

4

Apresentação e Discussão dos Resultados

As seções de teste descritas no capítulo anterior foram projetadas e construídas com o objetivo de possibilitar o estudo dos mecanismos básicos responsáveis pela deposição de parafina nas paredes de um duto. Após a revisão da literatura realizada ao longo deste trabalho e apresentada no Capítulo 2, verificou-se ainda existir dúvidas sobre a importância relativa dos possíveis mecanismos de deposição. Em particular, sobre a relevância dos mecanismos de deposição por difusão molecular, difusão Browniana e dispersão por cisalhamento.

Os resultados que serão apresentados neste capítulo foram obtidos a partir das seções de teste construídas para condições de deposição em líquido estagnado e sob condições de escoamento laminar.

4.1

Deposição de Parafina com Camada Estagnada de Líquido

Os estudos experimentais sobre deposição de parafina foram iniciados investigando-se uma camada de líquido estagnada submetida a um gradiente de temperatura. Esta configuração foi utilizada por tratar-se de uma configuração simples onde a importância relativa dos mecanismos de deposição poderia ser melhor avaliada.

Os experimentos foram conduzidos na seção de testes descrita na seção 3.1.2 que, de uma maneira resumida, tratava-se de uma cavidade formada por duas paredes principais horizontais de vidro e duas paredes verticais de cobre com temperatura controlada. O espaçamento entre as paredes de vidro era de 0,5 mm, o que minimizou a intensidade das correntes de convecção natural, podendo o fluido dentro da cavidade ser considerado como estagnado.

4.1.1

Resultados de Perfis de Temperatura

Antes de iniciar os testes com deposição de parafina, foram realizados ensaios onde a distribuição de temperatura no líquido no interior da cavidade era monitorada à medida que um gradiente de temperatura era imposto. A obtenção de um perfil de temperatura linear entre as paredes de cobre quente e fria seria uma boa indicação que a troca de calor através do líquido presente na cavidade se dava somente pelo mecanismo de condução, o que, por sua vez, seria uma boa indicação da ausência de movimento do fluido dentro da cavidade, como desejado para o experimento.

Para medir o perfil de temperatura no líquido e no sólido seis termopares foram introduzidos na parede lateral da cavidade. Na vista explodida da cavidade apresentada na Figura 3.6, os furos para receber os termopares podem ser vistos na parede de latão oposta àquela onde estão instalados os dois tubos para enchimento da cavidade. Os termopares eram de Chromel-Constantan, com diâmetro de 0,127 mm e recobertos com Teflon. Cada termopar foi introduzido em um pequeno tubo de aço inoxidável com a ponta fechada por solda. Os seis tubos penetravam cerca de 10 mm no interior da cavidade.

A Figura 4.1 apresenta um resultado representativo dos testes realizados. Na figura, a abscissa representa a distância entre as placas de cobre da cavidade, com a origem colocada sobre a placa fria. A ordenada apresenta a temperatura indicada pelos termopares em graus Celsius. A solução utilizada foi fornecida pelo CENPES/Petrobras, sendo uma mistura de 10% em massa de parafina com números de carbono na faixa entre C_{21} e C_{38} com solvente na faixa entre C_{13} e C_{16} . A temperatura inicial de aparecimento de cristais para esta solução foi medida em 27°C . Como as paredes da cavidade durante os ensaios foram mantidas entre 20 e 30°C respectivamente, houve deposição dentro da cavidade.

Uma análise da figura mostra que inicialmente os termopares indicam uma temperatura aproximadamente uniforme em torno de 30°C . Esta temperatura foi obtida mantendo-se as duas placas de cobre aquecidas e aguardando-se a obtenção da condição de regime permanente. Após esta condição ser atingida, uma manobra de válvulas fazia com que água proveniente de um banho termostático já previamente ajustado na temperatura de 20°C fluísse para o trocador de calor conectado a uma das placas de cobre. A outra placa era mantida ligada ao banho com temperatura de 30°C . Os dados da Figura 4.1 mostram a evolução temporal do perfil de temperatura na cavidade. Como pode ser observado, cerca de 20 minutos após o

início do resfriamento de uma das placas o perfil de temperatura atinge uma distribuição linear, como esperado. Os resultados deste teste mostraram que o projeto adequado da cavidade proporcionou a obtenção da condição de troca de calor através de líquido estagnado, conforme desejado.

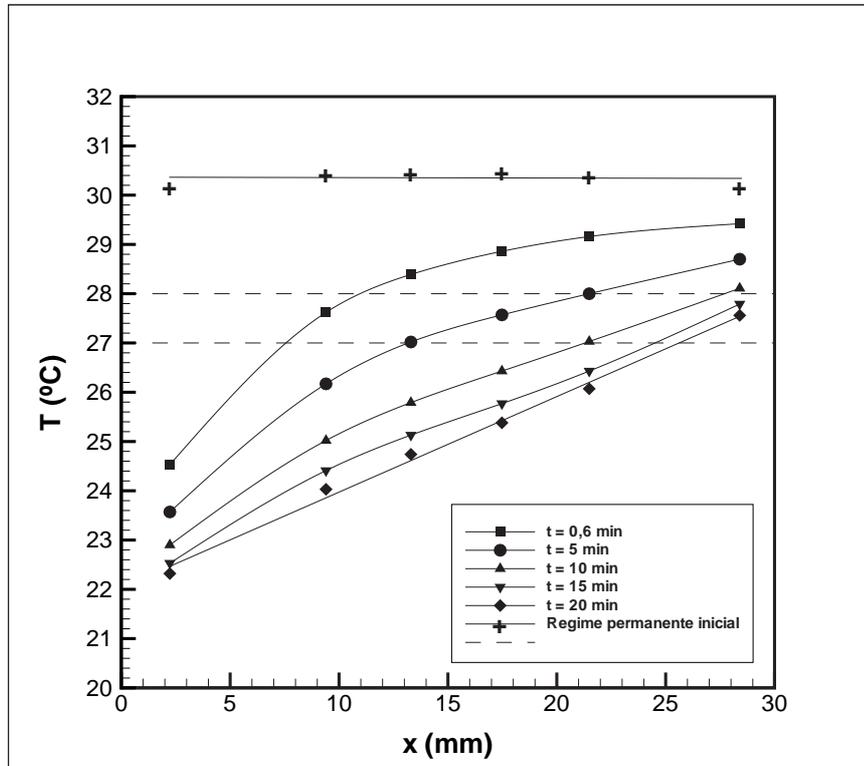


Figura 4.1: Evolução dos perfis de temperatura para testes com fluido em cavidade estagnada. Temperatura da parede quente igual a 30°C, temperatura da parede fria igual a 20°C, TIAC igual a 27°C.

A Figura 4.2 apresenta os resultados do crescimento da espessura de deposição de parafina em função do tempo, para o mesmo ensaio onde foram obtidos os dados de temperatura da Figura 4.1. Na figura, a espessura em milímetros é apresentada em função do tempo do experimento em minutos.

O crescimento assintótico da espessura do depósito pode ser observado na figura. Após 20 minutos de experimento o depósito ocupava cerca de 25 mm da cavidade de 30 mm de comprimento. Na figura são apresentadas também duas curvas tracejadas localizadas acima e abaixo da curva que representa o crescimento da espessura do depósito. Estas curvas foram construídas a partir dos dados de temperatura da Figura 4.1 e representam a evolução espacial das isoterms de valores 27 e 28°C, respectivamente. O valor fornecido pelo CENPES para a TIAC da parafina utilizada nos ensaios era de 27°C. A comparação da evolução da isoterma de 27°C com a curva de crescimento do depósito mostra que o depósito acompanha a evolução

espacial da TIAC. É interessante notar também que o preenchimento quase que total da cavidade com parafina sólida não produziu qualquer inflexão notável no perfil linear de temperatura. Este fato é uma indicação que não há diferenças apreciáveis na condutividade térmica da parafina líquida e do depósito sólido ainda muito poroso.

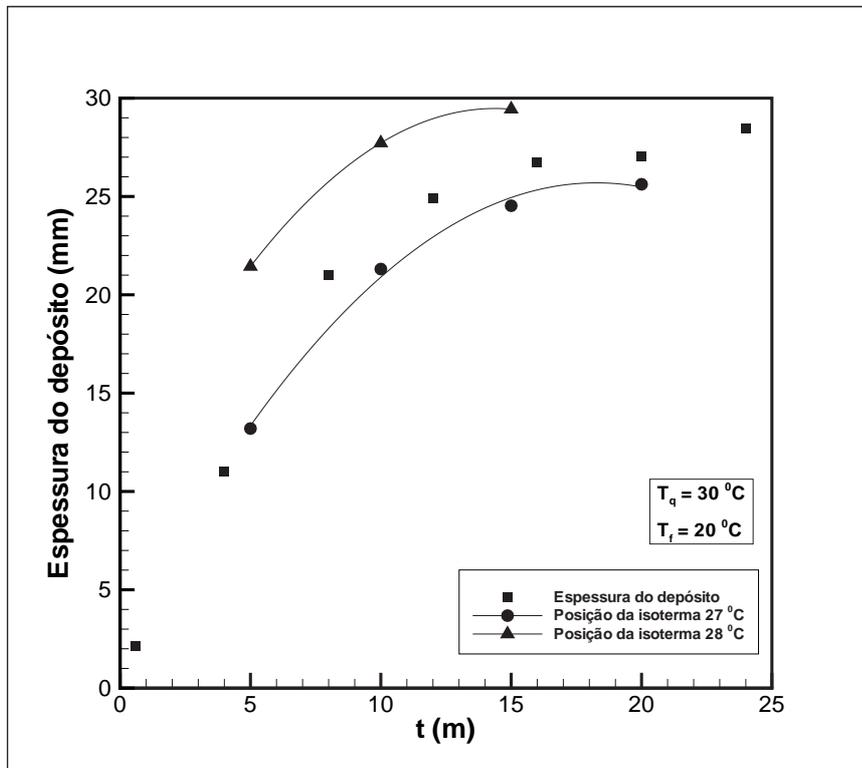


Figura 4.2: Evolução da espessura de parafina depositada em cavidade estagnada. Temperatura da parede quente igual a 30°C, temperatura da parede fria igual a 20°C, TIAC igual a 27°C.

A Figura 4.3 apresenta algumas das imagens digitais utilizadas na geração dos dados de crescimento do depósito de parafina apresentados na Figura 4.2. Estas imagens foram obtidas com lente zoom de 18-108 mm de distância focal com iluminação de luz branca pela frente da cavidade. A câmara utilizada possuía resolução de 640 x 480 pixels. O crescimento do depósito de parafina foi medido utilizando-se um programa comercial de processamento de imagens. A escala da imagem foi obtida a partir da distância conhecida entre as paredes horizontais de cobre que formam a cavidade. Os tubos contendo os termopares podem ser vistos na figura.

Uma observação mais detalhada das imagens apresentadas na Figura 4.3 mostra efeitos da troca de calor do fluido dentro da cavidade para o ambiente externo através das paredes laterais da cavidade. Este efeito é mais facilmente notado na Figura 4.3 (c) onde um aumento na deposição junto

à parede esquerda é verificado. Este crescimento do depósito é creditado à maior perda de calor para o ambiente externo por esta parede. Devido a estas observações, os ensaios de deposição de parafina foram realizados com a cavidade envolvida em uma pequena caixa de material isolante, onde apenas duas aberturas existiam, uma para a entrada da iluminação, outra para a lente da câmara. Também, para minimizar efeitos de troca de calor, os experimentos de deposição foram conduzidos sem a presença dos termopares no interior da cavidade, visto que estes poderiam atuar como aletas transferindo calor entre a cavidade e o ambiente externo.

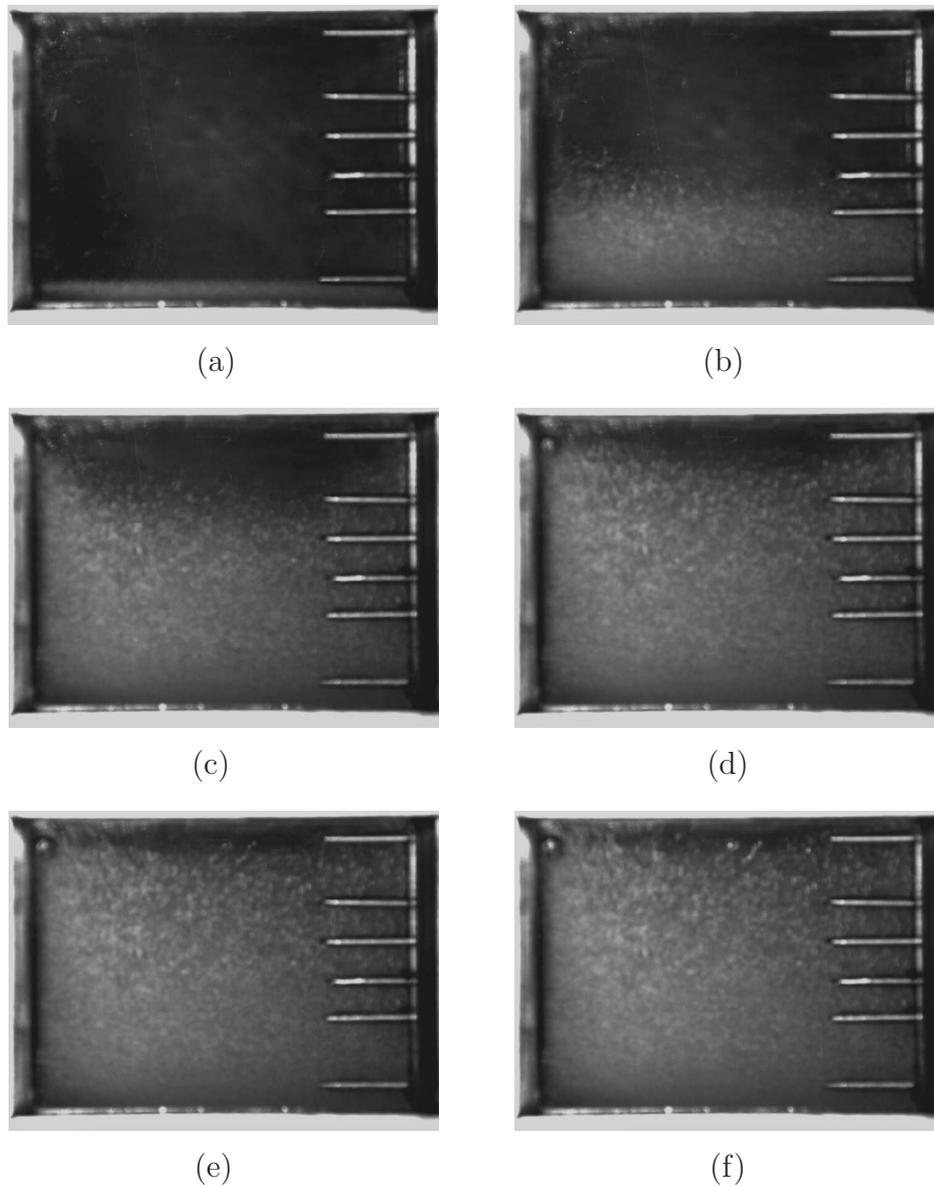


Figura 4.3: Crescimento do depósito de parafina em cavidade estagnada. Temperatura da parede superior igual 30°C e inferior 20°C . Temperatura externa 25°C . Imagens representam tempos de 0,6, 4, 8, 12, 16 e 20 minutos após início do resfriamento.

4.1.2 Resultados de Espessura de Deposição

A seguir são apresentados resultados para a espessura de deposição de parafina no interior da cavidade com fluido estagnado. Dois eram os objetivos principais dos experimentos. Primeiramente desejava-se obter dados da evolução temporal da espessura do depósito na cavidade que pudessem ser utilizados na verificação de modelos de simulação. O segundo objetivo era tentar identificar o movimento de cristais de parafina em direção à parede fria da cavidade, o que seria uma indicação da presença de outros mecanismos de deposição, além da difusão molecular.

A Figura 4.4 mostra os resultados de experimentos conduzidos para uma diferença de temperatura entre a parede quente e a fria de 20°C. Esta diferença foi obtida mantendo-se a parede quente a 32°C e a parede fria a 12°C. Na figura a espessura depositada, dada em milímetros, é apresentada em função do tempo decorrido desde o resfriamento da placa fria, dado em segundos.

A Figura 4.4 é composta de oito conjuntos de pontos cada um representando um valor da temperatura externa à cavidade. Como pode ser observado, o nível de temperatura externa influencia a taxa de crescimento dos depósitos, mas não o valor final atingido para a espessura de deposição. O valor da temperatura externa à cavidade controla a perda de calor da cavidade para o meio. Assim, observa-se na figura que, para valores iniciais de tempo, depósitos mais espessos são obtidos para as menores temperaturas externas que estão, por sua vez, associadas às maiores perdas para o ambiente.

O fato do valor assintótico do depósito ser aproximadamente o mesmo para todos experimentos pode ser explicado pela posição final alcançada pela isoterma com valor igual à TIAC da solução. Para o par de temperaturas das paredes quente e fria utilizado nos experimentos (12 e 32°C) e admitindo-se um perfil linear de temperatura na cavidade, como demonstrado nos experimentos com termopares, a posição da isoterma correspondendo à TIAC de 27°C da solução seria de 27,5 mm, quase atingindo a posição da parede quente situada a 30 mm da parede fria. Na figura, o valor assintótico da espessura do depósito é de aproximadamente 27 mm, valor bastante próximo à posição onde ocorre o valor da TIAC.

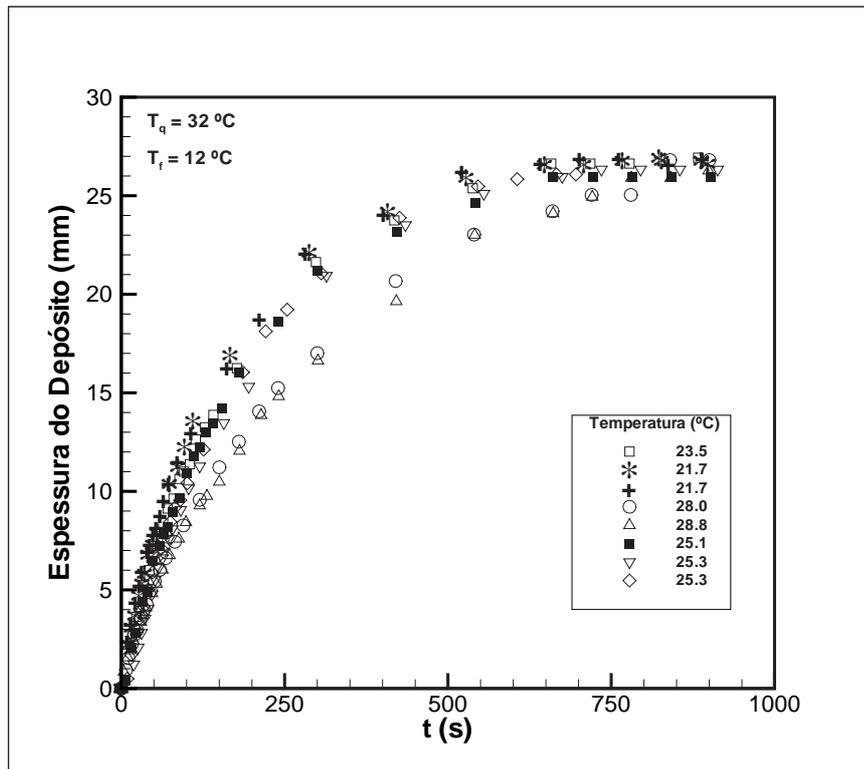


Figura 4.4: Evolução da espessura de deposição para diversas temperaturas externas à cavidade para fluido estagnado. Temperatura da parede quente igual a 32°C, temperatura da parede fria igual a 12°C, TIAC igual a 27°C.

A Figura 4.5 apresenta resultados semelhantes àqueles apresentados na Figura 4.4. Neste caso, a diferença de temperatura entre as paredes quente e fria é de 30°C, resultado de uma parede mantida a 42°C e outra a 12°C. Com esta diferença de temperatura e usando-se o perfil linear de temperatura dentro do fluido na cavidade, a posição da isoterma de 27°C correspondendo à TIAC é de 15 mm. Na figura pode ser observado que o valor assintótico da espessura de deposição é também de aproximadamente 15 mm. O efeito da temperatura externa à cavidade nos dados é menos pronunciado nos resultados mostrados na Figura 4.5 quando comparado àquele produzido sobre os dados da Figura 4.4. Acredita-se que esta menor sensibilidade deve-se à menor área lateral de parafina exposta no caso da Figura 4.5 onde a frente de deposição atinge seu valor limite a apenas 15 mm da parede fria expondo, desta forma, menos área para troca de calor.

A Figura 4.6 apresenta imagens típicas usadas na geração dos dados das Figuras 4.4 e 4.5. O movimento da frente de formação do depósito de parafina pode ser observado na animação preparada à partir das imagens da Figura 4.4. Esta animação encontra-se no arquivo Figuras-4-6.avi que consta do disco que acompanha esta tese.

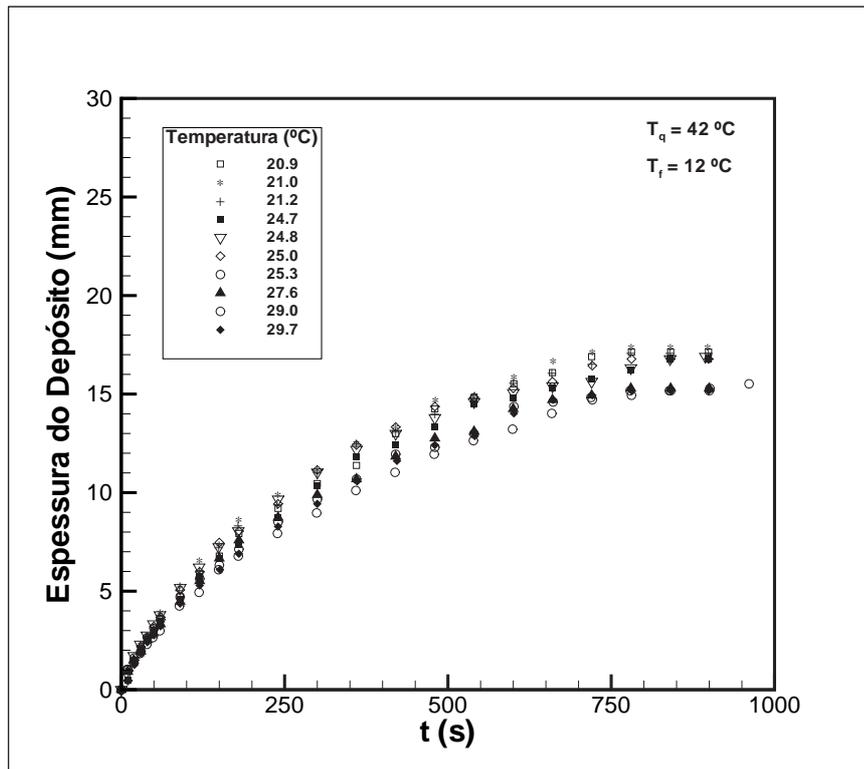


Figura 4.5: Evolução da espessura de deposição para diversas temperaturas externas à cavidade para fluido estagnado. Temperatura da parede quente igual a 42°C, temperatura da parede fria igual a 12°C, TIAC igual a 27°C.

4.1.3

Visualização dos Cristais de Parafina - Aumento de 50x

As imagens obtidas nos experimentos que geraram os dados de crescimento do depósito apresentados não permitiram observar qualquer movimento de cristais de parafina em direção à frente de deposição. Esta seria uma evidência da atuação do mecanismo de deposição por difusão Browniana. Para tentar visualizar estes cristais em movimento, a seção de testes foi montada sobre a mesa de um microscópio ótico com capacidade de aumento de até 1000 vezes. O microscópio disponível no Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia da PUC-Rio era da marca Zeiss modelo Axioplan 2, dotado de câmara digital. Para facilitar a captura das imagens do crescimento dos cristais, o procedimento experimental adotado utilizou rampas suaves de resfriamento da parede fria da seção de testes, o que produz um crescimento mais lento dos cristais.

A Figura 4.7 apresenta uma seqüência de imagens obtidas junto à parede fria da seção de testes, mostrando o início do processo de formação do depósito de parafina. Para este teste a mesma solução de parafina já descrita no item 4.1.1 foi utilizada. O aumento das imagens é de 50 vezes.

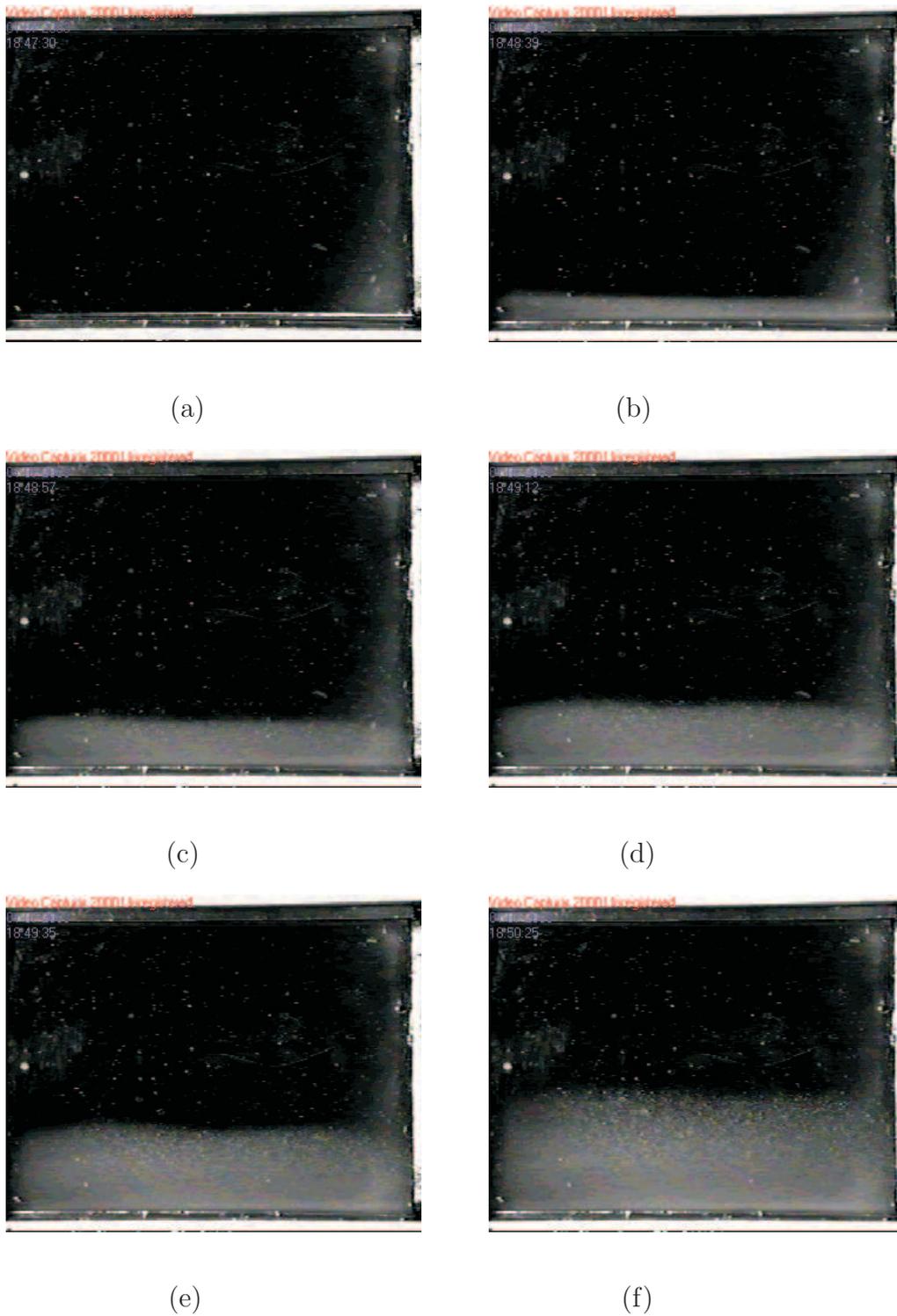


Figura 4.6: Crescimento do depósito de parafina em cavidade estagnada. Temperatura da parede superior igual 32°C e inferior 12°C . Temperatura externa 25°C . Imagens representam tempos de 0, 15, 33, 48, 71 e 125 segundos após início do resfriamento.

A parede fria situa-se no lado direito das imagens. A imagem sinuosa que aparece no lado direito das imagens não representa uma ondulação na parede de cobre, mas sim a imagem de adesivo de silicone utilizado para selar a cavidade pelo seu lado externo. A parede de cobre situa-se na borda direita de cada imagem. Para facilitar a visualização da frente de cristalização, uma rampa suave de resfriamento foi ajustada no banho termostático. No caso da figura em questão, a rampa de resfriamento utilizada foi de $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$.

Uma observação das imagens da Figura 4.7 mostra claramente o avanço da frente de cristalização. Na fase inicial do teste nota-se uma progressão relativamente lenta da taxa de aparecimento de pequenos cristais junto à parede resfriada. À medida que a temperatura da parede fria continua baixando, verifica-se uma aceleração forte no crescimento dos cristais caracterizando um processo explosivo. A estrutura de cristais entrelaçados formada é de pequena concentração espacial, formando uma matriz esparsa de cristais preenchida com o solvente. Os cristais possuem a forma de lâminas hexagonais. Uma melhor visualização do processo de formação de cristais descrito pode ser obtida através da observação de uma animação das imagens capturadas nos testes. Esta animação está disponível no arquivo Figura-4-7.avi, dentro da pasta Figura-4.7, gravada no disco que acompanha esta tese.

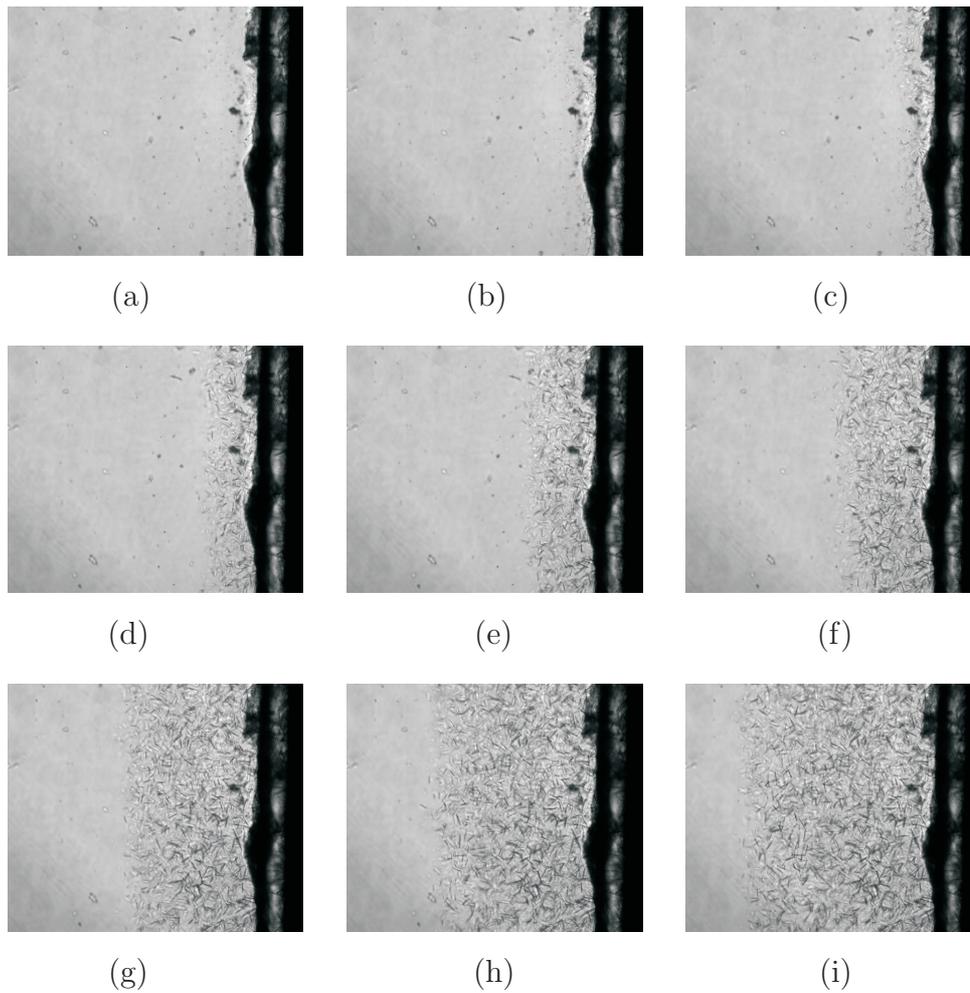


Figura 4.7: Crescimento do depósito de parafina. Intervalo entre imagens de aproximadamente 0,5 s. Aumento de 50 vezes. Rampa de resfriamento de $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Imagens digitais e animação disponíveis no disco que acompanha a tese na pasta Figura-4.7.

É importante ressaltar que em todos os testes realizados, dos quais as imagens da Figura 4.7 representam um teste típico, não foi verificado qualquer movimento de cristais em direção à parede fria. Esta observação leva à conclusão que, pelo menos no caso de fluido estagnado e para a ampliação utilizada, não há movimentação de cristais por um mecanismo que possa ser associado ao movimento Browniano dos pequenos cristais. Alguns testes foram realizados introduzindo-se pequenas partículas de poliestireno com diâmetro de cerca de 20 μm na solução dentro da cavidade. O objetivo deste procedimento era facilitar a nucleação de cristais longe da parede fria e observar os seus movimentos. Este procedimento não resultou em nucleação de cristais, sendo os cristais nucleados ainda na parede fria como nos experimentos anteriores.

4.1.4

Visualização dos Cristais de Parafina - Aumentos de 100x, 200x e 1000x

A não observação do movimento de cristais em direção à parede fria nos experimentos anteriores poderia ser devida ao aumento insuficiente das imagens. O aumento limitado a 50x poderia estar impedindo a visualização de cristais menores em movimento Browniano. Para verificar esta hipótese, foram realizados testes com maiores aumentos nas imagens. A geometria da cavidade utilizada nos testes não permitia a utilização das lentes com maior poder de aproximação do microscópio utilizado. Para contornar este problema os testes foram conduzidos com uma nova cavidade, conforme descrição do item 3.1.3 do capítulo anterior. Os resultados obtidos nestes testes são apresentados a seguir.

A Figura 4.8 apresenta um conjunto de imagens obtidas no microscópio com um aumento de 200 vezes. Para facilitar a visualização dos cristais o resfriamento da parede fria foi realizado de forma lenta por uma rampa programada no banho termostático com taxa de $0,1^{\circ}\text{C}/\text{min}$. A parede resfriada situa-se à esquerda de cada imagem, sendo o crescimento do depósito para a direita de cada imagem. Originalmente as imagens foram capturadas com intervalo de tempo de 1 segundo. Na Figura 4.8 apenas algumas imagens são apresentadas, sendo o intervalo entre elas de 3 segundos.

A observação das imagens da Figura 4.8 mostra claramente os cristais na forma de lâminas hexagonais, vistas de frente e de perfil.

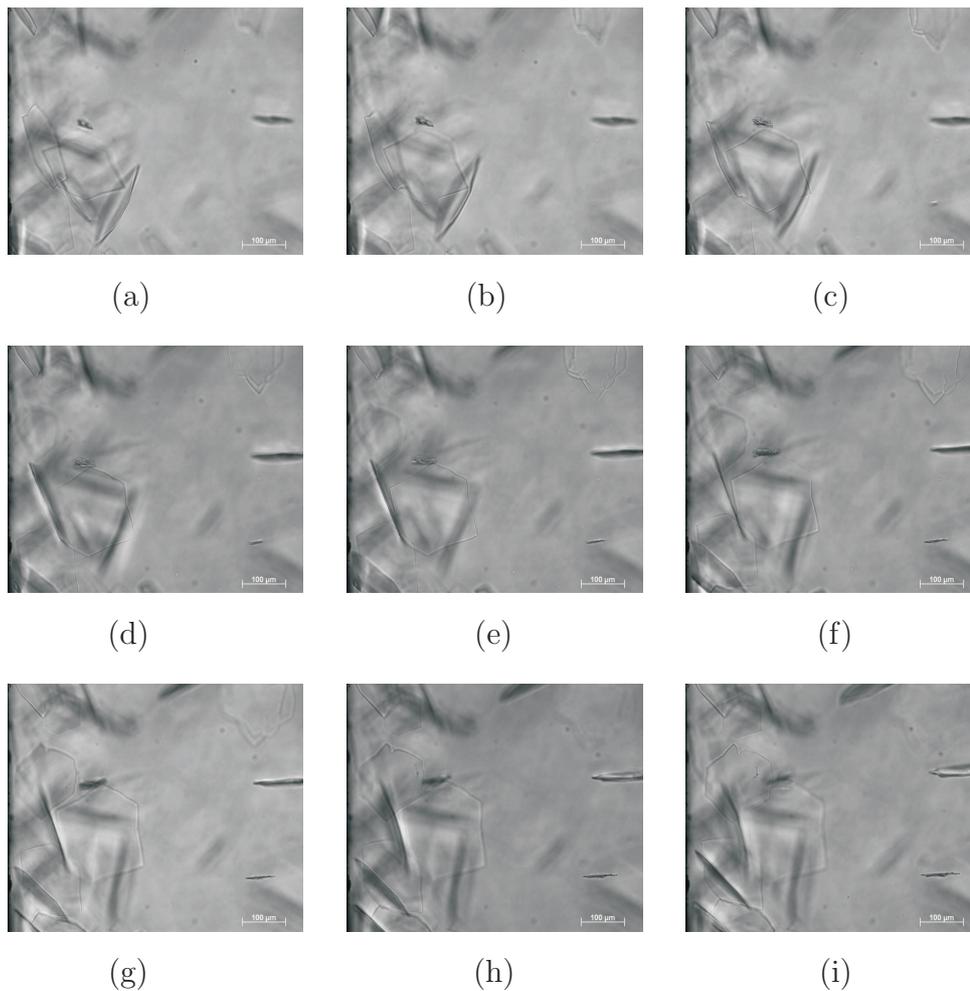


Figura 4.8: Visualização do processo de formação de cristais de parafina junto à parede fria. Parede fria à esquerda das figuras. Aumento de 200x. Rampa de resfriamento de $0,1^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Intervalo entre as imagens de 3 segundos. Imagens digitais e animação disponíveis no disco que acompanha a tese na pasta Figura-4.8

Os cristais podem ser vistos em seu rápido processo de crescimento. Pode ser notado algum movimento de pequena amplitude dos cristais em ambas as direções, saindo e voltando para a parede fria à esquerda da figura. Não foi verificado qualquer movimento consistente que trouxesse cristais para a parede fria. Por outro lado, verificou-se que um grande número de cristais forma-se em uma região próxima à parede, mas não exatamente na parede. O amplo espaço entre os cristais é notável. Nesta fase inicial de formação do depósito vários cristais ainda não aprisionados à parede ou à rede que se formará em seguida no processo de formação do depósitos, podem mover-se com relativa liberdade.

A animação preparada à partir das imagens do experimento que incluem imagens além daquelas apresentadas na Figura 200x, pode ser encon-

trada no arquivo Figura-4-8.avi localizado na pasta Figura-4.8, gravada no disco que acompanha este relatório. A animação corresponde a um tempo de captura de 25 segundos com intervalo entre imagens de 1 segundo. As imagens que geraram a animação também estão disponíveis na pasta.

Imagens capturadas por períodos mais longos fornecem uma idéia do processo de formação da rede de cristais e seu adensamento que darão origem ao depósito mais consistente com menor teor de óleo aprisionado. O resultado de testes de mais longa duração são apresentados na Figura 4.9. Estas imagens foram obtidas com aumento de 100x e rampa de resfriamento de $1/3^{\circ}\text{C}/\text{min}$.

A seqüência de imagens mostra claramente o processo de adensamento do depósito. As imagens foram capturadas durante um intervalo total de 39 minutos. É interessante observar também na figura o progressivo escurecimento das imagens. A diminuição do nível de transparência à luz transmitida pelo microscópio é uma indicação direta do processo de adensamento do depósito.

A animação das imagens capturadas mostra com maior clareza a diminuição progressiva do movimento dos cristais, à medida que a matriz de cristais vai adensando-se. Esta animação está no arquivo Figura-4-9.avi, na pasta Figura-4.9 no disco que acompanha a tese. A seqüência de fotos que formaram a animação está também disponível na mesma pasta.

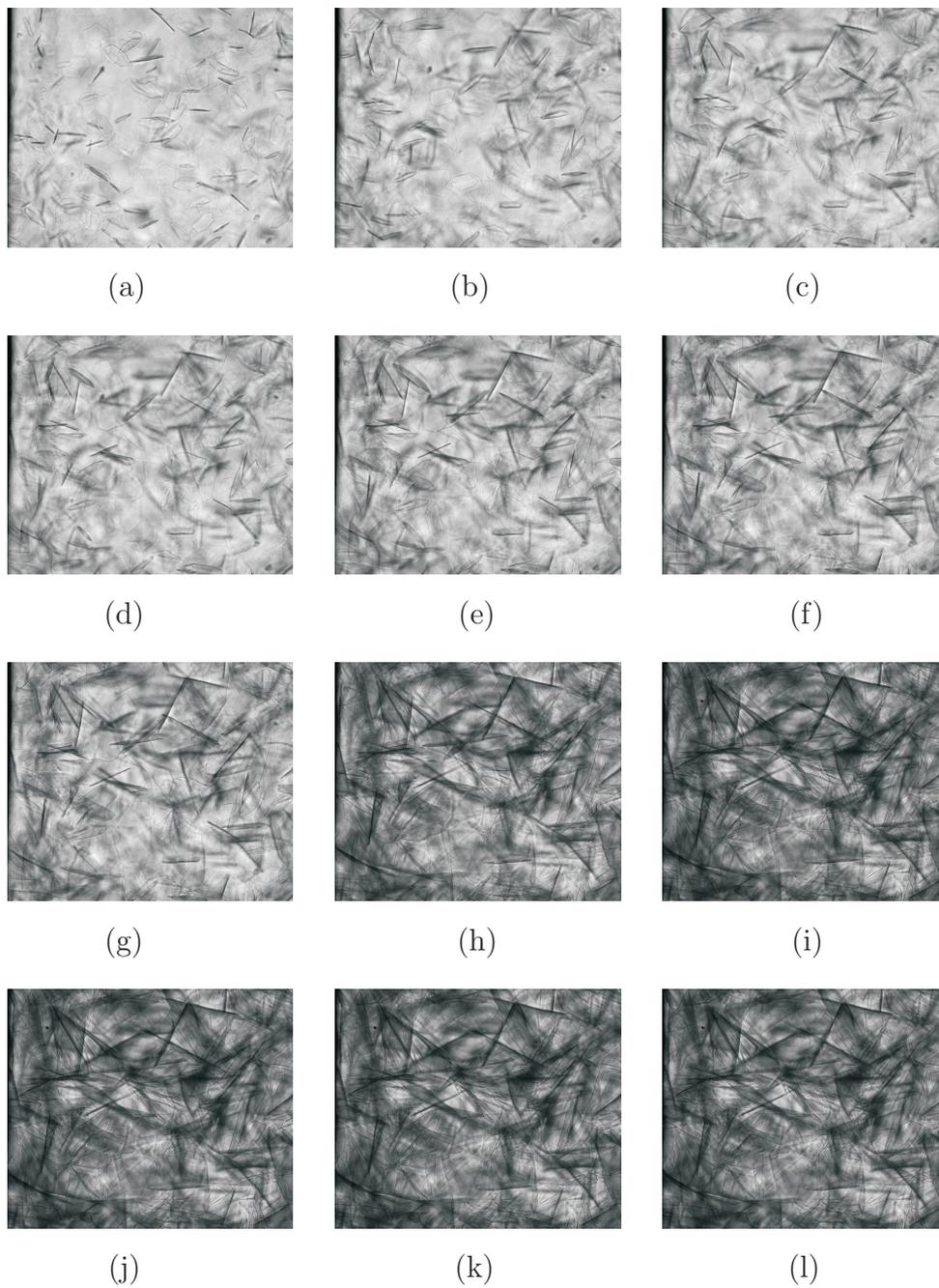


Figura 4.9: Visualização do processo adensamento dos cristais que formam o depósito de parafina. Aumento de 100x. Rampa de resfriamento de $1/3^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Intervalo entre a primeira e última imagem de 39 minutos. Imagens digitais e animação disponíveis no disco que acompanha a tese na pasta Figura-4.9.

O máximo aumento possível no microscópio utilizado era de 1000x. A seção de teste projetada permitia que esta lente objetiva fosse utilizada. Assim, a Figura 4.10 apresenta imagens do início do processo de nucleação de cristais com aumento de 1000x. Na figura pode ser observado o estágio de crescimento de um cristal. A animação disponível no arquivo Figura-4-10.avi auxilia na visualização do processo. Esta imagem está no disco que acompanha este relatório, na pasta Figura-4.10.

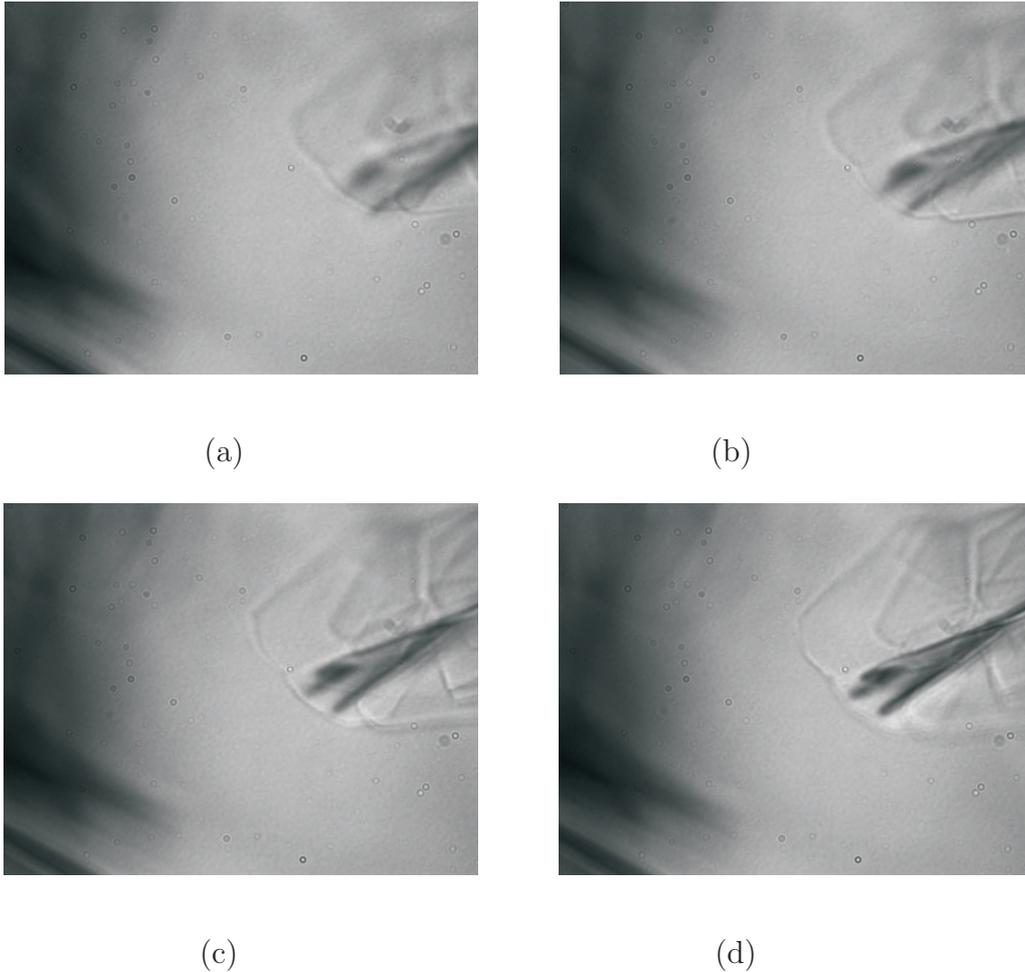


Figura 4.10: Visualização do crescimento de cristais. Aumento de 1000x. Rampa de resfriamento de $0,10^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Intervalo entre as imagens de 75 segundos. Imagens digitais e animação disponíveis no disco que acompanha a tese na pasta Figura-4.10

4.1.5

Deposição de Parafina sob Escoamento Laminar

O passo seguinte na investigação sobre os mecanismos básicos de deposição de parafina em dutos foi o estudo da deposição sob condições

de escoamento. Seguindo a metodologia de estudar-se problemas com grau crescente de dificuldade, primeiramente as investigações concentraram-se na deposição sob escoamento laminar. Para isto, foi utilizada a seção de testes projetada e construída conforme descrição da seção 3.2.1 do capítulo anterior deste relatório.

Basicamente, esta seção de testes era formada por um pequeno canal de seção retangular onde as duas paredes verticais eram de vidro para permitir visualização, e as duas paredes horizontais eram de cobre e dotadas de circulação externa de água para que suas temperaturas pudessem ser controladas. A deposição de parafina se dava nas paredes de cobre quando estas eram resfriadas. Uma câmara digital com lente de aproximação e montada sobre um trilho paralelo ao eixo do canal, permitia o acompanhamento do crescimento dos depósitos de parafina ao longo de toda a extensão do canal que media cerca de 300 mm.

A entrada e a saída o canal eram conectadas a dois tanques e estes, por sua vez, conectados a uma bomba de cavidades progressivas que era responsável pelo escoamento da solução de parafina e óleo pelo sistema. Aquecedores nos tanques e nas linhas de conexão mantinham a temperatura de entrada do óleo no canal sob controle. O fluido de trabalho utilizado nos testes era uma solução de 10% em massa de parafina comercial da marca Vetec com ponto de fusão na faixa de 56-58°C, com óleo spindle. A TIAC para esta solução foi avaliada pelo método de viscosimetria como sendo de aproximadamente 36,6°C.

Resultados para os Perfis Axiais de Temperatura no Canal

Antes de iniciar-se os experimentos de deposição de parafina, a distribuição de temperatura do fluido na seção de testes foi avaliada. Para isto, uma das paredes verticais de vidro foi substituída por uma parede com iguais dimensões, porém fabricada em acrílico. Nesta parede foram introduzidos 9 termopares para a medição da distribuição axial de temperatura ao longo do eixo central do canal.

A Figura 4.11 apresenta resultados típicos dos perfis axiais de temperatura medidos para três valores da vazão no canal, representadas pelos números de Reynolds 238, 279 e 536. Para estes testes de medição de temperatura, óleo spindle sem adição de parafina foi utilizado. Na figura, a temperatura da linha de centro do canal é apresentada como função da posição axial dos termopares. Nos testes apresentados na figura a temperatura do óleo dentro do tanque foi mantida em 40°C, enquanto a água de

refrigeração que circulava nos trocadores de calor conectados às paredes de cobre as mantinha na temperatura de 2°C.

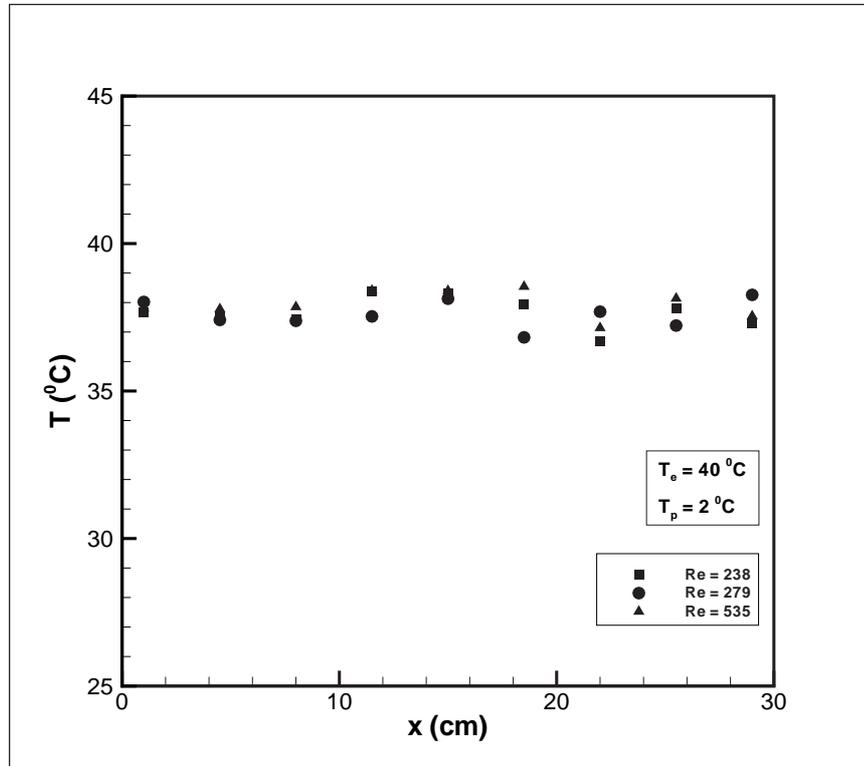


Figura 4.11: Distribuição axial de temperatura ao longo do eixo central do canal, para números de Reynolds iguais a 238, 279 e 536. Temperatura de entrada do óleo igual a 40°C. Temperatura da parede igual a 2°C.

Como pode ser observado, a temperatura da linha de centro do canal é praticamente constante e igual a 38°C. Este resultado era esperado pois a combinação das dimensões do canal com os números de Reynolds investigados, não permitia que a camada limite térmica que se desenvolve nas paredes frias de cobre atingisse a linha de centro do canal. Em outras palavras, não houve desenvolvimento do perfil de temperatura no comprimento do canal.

Embora não apresentado na Figura 4.11, perfis de temperatura ao longo da altura do canal foram também medidos em três posições axiais situadas no início, no meio e no fim do canal. Seis termopares foram posicionados verticalmente em cada estação axial. A avaliação da leitura destes termopares permitiu detectar assimetrias no perfil vertical de temperatura quando baixas vazões de óleo eram empregadas. A assimetria no perfil vertical de temperatura é uma indicação da influência da convecção natural sobre a convecção forçada. Como desejávamos realizar experimentos de deposição sob condições de convecção forçada apenas, os experimentos com

baixos valores do número de Reynolds foram evitados, garantindo-se assim a simetria vertical dos perfis de temperatura e, como será visto mais adiante, a simetria dos depósitos de parafina.

Resultados de Deposição de Parafina: Qualificação do Procedimento Experimental

A técnica utilizada para determinar a variação local da espessura de deposição de parafina era baseada na análise digital de seqüências de imagens dos depósitos. Como o canal utilizado nos testes possuía um comprimento de 300 mm, o enquadramento de todo o canal em uma só imagem resultaria em uma resolução espacial nas imagens que seria insuficiente para possibilitar a adequada medição da espessura dos depósitos. Assim, optou-se por obter imagens com maior ampliação e de pequena extensão axial. Por esta razão, a câmara digital era movimentada ao longo do eixo do canal em um total de 17 posições sucessivas. Em cada posição era registrada a evolução temporal do depósito, desde a condição inicial sem depósito, até que a espessura correspondente à condição de regime permanente fosse atingida. Após o registro de uma série de imagens para uma dada posição axial, a câmara era deslocada lateralmente para registrar a nova imagem, vizinha à anterior. Um processo de calibração realizado previamente utilizando marcações na parede do canal, possibilitou determinar o deslocamento necessário a ser dado no suporte que sustentava a câmara, de modo a posicioná-la exatamente na coordenada axial desejada para a aquisição do novo conjunto de imagens.

Após a câmara ser posicionada na coordenada desejada, as paredes de cobre eram aquecidas até que todo o depósito de parafina fosse removido. Depois disto, aguardava-se que uma condição estável de regime permanente fosse atingida, o que era monitorada pela estabilidade da temperatura do óleo no tanque de armazenagem na entrada do canal. Em seguida, as paredes de cobre eram novamente resfriadas para o nível de temperatura selecionado para o experimento em curso. A evolução temporal do depósito era então registrada na câmara digital até que a condição de regime permanente fosse atingida. Este procedimento era repetido até que todas as 17 posições axiais selecionadas para cobrir a extensão do canal fossem visitadas. No caso especial de registro da distribuição espacial do depósito na condição de regime permanente, as condições de vazão e temperatura do experimento eram ajustadas e, após a obtenção da condição de regime permanente, uma imagem era registrada para cada uma das dezessete posições da câmara.

Conforme descrito no parágrafo anterior, os experimentos que registravam a evolução temporal e espacial dos depósitos eram obtidos em diferentes realizações do mesmo experimento. Para estimar a incerteza associada a este procedimento, foram realizados testes preliminares onde, para uma dada posição axial da câmara digital, um conjunto de imagens era registrada englobando a evolução do depósito desde seu início até a obtenção da condição de espessura para o regime permanente. Em seguida, o depósito era removido pelo aquecimento da parede de cobre e novo experimento realizado a partir do resfriamento da parede de cobre. As medições de espessura de depósito realizadas nas imagens eram comparadas para cada replicação do experimento, para um mesmo intervalo de tempo, contado do início do resfriamento da parede de cobre.

A Figura 4.12 apresenta um resultado típico dos testes preliminares com a técnica de medição da espessura do depósito utilizada. Na figura, a espessura medida para o depósito dada em milímetros é apresentada como função da posição axial no canal. As condições do experimento correspondem a $Re = 431$, temperatura de entrada do óleo de 40°C e temperatura da parede de 5°C . A câmara para este experimento estava posicionada no início do canal, como pode ser observado pela faixa de variação da coordenada axial na figura que cobre de zero a 15 mm da extensão do canal. Três replicações dos experimentos são mostradas na figura. Cada uma delas corresponde ao tempo de 1 minuto contado a partir do início do resfriamento da placa de cobre. Para cada uma das replicações, 4 medidas de espessura foram realizadas nas imagens digitais, usando-se um programa comercial para o processamento das imagens. A comparação das medidas de cada replicação para uma mesma posição axial fornece uma boa estimativa da incerteza associada ao procedimento de medição adotado. Como pode ser observado na figura, as incertezas situaram-se dentro de uma faixa de cerca de $\pm 5\%$, valor plenamente aceitável para os propósitos do experimento.

Como mais uma verificação do procedimento experimental adotado e da seção de testes construída, foram realizados testes para avaliar a simetria da espessura do depósito obtido.

A Figura 4.13 apresenta resultados da espessura do depósito, obtidos para a condição de regime permanente, com $Re = 580$, temperatura de entrada $T_e = 40^{\circ}\text{C}$ e temperatura da parede, $T_p = 15^{\circ}\text{C}$. A escala adotada para a ordenada mostra efetivamente a altura do canal, 10 mm.

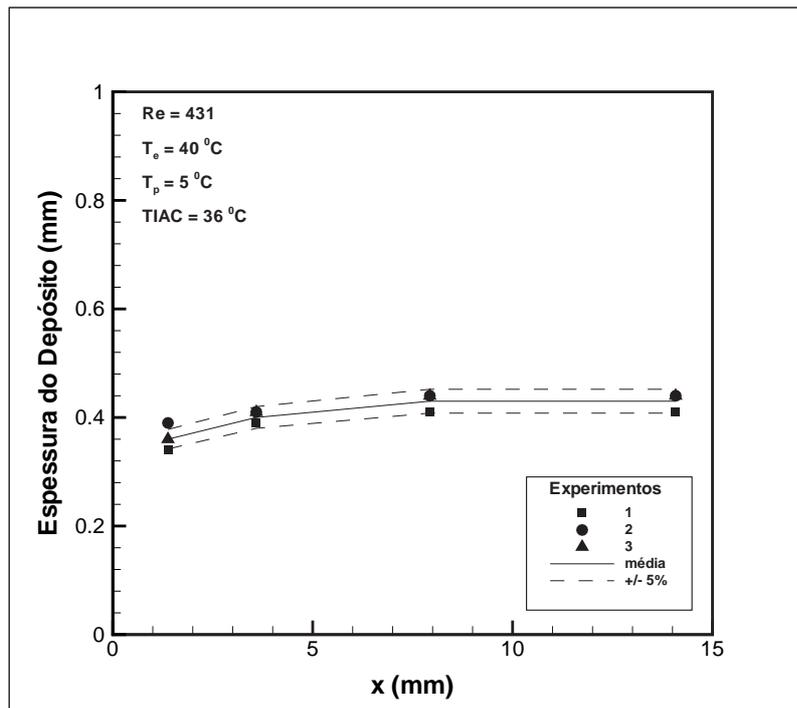


Figura 4.12: Testes de repetibilidade das medições de espessura de depósito. Temperatura de entrada da solução igual a $40\text{ }^\circ\text{C}$. Temperatura da parede igual a $5\text{ }^\circ\text{C}$. $Re = 431$. TIAC igual a $36\text{ }^\circ\text{C}$.

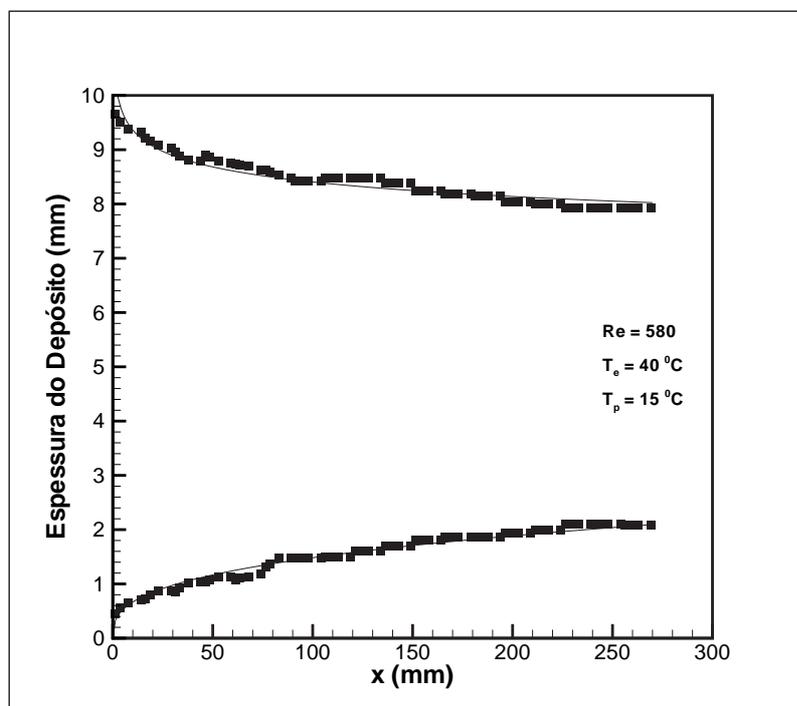


Figura 4.13: Teste para a avaliação da simetria da camada de parafina depositada nas paredes inferior e superior do canal. Temperatura de entrada da solução igual a $40\text{ }^\circ\text{C}$. Temperatura da parede igual a $15\text{ }^\circ\text{C}$. $Re = 580$. TIAC igual a $36\text{ }^\circ\text{C}$.

Como pode ser observado na figura, as espessuras de depósito para as paredes inferior e superior podem ser consideradas idênticas, levando-se em conta o nível de incertezas esperado para o experimento. Este resultado mostra que a simetria dos perfis de temperatura e velocidade que influenciam a formação do depósito pode ser considerada boa.

Uma conclusão importante pode ser retirada da análise dos resultados apresentados na Figura 4.13: a simetria dos depósitos indica que efeitos gravitacionais não são um mecanismo relevante no processo de formação do depósito de parafina. Este resultado já havia sido comentado na literatura (ver por exemplo Burger et al., 1981), tendo sido, todavia, obtido por via indireta à partir da comparação de espessuras de depósitos em tubos verticais e horizontais, obtidos sob mesmas condições de escoamento. O presente resultado fornece pela primeira vez uma visualização e quantificação direta desta conclusão.

Resultados para Espessura de Deposição de Parafina

Assim como nos testes de deposição em cavidades com fluido estagnado reportados anteriormente nesta tese, os objetivos dos testes de deposição sob escoamento laminar eram a geração de dados sobre a variação espacial e temporal da espessura de deposição e a visualização do movimento de cristais durante o processo de deposição.

As Figuras 4.14, 4.15, 4.16 e 4.17 apresentam os resultados experimentais obtidos para a evolução temporal e espacial dos depósitos de parafina junto a uma das paredes frias do canal, para valores do número de Reynolds de 301, 431, 580 e 729, respectivamente. O depósito, dado na forma dimensional em mm, é apresentado em função da coordenada axial do canal, também dada em milímetros. São apresentados perfis de espessura de depósitos para 5 valores distintos do tempo de ensaio, contado à partir do momento do abaixamento da temperatura das paredes de cobre do canal. A evolução dos perfis de deposição foi determinada nos experimentos através da medição em imagens obtidas em 12 intervalos de tempo. As figuras mencionadas apresentam apenas 5 instantes de tempo para evitar a superposição dos dados experimentais, o que dificultaria a interpretação dos resultados. Todos os experimentos reportados nas Figuras 4.14 - 4.17 foram realizados com a mesma solução de 10% em massa de parafina com óleo spindle, que apresentava valor da TIAC de 36°C. Também, em todos os experimentos, foram utilizadas as mesmas condições de temperatura de entrada do fluido, $T_e = 40^\circ\text{C}$, e da parede fria, $T_P = 15^\circ\text{C}$.

O valor da temperatura de 15°C para a parede fria foi selecionado após testes preliminares como sendo um valor que não produzia o bloqueio total da seção transversal do canal. Na verdade, buscou-se um valor de temperatura que deixasse livre cerca de 40% da área de escoamento na saída do canal, onde o depósito é mais espesso. Caso o canal fosse totalmente bloqueado por parafina, não haveria a possibilidade de realizar-se experimentos na condição de regime permanente como desejado. Ainda, caso apenas pequenas áreas livres para escoamento fossem obtidas no canal, altas taxas de cisalhamento poderiam ser geradas o que, provavelmente, removeria parte da camada depositada, misturando efeitos de deposição e remoção por cisalhamento que, embora possam estar presentes nas operações de campo, aqui, em nossos experimentos controlados, gostaríamos de vê-los separados para não dificultar ainda mais a interpretação dos resultados.

Uma importante característica dos resultados apresentados nas Figura 4.14 - 4.17 é a boa qualidade dos dados obtidos. Na revisão bibliográfica realizada não foram encontrados dados de deposição com o nível de detalhe fornecido nestas figuras. Nos experimentos reportados na literatura, eram utilizados métodos indiretos de medição da espessura de deposição, ou medições obtidas após a realização dos experimentos, envolvendo a desmontagem das seções de testes. Acredita-se que os resultados do presente trabalho sejam os primeiros dados obtidos em tempo real sobre a evolução dos depósitos. Em contrapartida, os dados aqui apresentados foram obtidos para seções de teste simples com soluções baseadas em parafinas refinadas, o que os afasta dos dados de campo. No entanto, de acordo com a filosofia adotada no presente trabalho, considera-se que os dados obtidos sejam excelentes para a verificação de modelos de simulação desenvolvidos. Caso os modelos desenvolvidos não sejam capazes de prever os perfis de deposição destes experimentos simples realizados sob condições controladas e utilizando soluções de parafina com propriedades relativamente bem conhecidas, não há esperança que eles venham prever com um razoável nível de incerteza os depósitos que ocorrem no campo.

Os resultados apresentados na Figura 4.14 foram obtidos para o menor valor das vazões testadas, o que corresponde a $Re = 301$. Vazões menores que este valor foram evitados por produzirem depósitos maiores na parede inferior do que na parede superior do canal, para um mesmo tempo e posição axial. Esta diferença era ocasionada pela assimetria nos perfis de temperatura devido ao efeito de convecção natural, como já comentado dentro do item 4.1.5.

Pode-se observar na Figura 4.14 o rápido crescimento inicial do

depósito ao longo de toda a extensão do canal. De fato, os primeiros 10 minutos de acumulação de depósito são responsáveis por cerca de 50% do valor da espessura final do depósito, obtida para a condição de regime permanente.

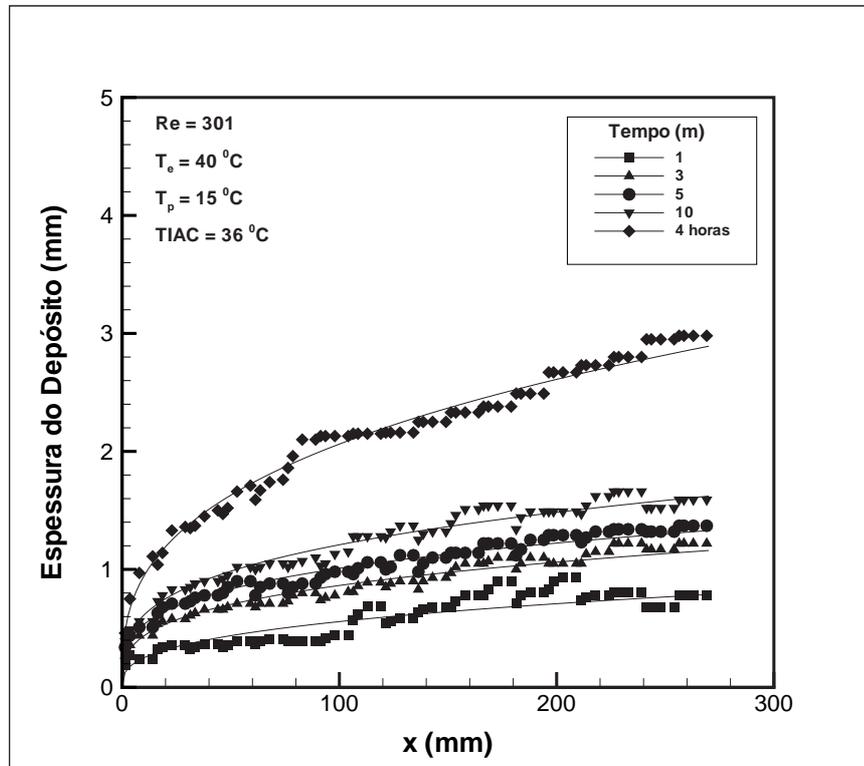


Figura 4.14: Evolução temporal e espacial da espessura do depósito de parafina na parede inferior do canal. Temperatura de entrada da solução igual a 40°C. Temperatura da parede igual a 15°C. $Re = 301$. TIAC igual a 36°C.

Os resultados também mostram um comportamento assintótico para a espessura de deposição em função da coordenada axial. Como o canal utilizado nos experimentos era relativamente curto - cerca de 65 diâmetros hidráulicos de comprimento - não foi possível realizar medições nas regiões próximas ao valor assintótico da espessura do depósito. Na figura são apresentadas curvas ajustadas aos dados, para cada instante de tempo. O tipo de curva que melhor ajustou os dados, indica uma dependência do tipo lei de potência para a relação entre espessura e distância axial. Um valor médio, para todos os instantes de tempo, obtido para o expoente da lei de potência era de $1/3$. Este comportamento assintótico da espessura do depósito indica que, para dutos longos, como os encontrados nas aplicações de campo, o comportamento inicial do depósito torna-se irrelevante. Contudo, a previsão da forma do crescimento do depósito na região de entrada do canal

seria um teste mais rigoroso para os modelos de simulação, e os dados aqui apresentados poderiam ser utilizados também para esta finalidade.

Os dados apresentados na Figuras 4.15 a 4.17 apresentam comportamento da espessura de depósito semelhante àquele já comentado para o caso da Figura 4.14. A tendência geral de menores espessuras de depósito para maiores valores do número de Reynolds é verificada nos resultados.

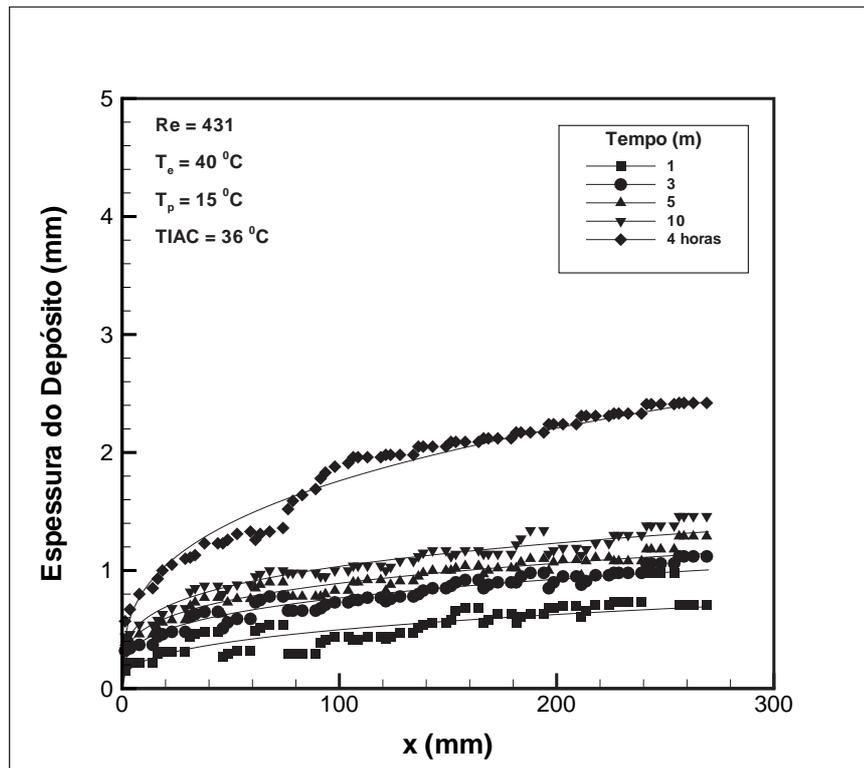


Figura 4.15: Evolução temporal e espacial da espessura do depósito de parafina na parede inferior do canal. Temperatura de entrada da solução igual a 40°C. Temperatura da parede igual a 15°C. $Re = 431$. TIAC igual a 36°C.

As leis de potência que melhor representam os dados experimentais apresentam expoentes bastante próximos para todos os valores de Reynolds investigados. O valor 1/3 para o expoente da lei de potência representa o valor obtido para cada um dos experimentos reportados dentro de uma faixa de $\pm 20\%$.

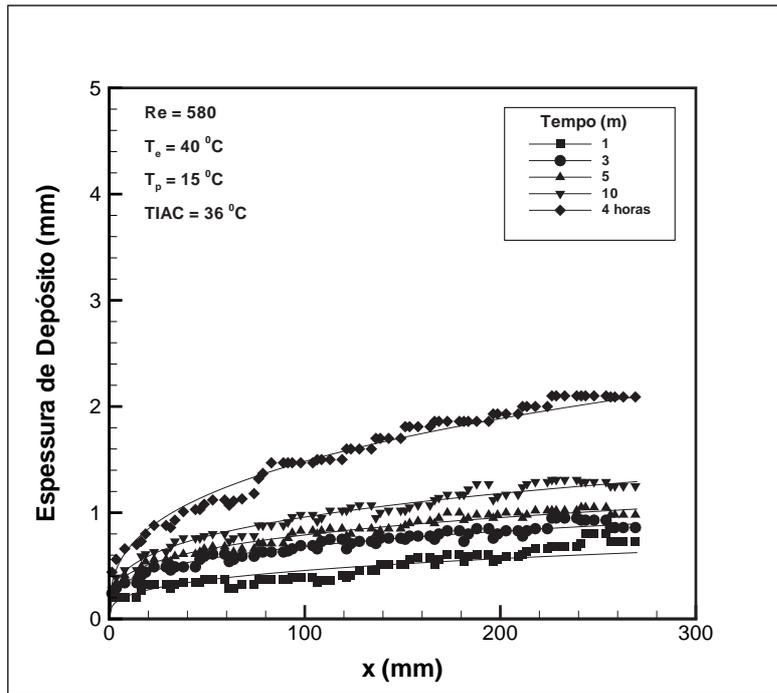


Figura 4.16: Evolução temporal e espacial da espessura do depósito de parafina na parede inferior do canal. Temperatura de entrada da solução igual a 40°C. Temperatura da parede igual a 15°C. Re = 580. TIAC igual a 36°C.

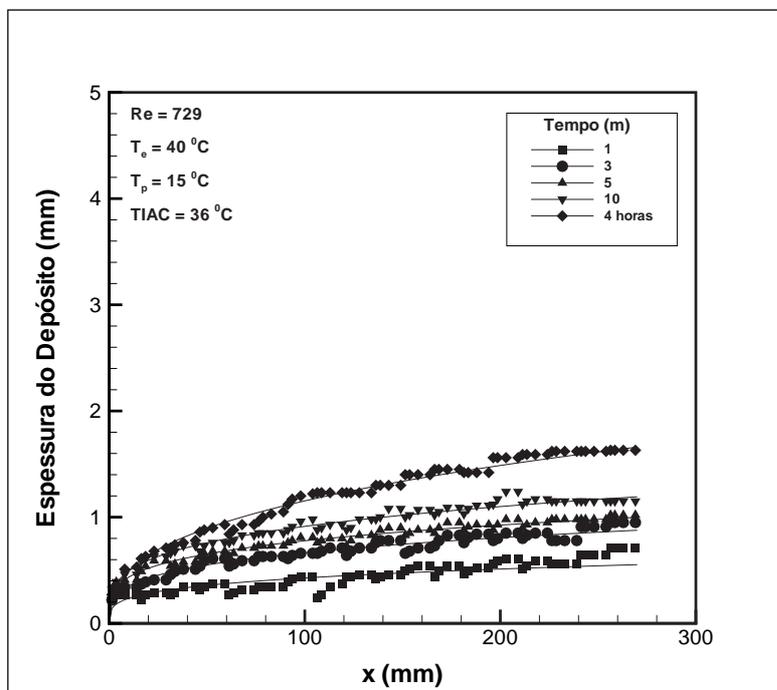


Figura 4.17: Evolução temporal e espacial da espessura do depósito de parafina na parede inferior do canal. Temperatura de entrada da solução igual a 40°C. Temperatura da parede igual a 15°C. Re = 729. TIAC igual a 36°C.

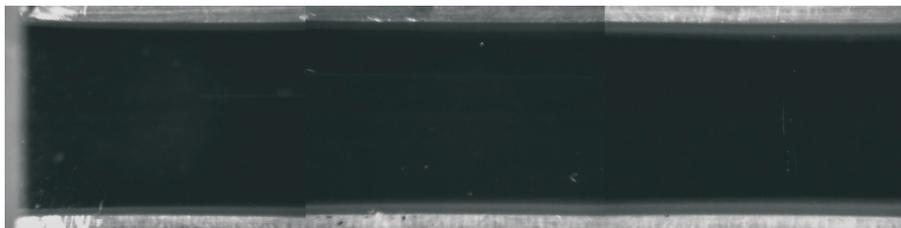
A Figura 4.18 ilustra o tipo de imagens obtidas nos experimentos e utilizadas na construção das Figuras 4.14 - 4.17. Cada imagem apresentada para o tempo assinalado na figura é, na realidade, uma justaposição de várias imagens obtidas de replicações distintas do experimento, de acordo com o procedimento descrito dentro do item 4.1.5. A visualização do depósito formado junto às paredes horizontais de cobre não é fácil, devido à qualidade da impressão obtida neste texto. O perfil de espessura de depósito para o tempo de 4 horas, considerado como regime permanente, é mais fácil de ser observado na figura. As imagens da Figura 4.18 são relativas ao experimento apresentado na Figura 4.16. As imagens apresentadas na Figura 4.18 podem ser melhor observadas na forma digital no arquivo Figura-4-18, localizado na pasta Figura-4.18, que pode ser encontrada no disco que acompanha esta tese. Na mesma pasta encontra-se também o arquivo Figura-4-18.avi que mostra uma animação do processo transiente de formação do depósito na região de entrada do canal.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 4.18: Seqüência de imagens mostrando a evolução do depósito nas paredes inferior e superior do canal. Escoamento na figura da esquerda para a direita. Temperatura de entrada igual a 40°C. Temperatura da parede igual a 15°C. $Re = 580$.

Resultados sobre a Observação da Movimentação de Cristais de Parafina

Como mencionado anteriormente, um dos objetivos do trabalho era tentar observar a movimentação de cristais de parafina em direção à parede fria, para avaliar a possível contribuição de mecanismos de transporte de parafina sólida na formação do depósito.

Os resultados de deposição reportados nas Figuras 4.14 - 4.17 foram todos obtidos com uma lente zoom de 18 - 108 mm de distância focal. Para o nível de ampliação utilizado não foi possível observar qualquer movimentação de cristais em direção à parede.

Testes com lentes de aproximação que permitiam ampliações de cerca de 12x foram realizados. Nestes testes foi possível identificar cristais ou pequenos aglomerados de cristais movendo-se por sobre a superfície dos depósitos em formação. Visto sob este nível de ampliação, a superfície dos depósitos é bastante irregular, o que provoca o aparecimento de pequenas zonas de re-circulação de fluido nos vales formados atrás dos picos formados por aglomerados de cristais. Os cristais livres observados circulam nestas regiões e são, quase sempre, capturados pelos picos das formações de cristais, passando a integrar os depósitos. Ainda não realizamos experimentos em número suficiente para identificarmos a origem destes cristais em movimento. É possível que estes cristais tenham sido gerados pelo arrancamento - via cisalhamento pelo fluido - de cristais recém formados, localizados nas camadas mais externas do depósito e, portanto, fixados mais precariamente às camadas mais internas. Estes cristais arrancados de posições a montante da posição de observação estariam sendo trazidos pelo escoamento. No caso desta hipótese ser verdadeira, não estaríamos diante de um mecanismo de transporte lateral de cristais das regiões centrais do escoamento para a parede como buscamos identificar nestes experimentos.

As imagens capturadas que permitiram os comentários do parágrafo anterior não estão sendo aqui apresentadas devido à sua baixa qualidade - ainda estamos trabalhando para obter melhores imagens - e pela falta de certeza sobre a origem deste cristais em movimento.