

4 Resultados

Neste capítulo, serão apresentados e discutidos os resultados quantitativos e qualitativos obtidos a partir da visualização da deposição de parafina ao longo da parede interna do canal retangular, para regimes de escoamento laminar e turbulento.

A apresentação dos resultados será iniciada com informações sobre os perfis axiais de temperatura gerados na parede do canal durante os transientes de resfriamento. Em seguida serão apresentados os resultados qualitativos obtidos nos ensaios de visualização da deposição de parafina. Finalmente, serão apresentados os resultados referentes à distribuição espacial e temporal da espessura de depósito de parafina para os números de Reynolds ensaiados.

4.1 Resultados de Perfis de Temperatura

Como já descrito no procedimento experimental, os ensaios de deposição de parafina eram iniciados a partir de uma condição de regime permanente onde as paredes do canal e o fluido que era bombeado para o seu interior encontravam-se a uma mesma temperatura acima da TIAC para a mistura em estudo. O teste propriamente dito era iniciado quando a temperatura da parede era rebaixada abruptamente para um valor pré-determinado abaixo da TIAC e mantido neste valor até o fim do experimento. Idealmente, o abaixamento da temperatura deveria se dar na forma de um degrau, onde a temperatura é rebaixada instantaneamente do valor alto para o valor baixo. Esta condição ideal não pode ser atingida em experimentos de laboratório devido à capacidade térmica finita da parede do canal, bem como a limitações na taxa com que o calor é retirado das paredes.

Para caracterizar de maneira correta os ensaios realizados, é necessário que seja informado o comportamento real da temperatura da parede do canal ao longo do transiente inicial de resfriamento. Esta informação pode ajudar na

interpretação dos resultados de deposição de parafina que serão apresentados no presente capítulo, assim como pode também auxiliar na correta implementação das condições iniciais e de contorno de simulações computacionais que vierem a utilizar os resultados do presente estudo como forma de validação de suas previsões.

O monitoramento da temperatura das paredes do canal é feito através de quarenta termopares instalados no interior da parede, vinte em cada parede, com suas junções posicionadas a poucos décimos de milímetros da superfície interna da parede por onde escoava a mistura de querosene e parafina. Como as paredes principais do canal foram fabricadas em cobre - um ótimo condutor de calor - estas leituras de temperatura constituem-se em uma excelente indicação da temperatura da parede interna do canal por sobre a qual escoava o fluido. Os detalhes da instalação dos termopares foram descritos no Capítulo 3.

Os testes preliminares de resfriamento das paredes, cujos resultados serão apresentados a seguir, foram realizados seguindo os mesmos procedimentos dos testes com deposição de parafina. O procedimento experimental iniciava-se pelo bombeio do fluido aquecido a 40°C para o interior do canal que tinha suas paredes de cobre mantidas também a 40°C. A temperatura das paredes era mantida neste nível pela circulação da água dos banhos termostáticos previamente aquecidos. Para iniciar o teste, uma manobra de válvulas era realizada rapidamente, o que direcionava água a -10°C de um banho termostático de maior potência simultaneamente para o interior dos dutos de refrigeração posicionados no interior das paredes de cobre do canal. As temperaturas dos termopares posicionados no início de cada parede, termopares 1 e 21, eram monitoradas até que atingissem 15°C, a temperatura estabelecida para os testes. Quando esta temperatura era atingida, outra manobra de válvulas era rapidamente realizada, desconectando o fluxo de água do primeiro banho termostático e conectando outros dois banhos, um para cada parede do canal. Estes dois banhos estavam previamente em equilíbrio a uma temperatura de 13°C. A razão para a utilização de três banhos termostáticos na operação de resfriamento das paredes do canal deve-se ao fato que a potência do primeiro banho ajustado a -10°C era bastante superior à dos outros dois banhos que tinham a tarefa de apenas manter as temperaturas das paredes a 15°C. Esta operação combinada foi a que melhor resultados apresentou, no que diz respeito

à obtenção de uma condição inicial de temperatura que se aproximasse do degrau ideal.

A Figura 4.1 apresenta a evolução temporal dos perfis axiais de temperatura medidos em uma das paredes do canal. A ordenada representa os valores de temperatura ao longo do canal, medidos em graus Celsius, enquanto a abscissa representa a posição do termopar ao longo do comprimento do canal. Os resultados apresentados na figura correspondem a um número de Reynolds laminar igual a 1660. Os perfis de temperatura são apresentados para os tempos indicados na legenda da figura, contados a partir do início do processo de resfriamento da parede.

Observa-se na figura que inicialmente a parede do canal encontrava-se com temperatura uniforme equivalente a 40°C . Iniciado o resfriamento, nota-se que a parte inicial da parede do canal resfria-se mais rapidamente que o restante da parede. Este comportamento é devido ao fato que a entrada da água de refrigeração na parede de cobre se dá pela parte inicial do canal. Pode-se observar na figura, que a condição de refrigeração ideal por um degrau de temperatura não foi atingida nos experimentos realizados. De fato, são necessários cerca de 10 minutos para que toda a parede atinja a condição de regime permanente à temperatura de 15°C .

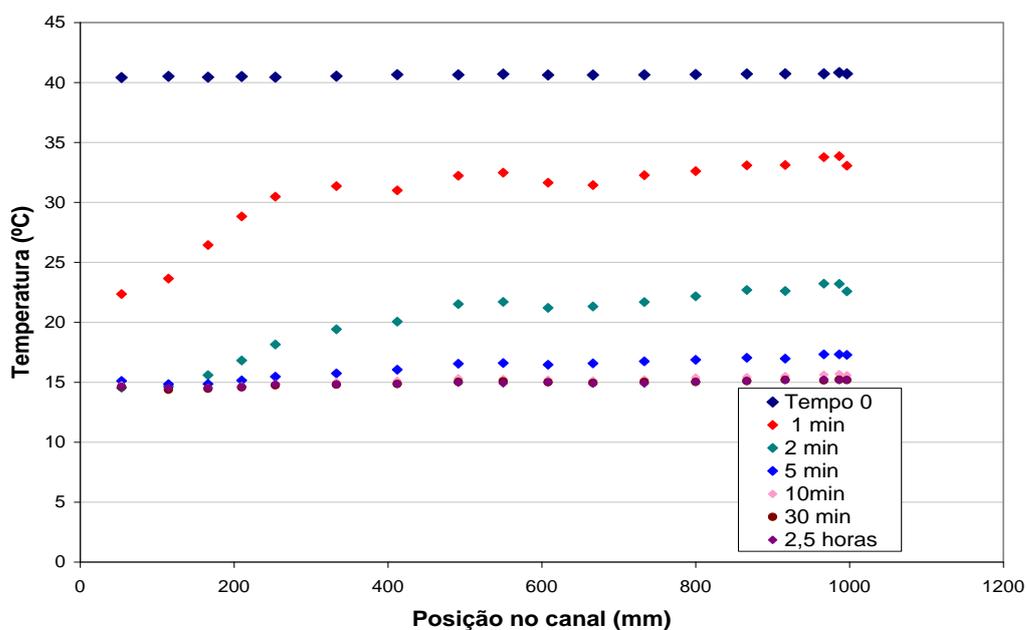


Figura 4.1: Evolução temporal do perfil axial de temperatura da parede interna do canal, para regime laminar com $\text{Re}=1660$.

A repetibilidade do procedimento experimental de resfriamento da parede do canal comentado no parágrafo anterior foi avaliada através da repetição de 17 experimentos realizados sob as mesmas condições operacionais. Os resultados destes experimentos são apresentados na Figura 4.2. Na figura, pode-se observar uma boa repetibilidade para o perfil de temperatura avaliado após 2 minutos do início do resfriamento. O espalhamento máximo verificado ao longo do comprimento do canal foi de $0,9^{\circ}\text{C}$. Resultados semelhantes foram encontrados para perfis avaliados a diferentes tempos após o início do resfriamento, mas não são apresentados.

O teste apresentado na Figura 4.2 foi realizado para um valor do número de Reynolds igual 1660, correspondendo, portanto, a um escoamento laminar. Testes de repetibilidade da temperatura foram também realizados para condições de escoamento turbulento. Os resultados obtidos para o número de Reynolds igual a 6900 são apresentados na Figura 4.3. Como pode ser observado, o nível de espalhamento observado é da mesma ordem de grandeza daquele obtido para o escoamento laminar. No entanto, observa-se que os níveis de temperatura alcançados pela parede são superiores àqueles alcançados durante os testes com regime laminar. As curvas para escoamento laminar e turbulento são apresentadas na Figura 4.3 para facilitar a comparação. As barras verticais em cada ponto indicam o espalhamento obtido entre os diversos experimentos realizados. O maior nível de temperatura observado para os experimentos com escoamento turbulento são devidos às maiores taxas de transferência de calor associadas ao escoamento turbulento que fornecem resistências convectivas menores, o que retarda o resfriamento da parede.

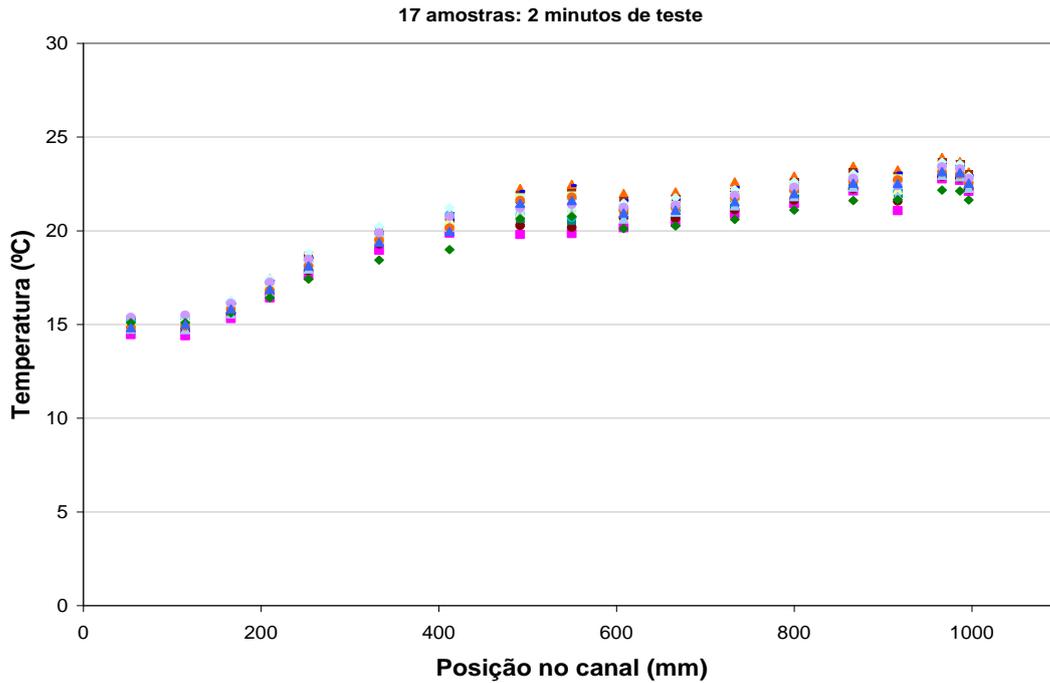


Figura 4.2: Teste de repetibilidade do processo de resfriamento da parede do canal. Resultados de 17 replicações dos experimentos para perfis de temperatura após 2 minutos do início do resfriamento. Regime de escoamento laminar, $Re = 1660$.

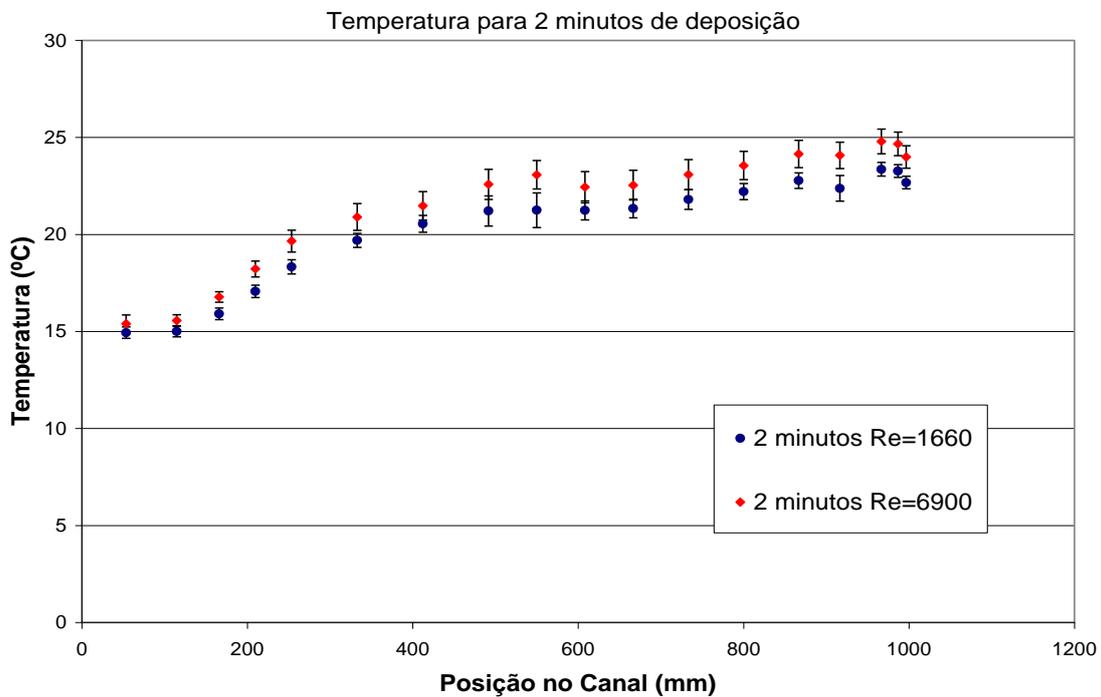


Figura 4.3: Comparação dos perfis de temperatura ao longo da parede do canal após 2 minutos do início do resfriamento para escoamento laminar ($Re = 1660$) e turbulento ($Re = 6900$). Barras verticais representam o espalhamento obtido na replicação de 17 experimentos.

4.2

Ensaio Preliminares de Deposição de Parafina

Antes de serem iniciadas as corridas experimentais para a tomada de dados sobre a variação espacial e temporal dos depósitos de parafina ao longo das paredes do canal, foram realizados os experimentos preliminares que serão descritos nesta seção.

Como já descrito em detalhes no Capítulo 3, a variação espacial e temporal dos depósitos de parafina foi determinada pela análise de imagens do crescimento do depósito capturadas em posições fixas ao longo do canal. Para cada posição, uma seqüência de imagens era capturada a intervalos pré-determinados. As imagens eram posteriormente analisadas fornecendo os dados sobre a variação espacial e temporal do depósito. As imagens foram capturadas por meio de um microscópio estereoscópico acoplado a uma câmera digital.

Como o canal apresentava um comprimento total de 1 metro e o campo de visão do microscópio era de cerca de 7 mm na direção axial por 5 mm na direção transversal, foi necessário utilizar o procedimento de medição descrito no Capítulo 3. Neste procedimento, o microscópio era posicionado em uma dada posição axial do canal registrando as imagens do crescimento do depósito de parafina ao longo do tempo, desde o início da refrigeração da parede, até a obtenção de uma espessura constante de depósito no regime permanente. Após a obtenção da espessura de regime permanente, as paredes do canal eram aquecidas e o depósito de parafina removido. O microscópio era então deslocado para uma nova posição axial no canal. As paredes eram novamente resfriadas e registravam-se as imagens do processo de deposição nesta nova posição. Este procedimento era repetido até que todas as 24 posições de interesse indicadas na Figura 3.16 tivessem sido visitadas.

4.2.1

Calibração das Imagens

As medições quantitativas realizadas sobre as imagens capturadas pelo microscópio necessitam ser calibradas de modo a fornecer uma relação entre as dimensões dadas em *pixels* na imagem com as dimensões reais na seção de testes.

A calibração foi realizada utilizando-se uma régua transparente graduada em 0,01 mm, fornecida pelo fabricante do microscópio especialmente para calibrações de imagens. Como as imagens dos depósitos de parafina dentro do canal de testes seriam obtidas através de uma parede de vidro e dentro de um meio líquido basicamente formado por querosene, foi necessário realizar as calibrações das imagens utilizando o mesmo caminho óptico. Assim, a régua de calibração foi posicionada dentro de pequeno vaso contendo querosene e coberta por uma parede de vidro idêntica à parede do canal de testes. Desta forma, foram reproduzidas as mesmas condições ópticas do canal, o que produziu uma calibração correta. As imagens foram calibradas para os diferentes níveis de ampliação utilizados no microscópio.

4.2.2

Determinação do Tempo para Obtenção de Regime Permanente

Após o microscópio ser posicionado no local desejado, o início da captura de imagens era marcado pelo acionamento das válvulas do banho a -10°C , produzindo o início da deposição. Em seguida, havia troca de válvulas para os banhos a 13°C e a estabilização da temperatura ao longo do canal se dava a 15°C . Quando a espessura de depósito atingia a condição de regime permanente o teste era finalizado.

A determinação do tempo necessário para a obtenção da condição de regime permanente da espessura do depósito de parafina foi obtida a partir de testes preliminares. A Figura 4.4 apresenta um resultado típico destes testes. Na figura, a espessura do depósito de parafina é apresentada em função do tempo contado a partir do início do experimento, para os diferentes valores de número de Reynolds testados, a saber, 1660, 4400, 5650 e 6900. No caso da Figura 4.4, as espessuras medidas correspondem a uma posição axial no meio do canal, i.e, a 500 mm da seção de entrada. Medições como estas foram também realizadas em outras posições axiais. Os resultados destes testes indicaram que um tempo de 150 minutos era necessário para a obtenção da condição de regime permanente na espessura do depósito. Este foi o valor adotado nos experimentos conduzidos.

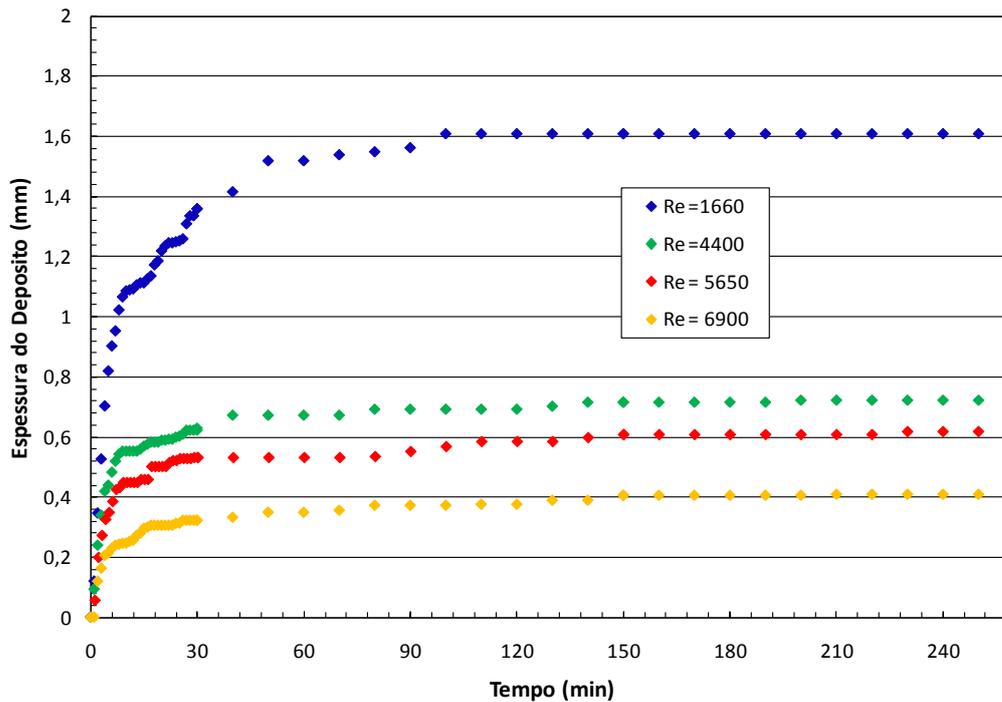


Figura 4.4: Variação temporal da espessura do depósito de parafina para uma posição axial no meio do canal para diferentes valores do número de Reynolds. Teste para a determinação do tempo necessário para a obtenção da condição de regime permanente na espessura do depósito de parafina.

4.2.3 Testes de Simetria do Depósito de Parafina

A seção de testes foi projetada e construída com cuidado de modo a produzir um canal com geometria simétrica em relação ao eixo axial. Também, foram tomados cuidados para que as condições de contorno térmicas impostas nas duas paredes do canal fossem idênticas. Para avaliar o nível de simetria do escoamento através do canal, foram realizados ensaios preliminares onde as distribuições de temperatura e espessura de depósito ao longo do canal para cada parede foram medidas e comparadas. Estas comparações são apresentadas para a condição de regime permanente, para um caso com número de Reynolds igual a 5650. As condições térmicas utilizadas são idênticas às utilizadas em todos os ensaios, ou seja, temperatura do fluido na entrada, $T_e = 40^\circ\text{C}$, e temperatura de equilíbrio das paredes de cobre, $T_p = 15^\circ\text{C}$.

A Figura 4.5 apresenta os resultados do teste de simetria. Na figura, a abscissa representa a coordenada axial do canal. A ordenada da esquerda

representa a espessura de depósito, enquanto a ordenada da direita indica a temperatura da parede.

Os pontos marcados no centro da figura indicam as temperaturas de cada uma das paredes. São indicadas as temperaturas da parede direita (termopares 1 a 20) e as da parede esquerda (termopares de 21 a 40). Pode-se notar uma perfeita concordância entre as temperaturas das duas paredes, o que indica que o canal é termicamente simétrico.

As espessuras de depósito para regime permanente em cada parede são indicadas nas partes superior e inferior da figura. Pode-se observar a forma simétrica do depósito em relação ao eixo do canal. Na Figura 4.6 as espessuras de depósito de cada parede são apresentadas no mesmo eixo, o que permite uma melhor avaliação do nível de simetria. Dentro dos níveis de incerteza esperados para este tipo de experimentos da ordem de $\pm 4\%$, pode-se afirmar que os depósitos são simétricos. Baseado nestes resultados foram realizadas medições de espessura em apenas uma das paredes do canal.

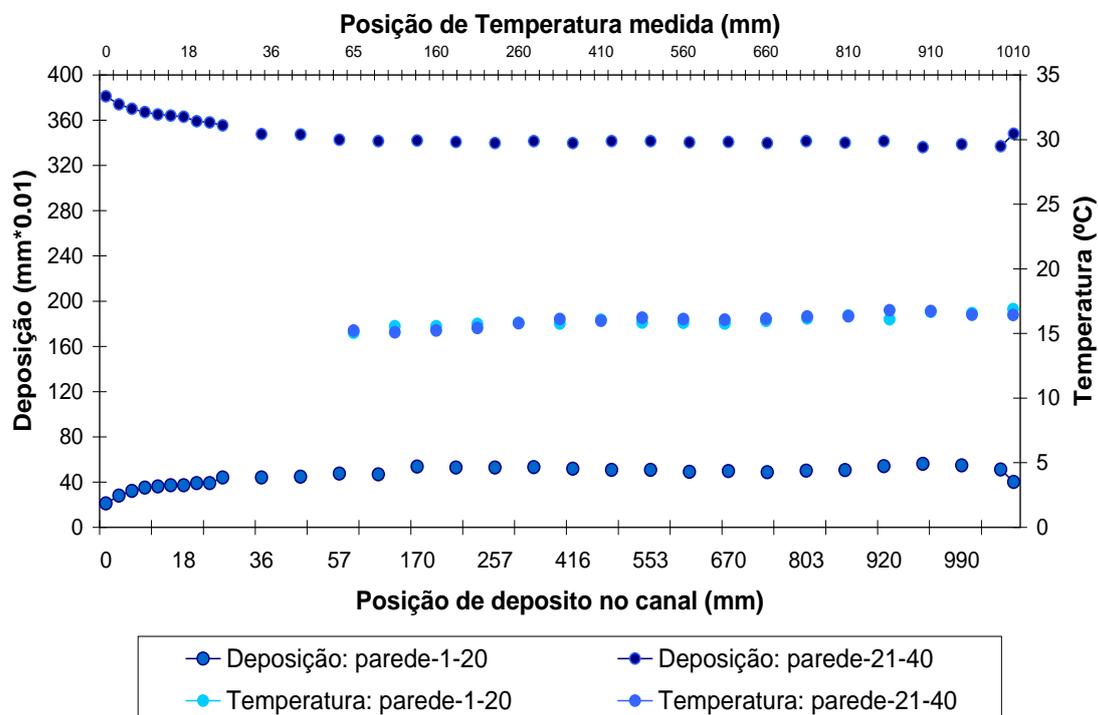


Figura 4.5: Testes para a verificação da simetria da distribuição de temperatura e espessura de depósito ao longo do canal. Resultados de regime permanente para $Re=5650$, $T_f= 40^\circ\text{C}$ e $T_p= 15^\circ\text{C}$.

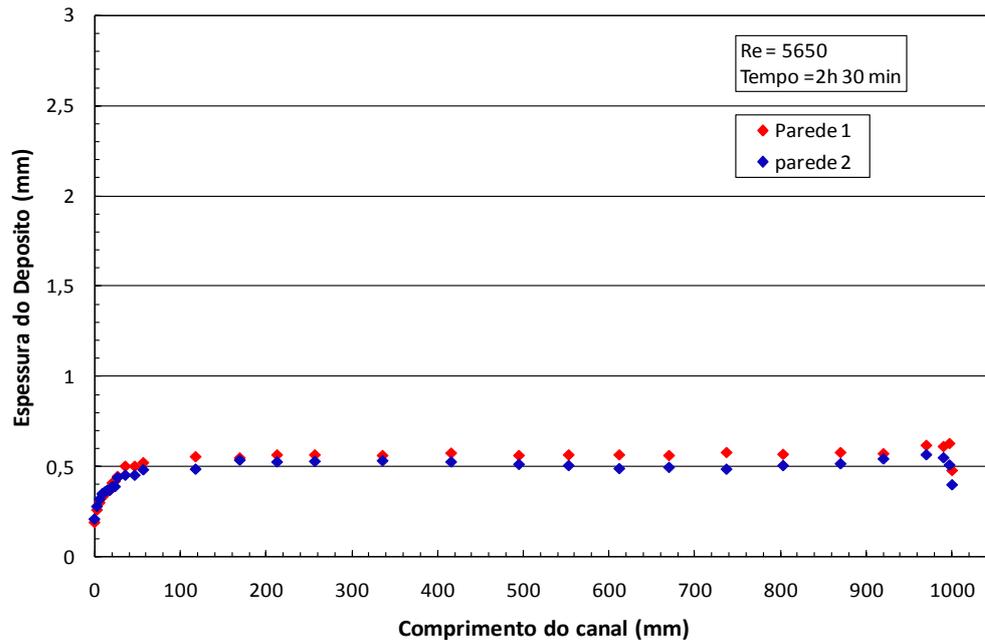


Figura 4.6: Testes para a verificação da simetria dos depósitos de parafina. Resultados da obtidos para a condição de regime permanente, com $Re=5650$, temperatura de entrada $T_e = 40^\circ\text{C}$ e temperatura das paredes, $T_p = 15^\circ\text{C}$.

4.2.4 Avaliação da Movimentação das Paredes do Canal

A seção de testes é formada por um canal de cerca de 1 metro de comprimento com paredes principais de cobre. Dentro destas paredes circula água de refrigeração que impõe as condições de contorno térmicas necessárias para o processo de deposição de parafina. A imposição de variações abruptas de temperatura nas paredes de cobre gerou preocupação relacionada às possíveis variações na posição das paredes ao longo do processo de resfriamento, devido a efeitos de dilatação térmica. Como a posição da parede de cobre era usada como referência nas imagens para a medida das espessuras de depósito de parafina, julgou-se necessário realizar um estudo preliminar para avaliar o nível de movimentação transversal das paredes.

Com este intuito foram realizados testes preliminares onde a mistura de querosene e parafina foi substituída por querosene puro. Isto foi feito para evitar a deposição de parafina nas paredes de cobre, já que o intuito dos experimentos era detectar a movimentação da parede devido a efeitos térmicos. Fora a troca mencionada do fluido de trabalho, os testes foram realizados de maneira semelhante aos testes para a medição da evolução espacial e temporal do

depósito de parafina. Assim, a posição da parede de cobre era determinada nas imagens capturadas pela câmera do microscópio para a condição inicial onde o fluido e a parede estavam ambas à mesma temperatura de 40°C. Em seguida, a parede de cobre era resfriada pelo mesmo procedimento já descrito utilizando os diversos banhos termostáticos, até que condição de regime permanente a 15°C fosse atingida. As imagens eram capturadas durante todo o processo de resfriamento, e a posição da parede de cobre registrada.

A Figura 4.7 apresenta os deslocamentos transversais da parede de cobre medidos a cada minuto, durante 30 minutos, para três posições axiais ao longo do canal, a saber, no início, no meio e no fim do canal. O regime de escoamento foi laminar, com um número de Reynolds de 1660.

Uma observação dos resultados apresentados na figura indica que os deslocamentos transversais máximos da parede medidos são da ordem de 0,04 mm, o que pode ser considerado desprezível em face à espessura de depósito de parafina medida nos experimentos realizados.

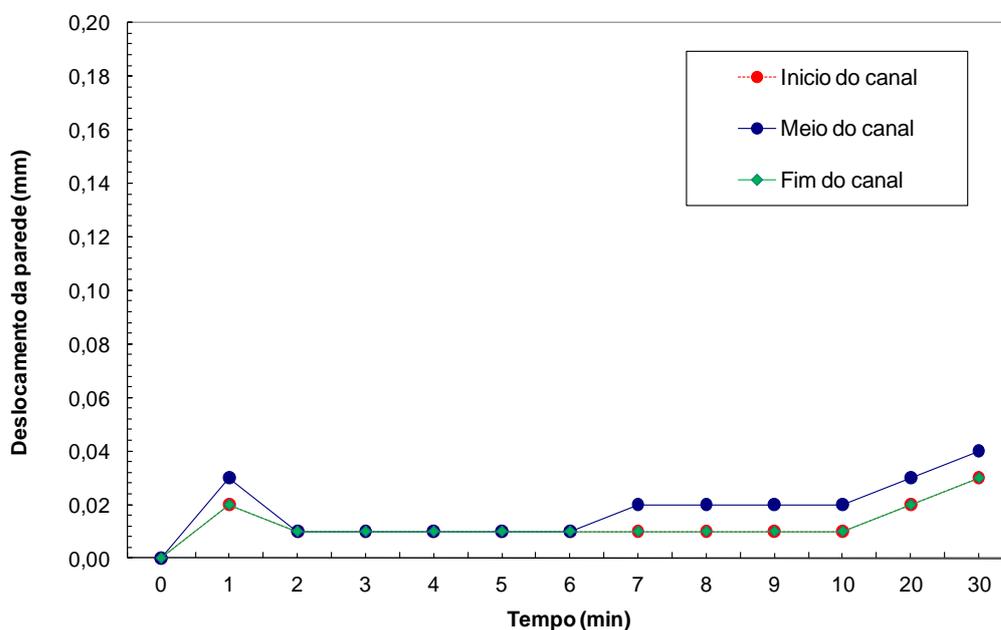


Figura 4.7: Deslocamentos transversais da parede de cobre devido ao resfriamento da parede como função do tempo contado do início do resfriamento. Teste para regime laminar com $Re=1660$, para três posições longitudinais do canal: início, meio e fim do canal. Temperatura de entrada do querosene a 40°C e temperatura final de resfriamento da parede igual a 15°C.

4.3 Visualização da Deposição de Parafina sob Escoamento Laminar e Turbulento

Os resultados quantitativos a serem apresentados sobre a distribuição espacial e temporal dos depósitos de parafina foram obtidos através de medições realizadas em imagens capturadas do processo de deposição. Antes de apresentar os resultados quantitativos sobre os depósitos para diferentes condições de escoamento, é interessante observar de maneira qualitativa algumas imagens típicas do crescimento dos depósitos registradas ao longo dos experimentos.

Como já mencionado, o crescimento dos depósitos de parafina foi registrado utilizando-se uma câmera digital acoplada a um microscópio estereoscópico. Dependendo da espessura do depósito a ser registrada selecionou-se uma ampliação óptica adequada no microscópio. Assim, para experimentos no regime de escoamento laminar utilizou-se aumento de 32 vezes. Já para os experimentos em regime turbulento, foram necessárias maiores ampliações devido às menores espessuras de depósito associadas a este regime de escoamento.

Para os experimentos em regime turbulento utilizou-se aumento óptico de 50 vezes. Em alguns experimentos em regime turbulento o aumento foi reduzido para 32 vezes de modo a permitir ampliar o campo de visão da imagem capturada. Estes casos ocorreram nas posições 1, 2 e 3 localizadas no início do canal, como indicado na Figura 3.16, aqui reproduzida sob o número de Figura 4.8, para facilitar o acompanhamento dos resultados que serão apresentados. Na figura pode-se observar que os espaçamentos entre as estações de observação eram menores no início do canal, ampliando-se ao longo do comprimento, de modo a melhor capturar as maiores variações na espessura de deposição de parafina na direção axial observadas no início do canal. Para posições axiais mais afastadas da entrada do canal, as variações da espessura com a distância axial são bem menores, permitindo a observação em posições mais espaçadas sem comprometer a medição do depósito e economizando significativamente o tempo total de medição para um dado experimento.

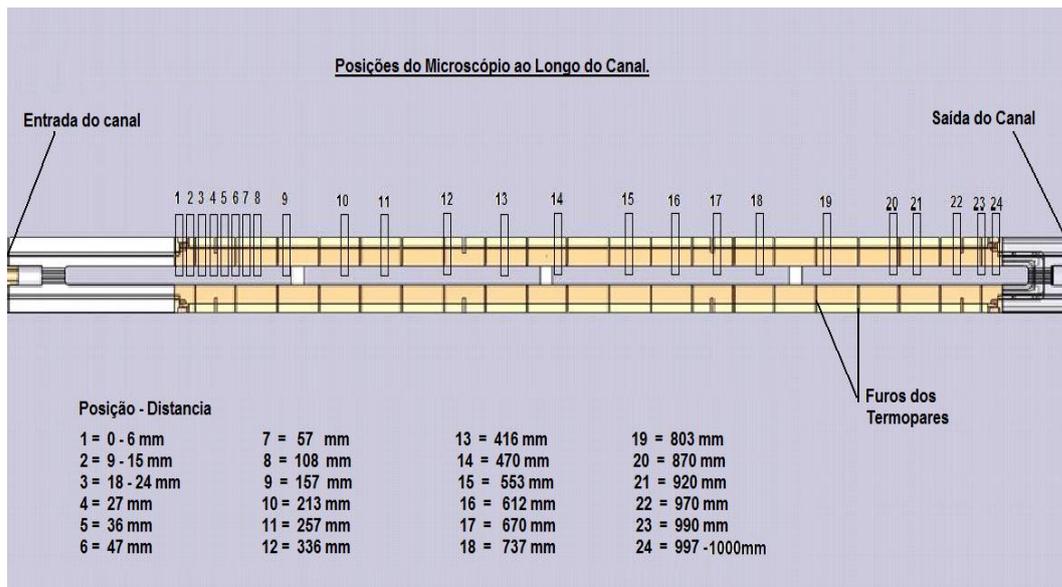


Figura 4.8 – Vista esquemática das posições das regiões de observação com microscópio ao longo do canal (reprodução da Figura 3.16).

Os testes tiveram duração total de duas horas e meia. Imagens eram registradas com intervalos de 10 segundos na primeira meia hora de operação do experimento, e de 10 minutos nas duas horas seguintes. De acordo com o procedimento experimental já descrito no Capítulo 3, em cada uma das 24 estações axiais de medição, após a espessura de depósito de regime permanente ter sido atingida, o experimento era interrompido, água quente era bombeada pelas paredes de cobre até que todo o depósito de parafina depositada fosse removido. Em seguida o microscópio era movimentado para uma nova posição de medição e o experimento re-iniciado com o resfriamento da parede de cobre. Este procedimento foi repetido para as 24 posições indicadas na Figura 4.8.

Em algumas das condições de operação dos experimentos realizados, verificou-se que havia deposição de cristais de parafina nas paredes internas de vidro da seção de testes. Antes de apresentar as imagens relativas às visualizações é importante comentar sobre este problema que limitou a obtenção de medidas quantitativas de qualidade em alguns regimes de escoamento.

A Figura 4.9 apresenta uma vista esquemática da seção transversal do canal de testes. No detalhe da figura podem-se observar as paredes de cobre refrigeradas já apresentando depósitos de parafina formados. A figura indica, de

modo esquemático, que o depósito é formado por duas camadas de densidades diferentes, a mais densa junto à parede. Devido à condução de calor para a parede de cobre fria, a parede de vidro junto ao cobre esfria, induzindo à formação de finos depósitos de parafina na parte interna do vidro. Em algumas condições de operação é possível identificar a verdadeira espessura do depósito no centro do canal observando-se através da fina camada de depósito no vidro.

Em outras condições, no entanto, o depósito na parede de vidro torna-se opaco, dificultando a identificação da posição verdadeira do depósito no interior do canal. No caso de escoamentos laminares o problema do depósito na superfície era mais crítico, especialmente nas posições mais próximas ao fim do canal. Em escoamentos laminares os coeficientes de transferência de calor convectivos são relativamente baixos, o que impede que o escoamento do fluido mais quente no interior do canal mantenha a temperatura interna do vidro acima da TIAC. Já para o caso de escoamentos turbulentos, coeficientes convectivos mais elevados são capazes de compensar a perda de calor condutiva do vidro para a parede de cobre, mantendo a temperatura interna do vidro acima da TIAC. Para estes escoamentos, as paredes de vidro se mantiveram sempre livres de depósitos internos. A ocorrência das condições adversas de visualização através do vidro será indicada ao longo da apresentação dos resultados.

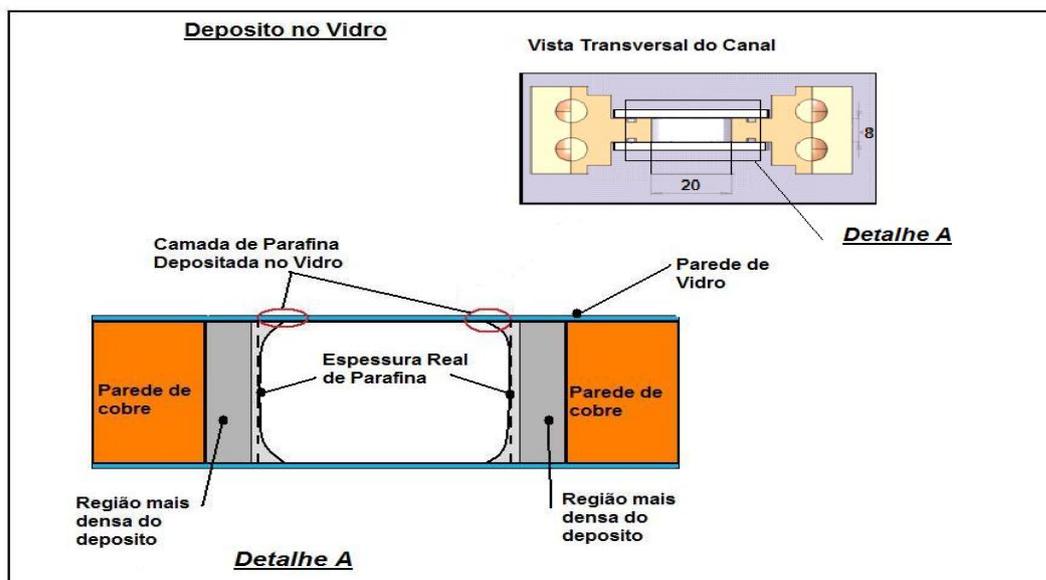


Figura 4.9: Visão esquemática da seção transversal do canal indicando a formação de depósito de parafina nas faces internas das paredes de vidro.

A Figura 4.10 fornece, de maneira esquemática, uma idéia da morfologia do depósito de parafina em formação sobre a parede de cobre a partir do início do resfriamento. O esquema da figura retrata apenas uma das paredes resfriadas, em uma região inicial do canal. Com o início do resfriamento, imediatamente forma-se uma camada de mistura querosene-parafina contendo um grande número de cristais de parafina em suspensão, que escoam junto à parede fria. No caso de escoamento laminar, essa camada apresentava alta concentração de cristais em suspensão, apresentando uma forma semelhante àquela esperada para a camada limite térmica desenvolvendo-se sobre uma placa plana. De fato, espera-se que os cristais em suspensão sejam formados em uma região termicamente afetada pela parede fria, onde a temperatura encontra-se abaixo da TIAC.

Simultaneamente à formação da camada de fluido com cristais em suspensão verificava-se a formação de uma fina camada de depósito de parafina junto à parede de cobre, que crescia continuamente em toda a extensão da parede do canal. Com a passar do tempo, esta camada crescia, tomando uma forma também similar à de uma camada limite térmica sobre uma placa plana. A forma final do depósito coincide aproximadamente com a forma de uma isoterma com o valor igual ao da TIAC para a solução em teste. Além desta região, a temperatura do fluido é acima da TIAC e, mesmo havendo, fluxo de calor saindo do canal não há mais deposição. Nota-se, no entanto, que com o passar do tempo a densidade do depósito apresenta um variação transversal, com os depósitos mais densos junto à parede. A Figura 4.10 pode ser usada para observar a descrição aqui apresentada.

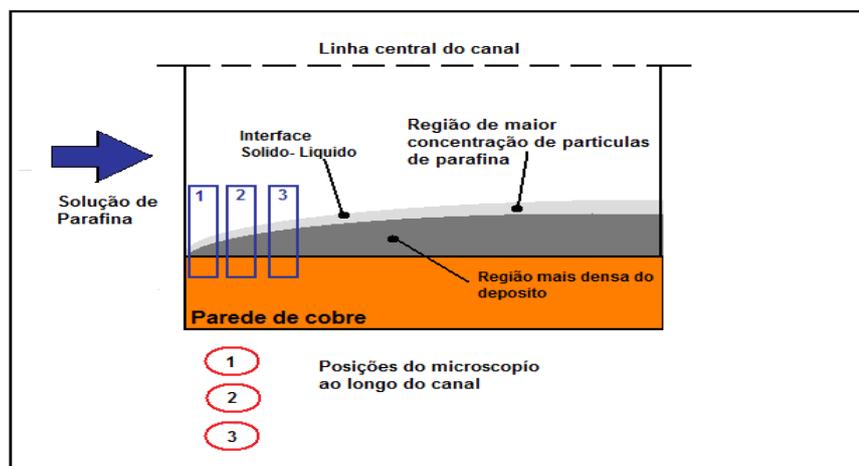


Figura 4.10: Região de concentração de cristais perto da parede nos primeiros segundos depois de iniciado o resfriamento.

As Figuras 4.11 e 4.12 apresentam seqüências de imagens capturadas de um depósito de parafina formada em escoamento laminar a número de Reynolds igual a 1660. A temperatura da mistura na entrada era de 40°C e a temperatura da parede fria, 15°C. A TIAC para a mistura utilizada era de 28,7°C. A Figura 4.11 apresenta uma seqüência de imagens para 6 instantes de tempo contados a partir do início do resfriamento, capturadas na região de entrada do canal, mais especificamente, nas posições 1,2 e 3 indicadas na Figura 4.8. A Figura 4.12 apresenta uma seqüência de imagens para os mesmos instantes de tempo, porém capturadas na região de saída do canal, posições 22,23 e 24. Nas duas figuras as imagens correspondem aos seguintes instantes de captura contados a partir do início do resfriamento: 0, 2, 5, 10, 30 e 150 minutos. Como já comentado anteriormente, o tempo de 150 minutos é considerado como representando a condição de regime permanente. O aumento utilizado no microscópio para o registro das imagens foi de 32 vezes.

Na figura 4.11(a), correspondendo a instante do início do resfriamento, ainda não se observa qualquer depósito de parafina. A superfície horizontal da parede de cobre livre de depósitos pode ser claramente observada na região de entrada do canal. A imagem de cor branca visualizada à esquerda das imagens na Figura 4.11, não representa qualquer depósito de parafina. É, na verdade, a imagem de uma junta de vedação situada fora do plano de observação. O crescimento do depósito de parafina com o tempo pode ser acompanhado nas imagens até a obtenção da condição de regime permanente, Figura 4.11(f).

Uma observação cuidadosa das imagens apresentadas na Figura 4.11 revela a variação da densidade do depósito já comentada. Nota-se a camada de depósito mais denso junto à parede de cobre que é fruto da difusão das frações mais leves da parafina para fora do depósito, deixando-o composto por frações mais densas. Este é o processo de envelhecimento do depósito descrito na literatura Singh, P., Venkatesan R. Fogler H.S. [22] O envelhecimento do depósito torna-se mais fácil de observar na condição de regime permanente, Figura 4.11(f). Superposto a cada imagem de depósito apresentada nas figuras há um ponto vermelho. Esta marca representa a espessura real de depósito observada no centro do canal. A espessura maior na figura é conseqüência do problema de deposição interna na parede de vidro, já comentado anteriormente.

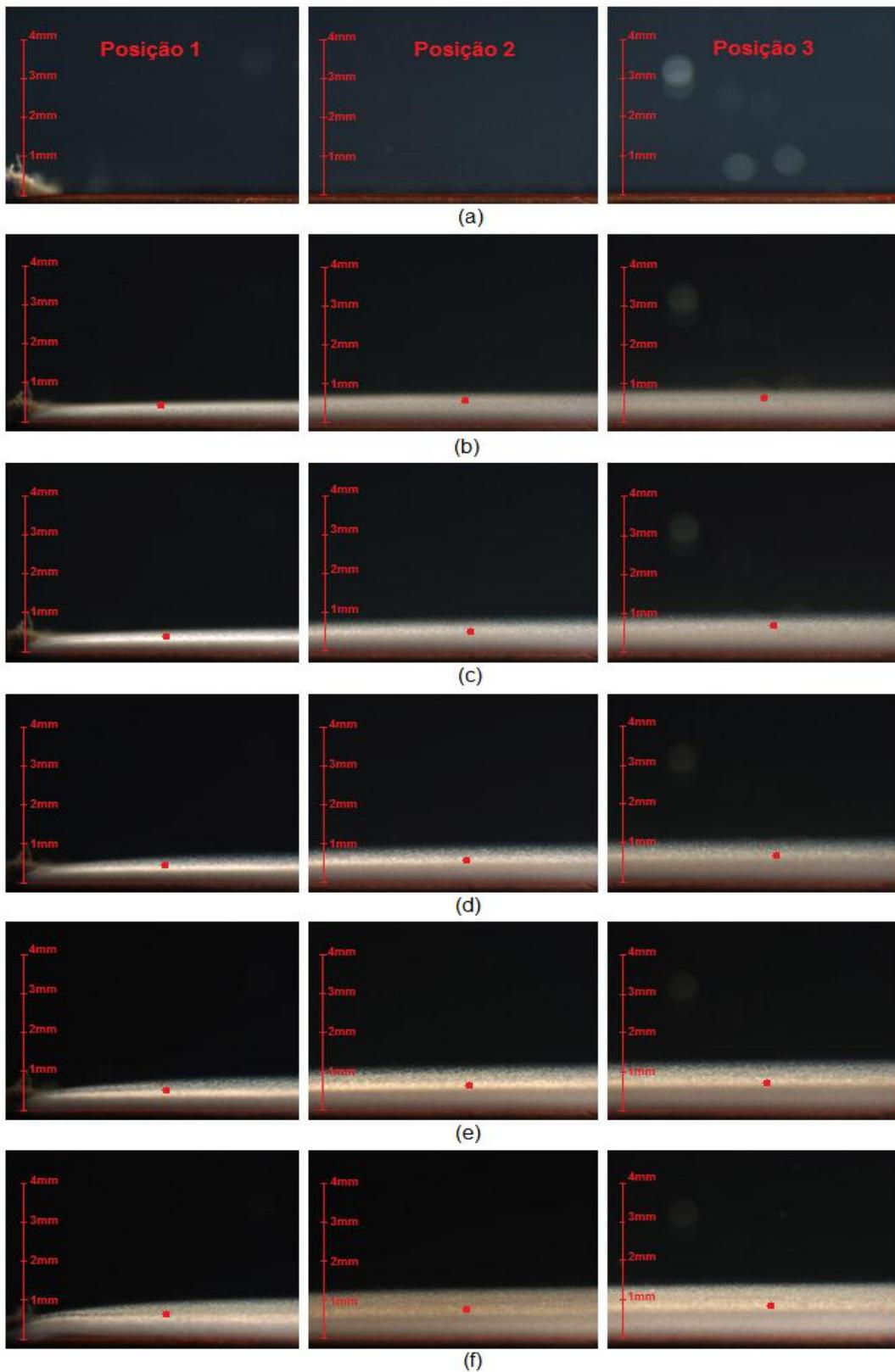


Figura 4.11: Seqüência de imagens obtidas na região de entrada do canal, mostrando a evolução temporal e espacial do depósito para o teste com $T_e=40^\circ\text{C}$, $T_{pi}=15^\circ\text{C}$ e $Re=1660$. O aumento utilizado foi 32x. As imagens foram obtidas nas posições axiais 1, 2 e 3, de acordo com a definição da Figura 4.8. As figuras correspondem aos instantes de tempo, 0, 2, 5, 10, 30 e 150 minutos, contados após o início do resfriamento.

A visualização da deposição na região de saída do canal mostra um comportamento distinto daquele da região de entrada apresentada no parágrafo anterior. Na Figura 4.12(a) a parede de cobre ainda se encontra totalmente livre de depósitos. Dois minutos após o início do resfriamento da parede a Figura 4.12(b) apresenta um depósito com espessura constante para as três posições axiais na região final do canal. A marca vermelha indica a espessura do depósito. A camada branca sobre o depósito é formada por cristais em suspensão carregados pelo escoamento. Nota-se na última posição à direita um decréscimo forte na espessura do depósito. O decréscimo se dá fora da parede de cobre, sobre uma parede de acrílico que conecta o canal à tubulação de bombeio de fluido. Trata-se, portanto, de uma parede má condutora de calor que não é resfriada, a não ser por efeitos condutivos devido ao contato com a parede de cobre. A observação dos depósitos nesta região não deve ser considerada na análise dos resultados.

Passados 5 minutos, figura (c), nota-se um aumento na espessura do depósito, mas que ainda se mantém uniforme. Além da região de cristais em suspensão, agora menor em espessura, observa-se também a presença de depósitos na parede de vidro. Esta configuração persiste até a condição de regime permanente, figura (f), onde os depósitos atingem um valor estável no tempo, e com maior espessura. Os efeitos da deposição na parede são mais pronunciados, mas ainda não impedem a observação da espessura real do depósito no centro do canal.

As observações feitas a partir das imagens das Figuras 4.11 e 4.12 corroboram as conclusões de Plasencia, 2006, que indicaram que os cristais em suspensão carregados pelo escoamento aderem ao depósito já formado, fazendo com que a espessura de depósito cresça a altas taxas. Este mecanismo de captura de cristais não está incluído dentre os possíveis mecanismos listados na literatura (ver, por exemplo, Burger et al., 1981 ou Teixeira e Azevedo, 2003). No trabalho de Plasencia, no entanto, a temperatura de entrada da solução do canal era abaixo da TIAC, o que resultava em um escoamento com alta concentração de cristais em suspensão. No presente caso onde o fluido entra no canal com temperatura acima da TIAC, o mesmo fenômeno foi observado nas regiões mais próximas ao final do canal, onde a temperatura de mistura do fluido é mais baixa devido à troca de calor com as paredes frias do canal. A observação deste mecanismo de deposição motivou pesquisadores da PUC-Rio a iniciar o

desenvolvimento de simulações de deposição de parafina em canais onde o fluido é tratado com um fluido de Bingham com tensão limite de escoamento dependente da temperatura. Neste caso, atingido um certo nível de temperatura, o fluido é estagnado sendo incorporado ao depósito sólido (Minchola e Nieckele, em preparação). Ainda não há resultados definitivos deste desenvolvimento que possam ser comparados com experimentos de modo a possibilitar a sua avaliação como possível mecanismo de deposição de parafina.

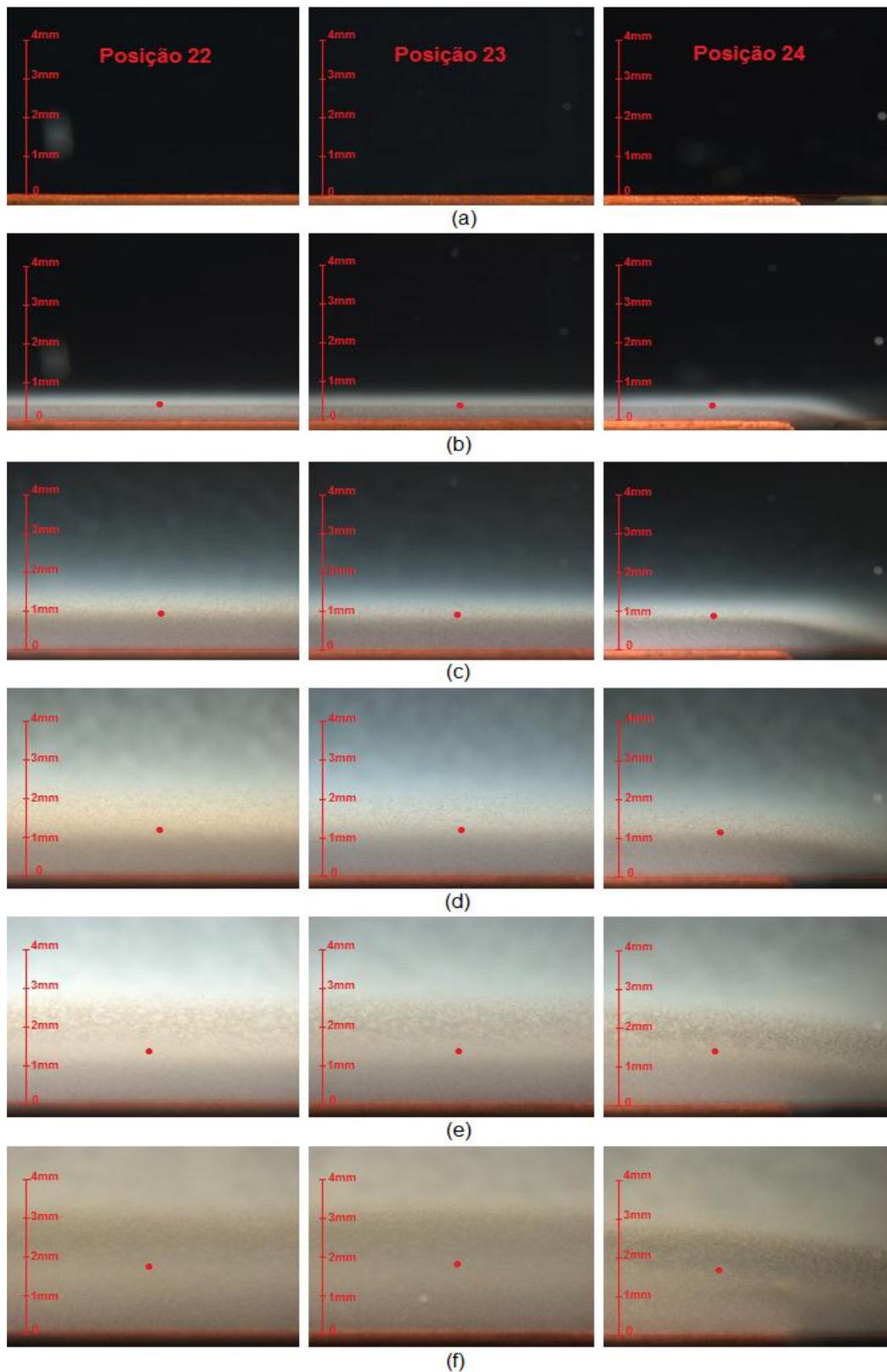


Figura 4.12: Seqüência de imagens obtidas na região de saída do canal, mostrando a evolução temporal e espacial do depósito para o teste com $T_e=40^\circ\text{C}$, $T_{pi}=15^\circ\text{C}$ e $Re=1660$. O aumento utilizado foi 32x. As imagens fora obtidas nas posições axiais 22, 23 e 24, de acordo com a definição da Figura 4.8. As figuras correspondem aos instantes de tempo, 0, 2, 5, 10, 30 e 150 minutos, contados após o início do resfriamento.

Experimentos de visualização da formação de depósitos de parafina sobre as paredes do canal foram também realizados para regime de escoamento turbulento com números de Reynolds iguais 4400, 5650 e 6900. Por apresentarem características similares, apenas os resultados para o número de Reynolds igual a 6900 serão apresentados. A Figura 4.13 apresenta os resultados dos estudos de visualização para Reynolds igual a 6900 para a região de entrada do canal, correspondendo às posições 1,2 e 3 da câmara. Um aumento óptico de 32 vezes foi utilizado no microscópio. Nestes ensaios, a temperatura de entrada do fluido no canal e a temperatura da parede fria foram, respectivamente, de 40°C e 15°C.

Uma análise comparativa das imagens das Figuras 4.11 e 4.13 revelam que sob escoamento turbulento as espessuras de depósito são significativamente menores. Este é um fato reconhecido na literatura Plasencia et al. [20], Brown et al. [2], Creek et al. [6], estando associado à menor espessura da camada limite térmica dos escoamentos turbulentos. Observou-se a remoção de camadas de parafina já depositadas pela ação da tensão cisalhante imposta pelo escoamento na região inicial do canal, para tempos superiores a duas horas. A ação da tensão cisalhante pode ser observada na Figura 4.13(f) que corresponderia à condição de regime permanente. Nesta figura observam-se falhas no depósito ao longo da região de entrada do canal que levariam, posteriormente, ao arrancamento de trechos de depósito.

As maiores taxas de transferência de calor impostas pelo escoamento turbulento impediram a formação de depósitos nas paredes de vidro, como pode ser observado na seqüência de fotografias apresentada na Figura 4.13.

A Figura 4.14 apresenta os resultados da visualização da formação do depósito na região final do canal. As condições de escoamento e térmicas são as mesmas da figura anterior.

As espessuras observadas são pouco maiores que aquelas observadas na região de entrada do canal, o que pode ser explicado pelo comportamento assintótico da cama limite térmica turbulenta e pela menor espessura desta camada para este valor elevado do número de Reynolds. Nota-se nas figuras 4.13, um pequeno crescimento dos depósitos nas paredes de vidro.

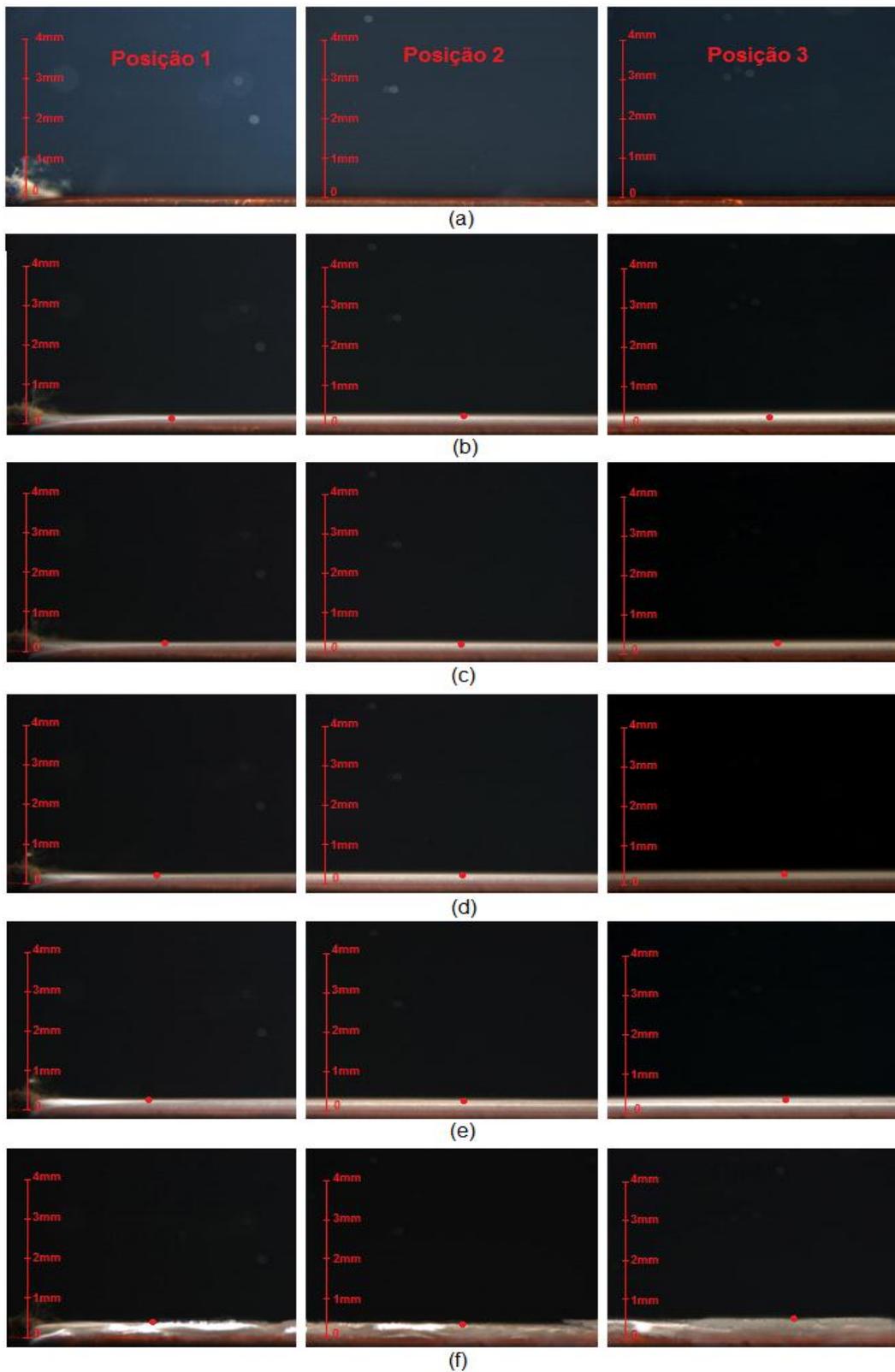


Figura 4.13: Seqüência de imagens obtidas na região de entrada do canal, mostrando a evolução temporal do depósito para o teste com $T_e=40^\circ\text{C}$, $T_{pi}=15^\circ\text{C}$ e $Re=6900$. O aumento utilizado foi 32x. As imagens foram obtidas nas posições axiais 1, 2 e 3, de acordo com a definição da Figura 4.8. As figuras correspondem aos instantes de tempo, 0, 2, 5, 10, 30 e 150 minutos, contados após o início do resfriamento.

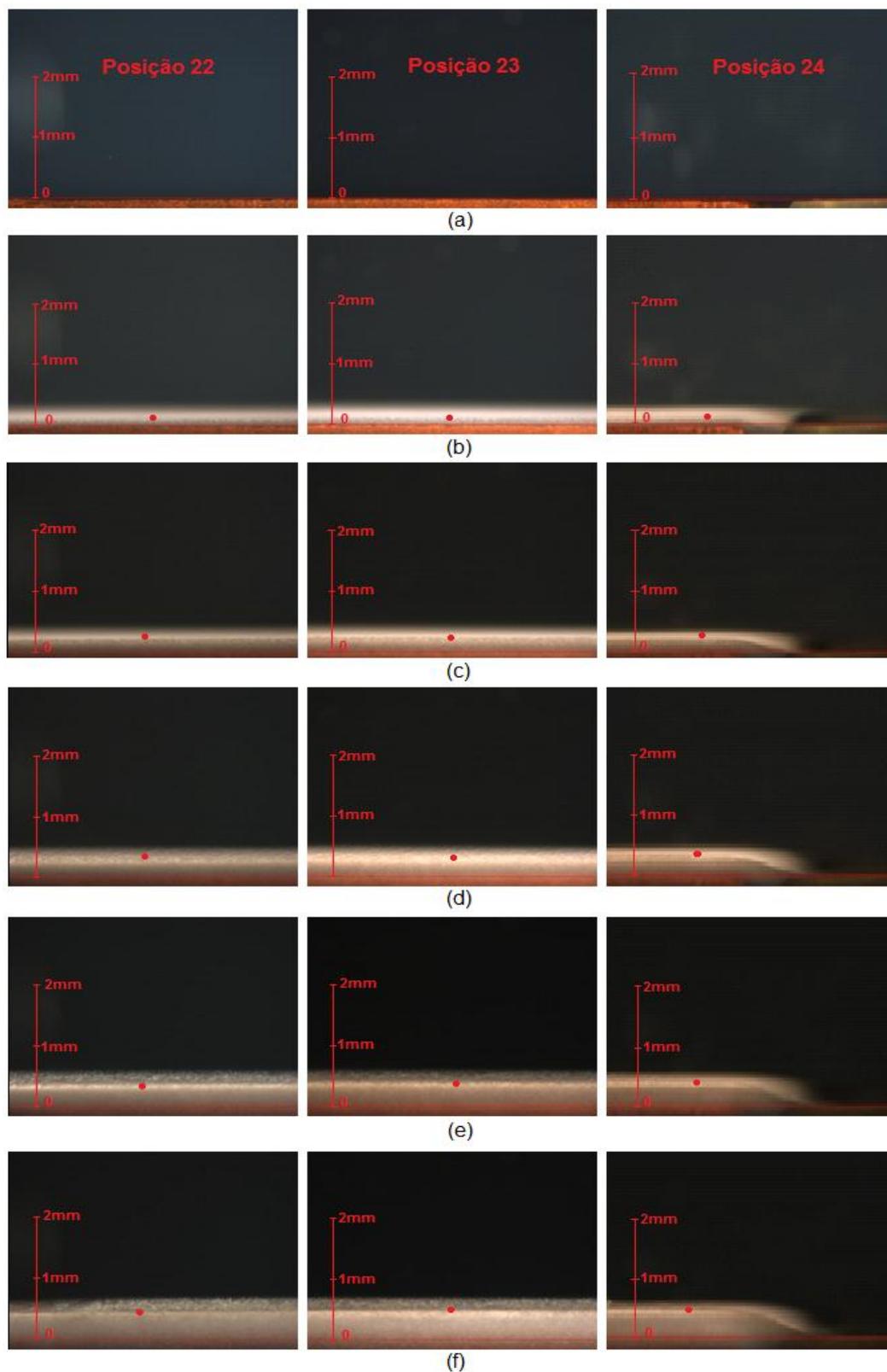


Figura 4.14: Seqüência de imagens obtidas na região de saída do canal, mostrando a evolução temporal do depósito para o teste com $T_e=40^\circ\text{C}$, $T_{pi}=15^\circ\text{C}$ e $Re=6900$. O aumento utilizado foi 50x. As imagens fora obtidas nas posições axiais 22, 23 e 24, de acordo com a definição da Figura 4.8. As figuras correspondem aos instantes de tempo, 0, 2, 5, 10, 30 e 150 minutos, contados após o início do resfriamento.

Uma melhor comparação entre as taxas de crescimentos e espessura final de depósito para escoamento laminar e turbulento pode ser obtida com o auxílio dos resultados apresentados das Figuras 4.15 e 4.16. Nestas figuras são apresentadas imagens obtidas na região central do canal, posição 16, para os seguintes instantes de tempo: 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12 e 14 minutos. A Figura 4.15 apresenta os resultados para Reynolds igual a 1600, escoamento laminar, enquanto a Figura 4.16 apresenta os resultados para Reynolds igual a 6900, escoamento turbulento. No caso do escoamento laminar o aumento utilizado foi de 32 vezes, enquanto que para o escoamento turbulento utilizou-se aumento de 50 vezes. Em ambas figuras as marcas em vermelho representam a espessura real do depósito, evidenciando a camada de cristais em suspensão e o depósito na parede que poderiam, erroneamente, ser interpretados como depósitos sólidos no centro do canal.

A observação conjunta das Figuras 4.15 e 4.16 podem demonstrar semelhanças e diferenças entre os processos de deposição sob regimes de escoamento laminar e turbulento. Para o tempo de 2 minutos após o início do resfriamento, Figuras 4.15(b) e 4.16(b), nota-se em ambos os casos o depósito sólido já formado sob uma camada de cristais em suspensão. Tanto o depósito sólido quanto a camada em suspensão são menores para o escoamento turbulento. A partir deste instante, a camada de depósito cresce mais rapidamente para o caso onde o escoamento é laminar. Os efeitos de depósitos nas paredes de vidro são bastante perceptíveis para o caso laminar. Aos 14 minutos, última figura apresentada, é notável a diferença entre as espessuras de depósito nos dois casos.

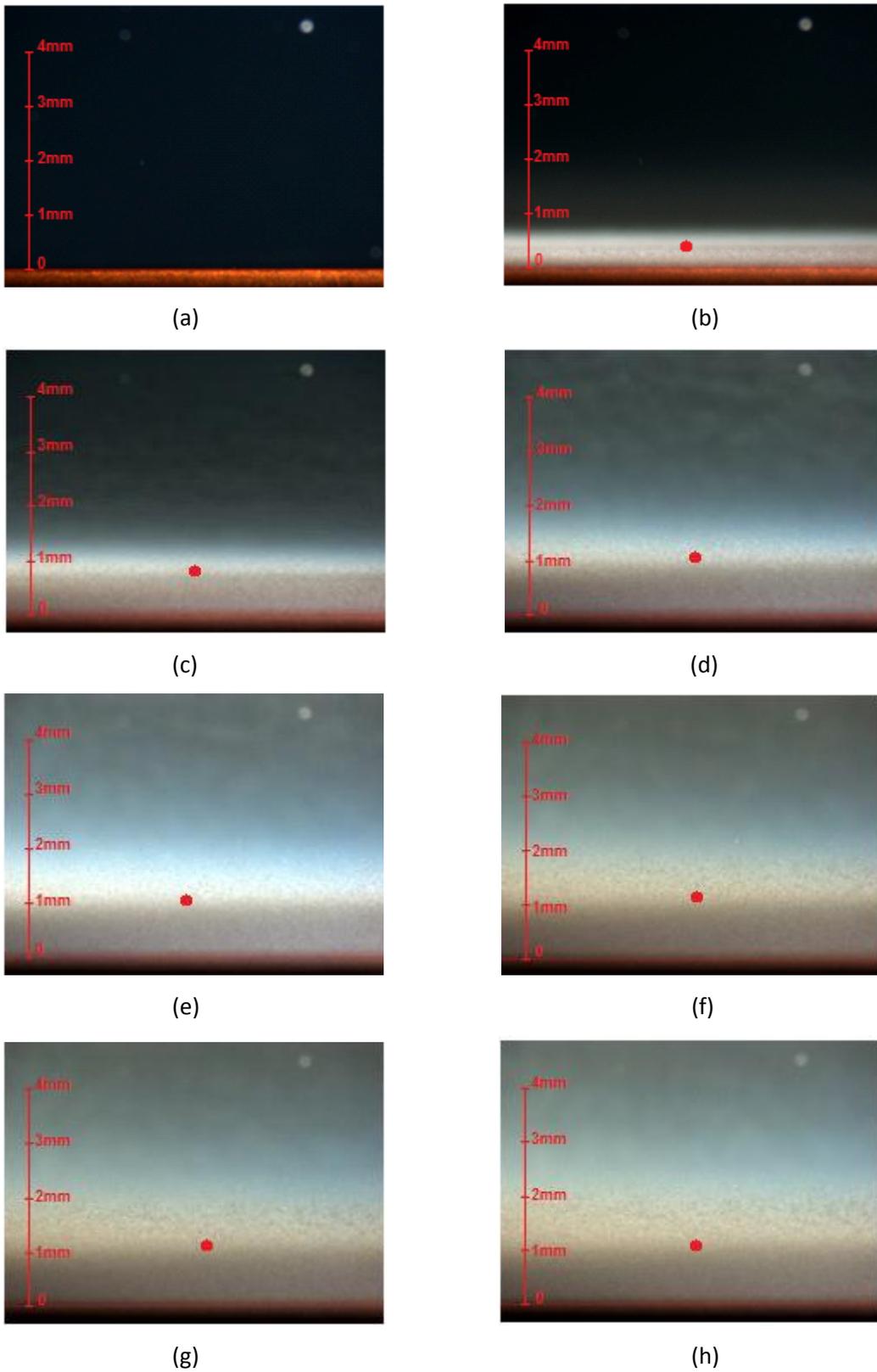


Figura 4.15: Seqüência de imagens obtidas na metade do canal, posição 16, mostrando a evolução temporal do depósito para o teste com $T_e=40^\circ\text{C}$, $T_{pi}=15^\circ\text{C}$ e $Re=1660$. Aumento utilizado de 32x. (a) 0 minutos, (b) 2 minutos, (c) 4 minutos, (d) 6 minutos, (e) 8 minutos, (f) 10 minutos, (g) 12 minutos, e (h) 14 minutos.

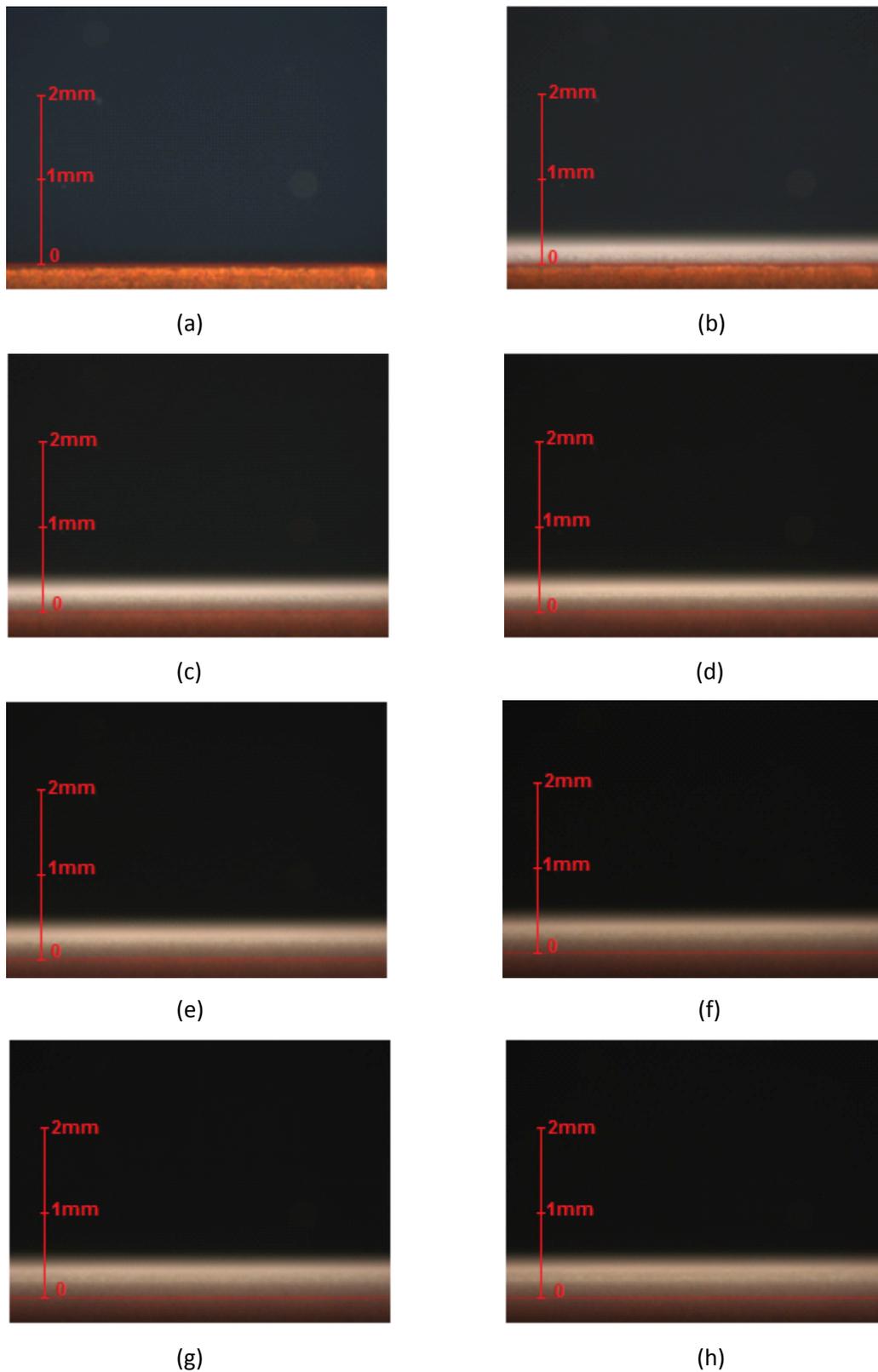


Figura 4.16: Seqüência de imagens obtidas na metade do canal, posição 16, mostrando a evolução temporal do depósito para o teste com $T_e=40^\circ\text{C}$, $T_{pi}=15^\circ\text{C}$ e $Re=6900$. Aumento utilizado de 50x. (a) 0 minuto, (b) 2 minutos, (c) 4 minutos, (d) 6 minutos, (e) 8 minutos, (f) 10 minutos, (g) 12 minutos, e (h) 14 minutos.

4.4 Resultados Quantitativos para a Deposição de Parafina

Nesta seção serão apresentados os resultados quantitativos obtidos para a distribuição temporal e espacial dos depósitos de parafina ao longo do canal. Os resultados serão apresentados para os seguintes valores do número de Reynolds: 1660, 4400, 5650 e 6900. Destes valores, apenas o primeiro corresponde a um escoamento em regime laminar, sendo os outros em regime turbulento. Apesar do foco do presente trabalho ser voltado para a deposição sob escoamento turbulento, o experimento em regime laminar fornece informações interessantes sobre a mudança significativa experimentada pelo depósito de parafina quando o regime de escoamento é alterado de laminar para turbulento, conforme já comentado quando da apresentação dos resultados de visualização.

Em todos os experimentos foi utilizada a mesma solução de querosene e parafina que apresentava uma TIAC igual a 28.7°C. Também foram mantidas constantes em todos os experimentos as temperaturas de entrada do fluido no canal e a temperatura da parede fria, respectivamente, 40 e 15°C.

Deve-se mencionar que os resultados quantitativos a serem apresentados a seguir foram obtidos a partir de medições feitas em imagens capturadas pela câmera digital acoplada ao microscópio, imagens semelhantes às aquelas apresentadas na seção de resultados de visualização.

4.4.1 Espessuras de Depósito de Parafina para Regime Permanente

A apresentação será iniciada pelos resultados quantitativos obtidos para a condição de regime permanente.

Figura 4.17 apresenta os resultados obtidos para a distribuição espacial dos depósitos de parafina para os quatro valores do número de Reynolds ensaiados e indicados na figura. A abscissa da figura indica a coordenada axial medida em milímetros ao longo da parede do canal, sendo a coordenada zero correspondente ao início da parede fria de cobre, e a coordenada 1000 correspondente ao fim da parede de cobre. A ordenada da figura indica a espessura do depósito, medida em milímetros. Na figura foi incluída uma vista

expandida dos primeiros 60 mm de comprimento do canal para facilitar a observação do desenvolvimento do depósito nesta região. Os dados apresentados são referentes a um tempo de duração do experimento igual a 150 minutos, valor considerado nos experimentos preliminares como sendo representativo da condição de regime permanente.

Uma observação geral da Figura 4.17 indica que, para todos os valores do número de Reynolds ensaiados, a espessura de depósito de parafina de regime permanente cresce fortemente no trecho inicial do canal, atingindo um valor aproximadamente constante ao longo da maior parte do comprimento do canal. É notável, no entanto, a diferença verificada entre as espessuras medidas para os ensaios realizados com escoamento turbulento e o ensaio com escoamento laminar. Não somente a espessura de depósito de parafina cresce muito mais fortemente no início do canal, mas atinge patamares que são cerca de duas a três vezes superiores às espessuras medidas para escoamento turbulento. Dentre os experimentos sob regime turbulento, verifica-se que quanto maior o valor do número de Reynolds menor a espessura de depósito de regime permanente.

As observações mencionadas no parágrafo anterior quanto à dependência da espessura de depósito com o regime de escoamento e número de Reynolds são conhecidas na literatura, apesar de não termos conhecimento de qualquer trabalho, até a presente data, que tenha apresentado a distribuição espacial dos depósitos desde o início do canal para regime turbulento.

A razão para o comportamento descrito para os depósitos pode ser associada ao comportamento da camada limite térmica no interior do canal. Se, para simplificar o raciocínio, considerarmos o desenvolvimento desta camada limite no interior do canal como sendo equivalente ao desenvolvimento sobre uma placa plana, verificaremos que, para uma mesma posição axial, a espessura desta camada é inversamente proporcional à velocidade do escoamento. Assim, para baixos valores de Reynolds teremos maiores valores da espessura da camada térmica. À medida que Reynolds cresce, as espessuras decrescem. Como só há depósito de parafina em regiões onde a temperatura estiver abaixo da TIAC para a solução em escoamento, o valor da isoterma referente à TIAC passa a ser praticamente coincidente com a espessura do depósito em regime permanente. Em outras palavras, para uma

dada posição axial, a coordenada transversal onde a temperatura se aproxima da TIAC estará tanto mais próxima da parede fria quanto maior for o número de Reynolds.

Pode-se notar na Figura 4.17 um crescimento abrupto da espessura do depósito em torno da coordenada 700 mm. Acredita-se que estes valores estejam associados a níveis elevados de incerteza experimental, pois nesta região a formação de depósito de parafina no interior das paredes de vidro dificultava a identificação da real espessura dos depósitos. Os valores medidos para posições a jusante deste ponto devem ser desconsiderados. Também nota-se na figura um decréscimo nos valores da espessura para regime turbulento junto à saída do canal. Este decréscimo de espessura está associado à troca de calor com a parede de acrílico que está conectada ao fim do canal e que, por meio de troca de calor condutiva, produz um aumento localizado na temperatura da parede de cobre nas coordenadas extremas do canal. Os resultados de depósito medidos nesta região devem também ser descartados.

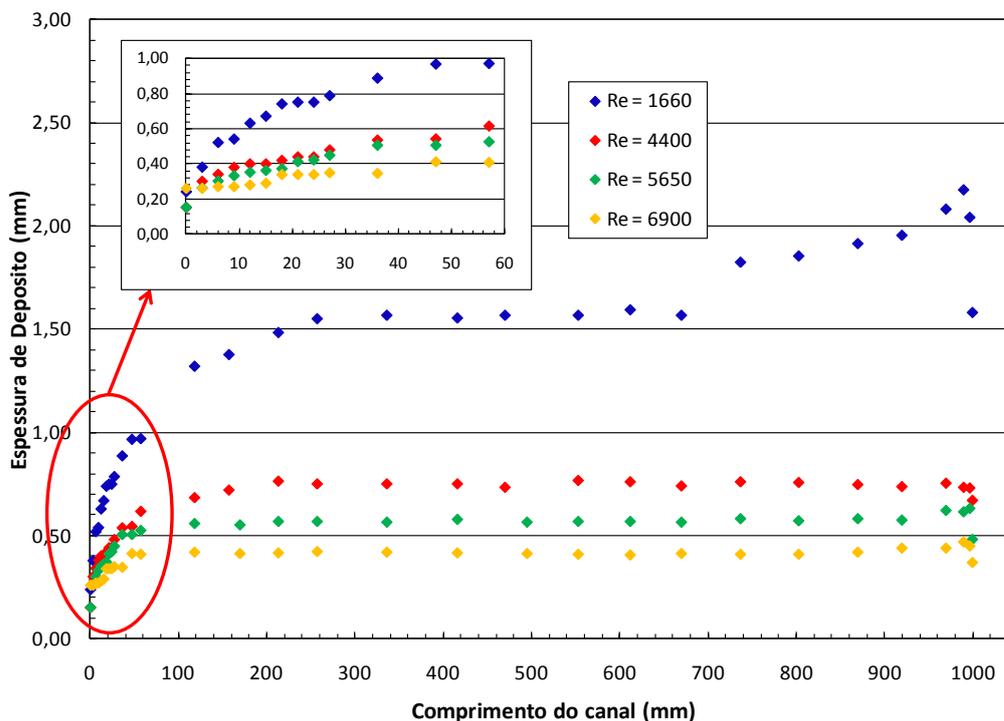


Figura 4.17: Distribuição espacial da espessura de depósito de parafina para regime permanente (150 min.) e diferentes números de Reynolds. Resultados para $T_e=40^\circ\text{C}$, $T_p=15^\circ\text{C}$ e $TIAC = 28.7^\circ\text{C}$.

4.4.2 Evolução Espacial e Temporal dos Depósitos de Parafina

Nesta seção são apresentados os resultados relativos à variação espacial e temporal dos depósitos de parafina ao longo da parede do canal. Até a presente data não conhecemos trabalhos na literatura aberta que tenham apresentado dados sobre a variação espacial e temporal dos depósitos de parafina sob regime de escoamento turbulento, o que faz destes resultados uma contribuição original do presente trabalho.

A apresentação é iniciada pelos resultados para os testes com regime laminar com Reynolds igual a 1660 mostrados na Figura 4.18. Esta figura apresenta a distribuição espacial das espessuras de depósito ao longo do canal para tempos contados a partir do início do resfriamento iguais a 2, 5, 10, 30 e 150 minutos, sendo este último valor considerado como representativo da condição de regime permanente. A figura apresenta um gráfico ampliado para as coordenadas iniciais do canal de modo a facilitar a observação dos resultados.

Pode-se observar na figura o rápido crescimento dos depósitos nos instantes iniciais. De fato, após cerca de 10 minutos após iniciado o resfriamento já se observam espessuras de depósito de cerca de 50% do valor de regime permanente.

A observação dos perfis dos depósitos para os tempos iguais a 2 e 5 minutos mostra que existe uma diminuição na espessura iniciando-se na coordenada 350 mm. Esta queda, não esperada, é reflexo do perfil de temperatura na parede fria que durante o transiente de resfriamento inicial se afasta da condição ideal de um resfriamento brusco do tipo degrau. Este fato é devido à potência insuficiente do sistema de refrigeração que não foi capaz de abaixar a temperatura ao longo de toda a extensão da parede de cobre à mesma taxa de resfriamento. As regiões no início do canal que primeiro recebem água de refrigeração são as que mais rapidamente resfriam. Este observação pode ser confirmada por uma verificação dos perfis de temperatura da parede fria para o experimento em questão apresentados na Figura 4.19. Pode-se verificar na figura que, realmente, são necessários cerca de 10 minutos para que toda a extensão da parede atinja a temperatura de 15°C.

Como foi comentado na análise dos resultados da Figura 4.17, verifica-se também nos resultados da Figura 4.18 um aumento abrupto nas espessuras de depósito para coordenadas axiais superiores a cerca de 700 mm. Também aqui, este crescimento abrupto é atribuído a incertezas experimentais decorrentes da dificuldade em avaliar-se opticamente as espessuras de depósito nestas regiões devido à deposição de parafina no interior do vidro. Os resultados de deposição para coordenadas axiais acima de 700 mm devem, portanto, ser desconsiderados.

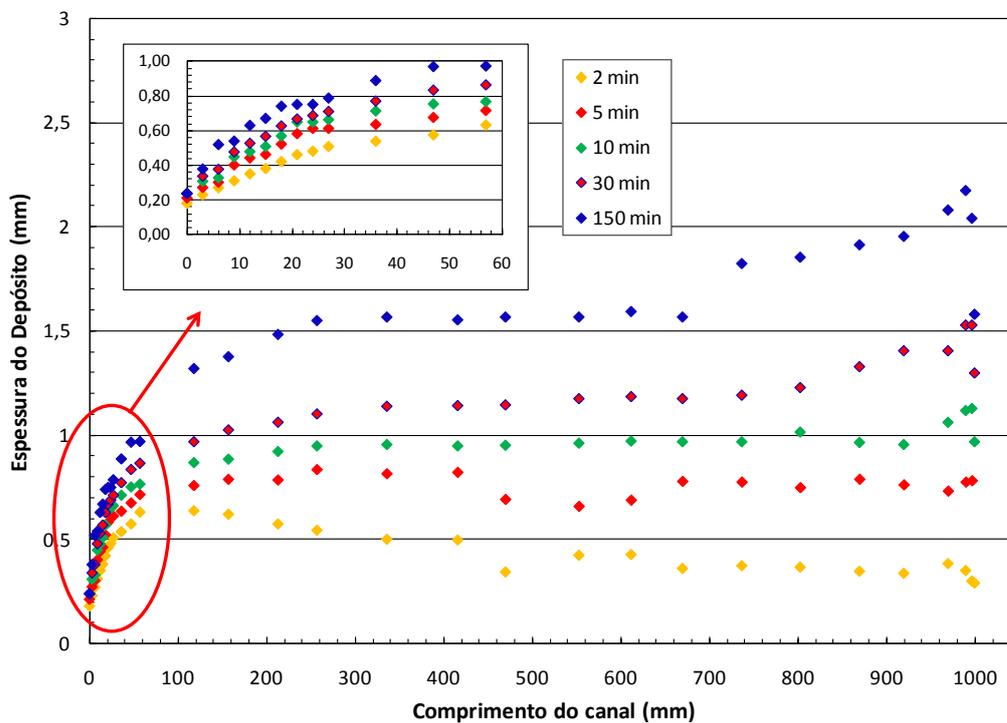


Figura 4.18: Evolução temporal e espacial da espessura do depósito de parafina na parede interior do canal sob escoamento laminar para $Re=1660$. Resultados para $T_e=40^\circ\text{C}$, $T_p=15^\circ\text{C}$ e $TIAC = 28.7^\circ\text{C}$.

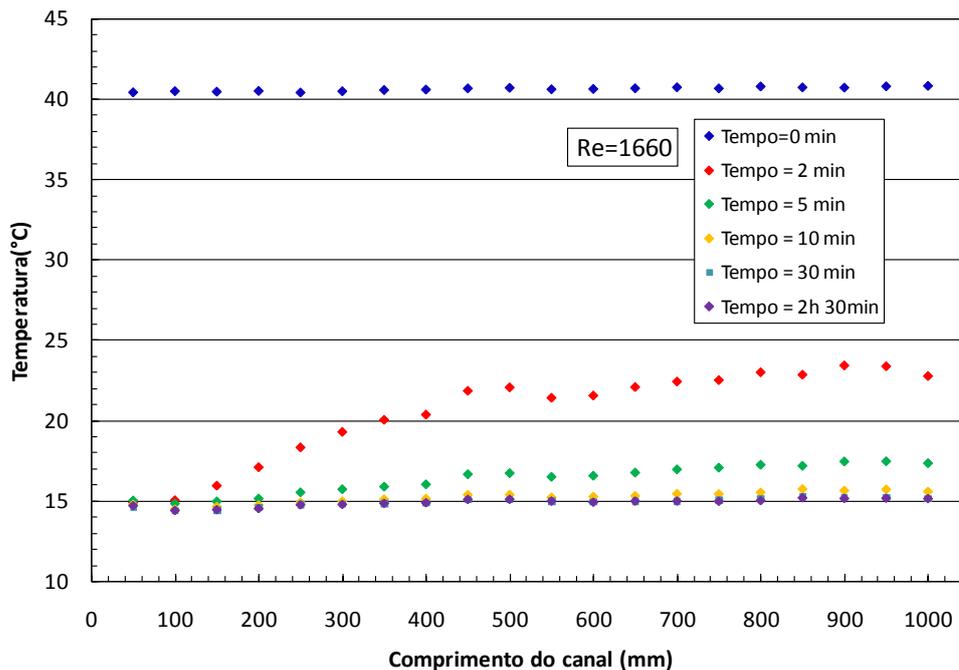


Figura 4.19: Distribuição axial da temperatura ao longo da parede de cobre para Reynolds igual 1660, para os instantes iguais a 0, 2, 5, 10, 30 e 150 min. Resultados para $T_e=40^\circ\text{C}$. $T_p = 15^\circ\text{C}$.

A Figura 4.20 apresenta os resultados para a variação espacial e temporal dos depósitos de parafina medidos para escoamento turbulento com número de Reynolds igual a 4400. Assim como na apresentação dos resultados para escoamento laminar, a figura apresenta a evolução dos perfis axiais de deposição para os instantes de tempo decorridos após o início do resfriamento iguais a 2, 5, 10, 30 3 150 minutos, onde este último tempo corresponde à condição de regime permanente.

Uma observação geral dos resultados apresentados na Figura 4.20 revela que as espessuras de depósito medidas para a condição de escoamento turbulento são significativamente menores que aquelas medidas para regime laminar. Este fato está diretamente associado às menores espessuras da camada limite térmica que prevalecem no escoamento turbulento, como já comentado quando da análise das imagens de visualização na seção 4.3.

Também pode-se observar nos resultados da Figura 4.20 uma queda na espessura do depósito ao longo do comprimento do canal para os tempos iniciais de 2 e 5 minutos. Este fato é reflexo da evolução temporal do perfil de

temperatura que se afasta da condição de resfriamento em degrau, devido à potência de resfriamento insuficiente oferecida pelo sistema de refrigeração utilizado. A evolução do perfil de temperatura pode ser observada na Figura 4.21, onde, de fato, observa-se que o perfil de temperatura somente atinge a condição de uniformidade axial no nível de 15°C desejado para o experimento após cerca de 10 minutos.

A queda de espessura de depósito observada no final do canal é dividida ao aquecimento da parede de cobre em contato com o canal de saída feito em acrílico e não refrigerado. As medições nesta região final do canal devem ser descartadas.

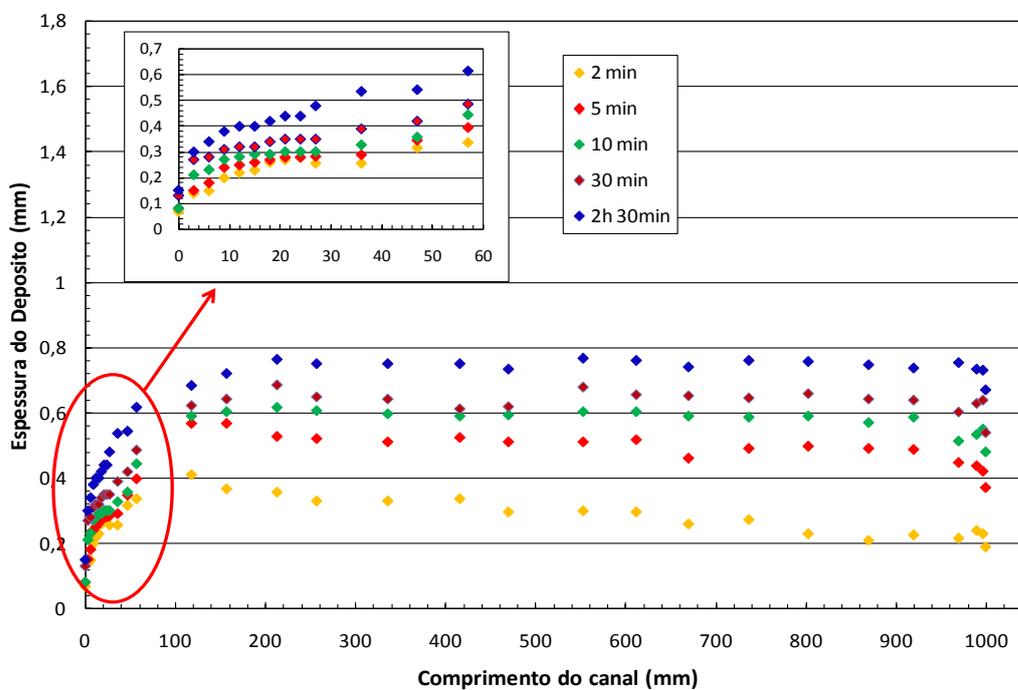


Figura 4.20: Evolução temporal e espacial da espessura do depósito de parafina na parede interior do canal sob escoamento turbulento para Reynolds igual 4400. Resultados para $T_e=40^\circ\text{C}$. $T_p = 15^\circ\text{C}$.

Os resultados medidos para a deposição de parafina sob escoamento turbulento a número de Reynolds igual a 5650 são apresentados na Figura 4.22. O comportamento geral da evolução espacial e temporal dos depósitos de parafina medidos para este número de Reynolds é similar àquele observado para o caso apresentado anteriormente para um Reynolds menor, porém também turbulento. Nota-se, no entanto, que as espessuras dos depósitos para

os mesmos instantes de tempo são ainda menores para o valor de Re igual a 5650. Esta diminuição de espessuras está relacionada com a diminuição da espessura da camada limite térmica com o aumento do número de Reynolds, como já comentado.

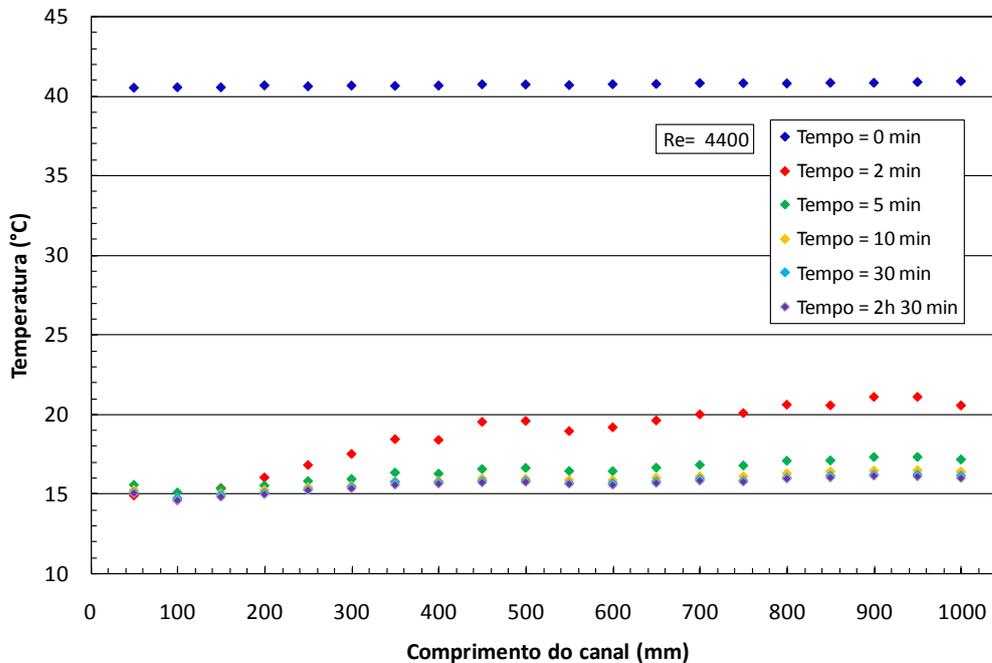


Figura 4.21: Distribuição axial da temperatura ao longo da parede de cobre para Reynolds igual 4400 para os instantes iguais a 0, 2, 5, 10, 30 e 150 minutos após do início da experiência. Resultados para $T_e=40^\circ\text{C}$. $T_p=15^\circ\text{C}$.

Também para Re igual 5650 observa-se uma diminuição da espessura do depósito ao longo do canal para um dado instante de tempo fixo. Esta diminuição é associada à variação espacial da temperatura ao longo da parede do canal. Neste caso de Reynolds mais elevado o problema de insuficiência de potência no sistema de refrigeração torna-se ainda mais relevante, como pode ser observado nos perfis de temperatura apresentados na Figura 4.23. Pode-se notar nesta figura que devido às maiores taxas de transferência de calor associadas ao escoamento com número de Reynolds mais elevado, o sistema de refrigeração não foi capaz de levar a temperatura da parede de cobre ao valor mínimo desejado de 15°C , mesmo na condição de regime permanente. Esta limitação da seção de testes deve ser eliminada em experimentos futuros.

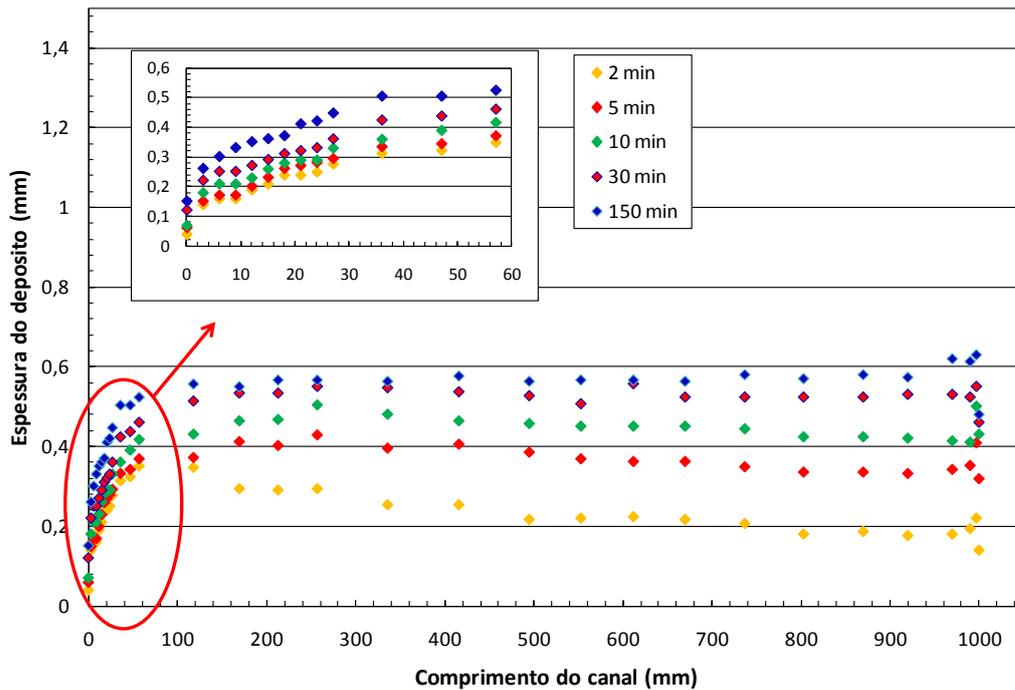


Figura 4.22: Evolução temporal e espacial da espessura do depósito de parafina na parede interior do canal sob escoamento turbulento para Reynolds igual 5650. Resultados para $T_e=40^\circ\text{C}$. $T_p = 15^\circ\text{C}$.

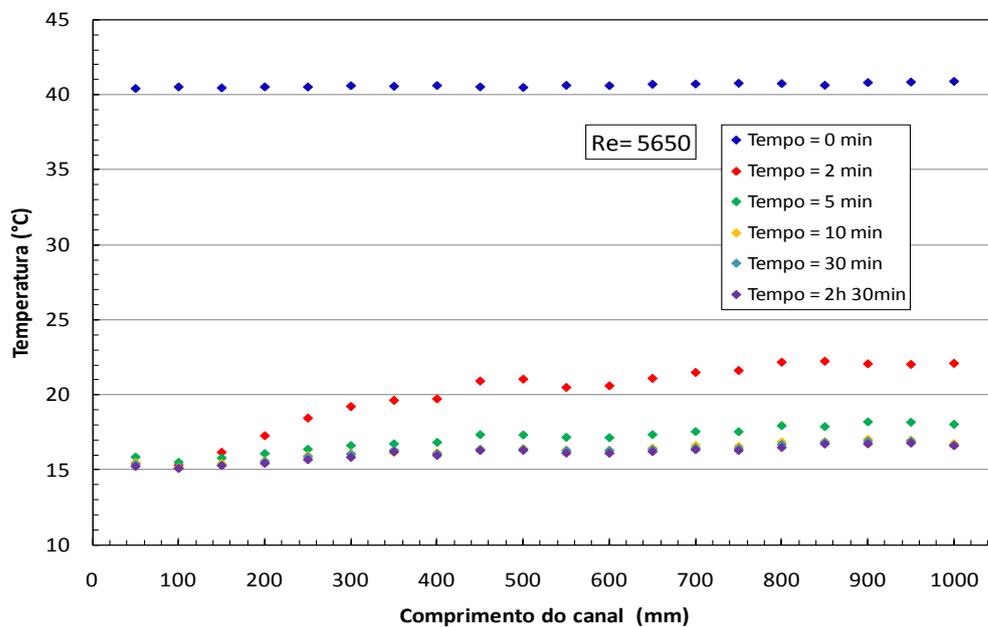


Figura 4.23: Distribuição axial da temperatura ao longo da parede de cobre para Reynolds igual 5650 para os instantes iguais a 0, 2, 5, 10, 30 e 150 minutos após do início da experiência. Resultados para $T_e=40^\circ\text{C}$. $T_p =15^\circ\text{C}$.

A Figura 4.24 apresenta os resultados obtidos para a deposição de parafina sob escoamento turbulento para o valor de número de Reynolds igual a 6900, o valor mais elevado estudado nos ensaios conduzidos no presente trabalho.

Os resultados apresentados na figura confirmam a tendência de diminuição das espessuras de depósito com o aumento do número de Reynolds, resultado associado à diminuição da espessura da camada limite térmica, como já comentado. Nota-se uma pequena alteração na taxa de crescimento dos depósitos na entrada do canal. Este efeito está provavelmente associado com a remoção dos depósitos devido aos efeitos da tensão cisalhante agindo sobre o depósito. As imagens do depósito com rachaduras mostrada na Figura 4.13(f) apresentam o efeito da tensão cisalhante sobre o depósito.

Também nos resultados mostrados na Figura 4.24 podem-se observar os efeitos do perfil de temperatura na parede do canal sobre o perfil dos depósitos. A Figura 4.25 mostra que para o número de Reynolds mais elevado igual a 6900, a temperatura da parede não atinge o valor desejado de 15°C, o que produz a diminuição do depósito, conforme já mencionado para o caso do Reynolds igual a 5650.

As Figuras 4.26 e 4.27 apresentam exemplos da evolução temporal dos depósitos de parafina medidos para uma determinada posição fixa no canal, como função do número de Reynolds. No caso das figuras a variação temporal é apresentada para uma posição na região central do canal. A Figura 4.26 apresenta a variação do depósito para os primeiros 10 minutos após o início do resfriamento, enquanto a Figura 4.27 apresenta resultados para os primeiros 30 minutos do resfriamento.

Os resultados das figuras indicam que a taxa de crescimento do depósito é tanto maior quanto menor for o número de Reynolds. Este resultado é contrário àquele esperado para um crescimento difusivo, onde o fluxo de massa difusivo é associado ao fluxo de calor saindo pela parede do canal. Espera-se que o fluxo de calor seja tanto maior quanto for maior for o número de Reynolds. Os resultados, no entanto, mostram maiores taxas de deposição para números de Reynolds menores, o que pode ser uma indicação que o mecanismo dominante de deposição não é o difusivo.

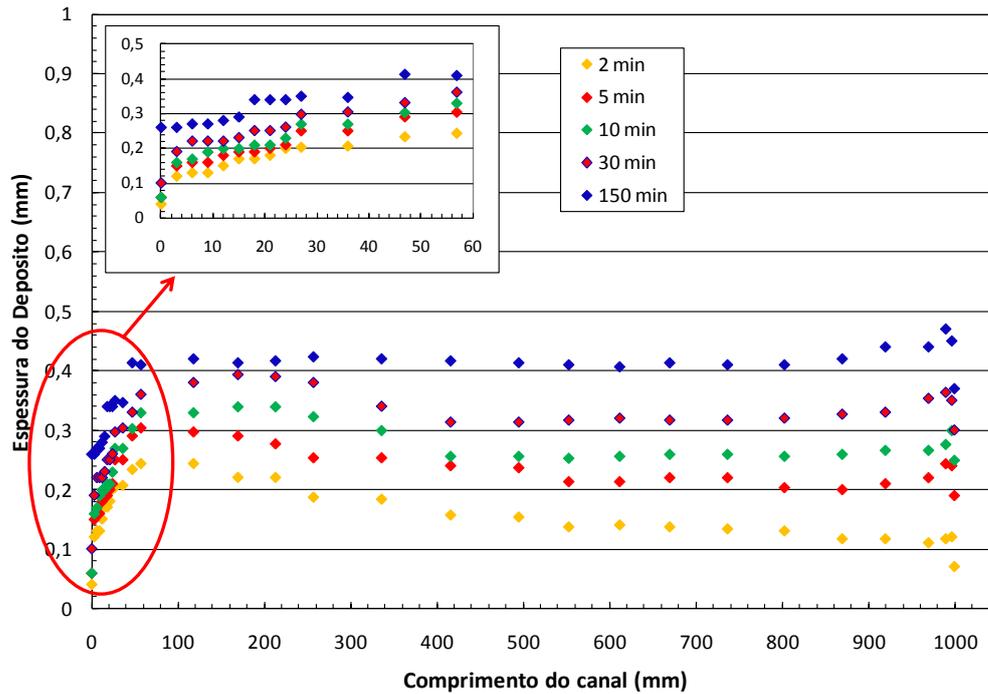


Figura 4.24: Evolução temporal e espacial da espessura do depósito de parafina na parede interior do canal sob escoamento turbulento para Reynolds igual 6900. Resultados para $T_e=40^\circ\text{C}$. $T_p = 15^\circ\text{C}$.

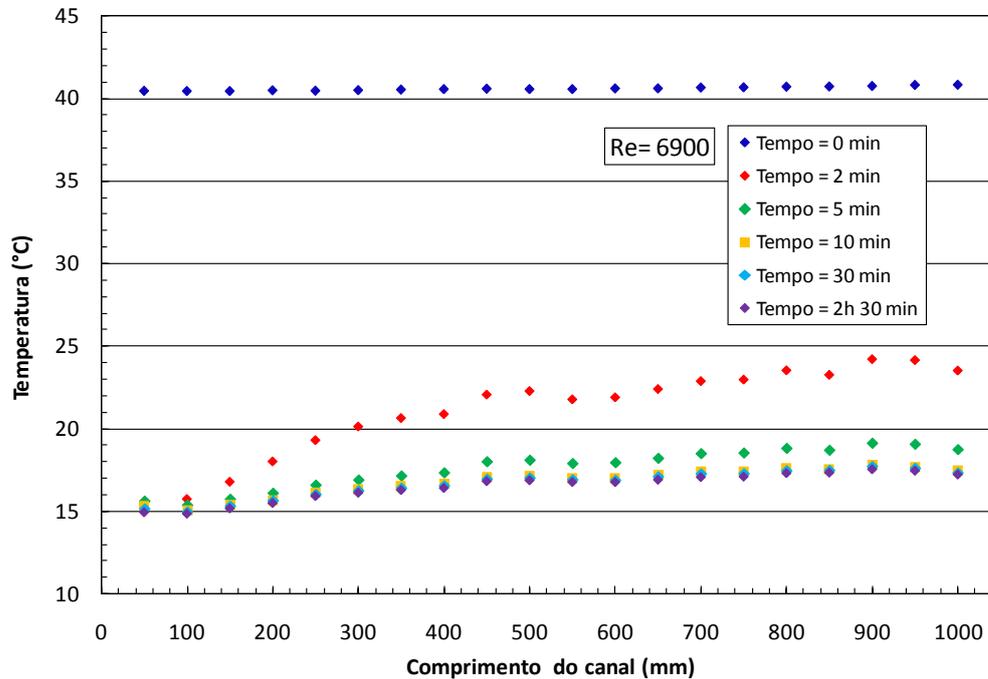


Figura 4.25: Distribuição axial da temperatura ao longo da parede de cobre para Reynolds igual 6900 para os instantes iguais a 0, 2, 5, 10, 30 e 150 minutos após do início da experiência. Resultados para $T_e=40^\circ\text{C}$ e $T_p=15^\circ\text{C}$.

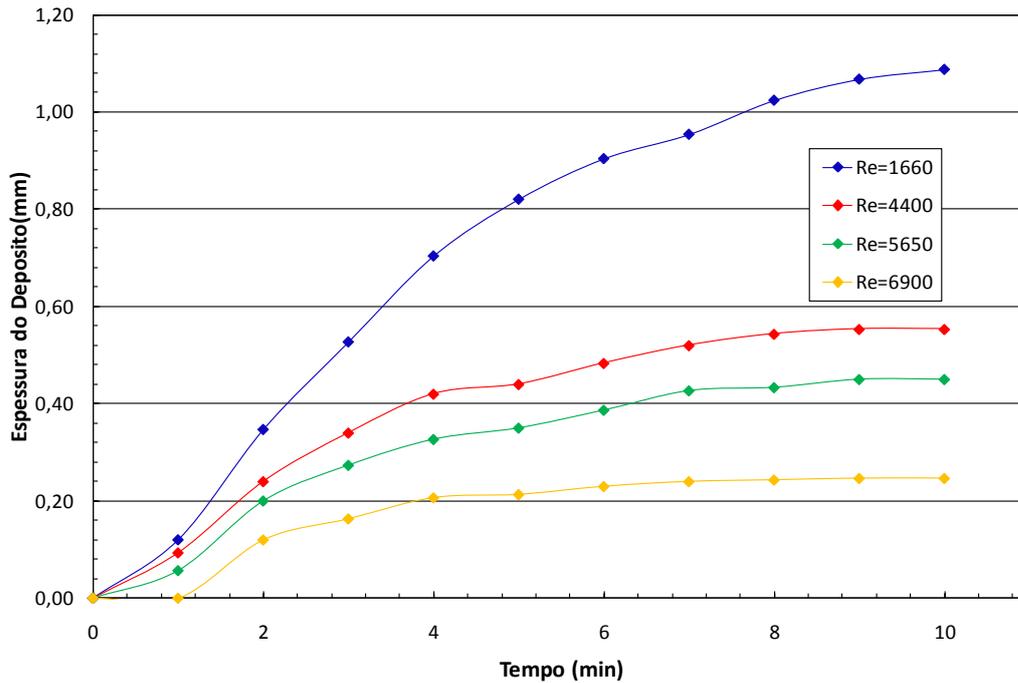


Figura 4.26: Taxa de crescimento de depósito para uma posição no meio do canal, como função do número de Reynolds. Resultados para os 10 primeiros minutos dos testes.

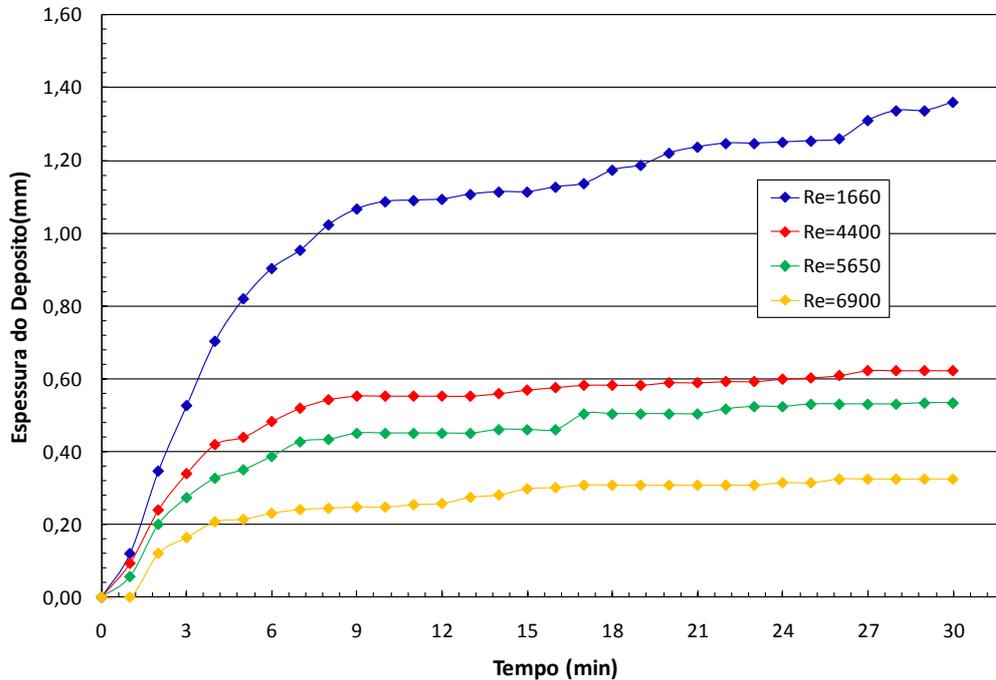


Figura 4.27: Taxa de crescimento de depósito para uma posição no meio do canal, como função do número de Reynolds. Resultados para os 30 primeiros minutos dos testes.