

3. Procedimento e Montagem Experimental

O presente trabalho é uma continuação da pesquisa iniciada por Leiroz [14]. A seção de testes usada para nosso estudo de deposição de parafina sob condições de escoamento laminar, foi obtida a partir de melhorias feitas no aparato experimental projetado e utilizado por ela. As modificações foram realizadas levando em conta suas sugestões, além das exigências decorrentes das novas condições de teste a serem investigadas onde cristais em suspensão são admitidos na seção de testes. Assim, no presente capítulo é apresentada em detalhe a disposição dos diversos elementos que compõem a seção de testes, além do procedimento experimental utilizado em cada uma das experiências.

3.1. Montagem experimental

A seção de testes foi construída seguindo-se a filosofia de realizar experimentos simples que permitam avaliar a importância de cada um dos diferentes mecanismos de deposição conhecidos. Tendo em mente esta filosofia de estudo, foi construído um sistema composto por um reservatório de alimentação, uma bomba de cavidades progressivas e um canal retangular de dimensões internas 3 x 10 x 300 mm (largura x altura x comprimento), que é o coração da seção de testes (região de visualização). Em seguida serão descritos em detalhe cada uma das características e funções dos diferentes componentes listados. A Figura 3.1 mostra esquematicamente o detalhe da disposição de cada um dos elementos da seção de teste.

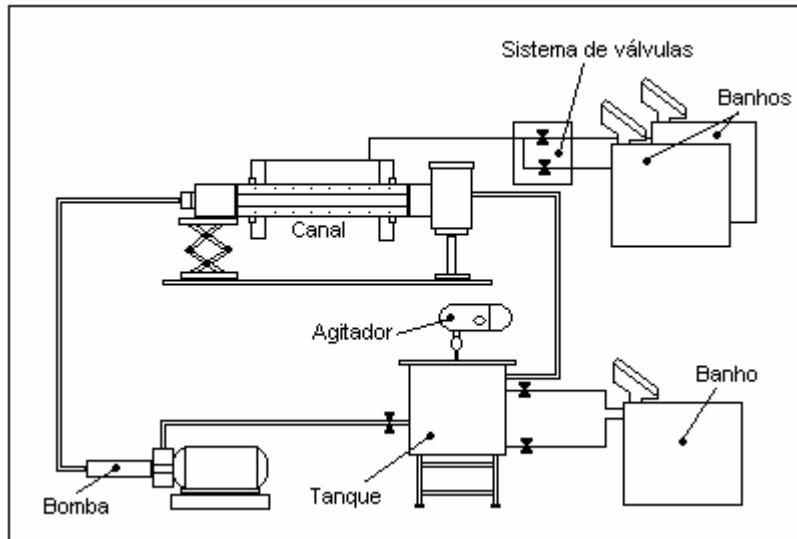


Figura 3.1: Vista esquemática da seção de testes para ensaios de deposição de parafina em condições de escoamento.

A parte principal da seção de testes é o canal. É aqui onde foram realizados os experimentos de deposição de parafina com o acompanhamento visual do comportamento transiente do fenômeno. O canal é constituído por duas paredes de cobre que atuam como espaçadores das duas paredes de vidro. As paredes de vidro, de 10 mm, foram projetadas tendo em mente a idéia de visualização do processo de deposição. As outras duas paredes de cobre, de 3 mm, foram usinadas a partir de blocos que contendo um furo axial por onde era circulada água proveniente de banhos termostáticos, que controlavam a temperatura. Assim, estas paredes de cobre atuavam como aletas condutoras que garantiam a homogeneidade da temperatura imposta como condição de contorno para as diferentes condições de deposição estudadas. A temperatura das duas paredes de cobre era controlada por dois banhos termostáticos Haake modelo Phoenix C25P com capacidade de geração de rampas de aquecimento e resfriamento. Adicionalmente, duas peças de acrílico a jusante e a montante das paredes de cobre, davam rigidez ao canal e garantiam a visualização do escoamento antes e depois da região de deposição. A Figura 3.2 mostra a montagem do canal com as duas peças de acrílico na entrada e saída. Um detalhe da construção do canal é mostrado na Figura 3.3. Nesta figura podem ser observadas as paredes de cobre e vidro que formavam a seção transversal retangular. Nas Figuras 3.4 e 3.5 são detalhadas as dimensões de construção do canal.

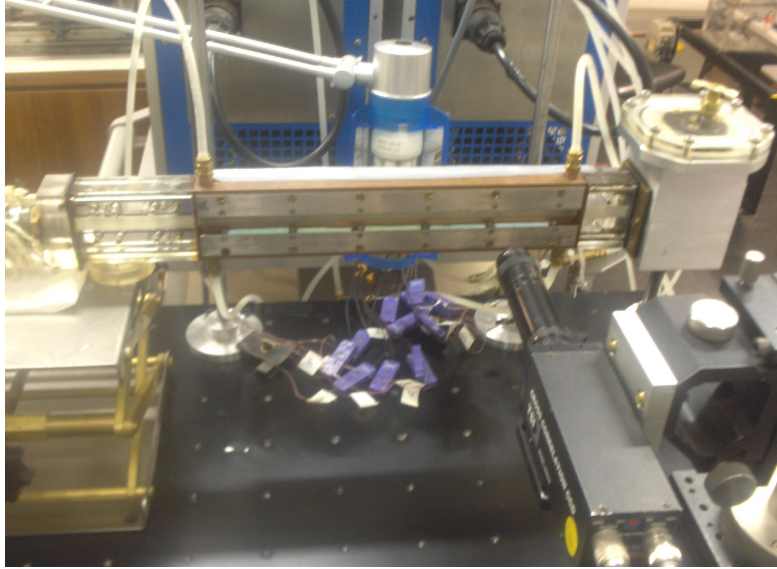


Figura 3.2: Vistas da montagem do canal com as duas peças de acrílico na entrada e saída.

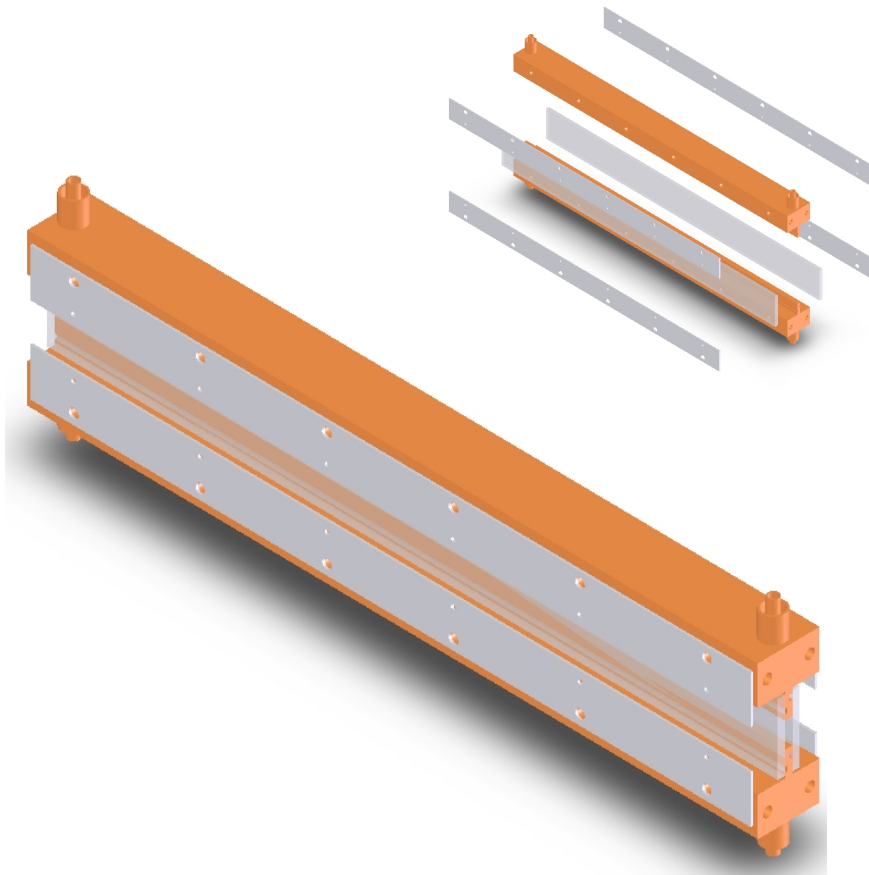


Figura 3.3: Vistas de conjunto e explodida do canal.

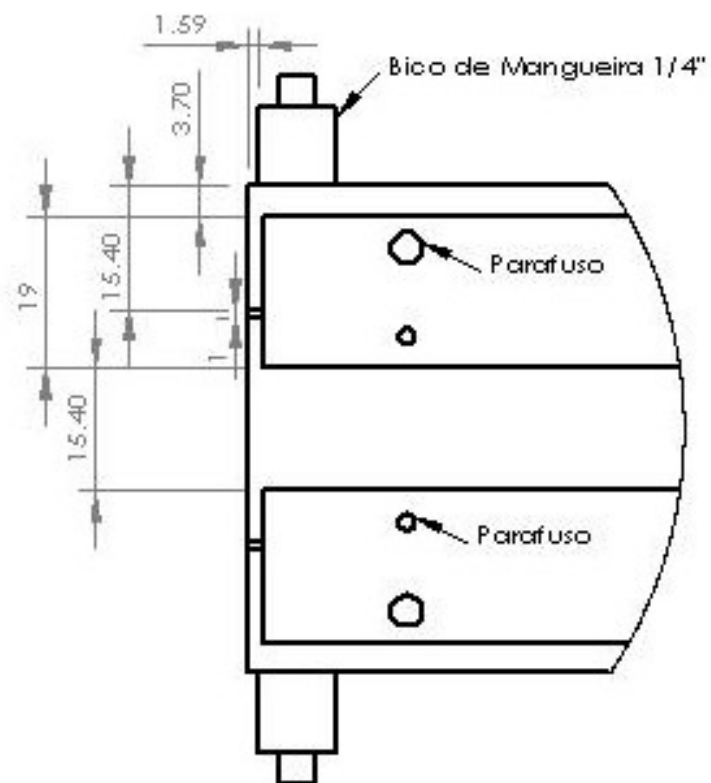
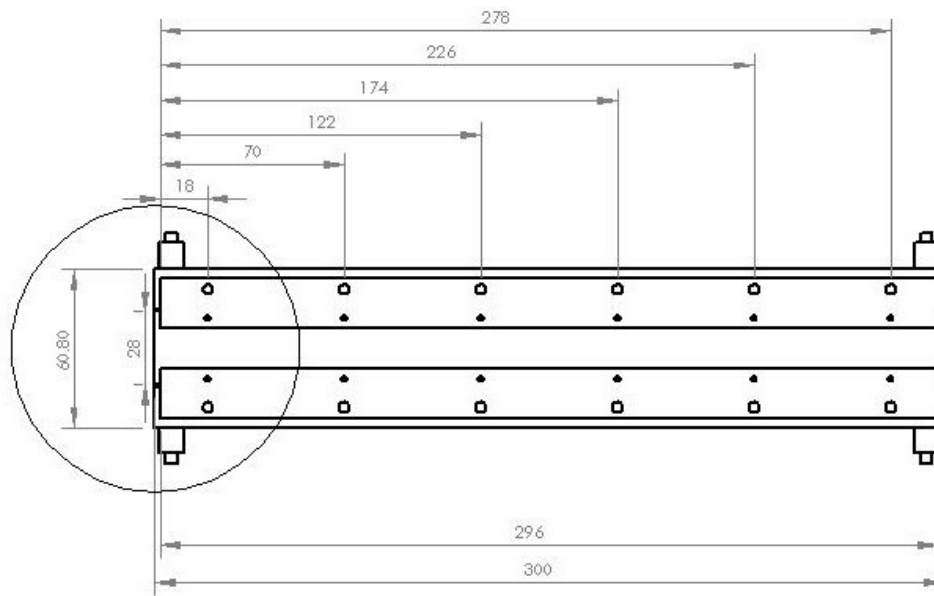


Figura 3.4: Vista de frente e detalhe das dimensões do canal.

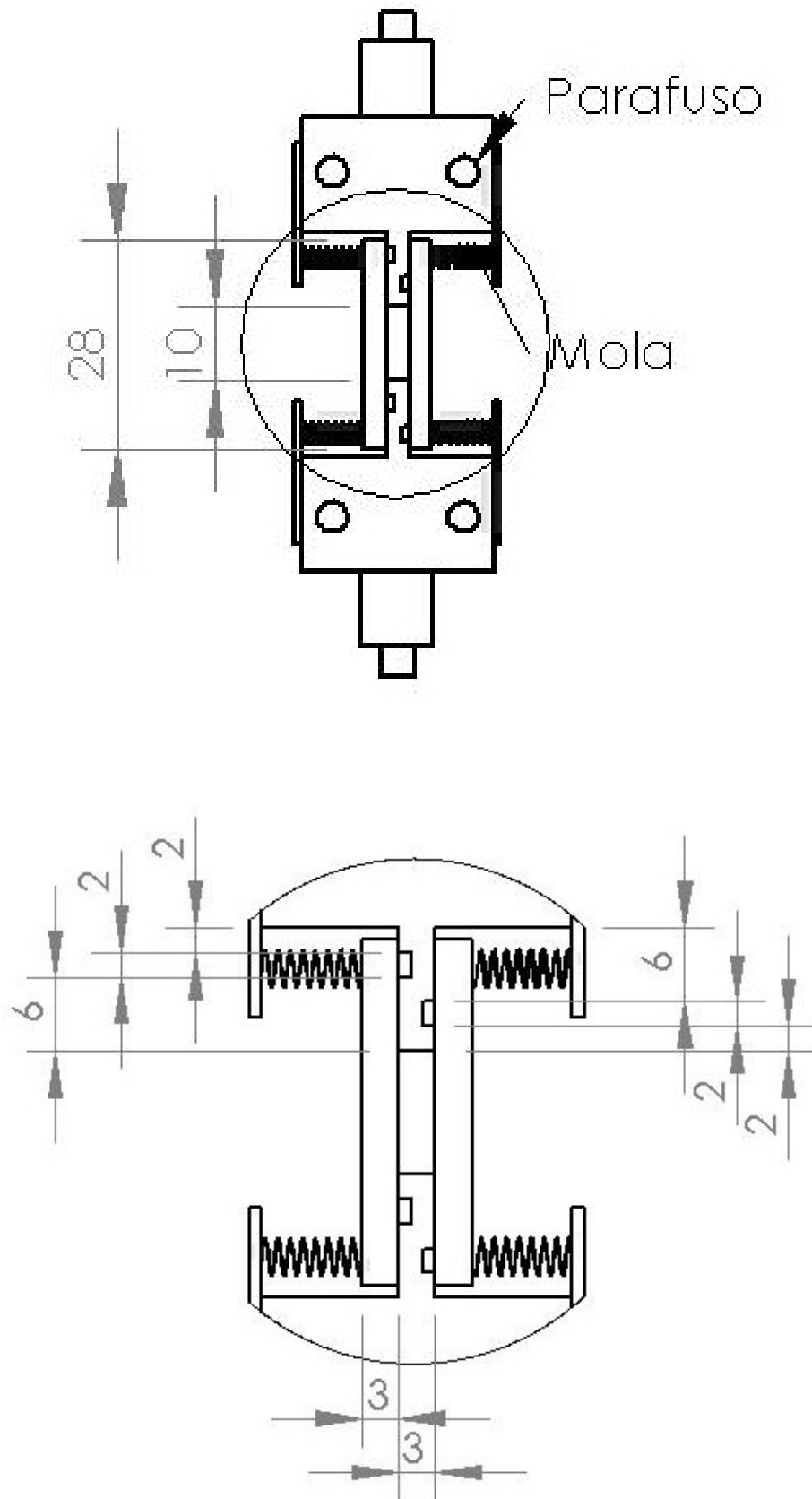


Figura 3.5: Vista lateral e detalhe das dimensões do canal.

O reservatório era outro elemento importante da seção de testes. Este alimentava e armazenava a solução óleo-parafina utilizada nas diferentes experiências e foi fabricado de forma cilíndrica em aço inoxidável. Uma serpentina de cobre, ligada a um banho termostático, envolvia o reservatório mantendo a temperatura da mistura controlada. A solução óleo-parafina contida no cilindro era homogeneizada por um agitador de marca Fisatom modelo 713. O reservatório de alimentação e a serpentina foram-se instalados em um tanque maior construído também em aço inox. Adicionalmente, a jusante do canal, encontrava-se um tanque de dimensões menores. Fabricado em alumínio, este tinha a função de fixar o canal além de receber o fluido de saída. Os detalhes da construção dos tanques são mostrados nas Figuras 3.6 a 3.9.

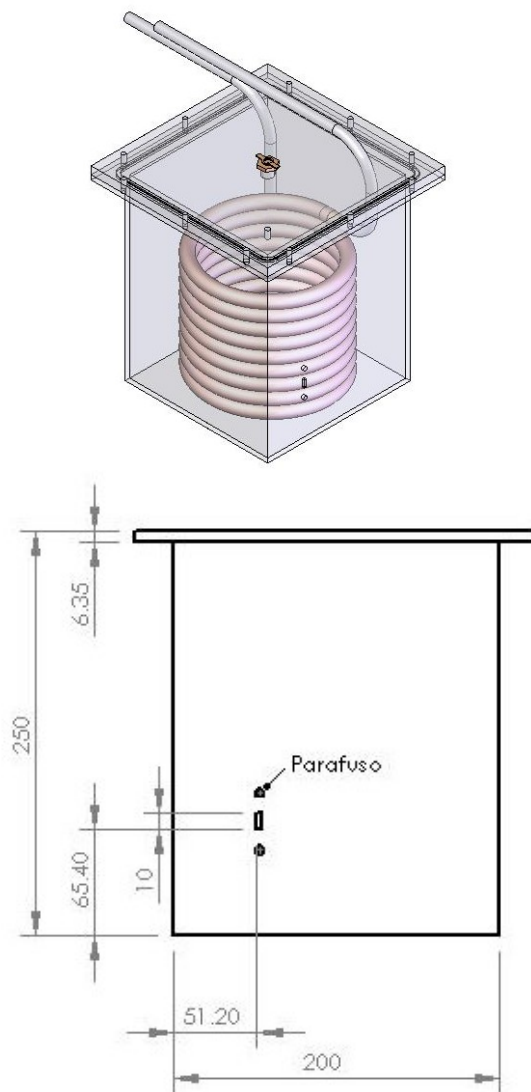


Figura 3.6: Vista isométrica e lateral do reservatório de armazenamento.

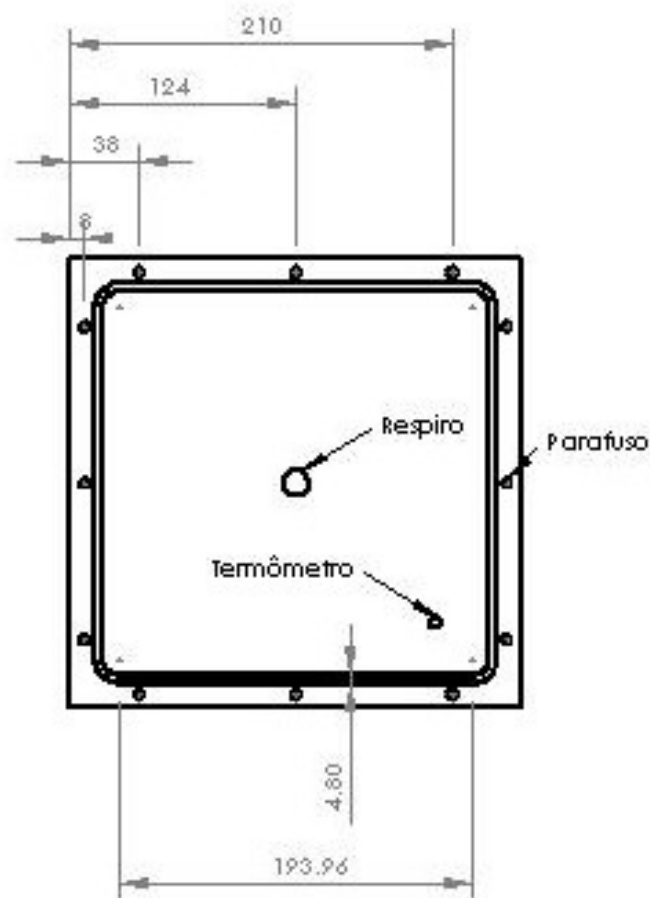
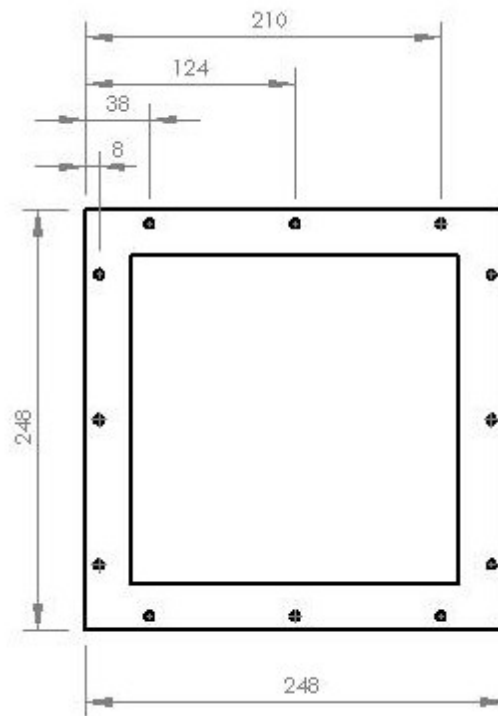


Figura 3.7: Vista do topo e tampa do reservatório de armazenamento.

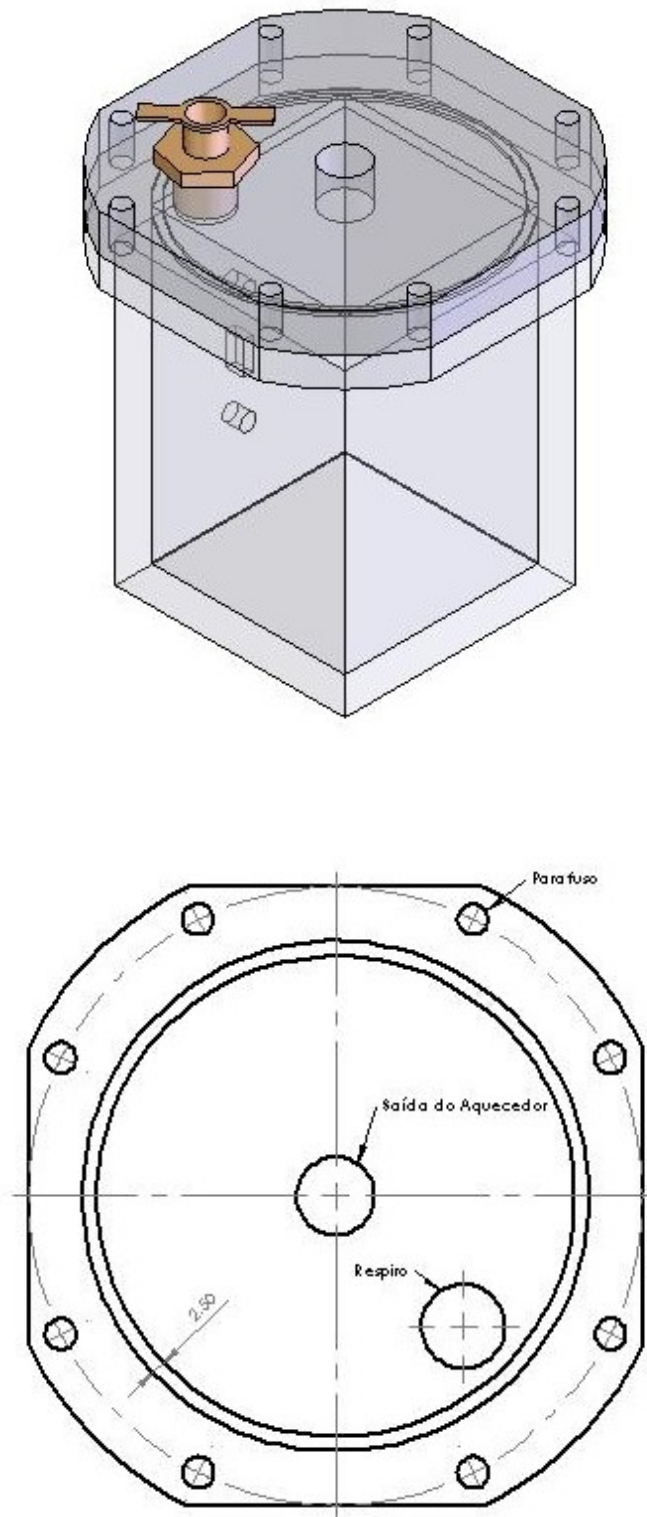


Figura 3.8: Vista isométrica e tampa do reservatório de alumínio.

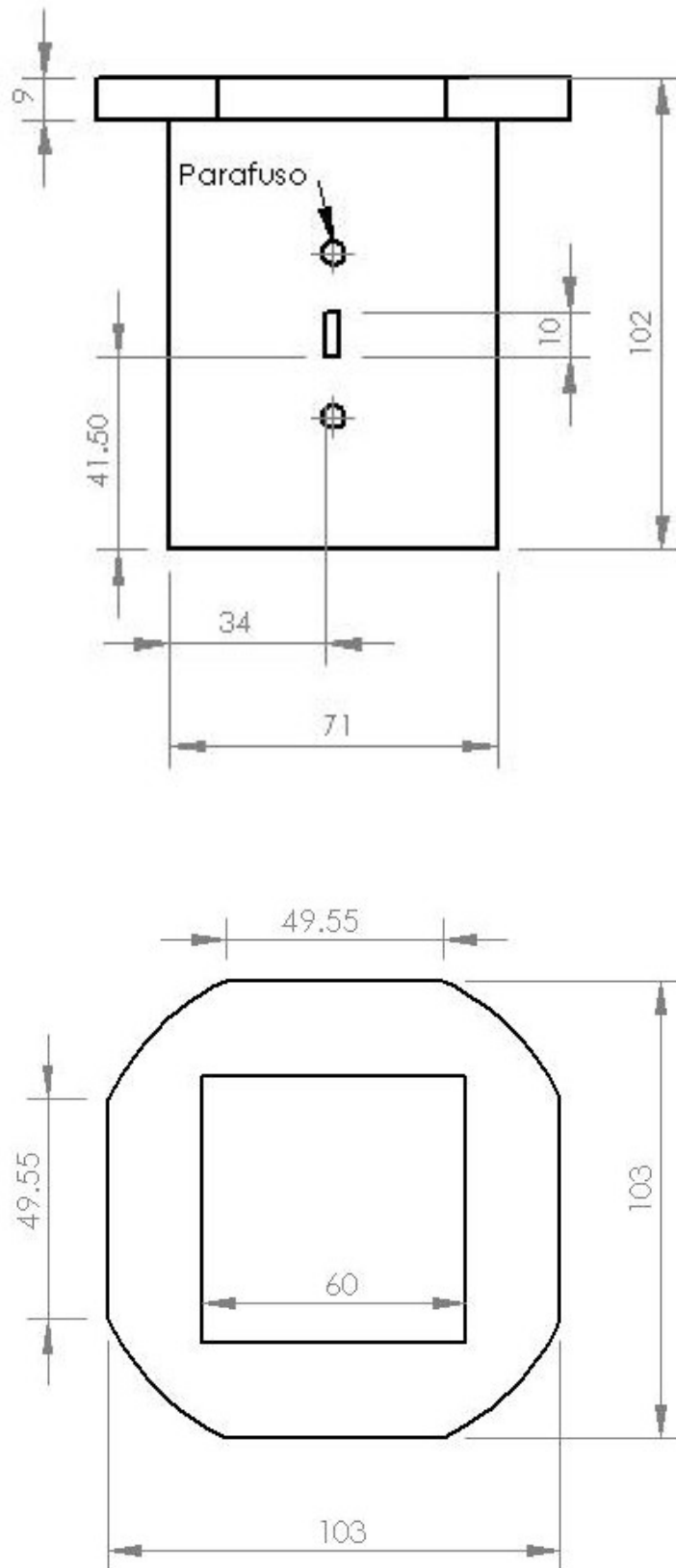


Figura 3.9: Vista lateral e de topo do reservatório de alumínio.

A seção de testes era alimentada por uma bomba de cavidades progressivas modelo NM015BY01L06B da marca Netzsch. Este tipo de bomba foi escolhido devido à sua característica de gerar vazões volumétricas constantes. Adicionalmente, foi utilizado um inversor de frequência da série CFW-08 da Weg, para controlar as revoluções da bomba e em consequência facilitar o controle de sua vazão. O inversor de frequência utilizado tinha a capacidade de variar de 0 a 60 Hz com uma resolução mínima de 0,01 Hz. Assim, foi obtida a curva de vazão da bomba em função da frequência do inversor, que pode ser encontrada no Apêndice A.2.

Mangueiras de 3/4 de polegada foram utilizadas como linhas de transporte entre o canal, o tanque de alimentação e a bomba. As mangueiras, suas conexões e até o rotor da bomba foram aquecidas por resistências elétricas na forma de fitas e isoladas com lã de vidro. Variadores de tensão permitiam o controle de aquecimento. Assim, o aquecimento das linhas evitava a deposição indesejável da parafina antes da entrada do fluido no canal retangular.

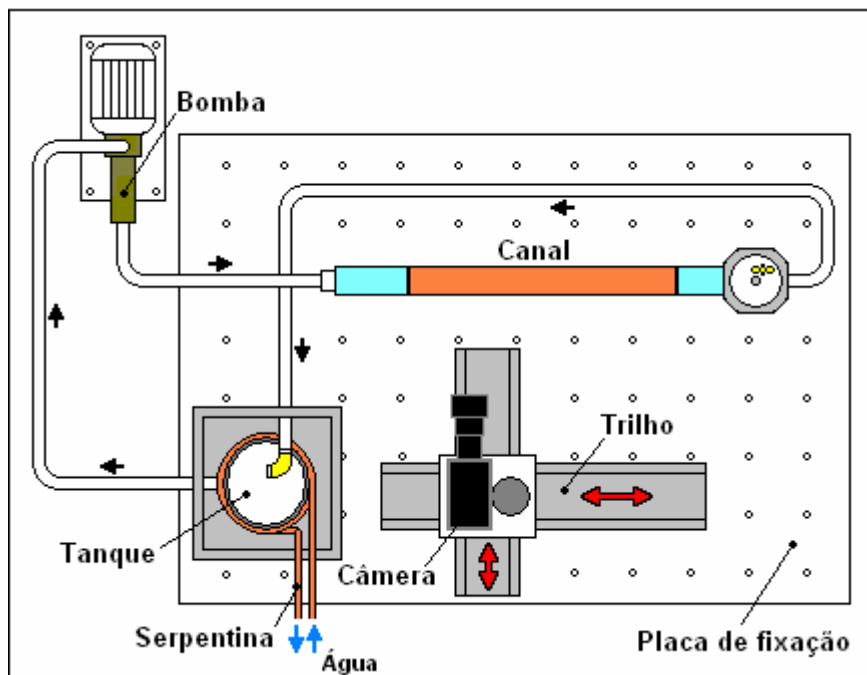


Figura 3.10: Vista superior da seção de testes que mostra o posicionamento da câmara.

Com a finalidade de minimizar as vibrações geradas durante o funcionamento da bomba, o tanque de alimentação e o canal foram montados sobre uma placa de alumínio com bases de borracha. Esta placa de alumínio

permitia a fixação dos elementos mediante uma matriz de furos roscados. A câmera digital, usada para a visualização do fenômeno, foi também montada sobre a placa de alumínio sobre um sistema de trilhos dispostos especialmente para facilitar seu posicionamento. Posicionadores micrométricos, com uma resolução de 0,01 mm, permitiam a movimentação da câmera com a resolução necessária para garantir uma boa focalização das imagens para os diferentes aumentos usados. A Figura 3.10 mostra a vista superior da seção de testes onde pode ser observada a montagem da câmera digital.

Sistema de Aquecimento por Jatos de Ar

Como foi mencionado, as paredes de cobre do canal eram controladas por banhos termostáticos. Quando estas paredes eram resfriadas para permitir a condução de experimentos de deposição de parafina, as paredes laterais de vidro em contato com as paredes de cobre eram também resfriadas por condução de calor. Geralmente o resfriamento do vidro produzia deposição de parafina em suas paredes internas o que dificultava, e às vezes até impossibilitava, a visualização do fenômeno de deposição no interior do canal. Para contornar este problema foi projetado e construído um sistema de aquecimento das paredes de vidro utilizando jatos de ar. Assim, seis jatos, espaçados 50 mm um do outro, foram posicionados em ambos dos lados do canal para controlar a temperatura de cada parede de vidro. Os jatos foram calibrados em uma vazão e posicionados em uma distância tal que evitasse a formação de picos de temperatura no vidro. O ar, fornecido por um soprador, era aquecido até a temperatura desejada numa caixa com duas resistências de 1000W cada uma, que eram controladas por um variador de tensão. O soprador utilizado foi da série CR-2 da marca Aspo, e tinha a capacidade de gerar vazões de até 5 m³/min. Por outro lado o motor do soprador, estava também ligado com um inversor de frequência da série CFW-08 da Weg para controlar sua vazão. As Figuras 3.11 a 3.13 mostram em detalhe o sistema de alimentação de ar.

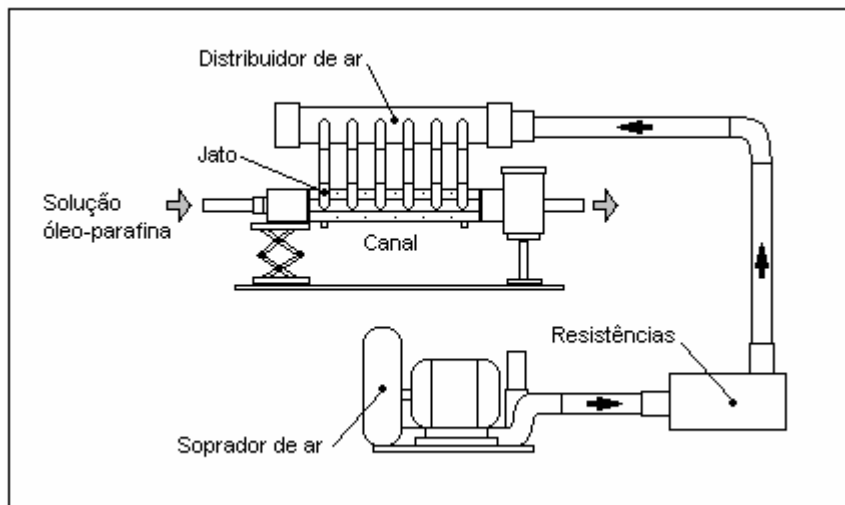


Figura 3.11: Vista esquemática do sistema de aquecimento por jatos de ar utilizado.

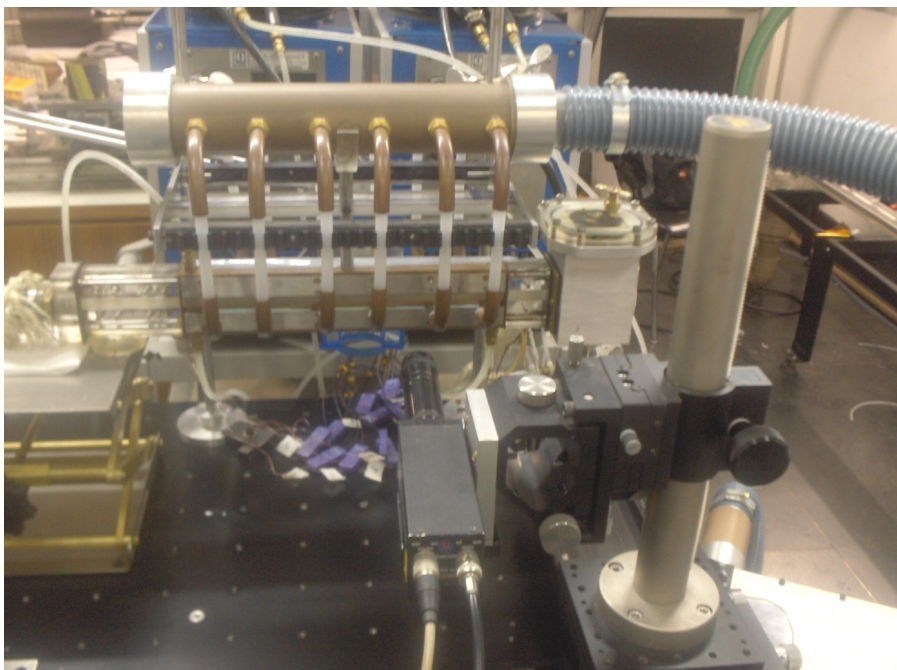


Figura 3.12: Imagem que mostra o posicionamento do sistema por jatos de ar nas paredes de vidro do canal.

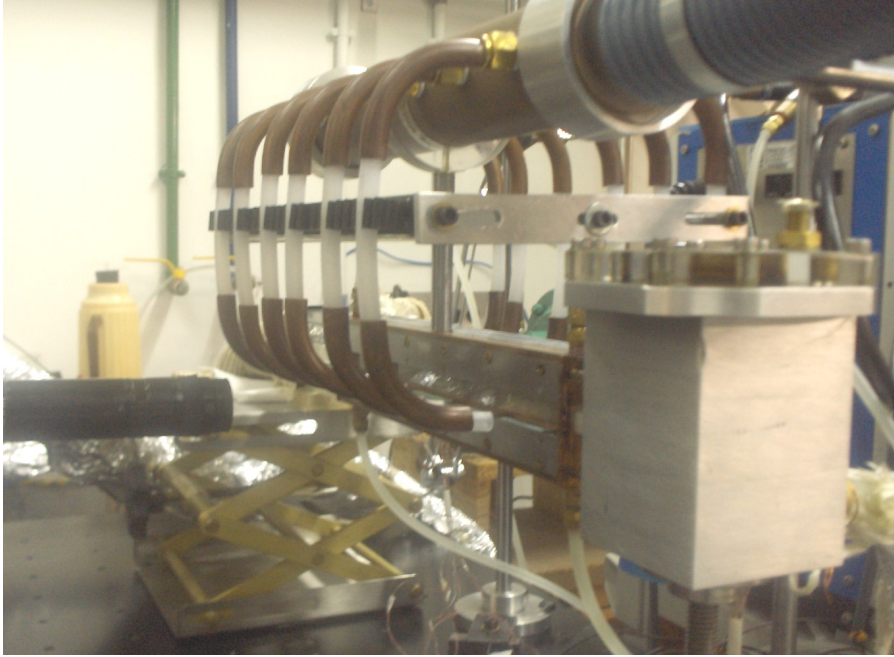


Figura 3.13: Vista lateral do posicionamento dos jatos em ambas paredes de vidro.

Controle e Medição de Temperatura

O objetivo de comparar os resultados obtidos dos testes experimentais com diferentes modelos de simulação numéricas gerou a necessidade de um bom controle das condições de temperatura a que é submetido o escoamento. Assim, foi instrumentada a região do canal com 15 termopares tipo E com diâmetro de 0,12 mm. Um dos termopares, introduzido numa agulha hipodérmica, controlava a temperatura da solução óleo-parafina na entrada do canal. Um segundo, controlava a temperatura na saída dos jatos de ar. Os treze termopares restantes foram colados em uma das paredes de vidro com a finalidade de conhecer a distribuição espacial da temperatura na linha central da mesma ao longo do canal. Estes termopares dispostos na parede de vidro cumpriam uma função importante mostrando a influencia do aquecimento por jatos de ar mencionado.

Os termopares utilizados foram conectados a um sistema de aquisição de dados AGILENT modelo 34970A. A temperatura era armazenada em intervalos de tempo de 10 segundos, tempo que foi considerado suficiente para acompanhar o transiente em estudo. A Figura 3.14 mostra em detalhe a disposição dos termopares na parede de vidro do canal.

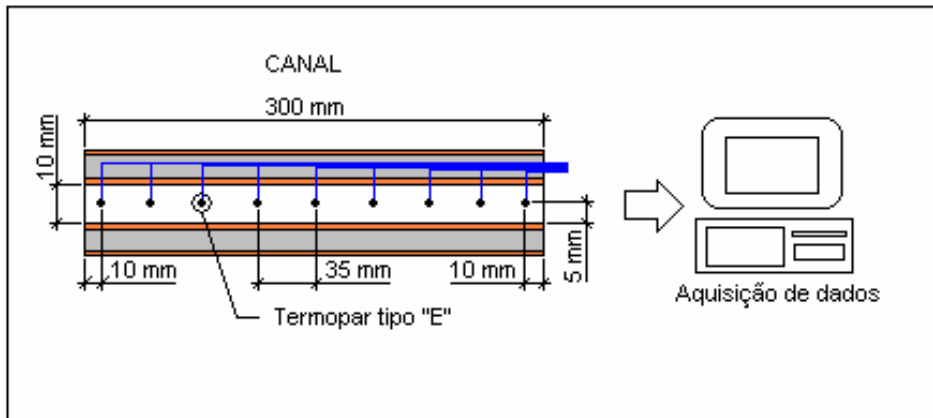


Figura 3.14: Detalhe da disposição dos termopares na parede de vidro do canal.

Sistema de Visualização e Processamento de Imagens

Para acompanhar e visualizar o fenômeno de deposição de cristais durante a realização das experiências foi usada uma câmera CCD modelo 630044 da TSI. A câmera estava ligada com um microcomputador e um aparelho de vídeo-cassete VHS em que eram registrados os filmes ou imagens, dependendo do tipo de estudo. A resolução espacial de esta câmera foi de 640 x 480 pixels, possuindo uma taxa fixa de 30 quadros por segundo. O acompanhamento do fenômeno de deposição foi realizado com três lentes de aumento diferentes dependendo do objetivo de estudo e da resolução desejada. Os aumentos utilizados durante este trabalho foram de 6x, 11x e 45x.

Os experimentos registrados em modo VHS foram convertidos para arquivos digitais no formato AVI por meio de uma placa Pinnacle Systems GmbH PCTV USB, o que facilitou a geração de seqüências de imagens.

Solução Óleo-parafina

Para os experimentos realizados, foi usada uma solução de 10% em peso de parafina em óleo. A parafina utilizada nas experiências foi da marca Vetec com um ponto de fusão na faixa de 56 a 58 °C. O óleo utilizado como solvente, foi o óleo Spindle proveniente da destilação a vácuo do petróleo e que foi fornecido pelo Centro de Pesquisa Leopoldo Miguez de Mello - Cenpes. Para o

preparo da solução, fundiu-se totalmente 1 Kg de parafina sendo posteriormente misturado com 9 Kg de óleo Spindle. A TIAC desta solução medida por viscosimetria, resultou ser de 36,6°C. Detalhes da medição da TIAC e a apresentação das diferentes curvas das propriedades da parafina são apresentadas no Apêndice A.1.

3.2. Procedimento Experimental

Dois tipos diferentes de testes foram desenvolvidos no presente trabalho, ambos em condições de escoamento laminar. Como será visto mais a frente, inicialmente foram realizados testes com o objetivo de avaliar as mudanças realizadas no aparato experimental usado por Leiroz [14], como por exemplo, a implementação do sistema de aquecimento por jatos de ar. O segundo tipo de experiências corresponde aos estudos de deposição na presença de cristais em suspensão, isto é, com temperaturas de entrada da solução óleo-parafina abaixo da TIAC. Assim, nesta seção serão detalhados ambos procedimentos experimentais.

Experiências de Validação

As experiências de validação foram desenvolvidas com temperaturas de injeção do fluido de 40°C (maior que a TIAC) para diferentes temperaturas de resfriamento das paredes de cobre. Nesta seqüência de testes foram resfriadas ambas paredes de cobre superior e inferior do canal. A preparação do aparato experimental era iniciada derretendo a parafina do tanque de armazenamento mediante a recirculação de água quente proveniente de um dos banhos termostáticos. Depois de dissolvida a parafina do tanque, a solução era homogeneizada fazendo uso do agitador. A parafina sólida da região do canal era derretida mediante o aquecimento das paredes de cobre com água proveniente de outro banho termostático. Além disso, eram ligadas as resistências distribuídas ao longo das tubulações de transporte e do rotor da bomba. Somente depois de garantir que a parafina da seção de testes estivesse completamente derretida, era acionada a bomba na vazão requerida. A constante monitoração das temperaturas da experiência permitia controlar e

atingir as condições de temperatura desejadas para o caso em estudo. Assim, as experiências eram iniciadas com o resfriamento das paredes de cobre, mediante o acionamento do sistema de válvulas que controlava a passagem de água fria, dando início ao processo de deposição.

Após o término da experiência de visualização, a parafina depositada no canal era derretida mudando a posição do sistema de válvulas e permitindo a passagem de água quente. Para a realização de cada experiência, sempre foram garantidos a homogeneidade da solução e o regime permanente do escoamento mediante o controle da estabilidade das diferentes temperaturas medidas.

Nas experiências realizadas com o uso do sistema de aquecimento de jatos por ar, o soprador era ligado na vazão desejada e as resistências aquecidas. A temperatura de saída dos jatos de ar requerida era atingida controlando a tensão de alimentação das resistências.

Experiências com Cristais em Suspensão

Este tipo de experimentos exigiu um maior cuidado. As diferentes experiências foram desenvolvidas com temperaturas de injeção do fluido abaixo da TIAC. O fluido na presença de cristais, foi submetido a diferentes condições de fluxo de calor (negativo, nulo e positivo). Para o caso de fluxo de calor nulo, ambas paredes de cobre foram mantidas na mesma temperatura do fluido de injeção. Por outro lado, para a geração de fluxos de calor negativos e positivos foi variada somente a temperatura da parede inferior, tentando manter a superior na mesma temperatura de injeção do fluido. Nestas experiências foi utilizado o sistema por jatos de ar para todas as condições de estudo.

A preparação prévia do experimento era iniciada do mesmo modo que nos testes de validação. Somente depois de garantir que a parafina da seção de testes estivesse completamente derretida, era acionada a bomba na vazão requerida. Assim, a bomba era ligada mantendo as duas paredes de cobre em 40°C e, ao mesmo tempo, a temperatura do ar na saída dos jatos em 38°C (maior que a TIAC). Com estas temperaturas das paredes de cobre e do ar

fixas, ia sendo diminuída a temperatura de entrada do fluido ao canal. Esta temperatura de entrada da solução devia atingir uma temperatura menor que a TIAC garantindo a presença de cristais em suspensão. Logo após a temperatura da solução atingir a temperatura desejada, eram diminuídas as temperaturas das paredes de cobre e do ar até atender as condições necessárias para o experimento. A seqüência desta metodologia era importante já que garantia que não fossem produzidos antes da experiência, fluxos de calor negativos (temperaturas da parede menores que a do fluido) que ocasionam a deposição por difusão molecular. Assim, as experiências eram iniciadas, mediante o acionamento do sistema de válvulas que controlava a passagem da água proveniente do banho a temperatura controlada, dando início ao experimento.

Do mesmo modo que nos testes de validação, depois da finalização da experiência de visualização, a parafina depositada no canal era derretida mudando a posição do sistema de válvulas e permitindo a passagem de água quente. Para a realização de cada uma destas experiências, sempre foram garantidos a homogeneidade da solução e o regime permanente do escoamento mediante o controle da estabilidade das diferentes temperaturas medidas.