação dos testes realizados com e sem jatos de ar (Re=519).



Figura 4.12: Comparação dos testes realizados com e sem jatos de ar (Re=863).

A boa concordância entre os resultados obtidos para os primeiros minutos, com e sem o uso do sistema de jatos de ar, garantem um bom desempenho do novo sistema de aquecimento implementado. A homogeneidade e similaridade dos perfis de espessura resultantes com aquecimento do vidro revelam que a vazão e temperatura escolhida para os jatos geram uma condição de contorno homogênea o suficiente, para cobrir a necessidade requerida. A diferença de espessura das camadas é somente uma conseqüência do leve aquecimento das paredes de vidro, e por tanto, de uma nova e melhor controlada condição de contorno estabelecida ao experimento.

As figuras a seguir apresentam resultados típicos dos perfis axiais de temperatura medidos na linha de centro da parede externa de vidro para os três valores dos números de Reynolds estudados. Nas figuras, a temperatura da linha de centro do canal é apresentada como uma função da posição axial dos termopares.

As Figuras 4.13 e 4.14 mostram as temperaturas médias da linha central da parede de vidro, para as experiências realizadas sem e com a utilização de aquecimento por jatos de ar, respectivamente. Observa-se que para os experimentos de deposição de parafina realizados com a utilização do aquecimento das paredes de vidro com jatos de ar, obtém-se um melhor controle da temperatura ao longo da parede de vidro. Os perfis de temperatura gerados podem ser utilizados como condições de contorno para testes dos modelos de simulação desenvolvidos.

Concluí-se também que a utilização dos jatos de ar reduz significativamente a influência gerada pela variação do número de Reynolds na temperatura ao longo da parede de vidro.



Figura 4.13: Temperaturas ao longo do canal, da linha central da parede de vidro para os testes realizados sem o uso de jatos de ar (T_e =40°C, T_{ps} =15°C, T_{pi} =15°C).



Figura 4.14: Temperaturas ao longo do canal, da linha central da parede de vidro para os testes realizados com o uso de jatos de ar (T_e =40°C, T_{ps} =15°C, T_{pi} =15°C).

4.2. Resultados para Deposição com Fluido Estagnado

Após a validação da seção testes e do procedimento experimental utilizados, apresentaremos os resultados obtidos nos experimentos realizados. Iniciaremos a apresentação pelos os resultados obtidos para a deposição sob a condição de fluido estagnado. Nesta investigação a solução de óleo e parafina é mantida sem escoar no canal, sendo as extremidades de saída e entrada fechadas para impedir escoamento para os tanques. O fluido aprisionado no canal era então submetido a um gradiente de temperatura transversal através do aquecimento da parede superior de cobre simultaneamente ao resfriamento da parede inferior de cobre. O gradiente de temperatura assim formado é estável impedindo a formação de correntes de convecção natural. Estes experimentos têm como objetivo fornecer dados para validação de simuladores computacionais do processo de deposição. A utilização da seção de testes do canal com um comprimento de 300 mm é conveniente, pois permite a realização dos testes na região central do canal, longe da influência das paredes laterais verticais que estariam presentes em uma cavidade com razão de aspecto mais próxima de 1.

A visualização do experimento foi realizada com o mesmo procedimento já descrito para as experiências em condições de escoamento. Para obter imagens com a resolução desejada, foi usada uma lente que permitia um aumento de 6 vezes. Este aumento permitia visualizar na mesma imagem as duas paredes de cobre, superior e inferior, importantes como referência para a medição da camada de depósito. A câmera, posicionada no centro do canal e previamente calibrada, registrava uma seqüência de imagens em intervalos de tempo fixos. Estas imagens permitiam a medição da espessura de depósito formado, usando como ferramenta as dimensões de cada pixel obtidas na calibração prévia.

Os experimentos para fluido estagnado foram desenvolvidos aplicando-se uma diferença de temperaturas entre as paredes de cobre. Esta diferença foi obtida mantendo-se a parede superior em uma temperatura fixa igual a 45°C enquanto a parede inferior foi testada para três diferentes níveis de temperatura: 5, 15 e 25°C. Uma experiência prévia realizada com o uso do aquecimento por jatos de ar resultou em depósitos irregulares, mostrando que estes causavam uma influência indesejável nos perfis de espessura esperados na ausência de

escoamento. Foi possível identificar que as regiões da camada de depósito mais afetadas pelos jatos encontravam-se nos pontos de estagnação dos jatos. Porém, outros testes sem o aquecimento do vidro, resultaram em boas condições de visualização com imperceptíveis camadas de depósito nas paredes de vidro, motivo pelo qual decidiu-se realizar os testes sem o aquecimento por jatos de ar.

A Figura 4.15 apresenta imagens típicas obtidas nos testes de visualização da evolução da frente de deposição para fluido estagnado. Originalmente, nos primeiros 10 minutos de teste as imagens foram capturas com intervalo de tempo de 30 segundos. Entre os 10 e 15 minutos de experimento as imagens foram capturas com intervalo de 1 minuto. A partir deste momento foram capturas apenas mais duas imagens, uma para 30 minutos e outra para 150 minutos de teste. As imagens representam tempos de 0, 1, 3 e 10 minutos após o início do resfriamento.





Figura 4.15: Seqüência de imagens registrada nos testes de fluido estagnado com $T_q=45^{\circ}C$ e $T_f=5^{\circ}C$. (a) Paredes de cobre superior e inferior antes de iniciado o resfriamento. (b) Camada de depósito resultante na parede inferior após 1 minuto. (c) Camada de depósito após 3 minutos. (d) Camada de depósito após 10 minutos.

A preparação para o experimento era iniciada com o aquecimento das paredes de cobre na temperatura de 45°C. Estas condições eram mantidas por um tempo considerável para permitir um aquecimento homogêneo do fluido estagnado e conseguir uma estabilidade das temperaturas, que eram controladas pelo sistema de aquisição de dados. O inicio da experiência era marcado pelo resfriamento da parede de cobre inferior mediante a circulação de água fria. O movimento da frente de formação do depósito de parafina pode ser claramente observado nas imagens. Imagens como estas apresentadas na Figura 4.15 foram processadas para produzir informações quantitativas da variação temporal da frente de deposição.

Os resultados das experiências para as três diferentes temperaturas da parede de cobre inferior são apresentados nas Figuras 4.16 e 4.17. A Figura 4.16 mostra a evolução temporal do depósito em toda a experiência, enquanto a Figura 4.17 mostra os mesmos resultados para uma escala de tempo ampliada de modo a tornar mais fácil a interpretação dos resultados. Nas figuras a espessura dada em milímetros, é apresentada em função do tempo decorrido desde o resfriamento da parede inferior, dada em minutos. A figura é composta de três conjuntos de pontos cada um representando um experimento realizado para uma dada diferença de temperatura.



Figura 4.16: Evolução temporal da espessura de depósito para os testes realizados com fluido estagnado para $\Delta T = 40^{\circ} C$, $\Delta T = 30^{\circ} C$ e $\Delta T = 20^{\circ} C$. TIAC igual a 36,6°C.



Figura 4.17: Detalhe dos primeiros 30 minutos da evolução temporal da espessura do depósito dos testes realizados com fluido estagnado.

A Figura 4.17 mostra as elevadas taxas de deposição geradas nos 10 primeiros minutos das experiências. Após este tempo o crescimento de depósito é muito lento, atingindo uma espessura de assintótica de equilíbrio de aproximadamente 8,2 mm para T_f=5°C, 7,3 mm para T_f=15°C e 4,6 mm para T_f=25°C (ver também Figura 4.16). Assim, a maior espessura de depósito resultou do teste com maior diferença de temperaturas entre as paredes ($\Delta T = 40^{\circ}C$), que é o caso do teste em que a temperatura da parede inferior foi de 5°C.

A temperatura externa da seção de testes era controlada por meio de termopares. Sua variação temporal nas experiências é apresentada na Figura 4.18. Estas três curvas correspondem aos valores medidos pelo termopar mais próximo da região central do canal, região onde foram realizadas as experiências. Uma análise da figura mostra que inicialmente os termopares indicam uma temperatura aproximadamente uniforme em torno de 43 °C. Esta temperatura foi obtida mantendo-se as duas paredes de cobre aquecidas e aguardando-se a obtenção da condição de regime permanente. Após esta condição ser atingida no segundo 1000, uma manobra de válvulas fazia com que a água proveniente de um banho termostático já previamente ajustado nas temperaturas estudadas fluísse para o trocador de calor conectado a uma das

placas de cobre. A outra placa era mantida ligada ao banho com temperatura de 45 °C. Os dados da figura mostram a evolução temporal do perfil de temperatura na parede de vidro. O inicio do resfriamento e marcado pela queda brusca da temperatura no segundo 1000. Como pode ser observado cerca de 250 segundos após o início do resfriamento da parede inferior de cobre, o perfil de temperatura atinge um valor praticamente constante.

Como já mencionado, estes resultados obtidos para fluido estagnado constituem-se em excelentes testes para modelos de simulação da deposição. No Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio, Romero [24] apresentou em sua dissertação de Mestrado um trabalho de simulação numérica da deposição de parafina. Como um primeiro teste básico do modelo, a condição sob fluido estagnado pode agora ser avaliada contra os dados obtidos no presente trabalho. Este trabalho de comparação estava sendo realizado no momento da redação deste texto, não estando ainda disponível para apresentação.



Figura 4.18: Evolução dos perfis de temperatura para testes com fluido em cavidade estagnada.

4.3. Resultados para Deposição sob Escoamento Laminar

Apresentaremos agora os principais resultados do presente trabalho, quais sejam, os perfis temporais e espaciais de deposição de parafina em um canal sob condições de escoamento laminar. Em particular, o presente trabalho focou atenção nos casos onde o fluido de trabalho penetrava na seção de testes com temperatura abaixo da TIAC tendo, portanto, cristais de parafina em suspensão. Os resultados obtidos para os depósitos formados são úteis para a verificação da existência de mecanismos de deposição de parafina além daquele por difusão molecular.

Serão apresentados resultados para a deposição sob diferentes condições térmicas impostas ao escoamento. Estas condições são caracterizadas pelo sentido do fluxo de calor através das paredes de cobre. Assim, três condições foram investigadas: fluxo de calor negativo, fluxo de calor nulo e fluxo de calor positivo. No presente trabalho convencionou-se denominar fluxo de calor negativo a situação onde o calor é retirado do fluido através da parede, ou seja, a temperatura da parede encontra-se abaixo da temperatura média de entrada do fluido. Inversamente, no caso de fluxo de calor positivo, a temperatura da parede de cobre encontra-se acima da temperatura do fluido, sendo o calor fornecido para o fluido. No caso de fluxo de calor nulo, a temperatura da parede é igual à temperatura de entrada do fluido. Como será comentado mais adiante, a condição de fluxo de calor nulo é de difícil obtenção no laboratório, podendo gerar flutuações de sinal no fluxo, o que torna difícil a interpretação dos resultados.

A existência ou não de depósitos de parafina sob condições de fluxo de calor nulo ou positivo ainda é assunto controverso na literatura. O presente trabalho visa a contribuir para o esclarecimento deste ponto. Deve ser ressaltado que os resultados a serem apresentados no presente trabalho são os primeiros resultados de perfis espaciais e temporais de deposição de parafina em dutos disponíveis na literatura. Os outros poucos resultados disponíveis apresentam sempre espessuras de depósitos medidas por técnicas globais empregadas sempre após o término dos experimentos, impedindo assim a obtenção de resultados instantâneos, como os aqui apresentados.

4.3.1. Resultados para Espessura de Deposição de Parafina – Fluxo de Calor Negativo

Como mencionado na pequena introdução apresentada anteriormente, serão apresentados aqui resultados para a deposição de parafina sob escoamento laminar e com o fluido entrando no canal com temperatura inferior à *TIAC*, apresentando portanto, cristais em suspensão disponíveis para deposição nas paredes.

A deposição de parafinas na presença de cristais em suspensão no escoamento é ainda uma condição muito pouco estudada pelos pesquisadores. Experiências deste tipo podem contribuir para um melhor entendimento da relevância dos mecanismos considerados responsáveis pelo transporte de cristais. A maior parte dos modelos numéricos encontrados na bibliografia assume a difusão molecular como o mecanismo dominante do fenômeno de deposição de parafinas. Outros mais sofisticados consideram adicionalmente um mecanismo de remoção de depósito por cisalhamento, mas muito poucos consideram a deposição de cristais formados suspensos no escoamento. Como já foi visto na revisão bibliográfica, a evidência experimental que considera a deposição de cristais já formados para condições de baixas taxas de cisalhamento é considerável [5, 9, 29, 31]. Por esta razão que experiências com a solução óleo-parafina entrando no canal com temperaturas abaixo da TIAC, submetida a diferentes fluxos de calor e números de Reynolds, são interessantes. Este novo caso, em que cristais em suspensão acompanham o escoamento, é sem duvida um teste importante para modelos de deposição que contemplem o transporte de cristais em suspensão. A seguir serão apresentados resultados de diferentes experiências realizadas com temperaturas de injeção do fluido abaixo do ponto de névoa, em condições de fluxo de calor negativo, isto é, com temperaturas das paredes do canal menores que a temperatura de injeção do fluido.

Os diferentes testes de validação realizados até agora no presente trabalho foram feitos com resfriamento das duas paredes de cobre (superior e inferior), o que gerava camadas de depósito simétricas. Para as experiências realizadas com temperaturas menores que o ponto de névoa, a presença de cristais no escoamento aumentava a taxa de deposição gerando camadas mais espessas de depósitos. Devido a este fato, optou-se por conduzir os

experimentos resfriando-se apenas a parede de cobre inferior (fluxo de calor negativo), mantendo-se a temperatura da parede superior próxima à temperatura de entrada do fluido (fluxo de calor nulo). Desta forma, evitava-se que os depósitos bloqueassem o canal, impedindo testes a baixas temperaturas.

Todas as experiências desenvolvidas com cristais suspensos no escoamento foram realizadas com o sistema de aquecimento por jatos de ar operando nas condições mencionadas anteriormente. Os valores do número de Reynolds utilizados nos testes foram de 151, 213 e 354. Foi verificado que, ainda que trabalhando com as mesmas vazões volumétricas da bomba utilizadas nos testes de validação, a significativa variação da viscosidade da solução devida à presença de cristais e aumento de viscosidade do óleo, gerou uma diminuição importante no valor do numero de Reynolds calculado. Em todos os experimentos com fluxo de calor negativo foram utilizadas as mesmas condições de temperatura de injeção da solução óleo-parafina, Te=34°C, e mesma temperatura da parede superior, T_{ps}=35°C. Três diferentes condições de temperatura da parede inferior foram testadas para cada um dos números de Reynolds investigados, T_{pi}=29, 19 e 9°C. Como a temperatura das paredes de vidro influenciam na espessura do depósito e são controladas pelo sistema de aquecimento por jatos utilizado, para cada teste realizado foram monitoradas e apresentadas as temperaturas da parede de vidro. Assim, o fluxo de calor perdido pela parede pode ser avaliado por um futuro usuário dos resultados aqui apresentados.

A condição de fluxo de calor negativo mencionada é obtida pela diferença imposta entre a temperatura de fluido e a temperatura da parede inferior. Por outro lado, a condição de fluxo de calor nulo entre o fluido e a parede superior foi aproximada com a temperatura da solução óleo-parafina mantida na faixa de $T_e = 34 \pm 0,3^{\circ}C$ e da parede superior mantida na faixa $T_{ps} = 35 \pm 0,3^{\circ}C$. Estas faixas de temperatura consideram as incertezas dos instrumentos de medição, além das possíveis oscilações das temperaturas de teste devido à influência do ambiente externo. A mínima diferença possível entre estas duas temperaturas resulta ser de 0,4°C, sendo mais que evidente que esta condição de calor nulo é na verdade, por vezes, uma condição de fluxo de calor positivo. Esta diferença de 0,4°C foi utilizada para evitar que as oscilações da temperatura gerassem fluxos de calor negativos, condição de contorno que, como é conhecido, sempre gera deposição de parafina.

Os primeiros resultados da espessura do depósito apresentados na Figura 4.19 foram obtidos para a condição de regime permanente, para valores do número de Reynolds de 151, 213 e 354 e temperatura da parede inferior, T_p =29°C. A diferença de temperatura entre a parede inferior e a temperatura de injeção da solução é de 5 °C. Este foi o menor ΔT usado nas experiências, gerando as camadas de depósito menos espessas. A TIAC para a mistura utilizada era de 36,6°C. O depósito dado na forma dimensional em milímetros é apresentado em função da coordenada axial do canal também dada em milímetros. Como era esperado, o maior número de Reynolds gerou camadas de depósito menos observado nos testes realizados com temperaturas de injeção da solução acima da TIAC.

Resultados típicos dos perfis de temperatura nas faces externas das paredes de vidro medidos para estes experimentos, são mostradas na Figura 4.20. Nesta figura, a temperatura da linha de centro da parede é apresentada como função da posição axial dos termopares. Como pode ser observado, a temperatura da parede de vidro é praticamente constante e igual a 34,5°C. Esta distribuição homogênea da temperatura, quase constante para os diferentes números de Reynolds testados, confirma que o uso do aquecimento por jatos de ar gera uma condição de contorno homogênea. É importante mencionar que sem o uso do sistema de aquecimento por jatos de ar, o problema de deposição de parafina nas paredes de vidro mostrado nas Figuras 4.7 e 4.8, geraria sem dúvida problemas mais críticos nestas experiências realizadas na presença de cristais, causando muitas dificuldades na visualização e na medição do depósito.



Figura 4.19: Comparação da espessura do deposito em regime permanente (4 horas) para diferentes números de Reynolds ($\Delta T = 5^{\circ} C$).



Figura 4.20: Temperaturas na linha central da parede de vidro para os testes realizados na presença de cristais em suspensão (T_e =34°C, T_{ps} =35°C, T_{pi} =29°C).

Continuando com a seqüência de experiências programada, foram realizados novos testes desta vez com a temperatura da parede inferior T_{pi}=19°C. Aqui foram obtidos os perfis espaciais e temporais de deposição para os mesmos números de Reynolds de 151, 213 e 354. As Figuras 4.21 a 4.23 mostram a evolução espacial e temporal da espessura de depósito de parafina para os tempos de 1, 3, 5, 10 e 150 minutos. O depósito, dado em milímetros, é apresentado em função da coordenada axial do canal também dada em milímetros. Nos experimentos reportados nas Figuras 4.21 a 4.23 não foi possível atingir o regime permanente devido a dificuldades na visualização da camada de parafina depositada. A diferença de temperaturas entre o fluido e a parede inferior de cobre ($\Delta T = 15^{\circ}C$) somado ao incremento potencial da deposição devido à presença de cristais, geraram camadas de depósito nas paredes de vidro mesmo com o uso do aquecimento por jatos de ar. Assim, a interface sólido-líquido somente foi possível de ser identificada até o minuto 150, tempo no qual foi obtido o último perfil de espessura do depósito. Assim como nos testes de validação com temperaturas acima da TIAC, aqui as taxas de deposição foram elevadas nos primeiros minutos, diminuindo com o transcorrer do tempo.

Uma característica do perfil de espessura de depósito medida, também notória nos testes de validação, é evidente na região de entrada do canal para os primeiros minutos da experiência. Pode ser visto nas Figuras 4.21 a 4.23 que o perfil gerado no primeiro minuto apresenta uma espessura levemente maior na entrada, que diminui e novamente aumenta na região a jusante do canal. Esta morfologia característica da espessura na entrada do canal vai desaparecendo com o transcorrer do tempo. Na experiência com a menor vazão (Re=151) e em conseqüência menor taxa de cisalhamento, esta característica é mais clara (ver Figura 4.21). Por outro lado, na Figura 4.23, para taxas de cisalhamento maiores (Re=354), este comportamento é desprezível.



Figura 4.21 - Evolução temporal e espacial da espessura do depósito na presença de cristais com o uso do sistema de jatos ($\Delta T = 15^{\circ}C$). Re=151.



Figura 4.22: Evolução temporal e espacial da espessura do depósito na presença de cristais com o uso do sistema de jatos ($\Delta T = 15^{\circ}C$). Re=213.



Figura 4.23: Evolução temporal e espacial da espessura do depósito na presença de cristais com o uso do sistema de jatos ($\Delta T = 15^{\circ}C$). Re=354.

A Figura 4.24 mostra a taxa de crescimento do depósito para um ponto fixo na região central do canal e para os dez primeiros minutos dos experimentos. Este gráfico compara os três testes mostrando que são geradas menores taxas de crescimento do depósito na medida que o número de Reynolds aumenta.

A distribuição de temperatura na linha central das paredes de vidro é apresentada na Figura 4.25. Estes valores encontram-se próximos de 33,5°C, mostrando um comportamento quase uniforme ao longo do canal. Pode também ser percebida que a variação do número de Reynolds afeta muito pouco a temperatura local medida por cada um dos termopares.



Figura 4.24: Taxa de crescimento de depósito para os 10 primeiros minutos dos testes realizados com cristais em suspensão ($\Delta T = 15^{\circ}C$).



Figura 4.25: Temperaturas na linha central da parede de vidro para os testes realizados na presença de cristais em suspensão (T_e =34°C, T_{ps} =35°C, T_{pi} =19°C).

Os resultados a serem apresentados do próximo teste realizado correspondem a uma diferença de temperatura entre o fluido e a parede de 25°C. Por esta razão, o problema da deposição de parafina no vidro agravou-se permitindo que os testes fossem conduzidos até um tempo máximo de 80 minutos, tempo ainda distante daquele esperado para a obtenção do regime permanente. A partir deste tempo, as observações da deposição por meio da câmera tornavam-se impossíveis. Para estes testes, a temperatura da parede inferior de cobre foi mantida em T_{pi}=9°C. As condições de temperatura mencionadas geram a condição mais crítica de deposição estudada. Esta maior diferença de temperatura entre o fluido e a parede inferior ($\Delta T = 25^{\circ}C$) gera o maior fluxo negativo das experiências realizadas na presença de cristais em suspensão, resultando em camadas de depósito mais espessas.

As Figuras 4.26 a 4.28 mostram os resultados da evolução temporal dos perfis de espessura medidos. Os dados apresentados nestas figuras apresentam comportamento da espessura de depósito semelhante àquele já comentado para o caso das Figuras 4.21 a 4.23. Ressalte-se que aqui é mais notória a maior espessura característica observada na entrada do canal nos primeiros minutos. Isto pode ser devido ao aumento das taxas de deposição geradas pela significativa diferença de temperaturas entre o fluido e a parede fria. Esta morfologia característica do depósito, mais notória para Re=151 (Figura 4.23), também vai desaparecendo com o passar do tempo. As elevadas taxas de deposição podem ser observadas na Figura 4.29. Aqui é apresentada novamente a evolução da espessura das três experiências juntas, para os dez primeiros minutos e para um ponto fixo na região central do canal. É observado que maiores números de Reynolds, geram menores taxas de deposição. Este fato, já observado para o caso da temperatura de entrada da mistura acima da TIAC, é mais uma vez verificado para o caso onde há presença abundante de cristais em suspensão. Caso um mecanismo baseado no cisalhamento fosse relevante, os experimentos com maiores valores de número de Reynolds e, portanto, apresentando maiores taxas de cisalhamento, poderiam revelar maiores espessuras de depósito. Este não foi o caso, indicando que a dispersão por cisalhamento não deve ser um fator relevante na deposição. Deve ser lembrando, no entanto que a dispersão por cisalhamento pode ser responsável por formar gradientes de concentração de cristais em regiões próximas à parede, requisito necessário para a ativação do mecanismo de deposição por

difusão Browniana. Voltaremos a este assunto mais adiante quando comentarmos o trabalho de Todi [29].

A distribuição de temperatura na linha central das paredes de vidro pare estes testes é apresentada na Figura 4.30. Estes valores apresentam uma leve variação com uma média de aproximadamente 32°C, apresentando uma maior dispersão que nos casos anteriores. Assim, pode-se concluir que a dispersão da temperatura da linha central das paredes de vidro é influenciada principalmente pela diferença de temperaturas entre o fluido e a parede fria (parede inferior). Aqui foi notada uma maior variação da temperatura medida por cada termopar para os diferentes números de Reynolds. No entanto, o sistema de aquecimento por jatos de ar implementado para a realização de estes testes, foi de muita ajuda na realização destas experiências na presença de cristais suspensos no escoamento. O leve aquecimento por ele gerado permitiu registrar a evolução da camada de espessura do depósito nestas difíceis condições de experimento.



Figura 4.26: Evolução temporal e espacial da espessura do depósito na presença de cristais com o uso do sistema de jatos ($\Delta T = 25^{\circ} C$). Re=151.



Figura 4.27: Evolução temporal e espacial da espessura do depósito na presença de cristais com o uso do sistema de jatos ($\Delta T = 25^{\circ}C$). Re=213.



Figura 4.28: Evolução temporal e espacial da espessura do depósito na presença de cristais com o uso do sistema de jatos ($\Delta T = 25^{\circ} C$). Re=354.



Figura 4.29: Taxa de crescimento de depósito para os 10 primeiros minutos dos testes realizados com cristais em suspensão ($\Delta T = 25^{\circ}C$).



Figura 4.30: Temperaturas na linha central da parede de vidro para os testes realizados na presença de cristais em suspensão (T_e =34°C, T_{ps} =35°C, T_{pi} =9°C).

Um teste especial realizado até o regime permanente (4 horas) feito para a condição mais crítica, representada pelo menor número de Reynolds (Re=151) e a maior diferença de temperatura entre o fluido e a parede inferior, $\Delta T = 25^{\circ}C$, mostrou que o canal não era bloqueado pela parafina. A espessura de equilíbrio foi atingida em um máximo de aproximadamente 6 milímetros, evidenciando de algum modo que o aumento das taxas de cisalhamento devido ao bloqueio parcial do canal não permitiram camadas de depósito mais espessas.

Na análise dos resultados obtidos, ainda não foram mencionadas as características da camada de parafina depositada. Como foi dito no procedimento experimental, nos testes na presença de cristais em suspensão, eram mantidas as duas paredes de cobre a 35°C. A temperatura de injeção da solução era mantida em 34°C até que a condição de regime permanente fosse atingida. Após alcançada essa condição, o resfriamento era iniciado circulando água fria somente pela parede inferior iniciando assim a deposição de material. Após o término da experiência, era circulada pela parede inferior água a 35°C com a finalidade de remover a parafina depositada. Inicialmente, foi planejado aumentar a temperatura do banho de 35°C para 40°C (acima da TIAC) para conseguir derreter a parafina depositada e iniciar um novo teste. Porém, contrariamente ao esperado, a temperatura de aquecimento da parede de 35°C (menor que a TIAC), ocasionava que a parafina em contato com a parede fosse fragilisada causando a remoção do depósito pelo escoamento, desde sua base junto à parede de cobre. A remoção do depósito com a temperatura de aquecimento de 35°C (menor que a TIAC), aconteceu em todas as experiências realizadas na presença de cristais em suspensão. No entanto, os depósitos produzidos com os maiores números de Reynolds demoravam mais tempo para serem removidos, sendo um indicativo de que maiores vazões e em conseqüência maiores taxas de cisalhamento, geram depósitos mais resistentes e densos.

A densidade do depósito é outra característica particular. Os depósitos mostraram sempre uma parte espessa, mais densa próxima à parede fria, e outra mais porosa na interface. A Figura 4.7.c mostra as camadas de depósito com uma região espessa e mais densa de cor escura perto da parede, e com a superfície mais clara e porosa. Esta imagem confirma esta característica mencionada.

4.3.2. Resultados sobre a Observação da Movimentação de Cristais de Parafina

Ao longo dos experimentos realizados para a condição de fluxo de calor negativo foi possível visualizar a movimentação de cristais escoando e depositando. Com o aumento de 11x usado naqueles experimentos, visualizouse uma concentração maior de cristais perto da parede, mais visível nos primeiros instantes após o início do resfriamento. Devido a este fato, decidiu-se realizar experimentos adicionais de visualização com uma lente de maior aumento, tentando identificar os cristais formados depositando na parede fria. Assim, utilizou-se uma lente com aumento de 45x que, além de conseguir a resolução desejada, proporcionava o enquadramento de um campo visual suficiente.

A grande concentração de cristais suspensos junto da parede de cobre observada com o aumento de 11x, era gerada imediatamente depois de iniciado o resfriamento. Esta região apresentava uma concentração de cristais muito maior que a parte central do canal que se encontrava com uma temperatura mais elevada, porém ainda menor que a TIAC. A densa camada de cristais suspensos mostrava uma morfologia característica, fina na entrada e espessa na região de saída do canal. Aparentemente, esta camada de alta concentração de cristais era formada devido ao resfriamento brusco, podendo ser da ordem de grandeza da camada limite térmica, gerada pela influência da temperatura da parede fria. Ao mesmo tempo, formava-se na parede uma fina camada de depósito que crescia continuamente, em condições similares ao fenômeno de formação de depósito sob a condição de fluido estagnado. A região de maior concentração de cristais suspensos escoando junto da parede, apresentava um pico de concentração quase imediatamente depois de iniciado o resfriamento. Com o passar do tempo, a camada crescente de depósito que se formava na parede atuava como um isolante térmico diminuindo a troca de calor com a parede, e em consegüência tornando menos densa a região de maior concentração de cristais. A Figura 4.31 dá uma idéia da morfologia da camada de concentração de cristais visualizada nos primeiros segundos do resfriamento. Aqui também são mostradas as posições da câmera em que foram obtidas as imagens das visualizações que serão mostradas mais para frente.



Figura 4.31: Região de concentração de cristais perto da parede nos primeiros segundos depois de iniciado o resfriamento.

As visualizações detalhadas foram observadas em todas as experiências feitas com cristais em suspensão para condições de fluxo de calor negativo. As diferentes temperaturas da parede de cobre e o número de Reynolds do escoamento influenciavam na espessura e densidade de partículas desta região de maior concentração de cristais. Assim, maiores números de Reynolds assim como menores gradientes de temperatura entre o fluido e a parede, contribuíam a diminuir a espessura da camada mencionada.

O primeiro teste de visualização da movimentação de cristais suspensos, foi o realizado nas condições de deposição mais críticas estudadas (Re=151 e T_{pi}=9°C), com posições da câmera na entrada e saída do canal e para um aumento de 45x. Este número de Reynolds representa os testes com as menores taxas de cisalhamento, enquanto a temperatura da parede fria de 9°C correspondia ao maior ΔT estudado. Para a região de entrada do canal, esta experiência de visualização revelou um crescimento homogêneo da espessura do depósito similar ao observado em condições de fluido estagnado. Nesta posição foi observada uma fina camada, que apresentava uma maior densidade de cristais suspensos, escoando junto ao depósito. A Figura 4.32 mostra uma seqüência de imagens do teste de visualização com tempos de 2 segundos entre cada uma das elas. A imagem (a) mostra a parede inferior do canal sem depósito antes do resfriamento. A imagem (b), mostra a fina camada de depósito formando-se no inicio do resfriamento. Pode-se observar que esta camada cresce com uma taxa aparentemente constante até a imagem (h). Para uma rápida identificação da superfície do depósito, as imagens foram marcadas com

um ponto cor laranja que mostra a espessura da camada para cada instante de tempo.



(a)



(b)



(C)

(d)



(e)





Figura 4.32: Seqüência de imagens obtidas na entrada do canal, mostrando a evolução temporal do depósito para o teste com T_e=34°C, T_pi=9°C e Re=151. Aumento utilizado 45x.

A deposição de parafina na região de saída do canal aconteceu mais bruscamente nos primeiros segundos do resfriamento. Como foi dito, uma espessa camada de concentração de cristais junto à parede foi observada ao mesmo tempo em que uma fina camada de depósito era formada. A Figura 4.33 mostra a seqüência de imagens para a região de saída do canal para intervalos de tempo de 2 segundos. A imagem (a), sem depósito, mostra instantes anteriores ao resfriamento. A imagem (b) marca o inicio do resfriamento mostrando uma fina camada de depósito crescente. Dois segundos depois na imagem (c), pode ser observada a mencionada espessa camada de concentração de cristais escoando junto da ainda fina camada de depósito. Como pode ser visto na imagem (d), estes cristais que vêm da região a montante do canal, são depositados rapidamente na parede aumentado subitamente a espessura do depósito. Foi visualizado que a camada de cristais concentrados que ocasionaram o aumento acelerado da espessura do depósito, vai diminuindo sua espessura e concentração com o passar do tempo. Assim, a deposição de cristais precipitados que foi mais visível no instante de produção do pico de concentração de cristais, também vai diminuindo até voltar para as condições de deposição similares às geradas na região de entrada do canal. As imagens mostram que a súbita deposição de cristais suspensos gerou uma superfície irregular do depósito (Imagens (f), (g) e (h)) que vai sendo homogeneizada com o passar do tempo e com a estabilização das taxas de deposição.

É difícil definir o mecanismo de deposição responsável pela deposição de cristais suspensos observado neste teste de visualização. O fato que esta deposição é mais visível quando é gerado o pico de concentração de cristais, não quer dizer que somente aconteça para essas condições. Assim, esta deposição de cristais poderia ter acontecido em menor escala também na região de entrada, sendo imperceptível para os instrumentos de visualização utilizados. Porém, a deposição de cristais já formados na parede fria foi evidente, embora seja difícil definir o mecanismo de deposição responsável e as condições de deposição requeridas.

As limitações dos instrumentos de visualização usados na experiência, não permitiram identificar a procedência dos cristais escoando junto da parede. Uma câmara de alta velocidade com lentes de aumento maiores, poderiam ter sido de muita ajuda para o seguimento da movimentação dos cristais de

105

parafina suspensos no escoamento. Não foi possível identificar se a elevada concentração de cristais junto da parede, produzida nos segundos iniciais e possivelmente causada pelo resfriamento brusco, continha também cristais removidos do depósito a montante do canal.



Figura 4.33: Seqüência de imagens obtidas na saída do canal, mostrando a evolução temporal do depósito para o teste com $T_e=34$ °C, $T_{pi}=9$ °C e Re=151. Aumento utilizado 45x.

Depois de feita a experiência de visualização para as condições mais críticas de deposição com as mais baixas taxas de cisalhamento (Re=151), foi considerado importante a realização de uma experiência similar para o maior número de Reynolds possível permitido pela seção de testes (Re=354). Esta nova experiência foi realizada com as mesmas condições de temperatura da anterior e a mesma temperatura de resfriamento da parede de cobre. Assim, poderia ser estudada a influência da taxa de cisalhamento no fenômeno de deposição de cristais formados.

O primeiro registro de imagens para este teste foi obtido na região de entrada do canal. Este mostrou um comportamento de crescimento do depósito igual ao observado na mesma posição do teste anterior, para a menor taxa de cisalhamento. A única diferença observada foi referida à velocidade de crescimento do depósito. Neste novo teste a camada de depósito crescia com uma menor taxa de deposição. A Figura 4.34 mostra a seqüência de imagens para este teste com as mesmas características de deposição mostradas pelo teste para Re=151 registrado na região de entrada do canal. A imagem (a) mostra a parede de cobre sem depósito, entanto a imagem (b) marca o inicio da deposição mostrando uma fina camada de parafina que vai crescendo nas imagens subseqüentes. Os intervalos de tempo entre estas imagens foram também de 2 segundos.

Com o posicionamento da câmera na região de saída do canal, foram registradas as seqüências de imagens da Figura 4.35, também para intervalos de tempo de 2 segundos. Nesta posição também foi observada a camada de concentração de cristais visualizada nas experiências para Re=151. Esta mostrava uma aparentemente menor concentração e espessura possivelmente causada pela maior velocidade do fluido que resultava em menores espessuras da camada limite térmica. Nesta experiência a taxa de deposição de cristais formados foi menor. Assim, a deposição de cristais formados é pouco perceptível nas imagens mostradas. Este resultado evidencia que o aumento da taxa de cisalhamento influencia no fenômeno de deposição evitando que cristais formados sejam depositados na parede fria. As imagens (g) e (h) mostram as irregularidades da superfície do depósito ocasionadas pela deposição de cristais formados.









(C)











Figura 4.34: Seqüência de imagens obtidas na entrada do canal, mostrando a evolução temporal do depósito para o teste com T_e =34°C, T_{pi} =9°C e Re=354. Aumento utilizado 45x.









(C)











Figura 4.35: Seqüência de imagens obtidas na saída do canal, mostrando a evolução temporal do depósito para o teste com T_e =34°C, T_{pi} =9°C e Re=354. Aumento utilizado 45x.

As explicações acerca das visualizações feitas e as diferentes seqüências de imagens apresentadas, mostram a elevada complexidade do fenômeno de deposição de parafinas. Porém, foi possível visualizar cristais formados depositando na parede por algum mecanismo de deposição não identificado, mostrando maiores taxas de deposição em condições de baixas taxas de cisalhamento. Com a qualidade das visualizações obtidas não foi possível evidenciar claramente a remoção de depósito por cisalhamento, mas uma conclusão das observações foi que elevadas taxas de cisalhamento podem evitar que cristais já formados e suspensos no escoamento possam ser depositados na parede fria. As limitações da seção de teste evitaram a realização de experiências com maiores taxas de cisalhamento como em condições de regime turbulento, que poderiam ter ajudado ao entendimento do fenômeno.

4.3.3. Resultados para Espessura de Deposição de Parafina – Fluxo de Calor Nulo e Positivo

Após a realização dos testes para fluxo de calor negativo foram realizadas experiências para condições de contorno de fluxo de calor positivo e nulo. A revisão bibliográfica feita revelou discordâncias nos resultados dos trabalhos realizados para estas condições. Pesquisas como as de Hunt [11], Brown et al [4], Hamouda et al [8] e Creek et al [7] em que foram desenvolvidas experiências para condições de fluxo de calor nulo, revelaram que não existe deposição de parafina para estas condições. No entanto, Burger et al [5] e Todi [29] realizaram testes experimentais para as mesmas condições de fluxo zero observando camadas muito finas de parafina depositada depois de algumas horas. Estas discrepâncias motivaram o desenvolvimento de experimentos tentando reproduzir as condições de fluxo de calor zero. Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos para estas experiências, detalhando previamente o procedimento experimental e as condições de temperatura utilizadas.

O procedimento experimental era iniciado do mesmo modo como foi detalhado no Capítulo 3 para as experiências realizadas na presença de cristais em suspensão. Com a parafina derretida, as paredes de cobre na temperatura de 40°C e a temperatura do ar na saída dos jatos em 38°C, era ligada a bomba na vazão desejada dando inicio ao escoamento. O primeiro passo consistia em

diminuir a temperatura de injeção no canal da solução óleo-parafina até 34°C, nível de temperatura no qual seriam realizadas as experiências. Isto era obtido abaixando-se a temperatura do banho termostático que controlava a temperatura do tanque de alimentação e diminuído também as temperaturas das resistências que aqueciam as tubulações da seção de teste. Nesta temperatura abaixo da TIAC, era possível ver o fluido de uma cor mais opaca confirmando assim a presença de cristais suspensos. Após a solução óleo-parafina atingir os 34°C, as temperaturas da saída dos jatos de ar e das paredes de cobre iam sendo lentamente diminuídas até atingir os 35°C, condição de temperatura desejadas para a experiência. Este procedimento era necessário para garantir que não fosse produzido um fluxo de calor negativo que, como é sabido, gera deposição de parafina. O teste era iniciado depois de um tempo considerável em que as temperaturas monitoradas pelo sistema de aquisição de dados mantinham-se estáveis, confirmando assim o regime permanente da experiência. Partindo deste instante, eram contabilizadas as 4 horas que foram consideradas suficientes para atingir o regime permanente do processo de deposição.

A vazão utilizada para estes testes de fluxo de calor zero foi a mínima possível (Re=151). A razão desta escolha foi baseada no fato que as baixas taxas de cisalhamento geradas por estas condições de escoamento ocasionariam melhores condições de deposição. A condição de fluxo de calor nulo entre o fluido e as paredes de cobre foi aproximada com a temperatura de injeção da solução óleo-parafina de $T_e = 34 \pm 0.3^{\circ}C$ e a temperaturas das paredes de cobre de $T_p = 35 \pm 0.3^{\circ}C$. Estas faixas de temperatura consideram as incertezas dos instrumentos de medição, além das possíveis oscilações das temperaturas nas experiências devido à influencia do ambiente externo. É facilmente calculado que a mínima diferença possível entre as temperaturas das paredes de cobre e a do fluido foi de 0.4° C. É também evidente que esta condição de calor nulo é na verdade uma condição de fluxo de calor positivo que contempla uma pequena diferença de 0.4° C para evitar que as oscilações da temperatura gerem fluxos de calor negativos, causando a deposição de parafina.

A temperatura da face externa da parede de vidro foi medida pelos termopares dispostos ao longo do canal. A temperatura do vidro era influenciada diretamente pelo sistema de aquecimento ar, que para este teste foi ajustado em uma temperatura do ar de $T_j = 35 \pm 0.5^{\circ}C$ imediatamente na saída de cada jato. Esta maior incerteza apresentada foi devido ao fato que o soprador que alimentava o sistema de aquecimento do ambiente apresentava uma variação de temperatura ao longo do dia. O uso do sistema de aquisição de dados de temperatura somado ao constante controle do experimento evitou que estas incertezas mencionadas fossem ser maiores.

Para o estudo do fluxo nulo inicialmente foram realizadas três experiências para as condições de temperatura e vazão definidas. Todas elas terminaram sem a observação de qualquer deposição em testes com durações de 4 horas. As temperaturas das paredes de vidro medidas pelos termopares para estas três experiências são mostradas na Figura 4.36. Cada uma delas apresenta uma barra de incertezas representando a influência da variação da temperatura ambiente. Neste gráfico são apresentadas também uma faixa que representa a variação da temperatura de injeção da solução ($T_e = 34 \pm 0.3^{\circ}C$) e outra que define a possível variação da temperatura das paredes de cobre ($T_p = 35 \pm 0.3^{\circ}C$) em cada experimento. Pode ser observada também a pequena diferença de 0,4°C entre a temperatura das paredes de cobre e a do fluido que tenta aproximar as condições de fluxo nulo ideais.

Da figura pode ser observado que tanto na região de entrada como na de saída do canal poderia ter sido gerado em algum instante da experiência um fluxo de calor negativo entre o vidro e o fluido. Esta condição é confirmada pela interseção das incertezas de cada medição da temperatura do vidro com a região de possível variação da temperatura da solução óleo-parafina. Assim, em algum instante da experiência a parede de vidro poderia ter assumido uma temperatura menor que a do fluido. No entanto, estas isoladas condições que poderiam ter acontecido não foram suficientes para resfriar a parede de cobre e gerar qualquer deposição.



Figura 4.36: Temperaturas da parte exterior das paredes de vidro geradas pelo aquecimento de ar para as experiências realizadas para condições de fluxo de calor nulo com $T_e=34$ °C e $T_p=35$ °C.

Após a realização dos experimentos descritos realizaram-se testes adicionais onde buscou-se aumentar ainda mais a concentração de cristais em suspensão. Para isso, a temperatura de entrada da mistura foi diminuída ainda mais. O limite desta temperatura foi estabelecido levando-se em conta a visibilidade do escoamento no canal e o bom desempenho da bomba de cavidades progressivas tendo em vista o aumento de viscosidade produzido como conseqüência do resfriamento do fluido. A mínima temperatura de entrada que atendia aos requisitos mencionados foi de da mistura no canal $T_e=32\pm0,3^{\rm o}\,C$. As temperaturas das paredes de cobre foram ajustadas para $T_p = 33 \pm 0,3^{\circ}C$. A temperatura de saída do ar para cada jato foi ajustada em $T_j = 33 \pm 0,5^{\circ}C$. A diminuição da temperatura de injeção para esta nova experiência de T_e=34°C para T_e=32°C ocasionou que um aumento considerável na viscosidade do fluido. Por esta razão, para a mesma vazão volumétrica da bomba do teste anterior, foi calculado o novo número de Reynolds de Re=106. Este novo teste sob condições mais criticas devido ao aumento da concentração de cristais suspensos no escoamento, não apresentou qualquer deposição de parafina em 4 horas de experimento. As temperaturas da face externa da parede

de vidro medidas pelos termopares para esta nova experiência são mostradas na Figura 4.37. Igualmente são apresentadas aqui as faixas de possível variação das temperaturas de injeção e das paredes de cobre. Nesta figura pode ser observada mais uma vez, a interseção das incertezas das temperaturas medidas pelos termopares com a região de possível variação da temperatura da solução. Porém, do mesmo modo que nos testes anteriores, isto não afetou o resultado obtido para estas condições de maior concentração de cristais.



Figura 4.37: Temperaturas da parte exterior das paredes de vidro geradas pelo aquecimento de ar para a experiência realizada para a condição de fluxo de calor nulo com $T_e=32^{\circ}C$ e $T_{p}=33^{\circ}C$.

Após de estudar a deposição nas condições de vazão mais críticas possíveis, foi realizado um teste adicional com as mesmas temperaturas desta ultima experiência, mas aumentando as taxas de cisalhamento para Re=249. Como era esperado, não foi encontrado qualquer depósito ao final da experiência que teve a mesma duração que as anteriores. Este resultado contradiz de alguma forma a possibilidade de que elevadas taxas de cisalhamento aumentam a deposição de cristais formados, como foi proposto por Burger et al. [5].

Um resultado que vale a pena mencionar foi obtido nas primeiras tentativas de geração das condições de fluxo de calor nulo. O procedimento experimental utilizado para atingir estas condições de fluxo zero foi concluído depois de realizar experimentos errados que resultaram em deposição. Nestas primeiras experiências tentou-se abaixar gradualmente as temperaturas do fluido, das paredes de cobre e do aquecimento simultaneamente. Assim, depois de algumas horas de experiência era visualizada uma fina camada de depósito da ordem de 0,1 mm devido a fato que, em algum momento, poderiam as temperaturas das paredes do canal, ter estado abaixo da temperatura do fluido gerando uma pequena diferença de temperatura (fluxo negativo) que resultou em deposição. Estas observações motivaram a implementação da metodologia descrita acima onde optou-se por diminuir primeiramente a temperatura da solução antes do que as temperaturas das paredes do canal, evitando assim a geração de fluxos de calor negativos.

A revisão bibliográfica detalhada no Capítulo 2 mostrou algumas conclusões referentes ao estudo do comportamento do fenômeno de deposição em condições de fluxo de calor positivo. Hsu et al. [10] afirmaram que fluxos positivos e nulos poderiam gerar deposição de parafinas, sempre que as temperaturas do petróleo e da parede fossem menores que a TIAC. Outra pesquisa realizada por Todi [29] em que foi desenvolvido um experimento para estas condições de fluxos positivos, resultou na visualização de uma fina e irregular camada de depósito aparecendo no terceiro dia de experiência. Baseado nestas informações foram desenvolvidos estes experimentos buscando observar a ocorrência de deposição de parafina em condições de fluxo de calor positivo. Nos experimentos realizados primeiramente era fixada a temperatura do fluido para depois diminuir as temperaturas das paredes do canal até os valores desejados. Esta experiência foi realizada uma vez mais para o menor número de Reynolds (Re=106) procurando produzir as melhores condições de deposição. A temperatura de injeção da solução $T_e = 32 \pm 0.3^{\circ}C$, a temperatura das paredes de cobre, $T_p = 35 \pm 0.3^{\circ}C$ e a temperatura do ar saindo dos jatos de $T_i = 35 \pm 0.5^{\circ}C$ foram as condições utilizadas para conseguir o fluxo positivo. Estas temperaturas são representadas graficamente na Figura 4.38. Aqui é mostrada a temperatura da parede do vidro comparada uma vez mais, com a faixa da temperatura de injeção e da temperatura das paredes de cobre. É possível observar uma diferença significativa entre as temperaturas das paredes do canal e a temperatura de injeção do fluido, o que representa as condições necessárias para produzir um fluxo de calor positivo. A experiência realizada para esta condição de fluxo positivo não resultou em qualquer depósito para um tempo de teste de 4 horas. Isto contradiz o resultado experimental obtido por Todi [29] que será discutido comparando seu trabalho com as nossas condições de experimento na seção seguinte do presente capítulo.



Figura 4.38: Temperaturas da parte exterior das paredes de vidro geradas pelo aquecimento de ar para a experiência realizada para condição de fluxo de calor positivo com $T_e=32^{\circ}C$ e $T_{p}=35^{\circ}C$.

4.4. Comparação dos Resultados com o Trabalho de Todi, 2005

O objetivo do presente trabalho está dirigido ao estudo da deposição de parafina na presença de cristais em suspensão. Os resultados obtidos das experiências com temperaturas de injeção de fluido abaixo da TIAC que foram apresentados até agora concordam com a maioria dos pesquisadores, que afirmam que é necessário um fluxo de calor negativo para que o fenômeno de deposição de parafinas aconteça. No entanto, uma pequena minoria, entre eles um trabalho recente realizado por Todi [29] discorda de nossos resultados. Por

esta razão, e devido à sua atualidade, o trabalho de Todi [29] será discutido a seguir.

Todi [29] desenvolveu diferentes experimentos na presença de cristais em suspensão submetendo o escoamento a fluxos de calor nulo, positivo e negativo. As suas experiências, realizadas para temperaturas de injeção do fluido menores que a TIAC, tornaram seu trabalho o estudo disponível na literatura que mais se aproxima dos objetivos do presente trabalho. No entanto, seus resultados que indicam a existência de deposição de parafina para as três condições de fluxo de calor, divergem dos resultados aqui apresentados.

Uma das diferenças mais perceptíveis entre o trabalho de Todi [29] e o presente trabalho é a faixa de números de Reynolds investigada nas experiências. Como pode ser visto na Tabela 2.3, em que foi apresentada uma reprodução parcial das condições de suas experiências, observar-se que os números de Reynolds por ele utilizados encontram-se na faixa de 4,1 a 88,5, enquanto no presente trabalho utilizou-se números de Reynolds na faixa de 106 a 354. Esta diferença, dependendo do tipo de óleo, poderia resultar em maiores esforços cisalhantes, o que provocaria, possivelmente, a remoção parcial ou total do material depositado. O objetivo de Todi [29] foi obter um modelo de óleo que representasse bem o comportamento não-Newtoniano que poderia resultar do resfriamento. A Figura 4.39 mostra a variação da viscosidade do óleo utilizado por Todi comparado com um tipo de petróleo cru. Assim, lembrando que a TIAC do óleo utilizado por ele foi de 10,9°C, poderíamos verificar nesta figura que a viscosidade do seu modelo de óleo na temperatura de aparecimento de cristais era da ordem de 1,0 Pa.s. A viscosidade da mistura utilizada no presente trabalho era da ordem de 0,01 Pa.s, medida também na TIAC (36,6°C). Esta significativa diferença compensa a desigualdade entre os números de Reynolds utilizados em ambas pesquisas, o que resulta em esforços cisalhantes na parede da mesma ordem de grandeza e, portanto, em condições similares de teste. Assim, a ausência de depósito dos testes realizados no presente trabalho dificilmente poderia ser atribuída aos diferentes números de Reynolds utilizados.



Figura 4.39: Comportamento da viscosidade com a temperatura do óleo utilizado por Todi comparado com um tipo de petróleo cru [29].

Em nossa visão, a razão para as diferentes conclusões quanto à presença de deposição sob condições de fluxo de calor nulo vem da condição de contorno térmica implementada no trabalho de Todi [29]. A condição de fluxo de calor nulo é na verdade uma condição ideal de difícil realização prática. Para tanto, seria necessário que a temperatura da solução de óleo e parafina fosse igual à temperatura da parede do duto. As incertezas presentes em um experimento não permitem que esta condição seja obtida exatamente. Como já foi mencionado, um pequeno fluxo de calor negativo entre o fluido e a parede poderia resultar em uma camada de depósito obtida quando o experimentalista acreditava estar trabalhando sob condições de fluxo de calor nulo.

Uma crítica que fazemos ao trabalho de Todi [29] está ligada à forma como foi estabelecida a condição de contorno térmica de seus experimentos. Todi optou por realizar experimentos de longa duração, cerca de 3 dias, instalando para isso um controlador termostático para a temperatura do ambiente externo a seu experimento. Como é descrito em seu experimento, o controlador era capaz de manter a temperatura externa dentro de uma faixa de ±1°C. Esta incerteza, de acordo com a nossa experiência, seria mais que suficiente para gerar fluxos de calor negativos que gerariam deposição de parafina por difusão molecular. Assim, a observação feita no trabalho de Todi [29] de finas camadas de depósito resultantes em seus experimentos poderiam ter acontecido devido a regiões na tubulação nas quais foram gerados fluxos de calor negativos e não pelos mecanismos de deposição por gravidade e difusão Browniana como ele conclui. O aparente desconhecimento do problema explicado pode ser um indicativo de deficiências no controle de temperatura dos seus testes.

118

Os testes realizados por Todi [29] para condições de fluxo de calor positivo, foram desenvolvidos em condições similares às do presente trabalho. No entanto, contrariamente aos nossos resultados, ele também observou uma camada muito fina de depósito após 3 dias de experimento. A temperatura de injeção da mistura de 5°C e da parede do duto de 9,5°C comparadas com a TIAC de 10,9°C das experiências realizadas por Todi [29], geraram diferenças de 5,9°C e 1,4°C respectivamente. No presente trabalho foi realizado um teste com a temperatura de injeção de 32ºC e das paredes de 35ºC, que comparados com a TIAC de 36,6°C, resultam diferenças de temperatura de 4,6°C e 1,6°C, valores próximos àqueles utilizados por Todi. Também, a concentração de parafina no óleo utilizada por Todi foi a mesma utilizada no presente trabalho, qual seja, 10% em massa. Assim, vê-se que ambos experimentos foram realizados sob condições semelhantes, apresentando, no entanto resultados distintos. Não foi possível encontrar uma explicação física plausível para o aparecimento de pequenos depósitos de parafina nos experimentos de Todi [29] somente após 3 dias de testes.