

3

Métodos e Montagens Experimentais

Diversas seções de teste foram projetadas, construídas e testadas ao longo do trabalho, até que chegou-se a uma configuração adequada para a medição e visualização do processo de formação de depósito de parafina. A seguir é apresentada uma descrição das seções construídas. Optou-se por incluir a descrição de todas as seções construídas, mesmo daquelas que não apresentaram desempenho satisfatório, de modo a deixar disponível as informações consideradas relevantes para referência futura.

Em todos os ensaios utilizou-se como fluido de trabalho soluções de óleo e parafina refinada preparadas em laboratório.

3.1

Deposição em Fluido estagnado

3.1.1

Primeira Seção de Testes: Cavidade com Laser Pulsado

No objetivo do projeto propôs-se a verificação dos mecanismos básicos de deposição de parafina utilizando-se para isto uma cavidade contendo uma mistura óleo-parafina. A trajetória de cristais em direção à parede fria seria visualizada por meio de um plano de luz laser pulsado e uma câmera digital com lente de aproximação.

Na Figura 3.1 é mostrada a montagem experimental preparada para o estudo. A cavidade foi construída com dimensões de 50 x 50 x 5 mm (largura x profundidade x altura). As paredes verticais eram de vidro enquanto as paredes horizontais superior e inferior eram de cobre. A parede superior possuía um aquecedor elétrico ligado a uma fonte de corrente contínua para controle de temperatura. A parede inferior era refrigerada por um trocador de calor na parte externa da placa, ligado a um banho termostático. Desta forma era possível estabelecer um gradiente vertical de temperatura na mistura óleo-parafina no interior da cavidade.

Um plano de luz proveniente de um laser de ion de Argônio com 5 Watts de potência máxima iluminava o interior da cavidade. Uma câmera CCD modelo 630044 fabricada pela TSI com resolução de 640 x 480 pixels foi utilizada para capturar as imagens dos cristais de parafina iluminados pelo laser. A câmera utilizava um conjunto de lentes com o qual obtinha-se uma ampliação da imagem de 12 vezes.

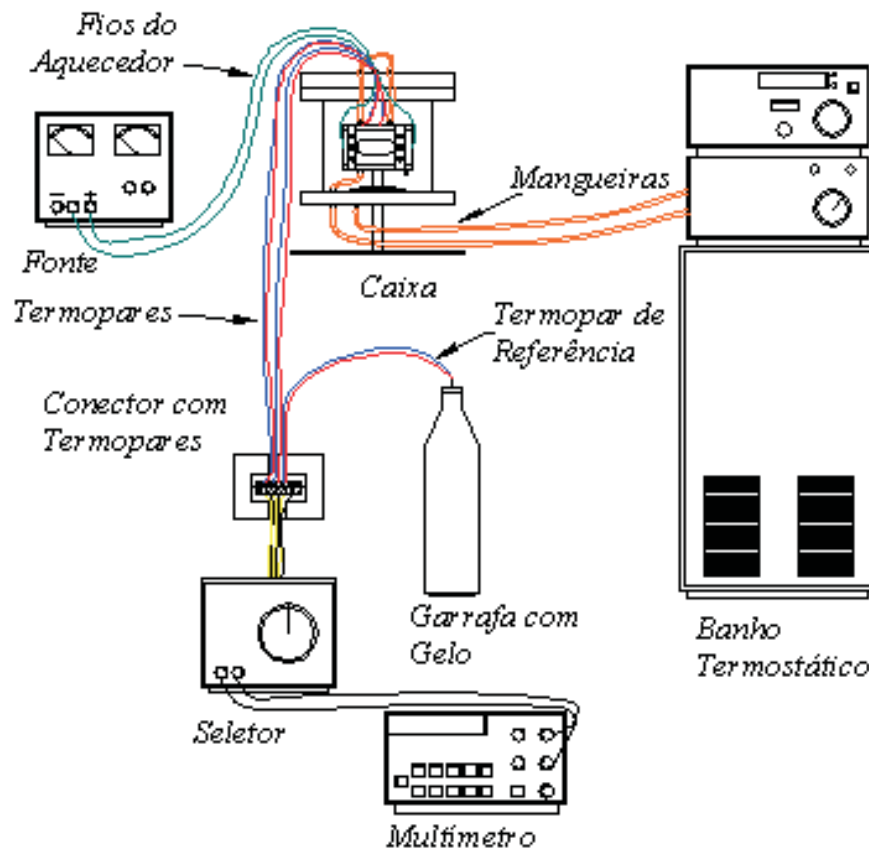


Figura 3.1: Primeira seção de testes construída para visualização da deposição de parafina.

A Figura 3.2 mostra de maneira esquemática a montagem do laser e das lentes para formação do plano de luz.

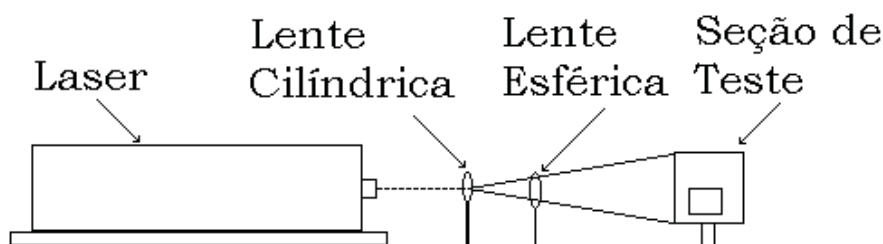


Figura 3.2: Vista esquemática da montagem para iluminação da cavidade.

Os primeiros testes realizados demonstraram que o movimento de convecção natural no interior da cavidade era intenso. Este movimento produzia uma movimentação dos cristais indesejada, pois nosso estudo necessitava do fluido estagnado para poder observar a movimentação de cristais devido somente ao movimento Browniano, caso este estivesse realmente presente. Para tentar minimizar a intensidade das correntes convectivas no interior da cavidade, a cavidade construída foi imersa em uma outra cavidade de vidro contendo água com temperatura controlada por um banho termostático. Esperava-se com este procedimento isolar a cavidade interna das variações de temperatura do laboratório, minimizando os efeitos de convecção natural. A Figura 3.3 mostra uma fotografia da cavidade de ensaio instalada dentro da cavidade de vidro com água. A Figura 3.1 mencionada anteriormente também já mostra a cavidade de teste dentro da cavidade com água.

Infelizmente, esta nova montagem também não foi capaz de eliminar os movimentos induzidos por convecção natural. Verificou-se também que a iluminação intensa do laser necessária para tornar os pequenos cristais visíveis também os aquecia provocando movimentos indesejáveis. Este projeto de experimento foi abandonado.

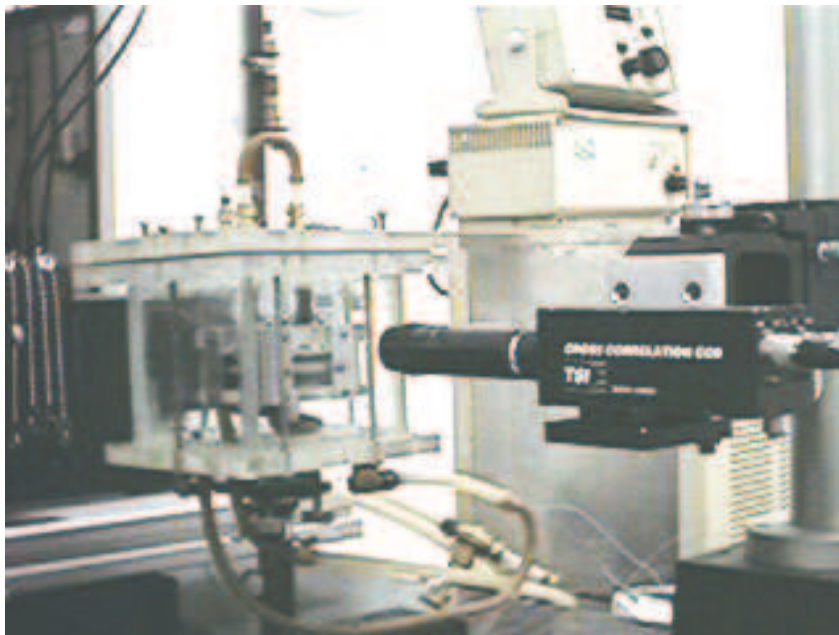


Figura 3.3: Vista da seção de teste para visualização da deposição de parafina.

3.1.2

Segunda Seção de Testes: Cavidade Esbelta com Iluminação de Fundo

Um segundo projeto de experimento totalmente novo foi elaborado. A iluminação laser foi substituída por uma iluminação de luz branca direcionada diretamente para a câmera digital. Uma nova cavidade com dimensões menores foi projetada com o objetivo de minimizar os efeitos de convecção natural que inviabilizaram a primeira seção de testes construída.

Simulação Numérica da Convecção Natural em Cavidade

Para auxiliar o projeto, a transferência de calor por convecção natural no interior da cavidade foi simulada numericamente. Para isto utilizou-se o programa Fluent disponível no Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio. Com o auxílio desta simulação otimizou-se a geometria da cavidade de forma a minimizar a movimentação do fluido, isto é, evitar o aparecimento de fortes correntes de convecção natural que provocariam a movimentação dos cristais formados contrariando o objetivo da experiência que é visualizar cristais em uma solução estagnada. As dimensões da cavidade obtidas a partir destes estudos serviram de base para o projeto da cavidade utilizada no experimento.

Montagem Experimental

O novo projeto da cavidade é apresentado esquematicamente nas Figuras 3.4 e 3.5.

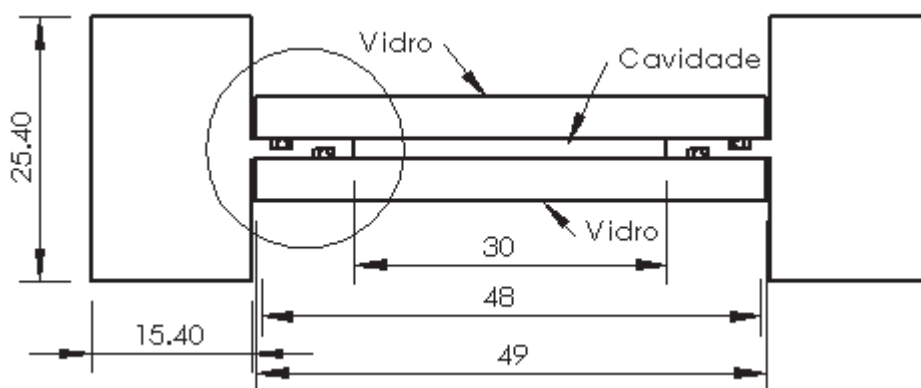


Figura 3.4: Vista esquemática da segunda seção de testes construída para visualização da deposição de parafina.

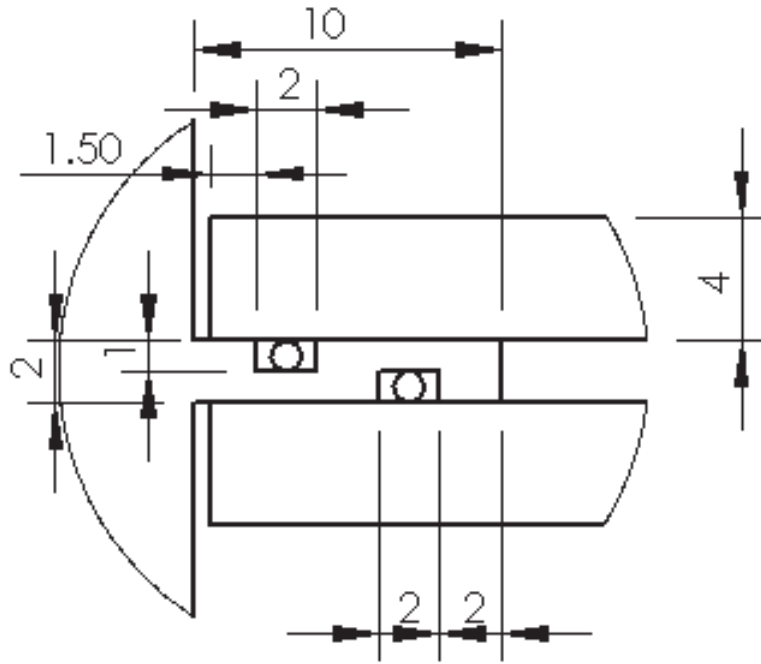


Figura 3.5: Detalhe da segunda seção de testes construída para visualização da deposição de parafina.

A seção de teste consiste de uma cavidade retangular cujo interior é composto por duas aletas de cobre que servem como espaçadores de duas lâminas de vidro borossilicato. Duas paredes laterais com juntas de borracha fecham a cavidade selando o fluido a ser estudado no seu interior. As aletas de cobre são soldadas a trocadores de calor ligados a dois banhos termostáticos. Desta forma, as temperaturas de dois lados da cavidade são mantidas constantes de forma a estabelecer o gradiente de temperatura através da amostra. As aletas de cobre tem 2,0mm de espessura, 40,0mm de largura e 10,0mm de comprimento. As lâminas de vidro tem 4,0mm de espessura, 40,0mm de largura e 50,0mm de comprimento. Deste modo, as dimensões internas da cavidade eram de 2,0 mm de altura, 40,0mm de largura e 30,0mm de comprimento. A temperatura das aletas é controlada por meio de termopares. A temperatura das placas de cobre é mantida por meio de banhos termostáticos. Uma câmera é montada ortogonalmente à cavidade, em lado oposto a iluminação de fundo. Todo este conjunto, juntamente com um termômetro, é coberto por uma caixa de material isolante a fim de se ter um melhor controle da temperatura do ambiente no contorno da cavidade.

Sistema de Aquisição de Imagens

O sistema de aquisição de imagens utilizado para visualizar o movimento dos cristais é composto por um microcomputador, um video-cassete e uma câmera CCD modelo 630044 fabricada pela TSI, montada ortogonalmente a cavidade. A câmera possui uma resolução espacial de 640 x 480 pixels e uma taxa fixa de 30 quadros por segundo. A câmera foi equipada com uma lente zoom de 18-108 mm. Em algumas situações a lente de aproximação com aumento de 12 vezes foi também empregada. A nova cavidade foi projetada tendo em mente a possibilidade de utilizar um microscópio ótico na visualização dos movimento dos cristais caso uma ampliação maior da imagem fosse necessária. Depois de filmado o experimento em modo VHS, este foi convertido para AVI por uma placa Pinnacle Systems GmbH PCTV USB e seqüências de imagens foram geradas.

Controle e Medição de Temperatura

No sistema, calor é transferido ao fluido através de água escoando pelos trocadores de calor de cobre. A temperatura da água era controlada por banhos termostáticos da marca Haake modelo Phoenix P2 C25P. Um termopar do tipo E (chromel-constantan) com diâmetro de 0,12 mm foi instalado na ponta de cada uma das aletas para monitorar as temperaturas na interface do cobre com o fluido no interior da cavidade. De modo a não perturbar a formação de cristais dentro da cavidade, os termopares foram instalados em furos que se aproximavam da interface sem, no entanto, expor os termopares.

Uma junção de referência instalada em um ponto de gelo, um seletor de canais manual e um voltímetro digital com incerteza de $\pm 1\mu\text{m}$ completavam a instalação para medição de temperatura.

A temperatura do ambiente externo à cavidade era controlada por um termômetro de líquido em vidro com incerteza de $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$. Apenas a seção da primeira montagem é colocada dentro de um compartimento feito de material isolante.

Preparação da Seção de Testes

A preparação da seção de testes para a realização de um ensaio iniciava-se com a limpeza dos vidros. Para tal, colocavam-se as lâminas em um becher com acetona no ultrassom. Em seguida, as lâminas eram secas e

montadas. Os reservatórios dos banhos termostáticos eram abastecidos com água destilada.

Uma vez montada a cavidade o fluxo de água dos banhos termostáticos era direcionado para os trocadores de calor de cobre de modo a aquecer a cavidade ainda vazia. A temperatura de aquecimento era cerca de 5°C acima da TIAC esperada para a amostra óleo/parafina a ser testada. Deste modo, possibilitava-se que a cavidade fosse preenchida com a solução, sem risco de formação de cristais e entupimentos.

A solução óleo-parafina a ser testada era introduzida na cavidade utilizando-se agulhas hipodérmicas e seringas. As agulhas penetravam na cavidade por um tubo disposto na lateral. Um segundo tubo também na lateral permitia a saída do ar e o completo preenchimento da cavidade com o fluido de trabalho.

Início dos Testes

A cavidade abastecida com a solução óleo-parafina era montada na posição correta para a visualização e deixada atingir regime permanente no nível de temperatura elevado utilizado no processo de enchimento.

O experimento propriamente dito era iniciado quando uma manobra de válvulas direcionava para um dos trocadores de calor água fria de um dos banhos termostáticos já em equilíbrio. A temperatura fria era abaixo da TIAC. Assim, o degrau de temperatura era imposto em uma das paredes enquanto a outra era mantida em temperatura elevada sendo aquecida pelo segundo banho termostático.

A partir da imposição do degrau de temperatura iniciava-se o processo de deposição de parafina na parede fria que era continuamente registrada pela câmera de vídeo até que a posição da frente de deposição atingisse uma posição de regime permanente ou que um tempo máximo estabelecido fosse atingido. Para a realização de novos testes a temperatura da parede fria era novamente elevada até que todos os cristais presentes se dissolvessem.

Testes preliminares utilizando água com partículas esféricas de plástico com diâmetro de $20\mu\text{m}$ mostraram que, apesar de significativamente reduzido, o movimento de convecção natural ainda existia. Velocidades máximas da ordem de $10\mu\text{m/s}$ foram observadas. Estas velocidades são da ordem de grandeza das velocidades esperadas para o movimento Browniano de cristais, caso existente. Para tentar diminuir a velocidade induzida pelas correntes convectivas, a altura da cavidade foi reduzida de 2 para 0,5 mm. Isto foi obtido através da introdução de uma placa de vidro com espessura

de 1,5 mm, largura de 40,0 mm e comprimento de 30,0 mm no interior da cavidade. Deste modo, as dimensões da cavidade mudaram para 0,5mm de altura, 40,0mm de largura e 30,0mm de comprimento.

Os testes realizados com água e as esferas de plástico mostraram que o fluido na cavidade encontrava-se estagnado para uma diferença de temperatura entre as placas quente e fria de 10⁰C. Estes resultados foram considerados satisfatórios e os testes com a mistura de parafina e óleo puderam ser realizados.

A Figura 3.6 apresenta uma vista de conjunto e uma vista explodida da seção de testes construída, onde podem ser observadas com mais detalhes as quatro conexões dos dois trocadores de calor de cobre. Os dois tubos mais longos de latão eram utilizados para preencher a cavidade com a solução de parafina a ser testada.

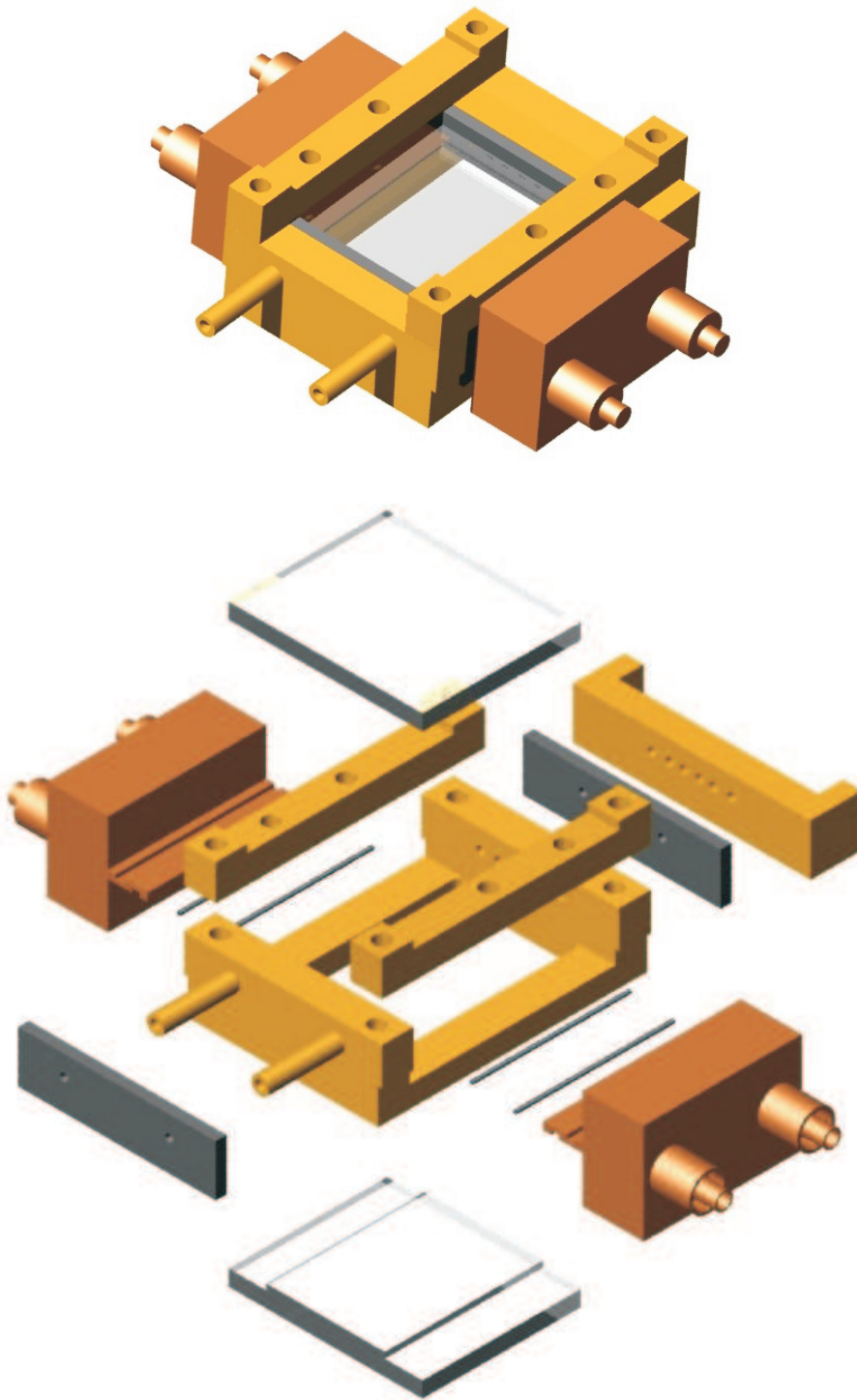


Figura 3.6: Vistas de conjunto e explodida da seção de teste para visualização da deposição de parafina.

3.1.3

Terceira Seção de Testes: Cavidade de Vidro para Uso em Microscópio

A seção de testes mostrada na Figura 3.6 foi montada sobre a mesa de um microscópio para permitir ampliações maiores das imagens do processo de deposição da parafina. Devido à espessura dos vidros utilizados e das pequenas distâncias focais normalmente disponíveis nas objetivas de microscópios óticos, não foi possível utilizar lentes objetivas que proporcionassem aumentos maiores que 50 vezes. Ainda assim, o movimento destas lentes estava limitado pelo contato com as partes mais altas da seção de testes construída. Com o objetivo de possibilitar um melhor acesso de lentes objetivas de maior aumento, projetou-se uma terceira seção de testes de dimensões reduzidas.

Esta seção, apresentada por uma vista frontal e em perspectiva na Figura 3.7, possuía dimensões significativamente menores que as seções anteriores e foi construída a partir de um tubo de vidro de seção reta ovalada, mas com as paredes principais planas e paralelas. Este tubo foi selecionado entre os modelos fabricados pela Vitrocom e possuía dimensões internas de 1 x 10 x 40 mm (espessura x largura x comprimento). A pequena espessura das paredes dos tubos de vidro utilizados cerca de 0,67 mm permitiu uma maior aproximação das lentes objetivas do microscópio e, por conseguinte, a obtenção de foco no plano central da cavidade.

O tubo de vidro foi fechado em suas extremidades com uma peça de cobre que possuía uma aleta que penetrava no tubo. Esta aleta, além de fechar as extremidades do canal era conectada a um bloco de cobre com circulação interna de água, de modo a permitir o controle de sua temperatura. As dimensões das aletas de cobre eram de 1,0 x 10,0 x 5,0 mm (espessura x largura x comprimento). Dois banhos termostáticos controlavam a temperatura da água que circulava no interior dos blocos de cobre, permitindo desta forma, que o gradiente de temperatura imposto através do líquido dentro da cavidade fosse estabelecido nos valores desejados para cada experimento realizado. A cavidade de vidro descrita no parágrafo anterior e apresentada na Figura 3.7 foi montada sobre a mesa motorizada de um microscópio ótico.

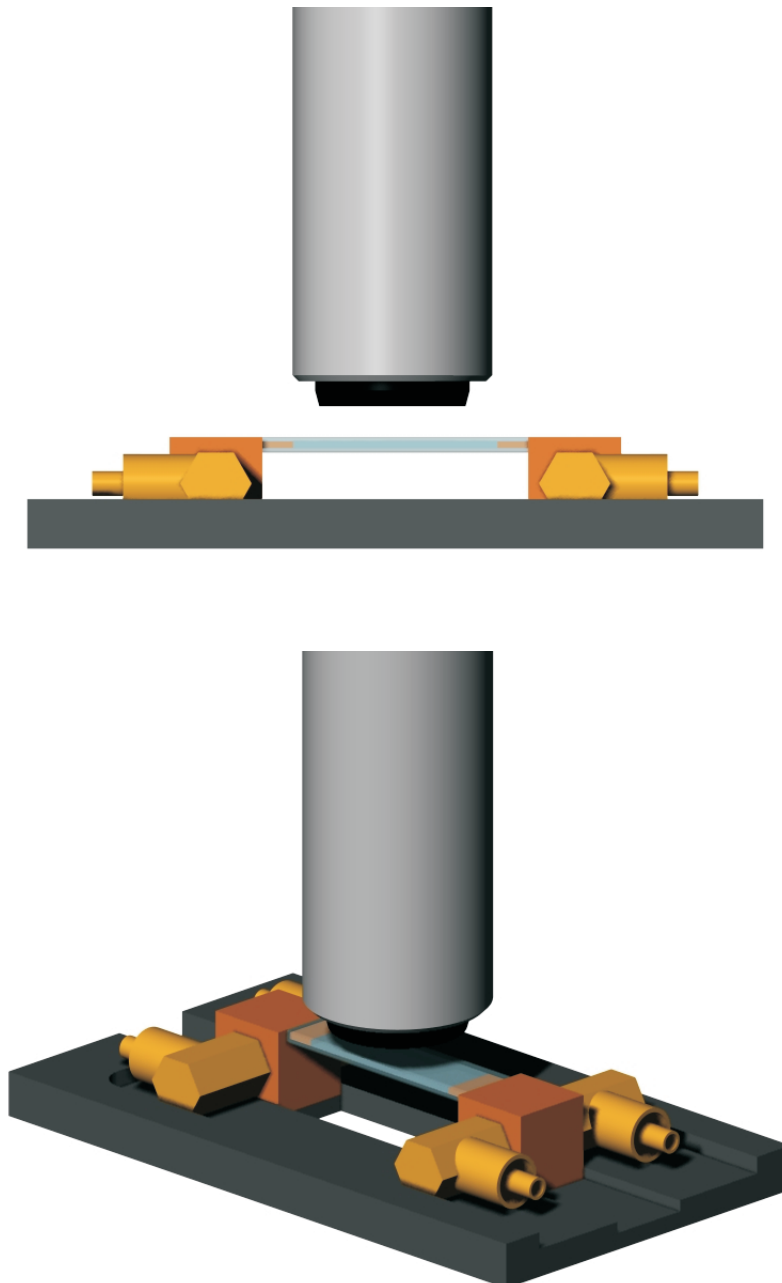


Figura 3.7: Vista frontal e em perspectiva da seção de testes com cavidade de vidro para uso com microscópio.

Sistema de Aquisição de Imagens

O sistema de aquisição de imagens era composto por um microcomputador, um microscópio ótico e uma câmera digital disponíveis no Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia da PUC-Rio. Foi utilizado um microscópio da marca Zeiss Axioplan 2 Imaging com uma câmera Axio-cam HR acoplada. Dois programas foram utilizados para captura das imagens, o Axio Vision 3.1 e o KS400 versão 3.0 Carl Zeiss Vision. Através destes programas, a mesa motorizada do microscópio foi programada para acompanhar a frente de solidificação da parafina, possibilitando assim seu acompanhamento por períodos mais longos. Caso a mesa do microscópio permanecesse parada, a visualização da frente de parafinação se daria por apenas um pequeno intervalo de tempo, pois rapidamente estaria fora do pequeno campo de visão típico das lentes de microscópio.

Controle e Medição de Temperatura

No sistema, calor é transferido ao fluido através de água escoando pelos blocos de cobre. A temperatura da água era controlada por banhos termostáticos da marca Haake modelo Phoenix C25P. Além disto termopares do tipo E com 0,12 mm de diâmetro foram instalados no interior das aletas de cobre a cerca de 0,5 mm da superfície que toca a parafina no interior da cavidade. Os termopares eram ligados a um ponto de gelo fundente e as tensões geradas medidas por um voltímetro com incerteza de $\pm 1\mu\text{m}$. A temperatura do ambiente externo à cavidade era monitorada com um termômetro de mercúrio em vidro.

Início dos Testes

Com uma das extremidades fechada pela aleta de cobre, a cavidade era posicionada verticalmente e preenchida totalmente com a mistura óleo/parafina que viria a ser ensaiada. O segundo conjunto aleta/bloco de cobre, idêntico ao primeiro era introduzido na segunda extremidade da cavidade de vidro, aprisionando o líquido dentro da cavidade. Devido às pequenas dimensões do conjunto, não foi possível utilizar-se anéis de vedação. A vedação do líquido no interior da cavidade de vidro era obtida pela aplicação de pequenas quantidades de adesivo de silicone nas extremidades do vidro que tocam o bloco de cobre.

A cavidade contendo o fluido era então posicionada horizontalmente sobre a base plástica mostrada na Figura 3.7. Esta base era posicionada

sobre a mesa do microscópio e cuidadosamente nivelada. Um dos banhos termostáticos conectados aos dois blocos de cobre era acionado mantendo a temperatura dos blocos acima da TIAC para a solução testada. Quando uma condição de regime permanente era observada, uma manobra de válvulas era realizada de modo a direcionar água do segundo banho para um dos blocos de cobre, enquanto o outro era mantido conectado ao primeiro banho com temperatura elevada. O banho termostático era programado para impor uma rampa de resfriamento em um dos blocos de cobre, iniciando assim o processo de formação do depósito de parafina.

Para iniciar-se um novo experimento, a cavidade era novamente aquecida pelos dois banhos até que todos os cristais de parafina tivessem sido dissolvidos.

3.2

Deposição sob Escoamento Laminar

3.2.1

Quarta Seção de Testes: Canal para Estudo de Deposição sob Escoamento Laminar

Montagem Experimental

Uma etapa importante da tese é o estudo da deposição de parafina sob condições de escoamento. Seguindo-se a filosofia de trabalho adotada de aumentar gradativamente a complexidade do problema investigado, o estudo da deposição de parafina sob condições de escoamento foi iniciado pelo caso mais simples de escoamento laminar em canal retangular. A seção de teste projetada e construída para os testes de deposição sob regime de escoamento laminar é apresentada de forma esquemática na Figura 3.8.

O coração da seção de testes é formado por um canal de placas paralelas com dimensões internas de 3 x 10 x 300 mm (largura x altura x comprimento). As paredes laterais do canal são de vidro para permitir uma boa visualização do processo de deposição. Duas peças de cobre idênticas são usadas como espaçadores das placas de vidro, e fornecendo as duas paredes restantes que fecham o canal. As peças foram usinadas a partir de blocos de cobre de maneira que os espaçadores funcionassem também como aletas cuja temperatura pudesse ser controlada em cada experimento. Para isso, cada aleta era integrada a um bloco contendo um furo axial por onde circulava

água proveniente de um banho termostático. A Figura 3.9 apresenta vistas de conjunto e explodida do canal construído.

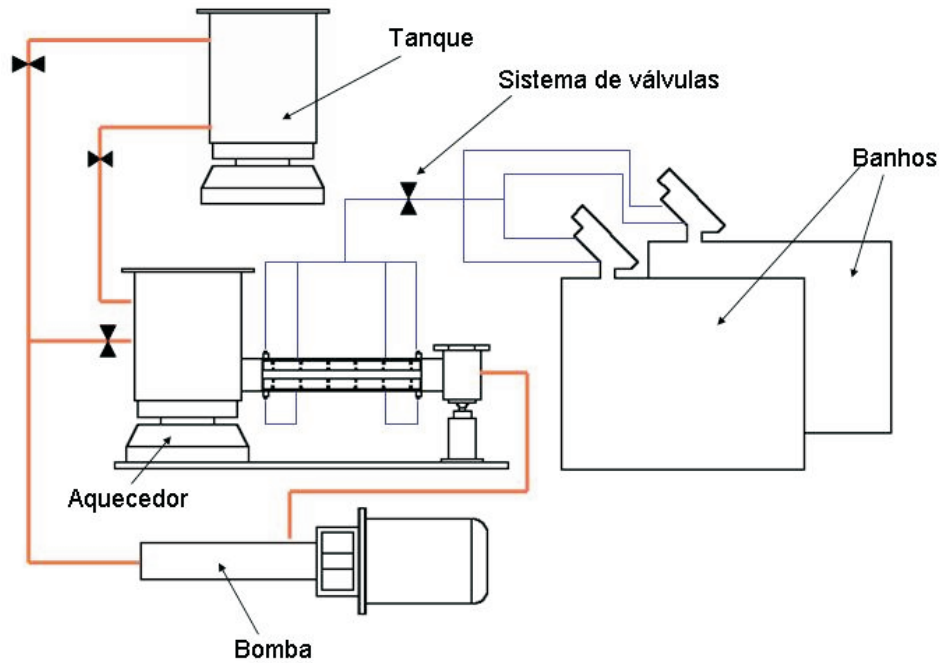


Figura 3.8: Vista esquemática da seção de testes para ensaios de deposição de parafina sob escoamento laminar.

Um banho termostático Haake modelo Phoenix C25P com capacidade de gerar rampa de aquecimento e resfriamento foi conectado a cada bloco de cobre. Como pode ser observado na Figura 3.8, o canal retangular descrito era ligado a dois reservatórios de óleo/parafina por meio de uma peça de acrílico.

Os detalhes construtivos dos reservatórios podem ser observados nas Figuras 3.10 a 3.16.

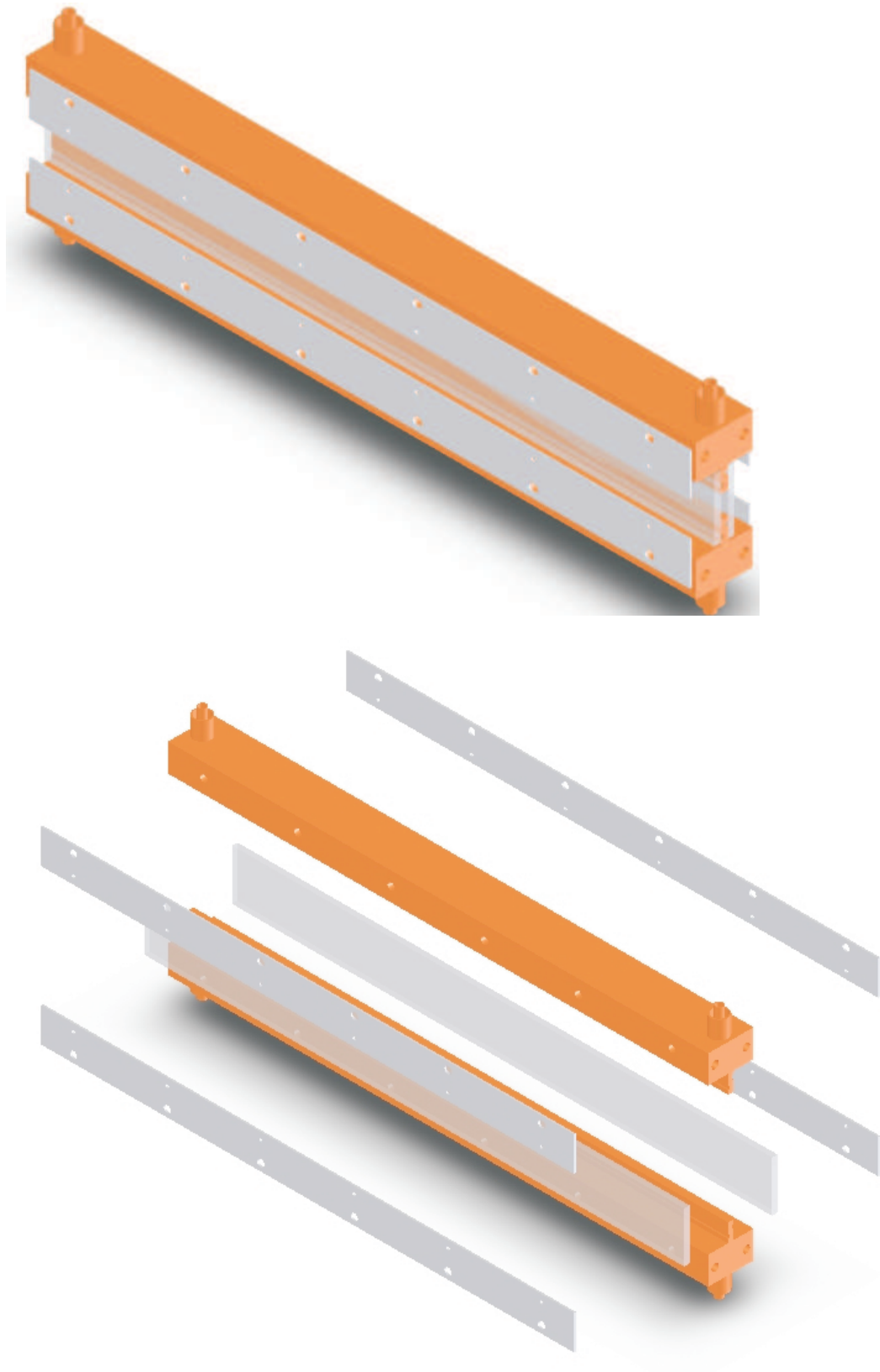


Figura 3.9: Vista de conjunto e explodida do canal para estudos de deposição de parafina com escoamento laminar.

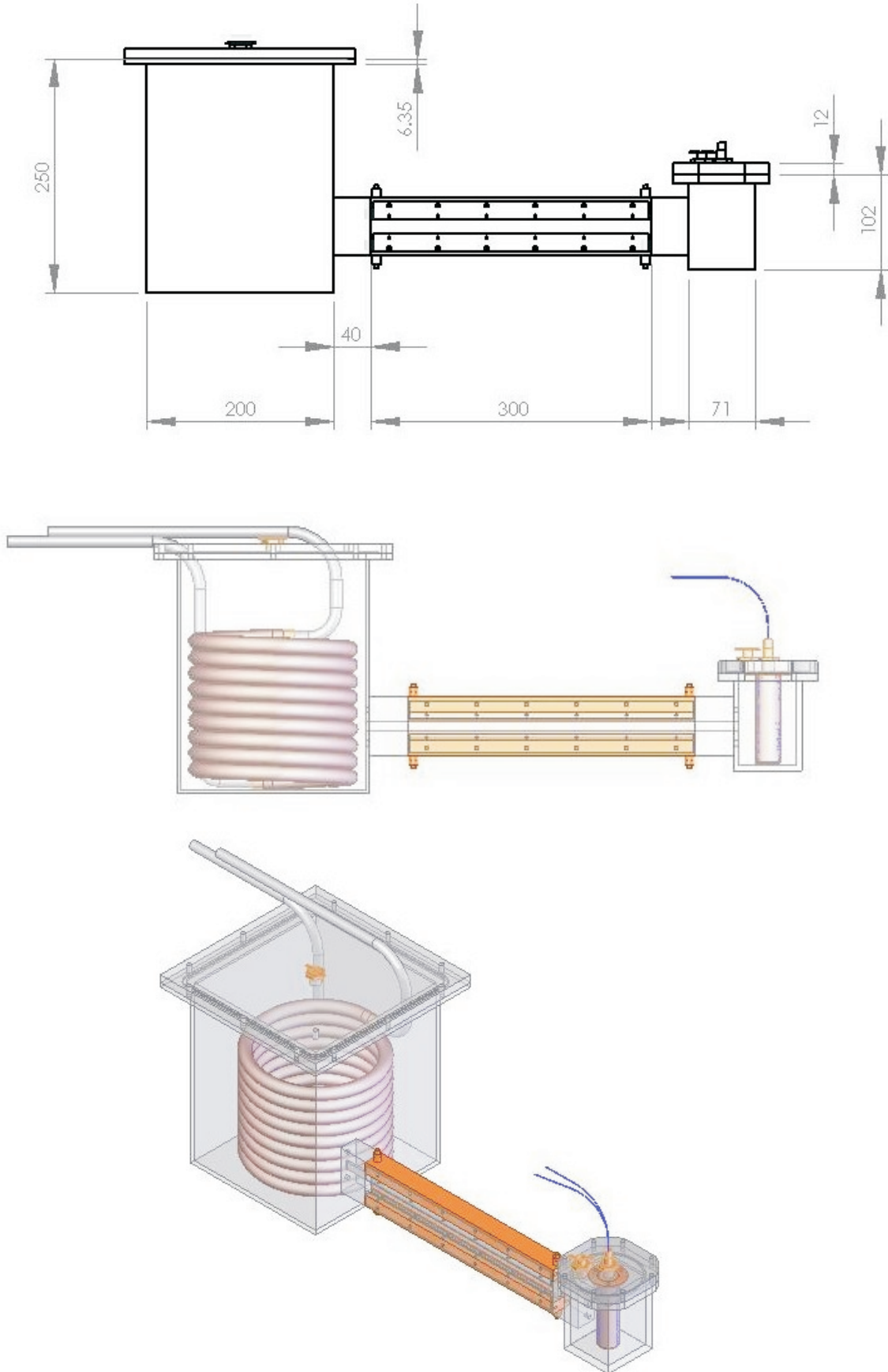


Figura 3.10: Vista do canal com os reservatórios.

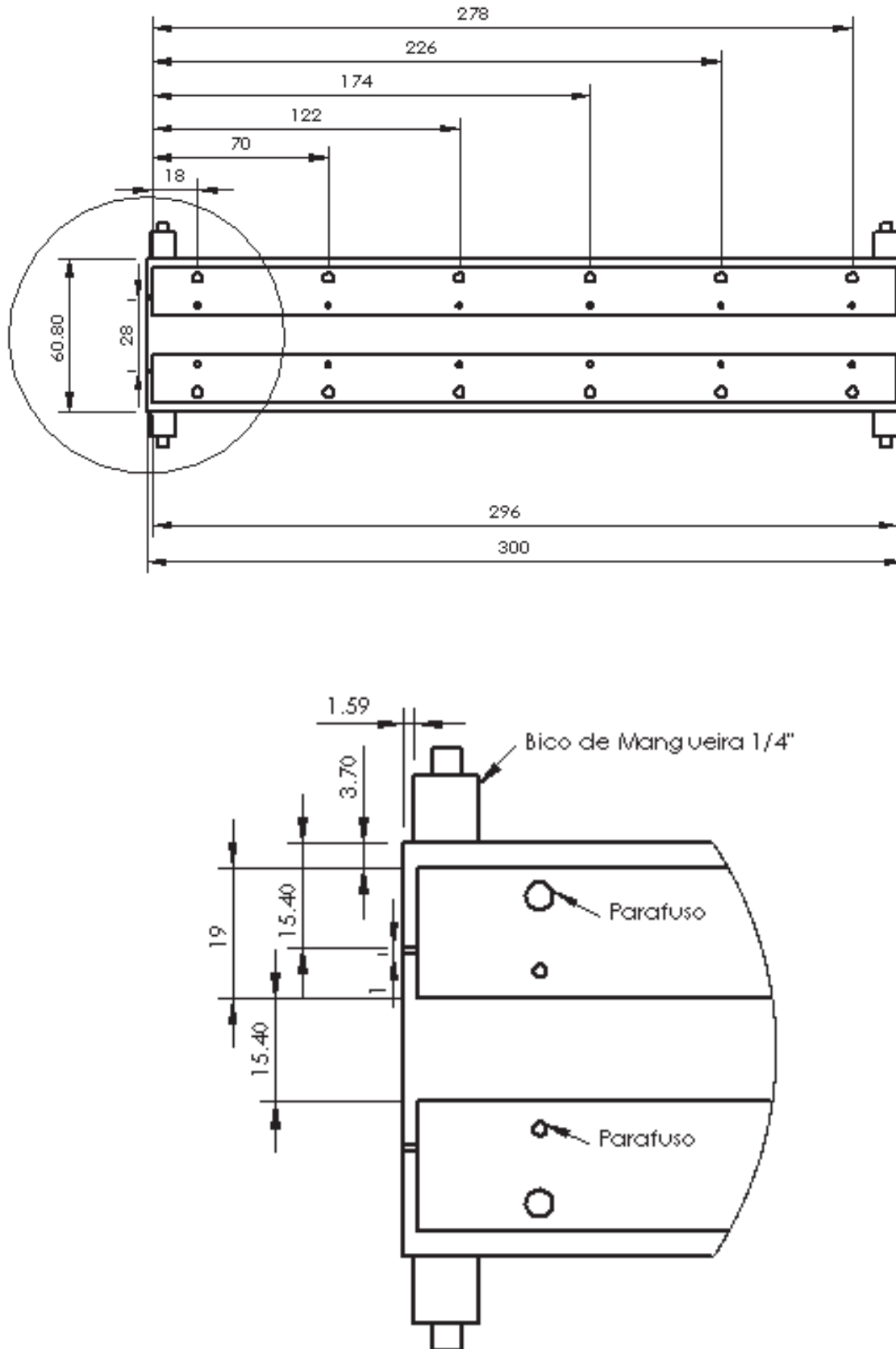


Figura 3.11: Vista de frente e detalhe do canal de visualização.

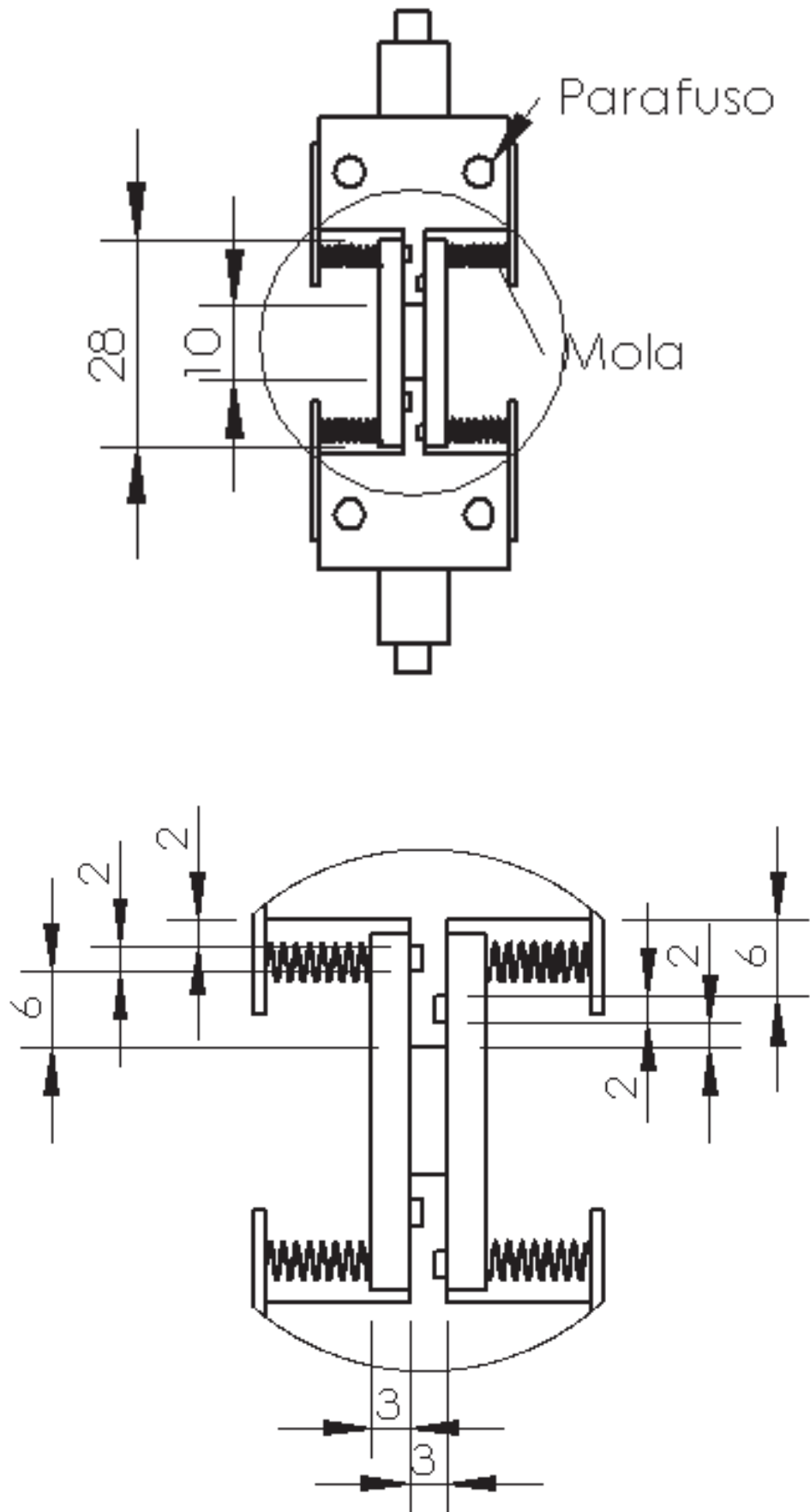


Figura 3.12: Vista lateral e detalhe da fixação dos vidros do canal de visualização.

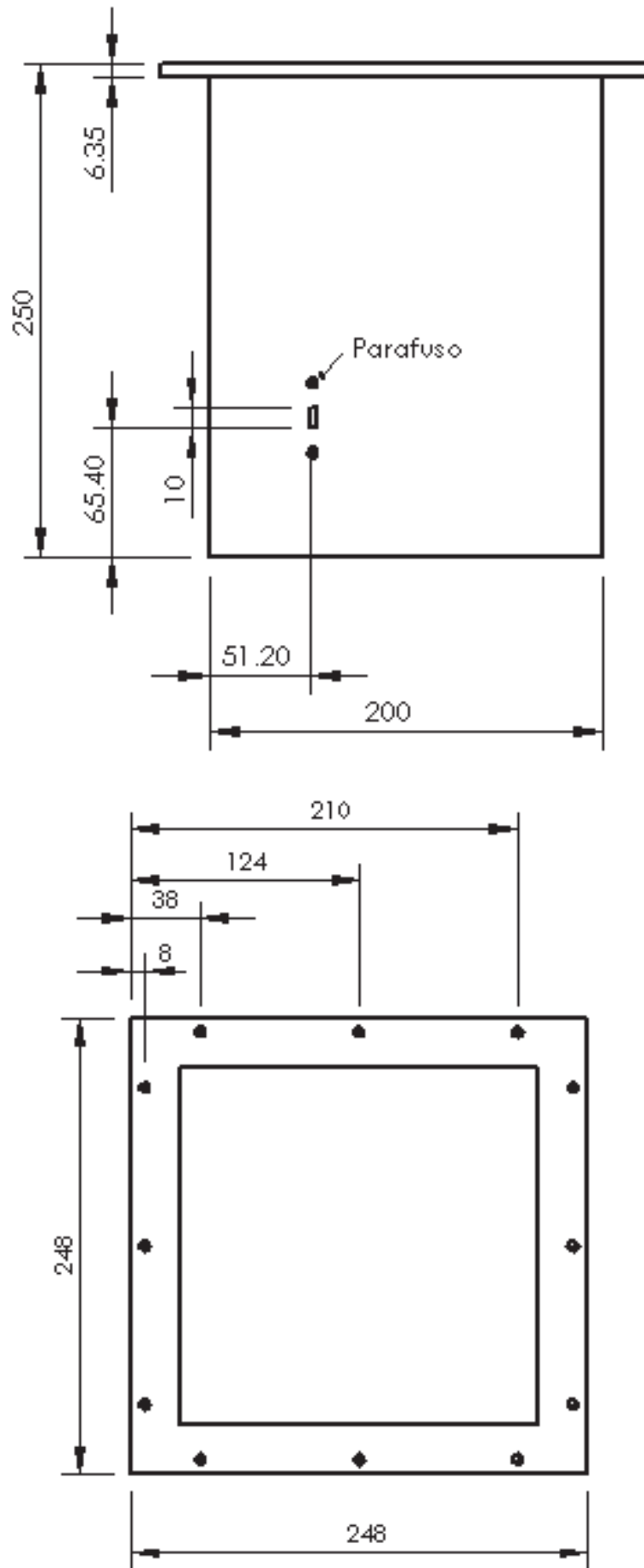


Figura 3.13: Vista lateral e de topo do reservatório de aço inox.

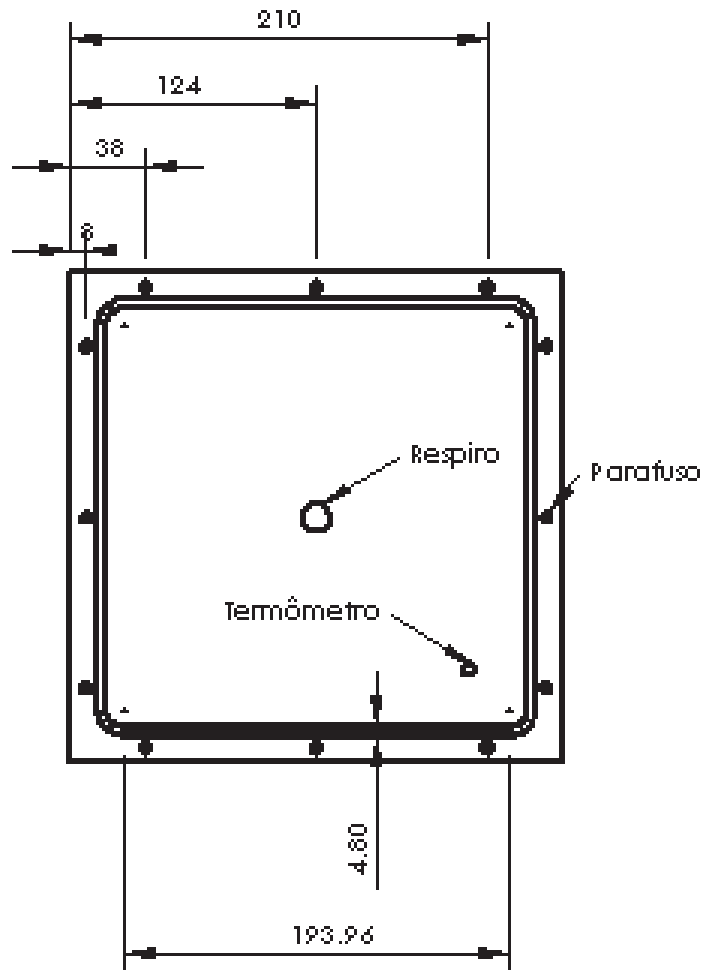


Figura 3.14: Tampa do reservatório de aço inox.

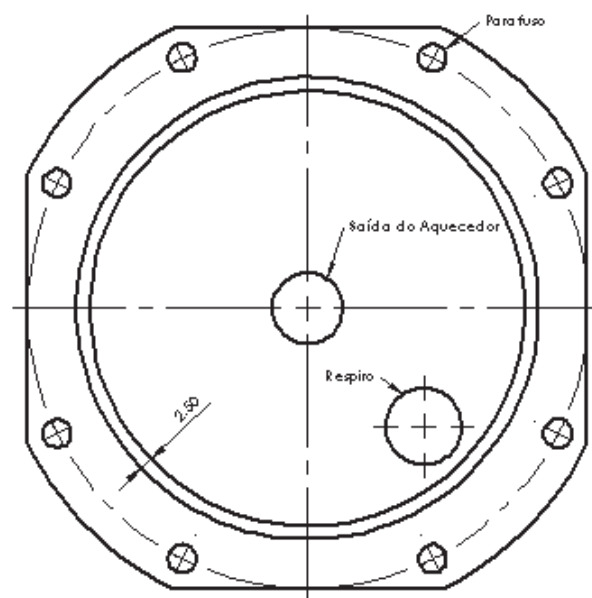


Figura 3.15: Tampa do reservatório de alumínio.

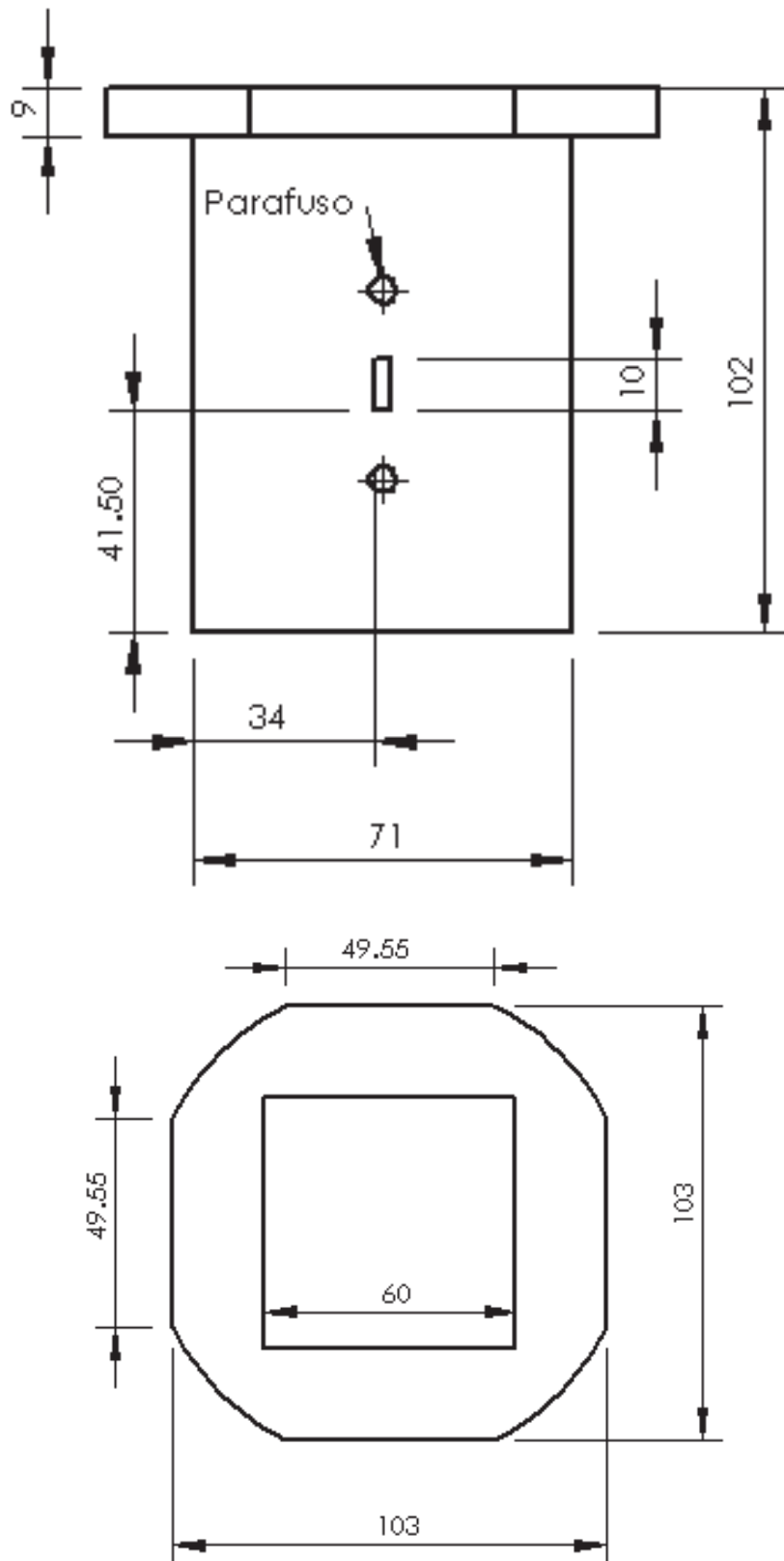


Figura 3.16: Vista lateral e de topo do reservatório de alumínio.

Como pode ser observado na Figura 3.8, o canal retangular descrito era ligado a dois reservatórios de óleo/parafina. O reservatório maior, a montante do canal, foi construído em aço inoxidável e repousava sobre uma placa agitadora com aquecimento. A placa agitadora era da marca Fisatom modelo 754-A, apresentando potência máxima de aquecimento de 1000 Watts. Para obter melhor controle da temperatura, caso necessário, e também para operar com temperaturas abaixo da temperatura do ambiente do laboratório, uma serpentina feita a partir de tubos de cobre foi introduzida no tanque de aço inox. Esta serpentina era ligada a um banho termostático para controle de temperatura. O segundo reservatório, a jusante do canal, tinha dimensões menores e foi fabricado a partir da usinagem de um bloco de alumínio. Uma bomba de cavidades progressiva modelo NM015BY01L06B da marca Netzsch succionava o fluido do segundo reservatório e o entregava na parte superior do reservatório de inox. Para que fosse possível efetuar uma variação de rotação e, conseqüentemente de vazão da bomba, utilizou-se um inversor de frequência da série CFW-08 modelo μ line da Weg. A faixa de variação da frequência controlada através do operador digital do inversor está entre 0 e 60 Hz, com uma resolução de 0,01 Hz. A curva de vazão volumétrica em função da frequência da bomba utilizada pode ser encontrada no Apêndice A.

Um segundo reservatório de aço inox foi construído e posicionado em uma altura superior ao primeiro reservatório. Este segundo reservatório foi instalado para poder permitir a condução de experimentos de deposição de parafina onde fosse exigida apenas uma passagem do fluido pelo canal. Este modo de operação garante que a concentração de parafina na entrada do canal seja mantida constante pois, em operações em circuito fechado onde o retorno do líquido era direcionado ao tanque ligado ao canal, poderia haver queda na concentração da parafina no óleo na entrada do canal. O segundo reservatório também era utilizado para armazenar a mistura óleo/parafina quando o canal de teste era esvaziado para reparo ou limpeza. Um conjunto de válvulas de esfera instaladas nas linhas de conexão entre os tanques e a bomba permitia o direcionamento do fluxo para que o sistema operasse no modo desejado. Aquecedores na forma de fitas contendo resistências elétricas foram enroladas sobre os tubos que faziam as conexões entre os tanques e a bomba para evitar que a parafina se depositasse no interior dos tubos. Também foram enroladas fitas aquecedoras sobre o rotor da bomba de cavidade progressiva. O conjunto dos tanques e o canal de testes foram montados sobre uma placa de alumínio com bases de borracha para minimizar vibrações. A bomba era montada fora da

base de alumínio também com o intuito de minimizar a transmissão de vibrações. Na placa de alumínio foi usinada uma matriz de furos roscados para facilitar a fixação de equipamentos óticos para observação do fenômeno de deposição de parafina. A Figura 3.17 apresenta uma vista superior esquemática da seção de testes montada sobre a placa. Nesta vista pode ser observada a câmera digital usada no experimentos, montada sobre trilhos. Posicionadores micrométricos permitiam a movimentação da câmera com uma resolução de 0,01 mm. Este nível de resolução é necessário para possibilitar a focalização das imagens quando lentes com grande aproximação são utilizadas.

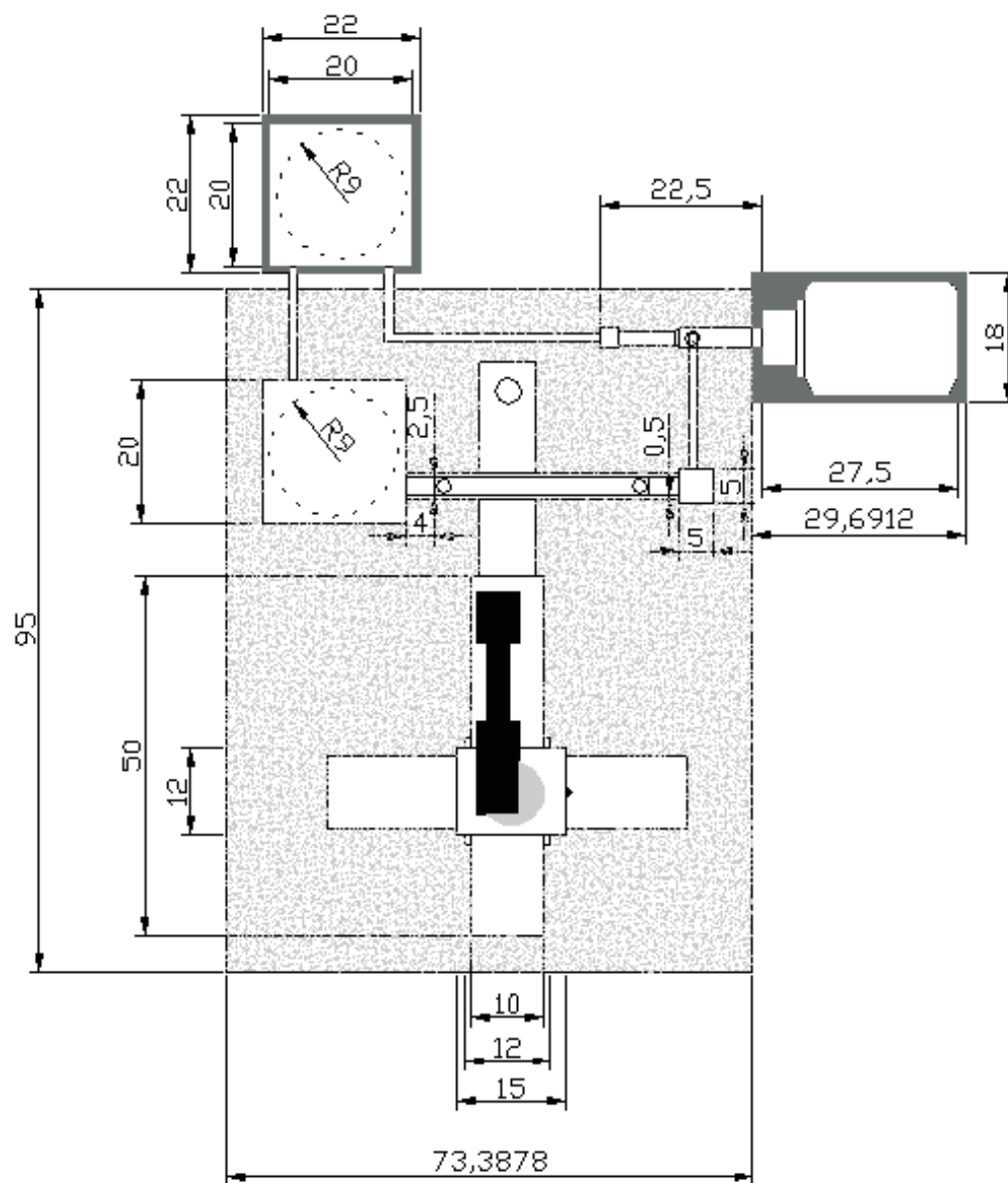


Figura 3.17: Vista superior da montagem experimental para estudo da deposição de parafina sob escoamento laminar.

A Figura 3.18 mostra uma fotografia da montagem experimental utilizada nos ensaios com escoamento laminar.

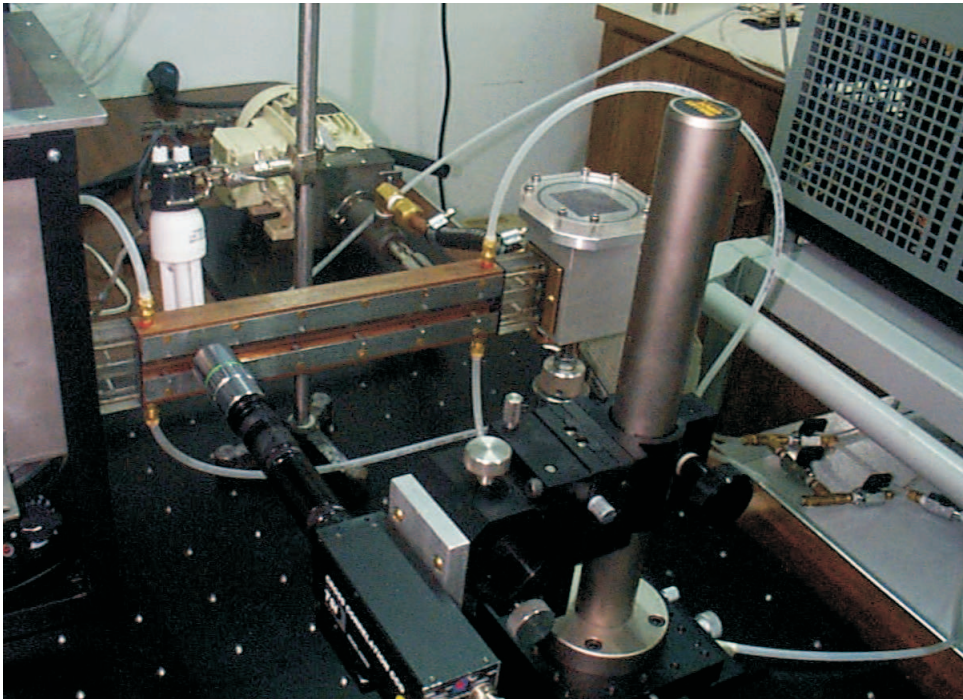


Figura 3.18: Vista da montagem experimental para estudo da deposição de parafina sob escoamento laminar.

Nos ensaios com escoamento foi utilizada uma câmera digital com resolução espacial de 640 x 480 pixels. Em ensaios onde desejava-se uma visão geral do processo de deposição, utilizou-se uma lente zoom de 18-108 mm de distância focal. Para visualizações com maiores ampliações utilizou-se um conjunto de lentes de aproximação que permitiam aumentos desde 2 vezes até 90 vezes. Aumentos maiores que 20 vezes não foram utilizados pois não foi possível obter-se imagens de boa qualidade. Acredita-se que fontes de iluminação pelo eixo ótico das lentes poderiam vir a fornecer melhores resultados. No entanto, estas fontes não estavam disponíveis para os testes.

Controle e Medição de Temperatura

Durante os testes, foram realizados experimentos com e sem deposição de parafina onde foram determinadas as distribuições de temperatura do fluido no interior do canal retangular. Para isto, uma das placas laterais de vidro do canal foi substituída por uma placa de dimensões idênticas, porém

fabricada em acrílico. Nesta placa foram usinados 15 pequenos furos para a instalação de termopares.

Os termopares foram introduzidos em agulhas hipodérmicas com 1,0 mm de diâmetro tendo uma das extremidades fechada com solda. As agulhas contendo os termopares foram introduzidas nos furos da placa de acrílico penetrando até o plano central do canal. Dos 15 termopares, nove estavam dispostos ao longo do eixo central do canal. Os outros termopares foram instalados em posições transversais do canal. Os termopares utilizados eram do tipo E com diâmetro de 0,12 mm e foram conectados a um sistema de aquisição de dados AGILENT modelo 34970A. Este sistema de aquisição de dados programável permitia a leitura de 20 leituras por segundo, o que era adequado para o levantamento do perfil de temperatura do fluido no canal durante o resfriamento das paredes de cobre.

Sistema de Aquisição de Dados

O sistema de aquisição de dados é composto por um microcomputador, um video-cassete e a mesma câmera utilizada no sistema de fluido estagnado, montada ortogonalmente ao canal. A câmera foi equipada com dois conjuntos de lentes. Em ensaios onde desejava-se uma visão geral do processo de deposição, utilizou-se uma lente zoom de 18-108 mm de distância focal. Para visualizações com maiores ampliações utilizou-se um conjunto de lentes de aproximação que permitiam aumentos desde 2 vezes até 90 vezes. Aumentos maiores que 20 vezes não foram utilizados pois não foi possível obter-se imagens de boa qualidade. Acredita-se que fontes de iluminação pelo eixo ótico das lentes poderiam vir a fornecer melhores resultados. No entanto, estas fontes não estavam disponíveis para os testes. Os experimentos foram filmados em modo VHS e depois foram convertidos para AVI por meio de uma placa Pinnacle Systems e com isto, foram geradas sequências de imagens.

Solução de Óleo com Parafina

A amostra utilizada nos testes foi uma solução 10% de parafina. Para isto utilizou-se parafina comercial da marca Vetec com ponto de fusão na faixa de 56 – 58°C. O solvente utilizado foi o óleo spindle proveniente da destilação a vácuo do petróleo. Este solvente foi fornecido pelo Centro de Pesquisa Leopoldo Miguez - CENPES. Para o preparo da solução, pesou-se 1Kg de parafina e aqueceu-a em uma placa aquecedora até sua total fusão.

Depois de fundida, a parafina foi misturada a 9Kg de óleo Spindle dentro do tanque de aço inox descrito anteriormente.

Início dos Testes

Um teste típico de deposição de parafina era iniciado fazendo-se circular água aquecida dos banhos termostáticos pelas paredes de cobre. O óleo com a parafina dissolvida era colocado dentro do tanque de aço inox e aquecido e agitado pela placa aquecedora. Depois de homogeneizada, a solução era deixada escoar pelo canal retangular até preencher o tanque de alumínio a jusante. A bomba era então acionada e a vazão a ser testada ajustada no inversor de frequências. Após a condição de regime permanente ter sido atingida, a água fria proveniente dos banhos termostáticos era escoada para dentro das paredes de cobre iniciando o processo de deposição que era registrado pela câmera digital.

Para a realização de novo teste, água quente era circulada pelas paredes de cobre até que toda parafina fosse derretida.