

3

Experimentos

Com base nas informações obtidas do levantamento da literatura conduzido, verifica-se que o efeito das superfícies revestidas na formação de depósito de parafina está longe de ser um assunto consolidado, existindo até mesmo resultados contraditórios nos trabalhos publicados. Este quadro motivou o presente trabalho que se propôs a contribuir para o tema com um estudo experimental sobre a deposição de parafina em superfícies revestidas, sob condições controladas.

Este capítulo é dedicado à descrição dos experimentos conduzidos

3.1.

Premissas de Projeto

No projeto da seção de testes optou-se pela construção de um canal de placas paralelas ligado a um loop em circuito fechado por onde circulava a solução de parafina. Esta opção foi escolhida para atender a algumas premissas básicas estabelecidas para o experimento. Em primeiro lugar, desejava-se que as condições de escoamento nos testes fossem bem controladas, reproduzíveis e mais próximas às condições de escoamento no campo. Controle das taxas de cisalhamento e do campo de velocidade do fluido sobre o depósito também eram condições desejadas. Outra característica importante desejável para a seção de teste era a disponibilidade de acesso óptico ao interior da seção, de modo que a formação do depósito ao longo do tempo pudesse ser registrada em vídeo para posterior processamento. Também foi estabelecido para o projeto a possibilidade de registro do fluxo de calor retirado da seção de teste durante o processo de deposição. Acredita-se que os resultados obtidos de deposição de parafina sobre diferentes revestimentos e sob mesmo fluxo de calor sejam uma contribuição original do presente trabalho.

A opção de realização de testes utilizando uma configuração do tipo *cold finger* foi descartada por não atender as premissas básicas descritas anteriormente.

3.2. Descrição geral do experimento

A Figura 3-1 apresenta uma vista simplificada do experimentado montado no laboratório de Engenharia de Fluidos do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC - Rio.

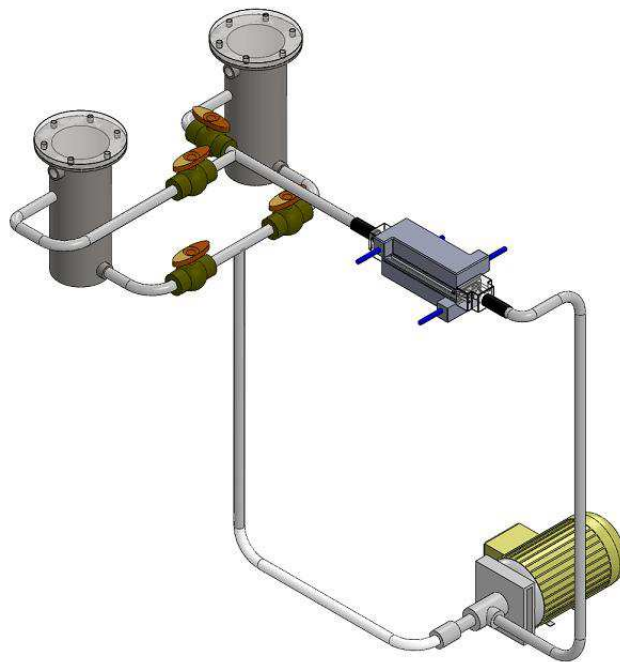


Figura 3-1 - Vista simplificado do experimento montado para o estudo da deposição de parafina

O sistema experimental é composto de dois tanques de 4 litros de capacidade interligados a uma bomba de cavidades progressivas (BCP) modelo NEMO NM021BY001L06B. A bomba, utilizada para circular o fluido através da seção de teste e retornando o mesmo para o tanque de origem, foi dimensionada de forma que pudessem ser utilizadas as vazões necessárias para investigar tanto o regime laminar quanto o regime turbulento no interior da célula. A planilha com os cálculos do número de Reynolds bem como a curva da bomba é encontrada no apêndice A. O sistema foi projetado com dois tanques para permitir a operação com dois fluidos diferentes. Como será descrito adiante, foi necessário conduzir

experimentos de calibração com um fluido que não produzisse deposição de parafina. Um sistema de válvulas operado manualmente permitia a utilização de um ou outro tanque por vez. A vista completa do sistema é apresentada na Figura 3-2.

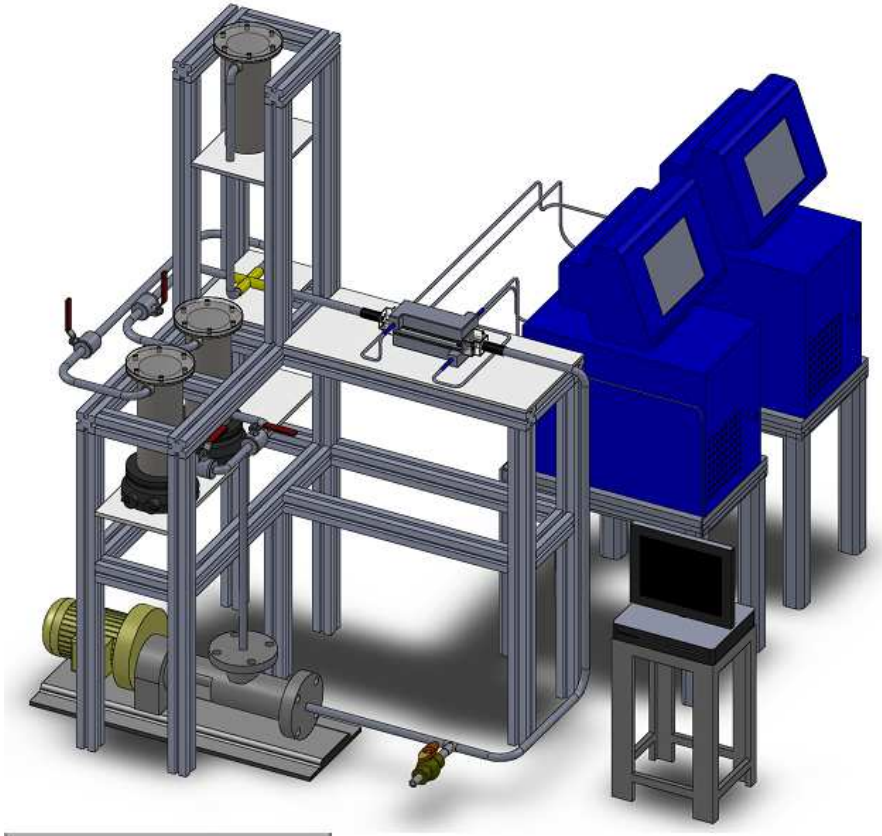


Figura 3-2 - Visão geral do loop experimental montado para o estudo da deposição de parafina.

O sistema ainda dispunha de um tanque de descarte que era utilizado como via de alívio quando da limpeza do canal e em caso de falha nas válvulas que comunicam a saída da seção com a entrada dos tanques. Não há válvula de bloqueio entre a saída da seção e o tanque de descarte, assim em caso de sobrepressão da bomba, o fluido é desviado automaticamente para este tanque. Há apenas uma válvula de retenção que impede que qualquer fluido presente no tanque de descarte retorne para o sistema.

3.3. Seção de teste de deposição

A principal parte do sistema experimental era a seção de testes onde ocorria a deposição de parafina. A Figura 3-3 e Figura 3-4 apresentam vistas desta seção.

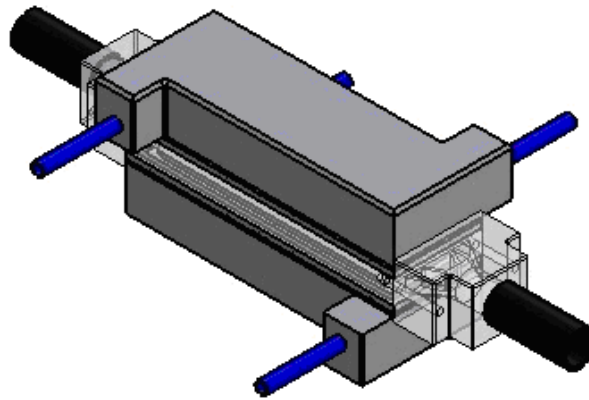


Figura 3-3 - Vista isométrica da seção de teste



Figura 3-4 - Vista lateral da seção de teste

A seção tinha a forma de um canal de seção reta retangular de 10 x 40 mm (altura x largura) e com 150 mm de comprimento na direção do escoamento. O canal tinha duas paredes principais de aço inoxidável, onde acontecia a deposição de parafina, e duas paredes de acrílico que ofereciam acesso óptico ao interior do canal. Como será detalhado a seguir, as paredes principais de aço inox eram formadas por um conjunto de peças de modo a permitir a monitoração de temperatura e fluxo de calor, além de permitir que estas fossem aquecidas ou

resfriadas dependendo da fase do experimento. A Figura 3-5 apresenta uma vista explodida da seção de teste que facilita o entendimento do projeto.

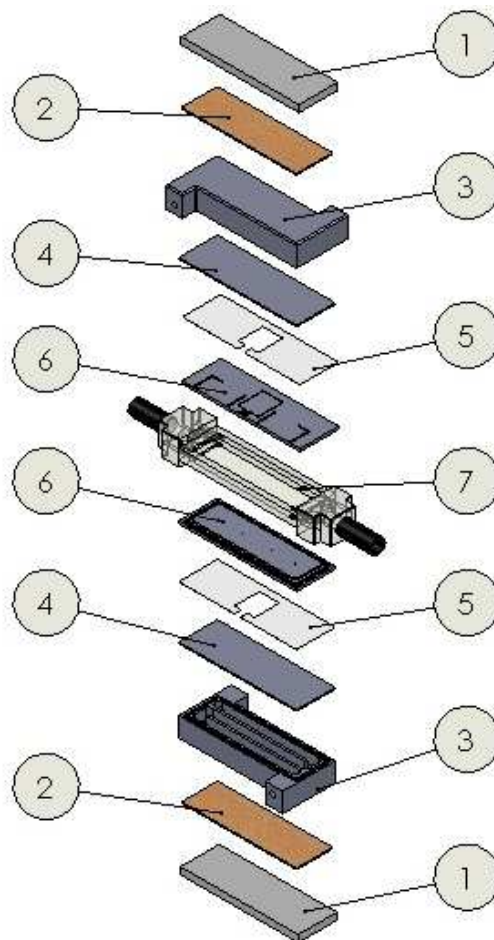


Figura 3-5 - Vista Explodida da seção de teste: 1- Placa isolante de polipropileno (10 mm); 2- Placa de cortiça (4 mm); 3- Trocador de calor em Polipropileno; 4- Placa lisa de aço inox; 5- Filme de PVC com recorte para encaixe do sensor de fluxo; 6- Placa de aço inox 316 L, com recortes para fixação dos termopares e sensor de fluxo; 7- Seção usinada em acrílico.

A seção de acrílico (item 7) foi usinada para receber as placas de aço inox mantendo o espaçamento do canal. O fluxo de solução de parafina pelo canal era realizado através de mangueiras conectadas às cabeças com rosca tipo NPT localizadas na entrada e na saída da seção de acrílico. A transição da seção reta circular da mangueira para a seção retangular do canal foi projetada de maneira cuidadosa, como será apresentado neste capítulo.

Sobre cada lado da seção de acrílico era encaixada uma placa de aço inox instrumentada (item 6).

Sobre as faces externas de cada placa de aço inox foram montados um filme de PVC (item 5), uma placa lisa de aço inox (item 4) e um trocador de calor

de polipropileno (item 3). Duas camadas de isolamento térmico, uma de cortiça (item 2) e outra de polipropileno (item 1) foram sobrepostas ao trocador de calor. O conjunto montado era mantido em posição por um sistema de tirantes rosqueados (dois em cada extremidade) e porcas presos à mesa de trabalho de alumínio com uma placa de alumínio sobreposta ao sistema. A tensão nestes tirantes era ajustada através de torque nas porcas, comprimindo os anéis de vedação de forma a evitar vazamentos na seção. Para estabelecer o mesmo torque em todos os tirantes, cilindros de polipropileno de comprimento constante foram posicionados externamente ao tirantes, limitando o torque até que o conjunto tocasse a altura dos cilindros. Uma imagem da seção montada pode ser observada na Figura 3-6.

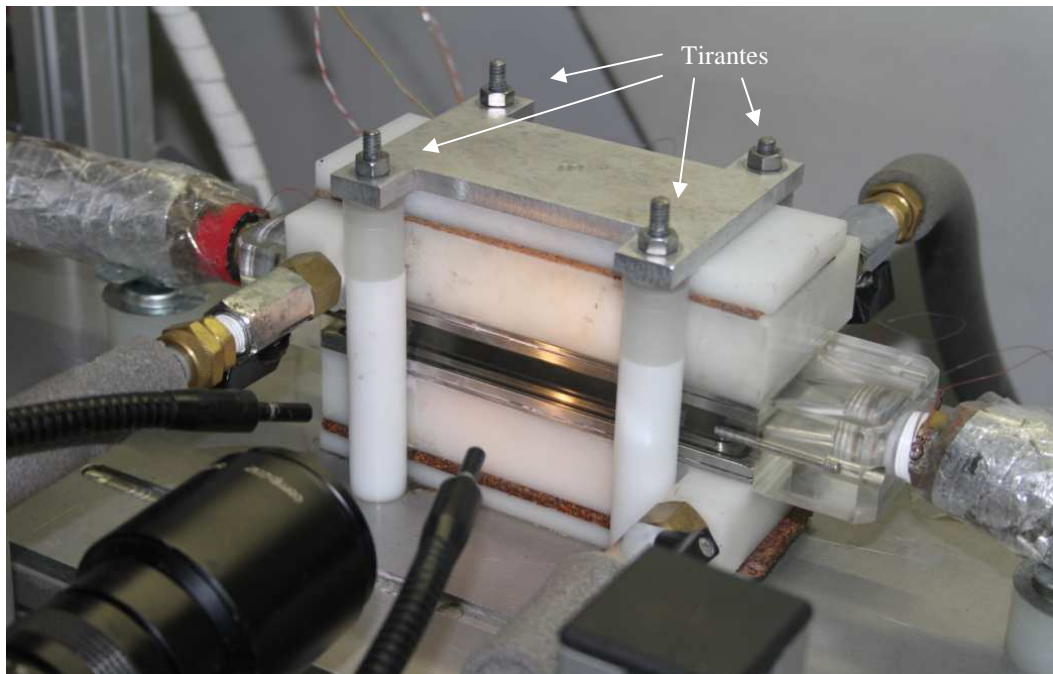


Figura 3-6 - Imagem da seção de teste montada no laboratório.

A seguir são apresentados alguns detalhes sobre os principais componentes da seção de teste.

3.3.1. Placas de aço inoxidável

As placas de aço inox formavam as principais superfícies do canal de teste, onde efetivamente ocorria a deposição de parafina. Na face das placas voltadas para o interior do canal foram usinadas canaletas para receber anéis de vedação,

como mostrado na Figura 3-7. Os diferentes revestimentos testados foram realizados sobre esta superfície. Conforme já mencionado anteriormente, um sanduíche de duas placas foi utilizado para atender às premissas do projeto do experimento. A Figura 3-8 apresenta a face inferior da placa que foi usinada com um detalhe em baixo relevo para fixação do sensor de fluxo e com quatro poços para fixação dos termopares (apenas os dois poços ao centro foram utilizados).

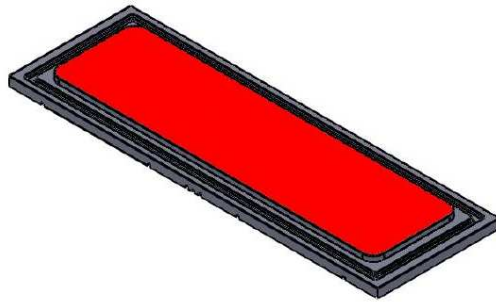


Figura 3-7 - Face superior da placa de aço inox 316L usinada com a região a ser revestida em vermelho.

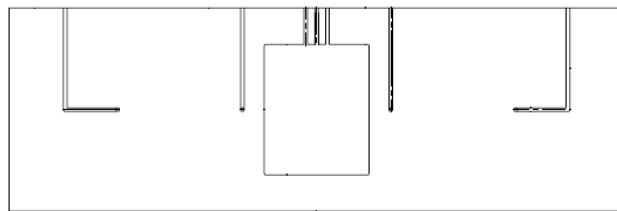


Figura 3-8 - Face inferior da placa de aço inox 316L.

A face principal foi usinada em forma de uma almofada que se encaixava no interior da seção de acrílico. A canaleta para alojar o anel de vedação, já mencionada anteriormente, foi usinada ao redor desta almofada. Na parte traseira da placa foi usinada por eletroerosão uma cavidade quadrada com dimensões de 35 x 28,5 mm e 1 mm de profundidade, como mostra a Figura 3-8. Esta cavidade foi usada para alojar o sensor de fluxo de calor utilizado nas medidas. Também foram usinadas três canaletas com 1 mm de espessura e de profundidade para permitir a passagem dos cabos elétricos do sensor de fluxo de calor.

Quatros furos com 1 mm de diâmetro foram realizados na parte traseira da placa para receber os termopares que monitoravam a temperatura na interface da placa com o fluido de teste no interior do canal. Termopares tipo E (*chromel – constantan*) de 0,075 mm de diâmetro revestidos de teflon foram instalados nestes furos utilizando adesivo epóxi condutor de calor (Omegatherm 100). A

profundidade de usinagem destes furos foi realizada de forma que a junção dos termopares ficasse a 0,5 mm da superfície principal da placa de aço inox. Canaletas com 1 mm de espessura e profundidade foram usinadas na parte posterior da placa para conduzir os fios dos termopares para fora da seção de teste.

O sensor de fluxo de calor era instalado na cavidade usinada utilizando uma camada de pasta térmica à base de silicone enriquecida com pó de cobre eletrolítico de forma a garantir bom contato térmico e maximizar a condutividade térmica.

Com o intuito de uniformizar espacialmente o fluxo de calor através da placa, uma junta de 0,3 mm de espessura de PVC (policloreto de vinila) foi recortada e instalada na parte posterior da placa como indicado no item 5 da Figura 3-5. Este procedimento de uniformização espacial do fluxo de calor mostrou-se de fundamental importância para as medições de fluxo de calor e será alvo de descrição detalhada mais adiante.

Uma segunda placa de aço inox lisa (item 4) foi colocada sobre a junta de PVC aprisionando o sensor de fluxo de calor. Sobre esta placa foi instalado um trocador de calor de polipropileno.

3.3.2. Projeto da seção de teste

A seção em acrílico é mostrada em detalhes na Figura 3-9. O projeto da seção de teste foi baseado no experimento de Tinsley⁴⁴. O experimento de Tinsley obtinha a medida do depósito através da medida de queda de pressão enquanto o presente experimento utilizou como forma de medida da espessura de depósito a visualização através de câmera. A seção retangular possui uma área de deposição de 60 cm². A usinagem da peça em acrílico permitia ao mesmo tempo a visualização do depósito e garantia o isolamento do sistema minimizando a troca de calor com o ambiente.

Para propiciar um escoamento contínuo, o diâmetro da tubulação de entrada e de saída foi projetado de forma que as velocidades na tubulação fossem próximas à velocidade no interior da seção de acrílico, considerando as mangueiras flexíveis disponíveis comercialmente. Para se utilizar uma mangueira compatível com os fluidos utilizados (querosene, óleo e parafina), e com a classe

de pressão adequada, foi selecionada a mangueira comercial ORTAC 250 da *Goodyear* com diâmetro nominal de $\frac{3}{4}$ ".

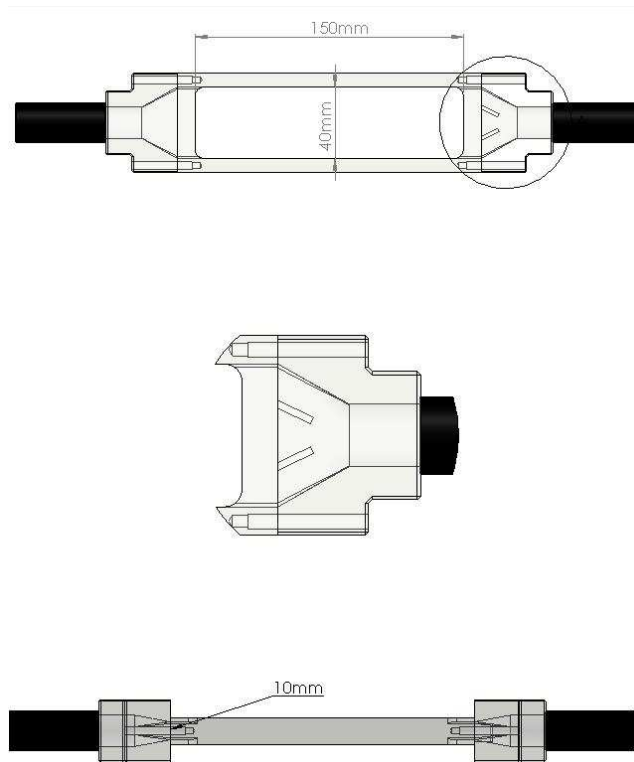


Figura 3-9 - Visão detalhada da seção de teste

Para impedir a formação de vórtices na entrada da seção de testes devido à ampliação da área de escoamento, optou-se por inserir duas placas difusoras de acrílico na entrada do canal de forma a diminuir o ângulo de entrada, conforme mostrado na Figura 3-10.

Para confirmar a mudança no padrão de escoamento com a eliminação das zonas de separação na entrada da seção de testes, foram conduzidos ensaios de visualização de escoamento. Para isto foi utilizado um feixe plano de luz laser e partículas traçadoras distribuídas na água que foi utilizada como fluido de trabalho. A montagem preparada para os testes de visualização é apresentada na Figura 3-11 e na Figura 3-12. Resultados representativos destes testes são apresentados na Figura 3-13. A observação do escoamento foi realizada em vazões que garantiram número de Reynolds de 700 (escoamento laminar) e 3500 (escoamento turbulento) e mostrou que a utilização das placas difusoras eliminou a formação de vórtices no escoamento, tanto em regime laminar quanto no turbulento.

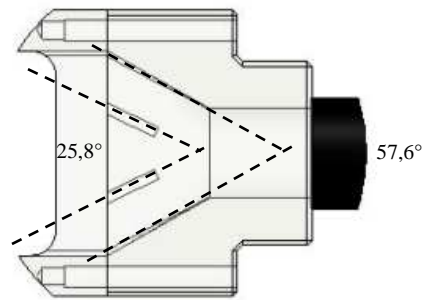


Figura 3-10 - Visão detalhada dos difusores de fluxo inseridos na entrada da seção de teste

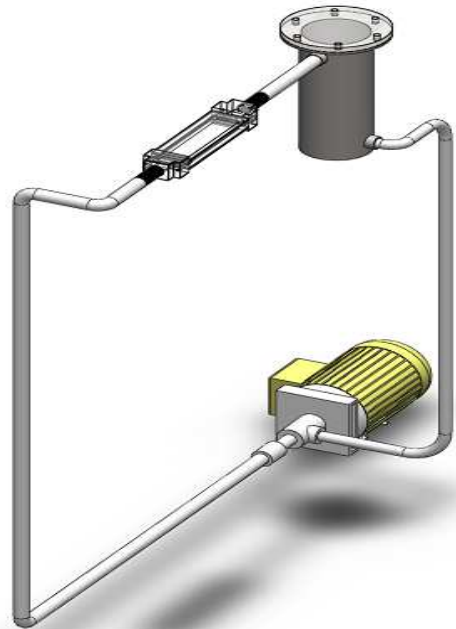


Figura 3-11 - Vista da montagem do circuito hidráulico para os experimentos de visualização do escoamento.

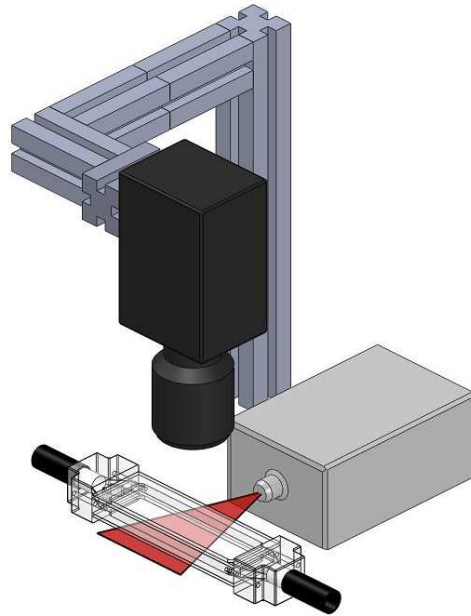


Figura 3-12 - Detalhe do experimento de visualização do escoamento na seção de teste mostrando o posicionamento da câmera digital relativa ao plano de luz laser.

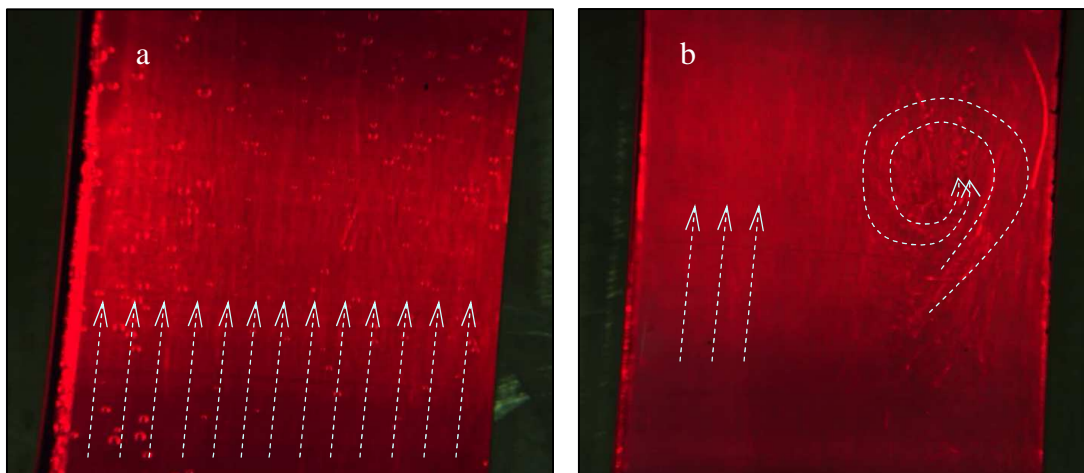


Figura 3-13 - Testes de visualização do escoamento com partículas traçadoras e plano de luz laser: a) escoamento no canal quando posicionadas as placas defletoras na entrada; b) escoamento no canal sem as placas defletoras; observa-se a ocorrência de recirculação do escoamento.

3.3.3. Trocadores de calor

A troca de calor com o fluido de teste no interior do canal era feita através da circulação de fluido frio proveniente de banho termostático através de trocadores de calor conforme indicado no item 3 da Figura 3-5. Os trocadores de calor, um para cada placa de aço inox, foram usinados a partir de blocos sólidos de polipropileno na forma de canaletas sinuosas. Isto foi feito com intuito de

aumentar a área de contato com a placa de aço inox e aumentar a velocidade do fluido de refrigeração permitindo uma troca de calor mais eficiente.

3.3.4. Banhos Termostáticos

A circulação de fluido no trocador de calor era feita por dois banhos termostáticos, um para cada trocador de calor. Os banhos modelo C25P da Haake permitiam o ajuste de rampas de temperatura tanto para aquecimento quanto para resfriamento. O fluido de trabalho utilizado foi uma mistura de 50% em volume de álcool etílico e água. As mangueiras que conectavam os banhos aos trocadores de calor eram isoladas termicamente, para minimizar variações de temperatura ao longo do circuito.

3.3.5. Sistema para visualização do depósito

A medição do crescimento do depósito de parafina sobre as paredes principais no interior do canal da seção de teste foram realizadas utilizando imagens digitais. Para isso o arranjo mostrado na Figura 3-14 foi construído. Uma câmera digital modelo AxioCam HR da Zeiss com resolução de 1280 x 1024 pixels foi utilizada. A câmera foi instalada ortogonalmente à parede lateral da seção de teste. A iluminação de fundo e de frente era fornecida por fontes de LED na cor branca. Desta forma havia contraste adequado no interior da seção para permitir a distinção entre o depósito de parafina e o fluido circulante. A câmera estava ligada ao *software* de aquisição e processamento de imagens *Axiovision* versão 3.1 da Zeiss. A resolução espacial das imagens de espessura de depósito era da ordem de 0,1 mm.

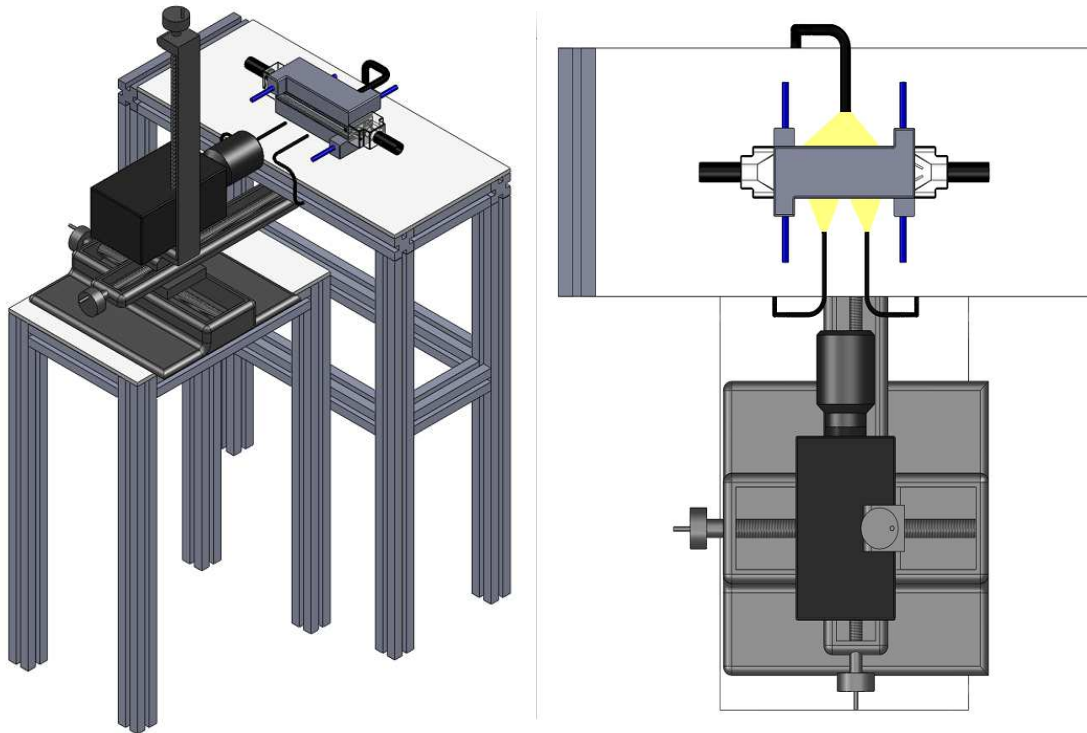


Figura 3-14 - Vista Isométrica e superior do sistema de aquisição de imagens

3.3.6. Sistema de aquisição de dados

As informações de temperatura e fluxo de calor eram obtidas automaticamente por um sistema de aquisição de dados modelo 34970A da *Agilent*. Este sistema foi configurado para realizar 10 aquisições por segundo e era capaz de realizar medidas de tensão com incertezas de $\pm 1 \mu\text{V}$. As aquisições correspondiam às seguintes medições: fluxo de calor em cada placa; duas medidas de tensão elétrica geradas por termopares tipo E instalados próximas à superfície de cada placa; medidas de temperatura na entrada e na saída da seção de teste realizada através de termopares tipo E instalados em poços metálicos inseridos nos terminais a montante e a jusante da seção de teste e medidas das temperaturas de cada tanque, realizadas também através de termopares tipo E instalados em poços metálicos inseridos no fundo dos tanques.

Um programa na plataforma *labview* foi desenvolvido para registrar, processar e exibir todas as variáveis de interesse. O processamento se fez necessário uma vez que as leituras de fluxo de calor realizadas pelo equipamento

eram feitas em unidades de tensão elétrica (mV). Através de uma curva de calibração inserida no programa era possível converter tensão em fluxo de calor. A determinação da curva de calibração será apresentada mais adiante. Da mesma forma, as temperaturas foram convertidas a partir de medidas de tensão usando uma curva de calibração típica para termopares tipo E. Adicionalmente, um termopar tipo E foi inserido em um banho de gelo isolado termicamente para servir de referência. Um termômetro digital também foi posicionado próximo à seção de teste para acompanhar a temperatura ambiente. Uma tela típica do programa é mostrada na Figura 3-15.

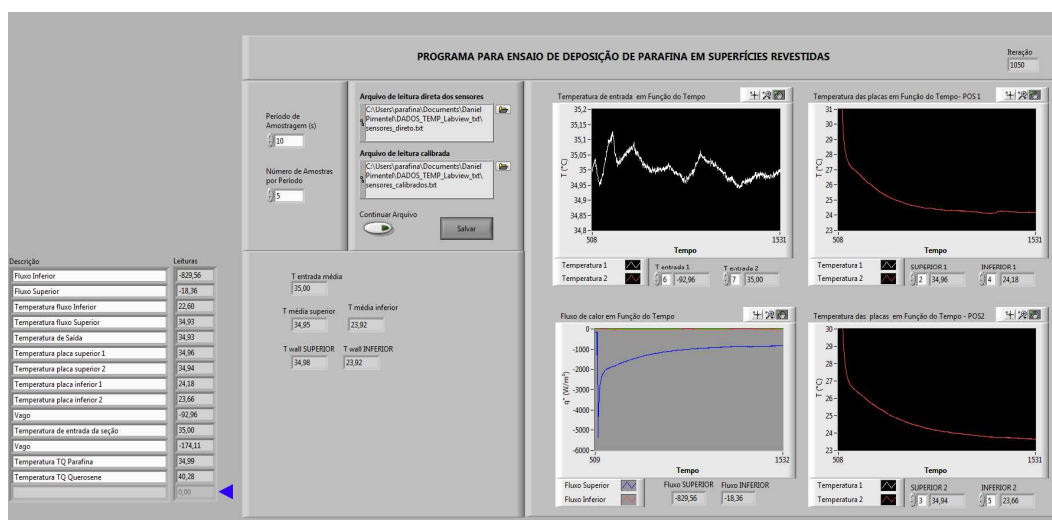


Figura 3-15 - Tela do programa *labview* desenvolvido para acompanhamento dos testes.

A temperatura interna na parede da placa de aço em contato com o fluido de trabalho foi determinada a partir da leitura do termopar instalado no furo usinado na parte posterior da placa. O procedimento de determinação da temperatura interna utilizava a medida de fluxo calor, a condutividade térmica e espessura das camadas superpostas ao furo onde se encontrava a junção do termopar. Os dados para as espessuras e condutividades térmicas dos materiais encontram-se na Tabela 3-1.

Tabela 3-1 - Espessura e condutividade dos materiais utilizados nas placas revestidas.

Material	Espessura L (m)	Condutividade Térmica k (W/m.K)	$\frac{L}{k} \left(\frac{m^2 \cdot K}{W} \right)$
Aço Inox 316 L	$0,5 \times 10^{-3*}$	$14,6^{48}$	$3,42 \times 10^{-5}$
Teflon [®]	$5,0 \times 10^{-5}$	$0,25^{49}$	$2,00 \times 10^{-4}$
Nylon 11 [®]	$1,0 \times 10^{-4}$	$0,24^{50}$	$4,17 \times 10^{-4}$
Carbono Amorfo	$2,0 \times 10^{-6}$	$1,0^{51}$	$2,00 \times 10^{-6}$

Com os dados da Tabela 3-1 a equação para condução de calor na placa metálica era utilizada:

$$\Delta T = \frac{L_{aço} \cdot q}{k_{aço}} + \frac{L_{coating} \cdot q}{k_{coating}} \quad (3-1)$$

Na equação acima, ΔT é a diferença entre a temperatura interna da parede e a temperatura na profundidade de instalação do termopar, q é o fluxo de calor; $L_{aço}$ é a distância entre a parede e o poço do termopar, $k_{aço}$ a condutividade térmica do aço inox 316L, $L_{coating}$ é a espessura do revestimento e $k_{coating}$ é a condutividade térmica do revestimento utilizado.

A temperatura interna na parede é então determinada por:

$$T_w = \bar{T} + 3,42 \times 10^{-5} \cdot q + \frac{L_{coating}}{k_{coating}} \cdot q \quad (3-2)$$

onde: T_w é a temperatura interna da parede e \bar{T} é a temperatura média dos termopares instalados na placa. Devido à ordem de grandeza dos valores de L/k , pode-se desprezar a resistência térmica oferecida pelo recobrimento de carbono amorfo.

* A espessura do aço inox 316L se refere à distância entre a superfície do aço e o final do poço para fixação do termopar.

3.3.7. Sistema de manutenção da temperatura de teste

Para manter a temperatura de entrada do sistema em valores constantes, dois dispositivos foram utilizados. Ambos os tanques dispunham de placa de aquecimento e agitação com ajuste regulável de forma a aquecer os fluidos no início do experimento, principalmente no caso da solução de parafina 20% que se torna sólida (pastosa) na temperatura ambiente e necessita ser aquecida para fluir. As mangueiras por onde o fluido circulava foram recobertas com fitas de aquecimento, lã de rocha (alguns trechos) e lã de vidro (alguns trechos), estes dois últimos atuavam como isolantes térmicos. As fitas de aquecimento estavam ligadas a uma fonte reguladora de potência de forma que tais fitas eram utilizadas para controlar a temperatura de entrada do fluido através da variação de potência do regulador. O controle era baseado na leitura do termopar instalado em um poço na entrada da seção de testes.

3.4. Sensores de fluxo de calor e experimento de calibração

Os sensores de fluxo de calor são formados por termopilhas que geram uma tensão elétrica proporcional ao fluxo de calor que atravessa o sensor. Os sensores de fluxo de calor foram posicionados em cada placa, sendo a determinação do fluxo considerada fundamental para a estratégia do experimento. Os sensores de fluxo uma vez calibrados, eram fixados à placa de teste com pasta térmica enriquecida com 40% de cobre eletrolítico em pó, de forma a aumentar a condutividade térmica da mistura.

O objetivo de medir o fluxo de calor que atravessava a superfície era submeter todas as placas revestidas ao mesmo fluxo de calor, desta forma eliminando o efeito de isolamento térmico impostos pelos revestimentos testados. Através desta medida seria possível testar todas as placas sob a mesma condição térmica e também seria possível acompanhar a deposição da parafina utilizando a redução do fluxo de calor e compará-lo com a medida visual, de forma a verificar a correlação entre estas duas técnicas de medição.

Os sensores de fluxo HFS-4 adquiridos junto a Omega possuíam um histórico, baseado em outros experimentos e testes preliminares, de defasagem significativa entre o valor medido e o valor esperado. Uma hipótese seria a dispersão do calor pelas laterais do sensor uma vez que o mesmo é feito de material isolante (poliimida), ou seja, o calor era preferencialmente conduzido ao redor do sensor diminuindo o calor conduzido através do sensor. Sendo assim decidiu-se por realizar a calibração dos mesmos.

Para realizar esta calibração, foi montado um experimento paralelo que consistia de uma folha de aço inox ultrafina, através da qual se fez passar uma corrente elétrica conhecida, funcionando como um aquecedor que produzia um fluxo de calor por unidade de área conhecido e constante espacialmente. Esta folha era isolada termicamente em um dos lados com isopor. O calor gerado pelo aquecedor montado era medido por dois sensores diferentes. O primeiro sensor utilizado foi o Hukseflux BS01, que é considerado como padrão, pois produz respostas mais coerentes com o esperado e possui certificado de calibração rastreável fornecido pelo fabricante. O segundo sensor era o sensor a ser calibrado e era fixado entre duas placas de aço inox 316 L da mesma forma que seria utilizado no experimento propriamente dito. A fixação deste sensor era realizada com pasta térmica enriquecida com 40% de cobre eletrolítico em pó de forma a aumentar sua condutividade térmica. Além disso, foram inseridos três sensores de fluxo de calor (HFS-4) na parte superior da placa, para verificar se havia variação de fluxo de calor ao longo da placa. Para realizar a medida destes sensores foi utilizado o próprio fator de calibração do fabricante, uma vez que o objetivo destes sensores era apenas comparativo. A Figura 3-16 abaixo mostra este experimento. Para estabilizar o sistema foi montada uma barreira lateral em isopor e o calor produzido foi dissipado utilizando um ventilador comum conforme mostrado na Figura 3-17. O sistema foi submetido a diferentes tensões e correntes de forma a gerar uma curva de calibração.

Para garantir medidas coerentes, foi necessário aguardar a estabilização do sistema, de forma que o calor gerado fosse igual ao calor dissipado e a temperatura do sistema fosse estável. As medidas foram realizadas em regime permanente de transferência de calor, ou seja, sem variação significativa no tempo das tensões lidas pelos sensores de fluxo. Os valores da tensão medida pelo sensor

a ser calibrado foram comparados com o fluxo de calor medido pelo sensor padrão e pelo calor gerado pela placa ultrafina.

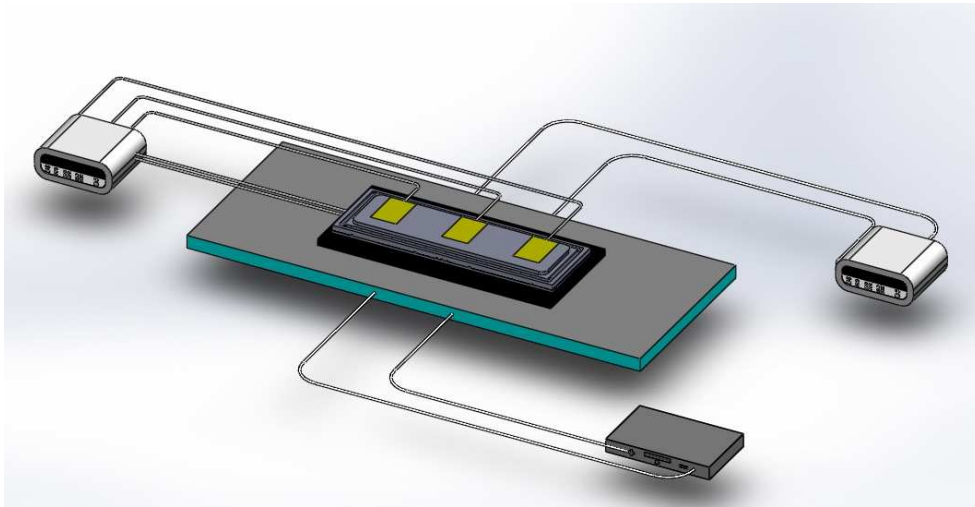


Figura 3-16 - Vista geral do experimento de calibração dos sensores de fluxo

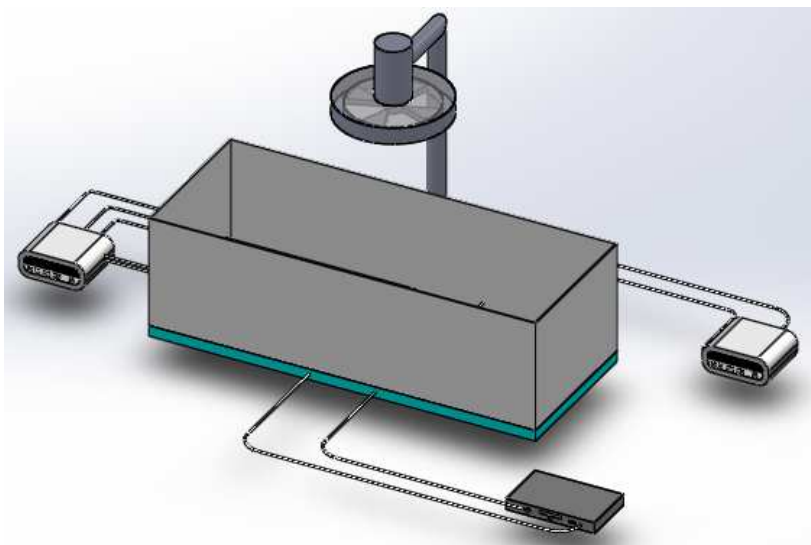


Figura 3-17 - Vista geral do experimento incluindo isolamento lateral e dissipação do calor gerado

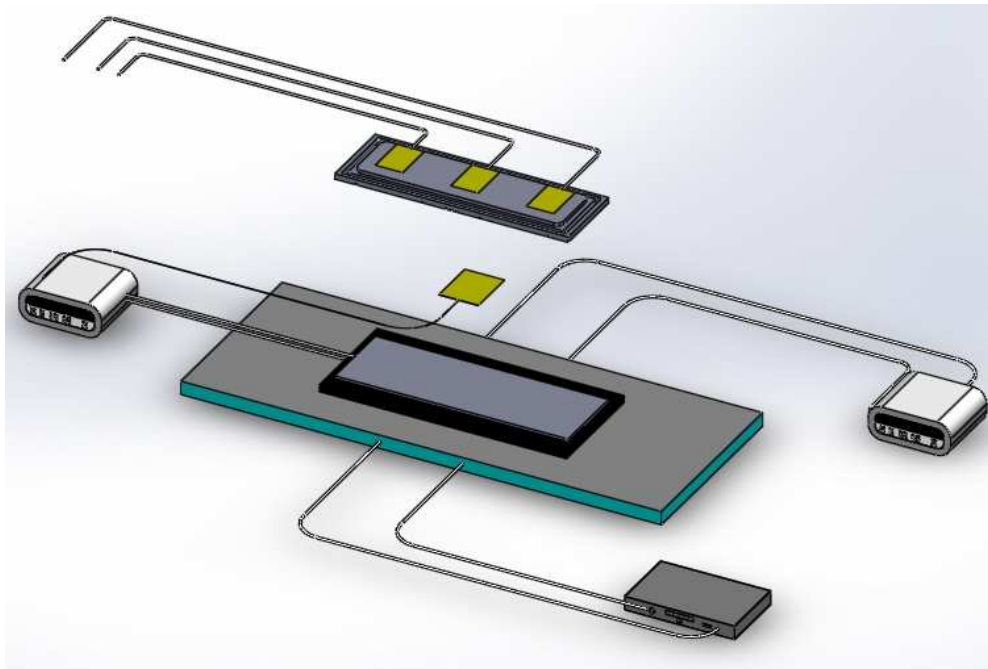


Figura 3-18 - Vista explodida da montagem utilizada na calibração dos sensores de fluxo

Foi observado que na montagem original deste experimento o fluxo de calor ao longo da placa era heterogêneo. O fluxo de calor pelos sensores nas extremidades era maior que o fluxo de calor pelo sensor posicionado no meio da placa. Além disto, o fluxo de calor no sensor a ser calibrado era cerca de 70% inferior ao fluxo de calor obtido pelo sensor de fluxo padrão. Baseado nestas observações conclui-se que havia uma fuga de calor pelas laterais do sensor, uma vez que o mesmo funcionava como isolante térmico. Vale ressaltar que o sensor padrão era constituído de 3 sensores dispostos lateralmente e envoltos por uma película plástica retangular que promovia um isolamento térmico homogêneo do instrumento.

Analisando-se o sensor padrão optou-se por inserir em volta do sensor de fluxo adquirido, uma película que tornasse o isolamento térmico homogêneo, ou seja, que minimizasse a fuga de calor pelas laterais do sensor. Foram utilizados os dados do fabricante (Omega) do sensor de fluxo para determinar qual material seria utilizado e qual seria a espessura do mesmo.

Tabela 3-2 - Especificação do sensor de fluxo HFS-4 da OMEGA

Modelo	Sensibilidade Nominal ($\mu\text{V}/\text{Btu}/\text{ft}^2\cdot\text{h}$)	Fluxo de Calor máximo ($\text{Btu}/\text{ft}^2\cdot\text{h}$)	Tempo de resposta (s)	Resistência Térmica ($^{\circ}\text{F}\cdot\text{ft}^2\cdot\text{h}/\text{Btu}$)	Espessura Nominal (mm)
HFS-4	6.5	30000	0.6	0.01	0.18

$$R_{\text{sensor}} = \frac{L}{k} = 0,01 \frac{^{\circ}\text{F}}{(\text{BTU} / \text{h}) \cdot \text{ft}^2} \quad (3-3)$$

$$k_{\text{PVC}} = 0,19 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} = 0,1098 \frac{(\text{BTU} / \text{h})}{\text{ft} \cdot ^{\circ}\text{F}} \quad (3-4)$$

$$R_{\text{PVC}} = \frac{L}{k} = 0,01 = \frac{L}{0,1098} \therefore L = 0,0011 \text{ft} = 0,33 \text{mm} \quad (3-5)$$

Onde R é a resistência térmica, L é a espessura e k é a condutividade térmica.

Foi utilizada então uma película de PVC, policloreto de vinila ($k = 0,19 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$), de 0,3 mm de espessura. Os detalhes da montagem com e sem a película de PVC estão mostrados na Figura 3-19. Os resultados obtidos para a calibração dos sensores estão explicitados na seção de resultados e pode-se observar resultados muito mais coerentes com o uso do PVC. Desta forma optou-se por calibrar os sensores usando a película de PVC e a mesma foi utilizada no experimento propriamente dito.

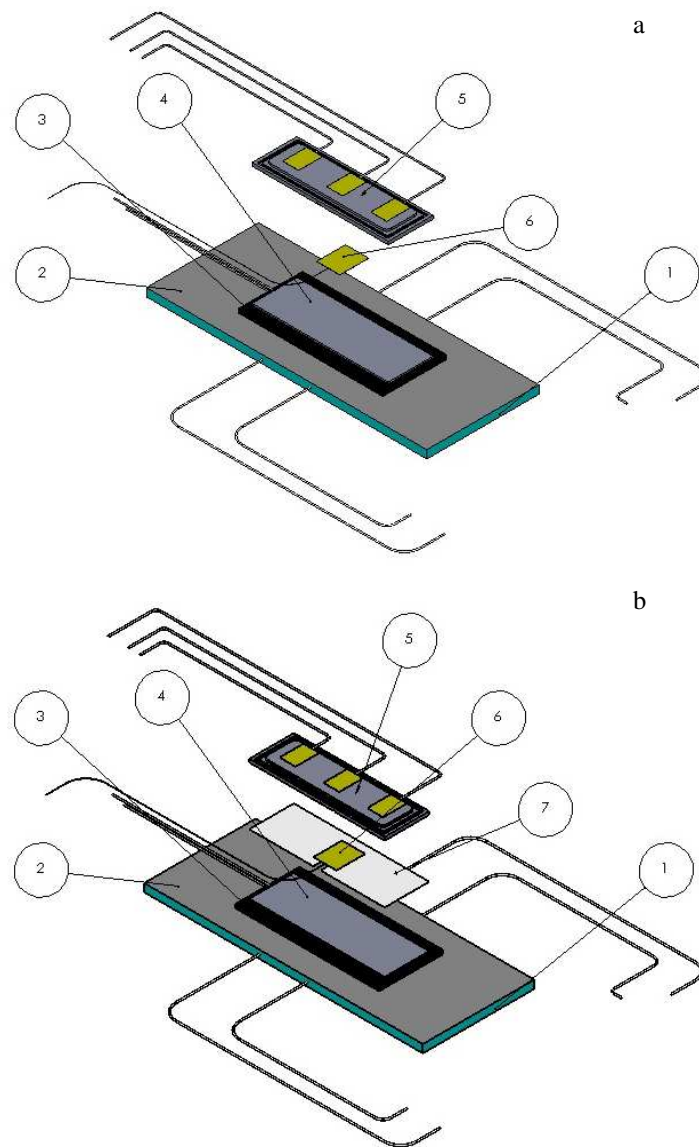


Figura 3-19 - Detalhes da montagem do sistema para calibração do sensor de fluxo: a) sem película de PVC e b) com película de PVC. 1- Isolamento térmico em isopor; 2- Placa de aço ultrafina submetida a tensão controlada; 3- Sensor de fluxo padrão; 4- Placa de aço inox 316L lisa; 5- Placa de aço inox 316L usinada com três sensores de fluxo (HFS-4) fixados na superfície; 6- Sensor de fluxo a ser calibrado (HFS-4); 7- Película de PVC.

3.4.1. Resultados de calibração dos sensores de fluxo

Os sensores de fluxo utilizados no experimento foram calibrados de acordo com a técnica e procedimento descritos no item 3.4. Inicialmente a calibração foi realizada para um dos sensores sem a película de PVC, e com outros três sensores

dispostos na superfície da placa superior. Os resultados destes sensores e a curva de calibração estão expostos na Figura 3-20.

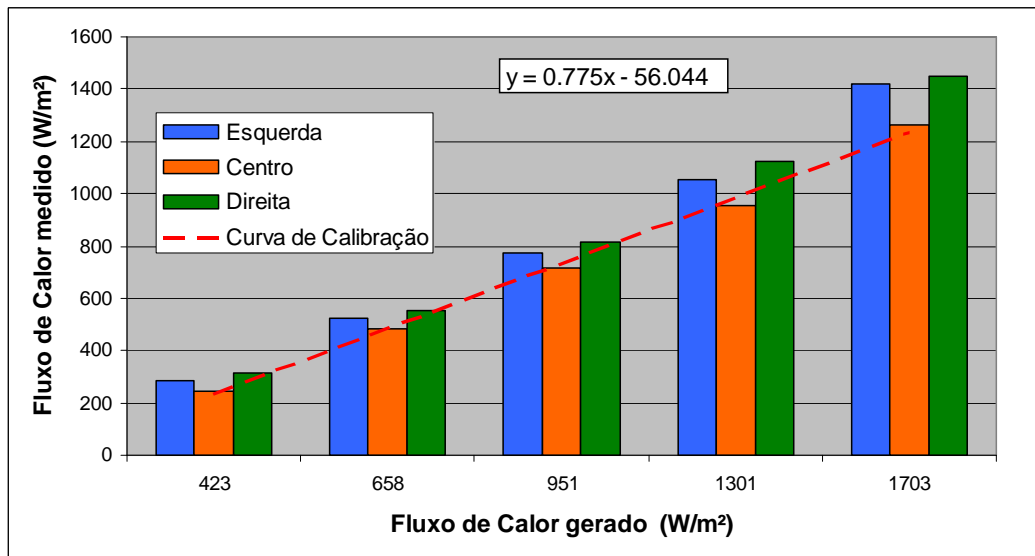


Figura 3-20 - Resultado da Calibração dos sensores de fluxo de calor sem a utilização de película de PVC entre as placas de aço.

Pelo gráfico mostrado acima, pode-se notar que não há uma distribuição homogênea de calor ao longo da placa. O sensor posicionado no centro da placa apresenta sistematicamente valores menores de fluxo de calor que os posicionados à direita e à esquerda. Isto comprova que o sensor de fluxo colocado entre as placas funciona também como isolante térmico, desviando o calor para as laterais da placa.

O fator de calibração obtido para este sensor, conforme mostrado através da curva de calibração no gráfico, corresponde a 77,5% do fator de calibração do fabricante, o que pode ser considerado um resultado muito baixo.

Após estas constatações, o ensaio de calibração foi repetido utilizando a película de PVC. Os resultados de fluxo de calor ao longo da superfície da placa são mostrados na Figura 3-21.

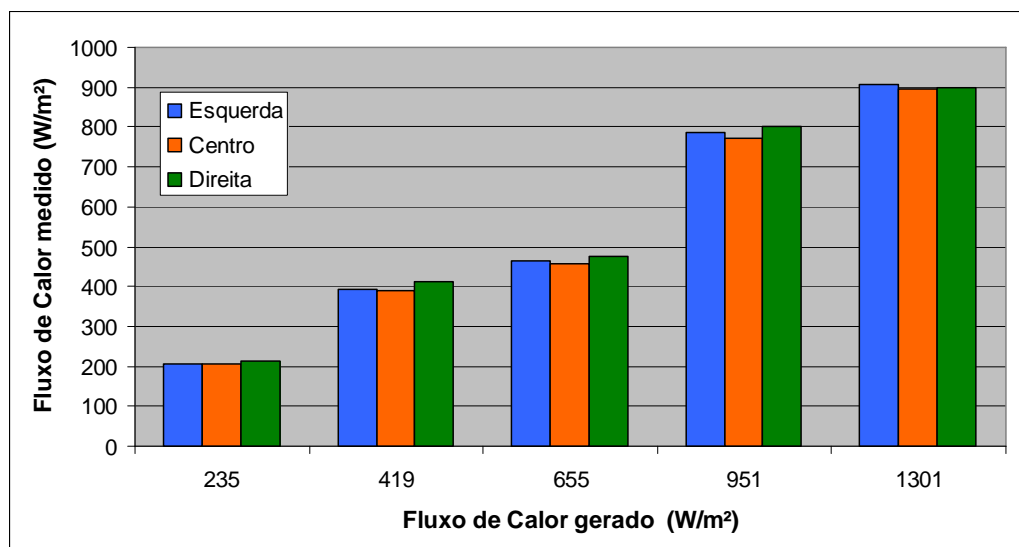


Figura 3-21 - Distribuição de fluxo de calor ao longo da superfície da placa de aço inox com a utilização da película de PVC entre as placas.

Após a inclusão do filme de PVC, nota-se uma distribuição de fluxo de calor ao longo da superfície da placa mais homogêneo. Nestas condições a leitura de fluxo de calor do sensor a ser calibrado se torna mais coerente, não havendo perdas de calor pelas adjacências do mesmo.

De forma a validar o sistema, o fluxo de calor gerado foi plotado contra a medida de fluxo de calor obtido pelo sensor de referência e o resultado é observado no gráfico da Figura 3-22.

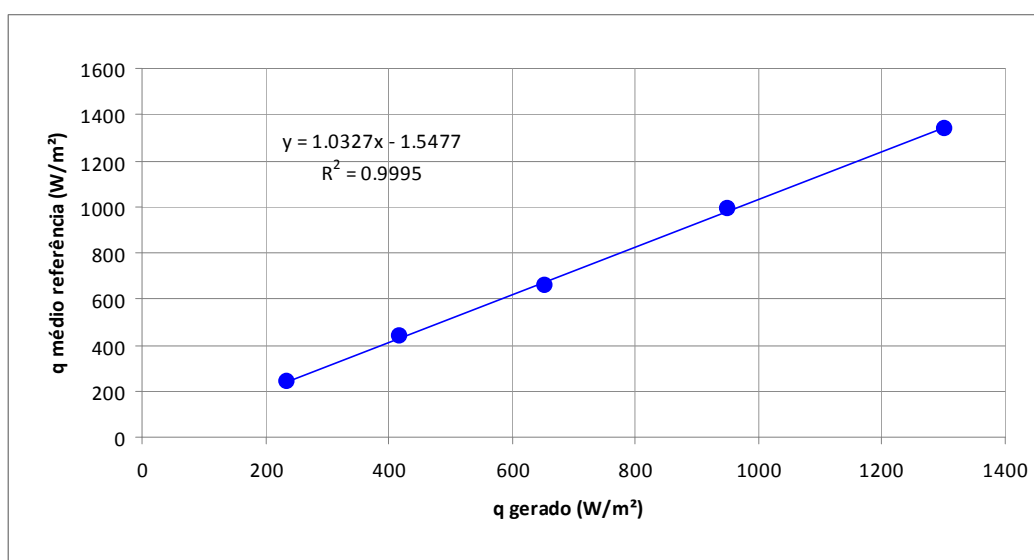


Figura 3-22 - Comparação entre o fluxo de calor gerado e o fluxo de calor medido pelo sensor de referência.

O gráfico acima mostra que o erro entre o fluxo de calor gerado e o medido é pouco superior a 3%. Esta diferença reside nas perdas laterais (fora assumido inicialmente fluxo de calor unidimensional) e na própria calibração do sensor considerado como referência. Porém este valor mostra que o sistema está bem dimensionado e apto para realizar a calibração do sensor de fluxo (HFS-4) que será utilizado no experimento propriamente dito.

As curvas de calibração dos sensores estão apresentadas na Figura 3-23 e na Figura 3-24.

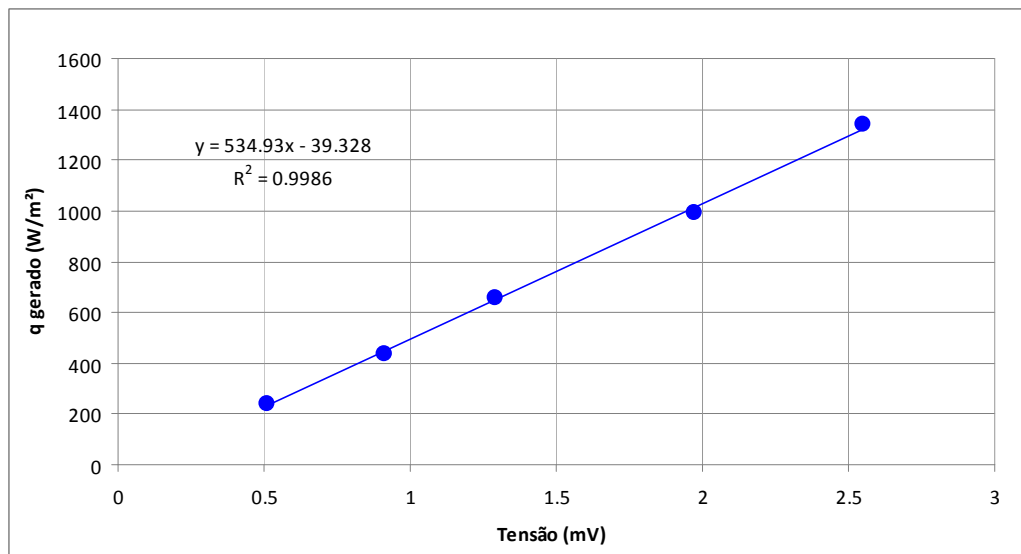


Figura 3-23 - Curva de Calibração do sensor de fluxo HFS-4 11021964, conectado na porta 101 da placa de aquisição.

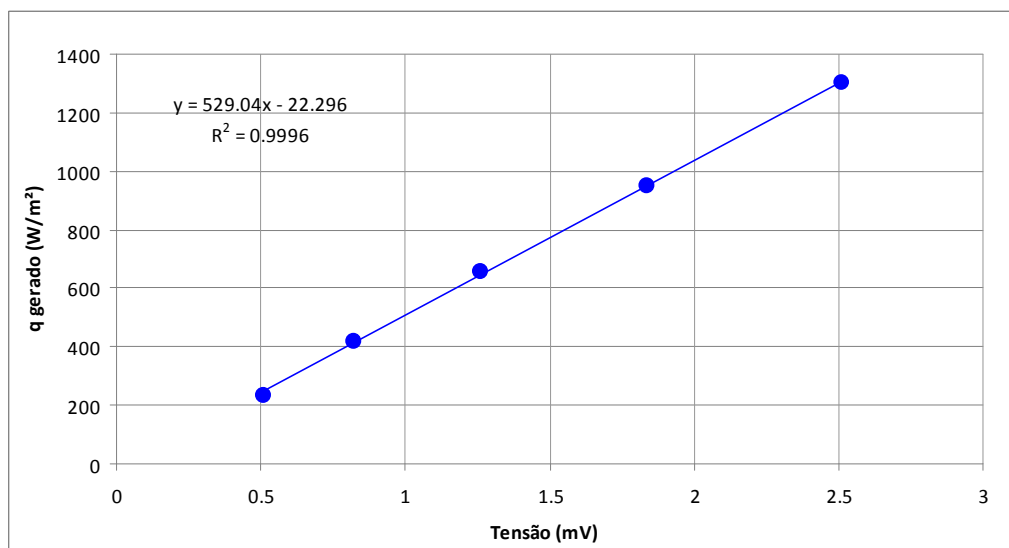


Figura 3-24 - Curva de Calibração do sensor de fluxo HFS-4 11021973, conectado na porta 103 da placa de aquisição.

Os coeficientes de calibração obtidos para os sensores com números de série 11021964 e 11021973 foram respectivamente: $535 \frac{W/m^2}{mV}$ e $529 \frac{W/m^2}{mV}$. O fator de calibração expedido pelo fabricante informa que ambos os sensores possuem o mesmo fator: $1,8 \frac{\mu V}{W/m^2}$, o que corresponde a $556 \frac{W/m^2}{mV}$. Ou seja, a metodologia aplicada foi capaz de realizar a calibração do sensor e uma vez inserida a película de PVC, o fator de calibração foi muito próximo ao relatado pelo fabricante. Mesmo assim para as medidas do experimento foram utilizados os fatores de calibração obtidos no laboratório.

3.5. Revestimentos utilizados

Os testes de deposição foram conduzidos com três tipos de revestimento aplicados sobre a placa de aço inox: Carbono amorfo (DLC – *diamond like carbon*), PTFE – Politetrafluoreto de etileno (Teflon[®]) e Poliamida 11 (Nylon 11[®]). Duas placas de aço inox 316L não revestidas também foram usadas. Uma delas apresentava acabamento superficial típico de fresadora. A outra placa de aço inox foi polida manualmente até atingir uma rugosidade cerca de 50 vezes menor que a da placa originalmente usinada. Este nível baixo de rugosidade era necessário para a realização do revestimento de carbono amorfo. Assim, uma placa com este nível de rugosidade, mas sem o revestimento foi incluída na matriz de testes. A Figura 3-25 apresenta a estrutura monomérica dos revestimentos plásticos utilizados enquanto a Figura 3-26 apresenta uma fotografia das cinco placas testadas. A caracterização destas superfícies será apresentada mais adiante.

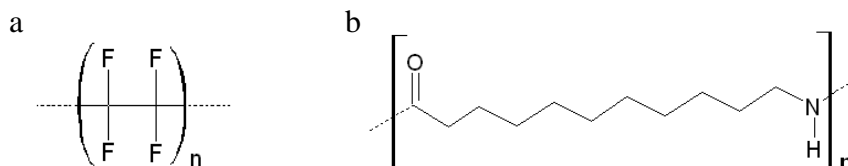


Figura 3-25 - Estrutura monomérica de a) Politetrafluoretileno- PTFE (Teflon[®]), b) Poliamida 11 (Nylon 11[®]). Cada vértice representa um átomo de carbono.

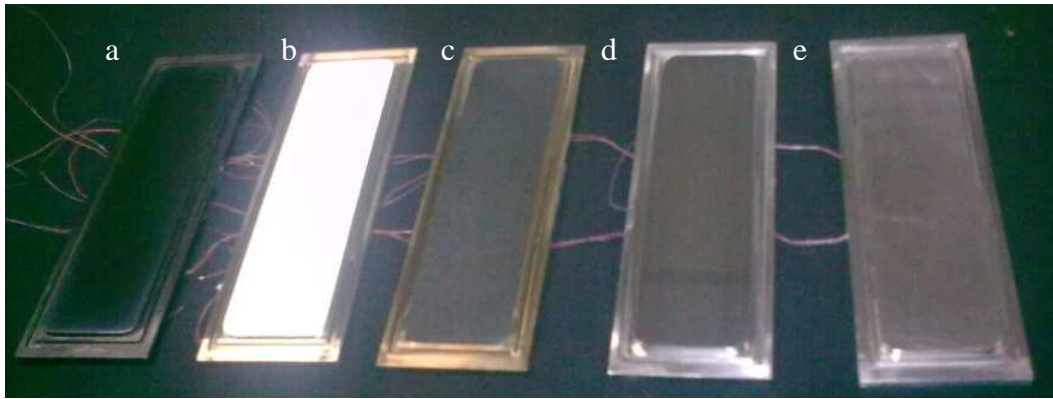


Figura 3-26 - Placas revestidas utilizadas: a) revestimento de carbono amorfo (DLC), b) revestimento de Nylon 11[®], c) revestimento de TEFLON[®], d) placa de aço polida, e) placa de aço convencional.

3.6. Estratégia de aquisição dos dados

O objetivo principal dos experimentos conduzidos era realizar medidas da espessura de depósito de parafina produzidos pelo escoamento em regime permanente de uma solução de parafina sobre um canal com placas resfriada. Para os testes foi selecionada uma solução 20% de parafina em querosene com temperatura de entrada na seção de 35°C, escoando por sobre uma placa resfriada. A temperatura de entrada foi definida de forma que fosse muito próxima, porém superior a TIAC da solução (33,5°C), para evitar a formação de cristais (ou mesmo depósito) fora da região de interesse (seção de teste). A concentração de parafina na solução foi determinada através de testes preliminares, de forma que fosse formada uma espessura suficiente para permitir a medida e ao mesmo tempo não ocasionasse a obstrução da seção.

Embora o objetivo inicial tenha sido realizar deposição em ambas as placas (superior e inferior), devido à redução da área de escoamento e sua influência na velocidade, optou-se por realizar a deposição apenas na placa inferior com resfriamento, sendo a placa superior mantida aquecida a 35°C, a mesma temperatura de entrada do fluido, de forma que não houvesse deposição alguma nesta placa.

As medidas de espessura seriam realizadas desde o início da deposição até que o sistema atingisse a condição de regime permanente, ou seja, até que não

houvesse variação significativa da espessura do depósito com o tempo $\left(\frac{d\delta}{dt} \cong 0\right)$.

Desta forma seria possível comparar o crescimento do depósito sobre os diferentes revestimentos, bem como a espessura final depois de atingido o regime permanente. O tempo necessário para atingir o regime permanente foi de cerca de 4 horas para a vazão mais alta e de 8 horas para a vazão mais baixa.

As medidas foram realizadas para diferentes valores de números de Reynolds: três em regime laminar e dois em regime turbulento. A Tabela 3-3 mostra as diferentes condições de escoamento impostas no experimento.

Tabela 3-3 - Relação entre a frequência de rotação da bomba, número de Reynolds e regime de fluxo.

Rotação da bomba (Hz)	Vazão (L/h)	Nº de Reynolds	Regime de Fluxo
10	143	589	Laminar
20	291	1200	Laminar
30	439	1810	Laminar
50	735	3032	Turbulento
60	883	3643	Turbulento

Os testes tiveram a vazão limitada à 883 L/h, uma vez que para vazões superiores, a espessura do depósito se tornava muito irregular em função das altas tensões de cisalhamento com ocorrência constante de remoção de pedaços do mesmo, conforme pode ser observado na Figura 3-27.



Figura 3-27 - Imagens do depósito para vazões superiores a 883 L/h, mostrando a formação de sulcos e irregularidade na espessura do depósito.

Para garantir que os experimentos com cada diferente revestimento fossem conduzidos sob os mesmos valores de fluxo de calor adotou-se a estratégia de conduzir experimentos preliminares utilizando outro fluido de trabalho. Este fluido foi escolhido de modo a apresentar as mesmas propriedades termofísicas (viscosidade, densidade, calor específico e condutividade térmica) que a solução de parafina e querosene a ser testada. O fluido escolhido, todavia, não possuía parafina em sua composição, de modo que não produziria depósitos quando resfriado na seção de testes. O fluido escolhido foi uma solução 50% de óleo mineral spindle em querosene; detalhes das características térmicas e da metodologia aplicada para escolha do fluido estão na seção 4.1.7.

O objetivo dos testes preliminares era determinar, para cada placa revestida e para cada número de Reynolds, o valor da temperatura do fluido de refrigeração que produziria a mesma temperatura da superfície interna da placa revestida. Esta condição era obtida para uma temperatura de entrada do fluido de trabalho constante e igual a 35°C. A temperatura interna de cada placa foi mantida a 30°C. As temperaturas do fluido de refrigeração no banho termostático que produziam a temperatura da superfície interna desejada de 30°C eram registradas para cada par de revestimentos e valor do número de Reynolds. Estes valores de temperatura do banho seriam posteriormente utilizados nos ensaios com deposição de parafina, garantindo assim que eles fossem conduzidos sob os mesmos valores de fluxo de calor.

3.6.1. Temperatura do fluido frio

Conforme descrito na seção 3.6, através da extrapolação da temperatura lida para a temperatura na parede e da circulação da mistura de óleo spindle e querosene 50%, nas diferentes vazões e para as diferentes placas estudadas, foram determinados as temperaturas de banho e fluxo de calor listados na Tabela 3-4. As condições de contorno utilizadas foram a temperatura de entrada e a temperatura na parede: 35°C e 30°C, respectivamente.

Tabela 3-4 - Temperatura do banho frio e fluxo de calor nas placas revestidas para cada vazão empregada.

Frequência (Hz)	Nº de Reynolds	Aço Inox 316L e DLC		Teflon		Nylon 11	
		Fluxo de Calor (W/m ²)	Temp. do banho (°C)	Fluxo de Calor (W/m ²)	Temp. do banho (°C)	Fluxo de Calor (W/m ²)	Temp. do banho (°C)
10	589	1620	26,5	1630	25,5	1620	25,1
20	1200	2590	24,1	2530	23,1	2640	22,0
30	1810	3470	22,0	3400	21,0	3530	20,1
50	3032	5490	17,3	5620	15,3	5380	14,2
60	3643	7130	13,7	7170	11,0	6960	10,1

Nota-se que o fluxo de calor aumenta com o aumento da vazão. Assim aumenta a quantidade de calor a ser retirada do sistema para manter a temperatura da placa em 30°C. A vazão de fluido frio (banho) é constante, assim para garantir a retirada de calor do sistema é necessário reduzir a temperatura do mesmo.

Considerando-se uma mesma vazão, a temperatura do fluido frio diminui com a espessura e a condutividade térmica do revestimento. Como a condutividade térmica do Teflon e do Nylon 11 são muito parecidas, a espessura do revestimento comanda a redução da temperatura do banho a ser utilizada para garantir a mesma temperatura na parede da placa em relação à placa não revestida. Com relação ao revestimento de carbono amorfo sua espessura muito pequena faz com que seu efeito isolante térmico seja desprezível e a temperatura utilizada é a mesma das placas de aço não revestidas.

3.6.2. Matriz de Testes

Todas as medidas foram realizadas para cada placa (revestida ou não) dando origem a matriz de testes apresentada na Tabela 3-5.

Tabela 3-5 - Matriz de testes.

Ensaio	Placa (Superfície)	Rotação da bomba (Hz)	Vazão (L/h)	Nº de Reynolds	Regime de Fluxo	Temp. do banho (°C)
1	Aço convencional	10	143	589	Laminar	26,5
2	Aço convencional	20	291	1200	Laminar	24,1
3	Aço convencional	30	439	1810	Laminar	22,0
4	Aço convencional	50	735	3032	Turbulento	17,3
5	Aço convencional	60	883	3643	Turbulento	13,7
6	Aço polido	10	143	589	Laminar	26,5
7	Aço polido	20	291	1200	Laminar	24,1
8	Aço polido	30	439	1810	Laminar	22,0
9	Aço polido	50	735	3032	Turbulento	17,3
10	Aço polido	60	883	3643	Turbulento	13,7
11	Teflon [®]	10	143	589	Laminar	25,5
12	Teflon [®]	20	291	1200	Laminar	23,1
13	Teflon [®]	30	439	1810	Laminar	21,0
14	Teflon [®]	50	735	3032	Turbulento	15,3
15	Teflon [®]	60	883	3643	Turbulento	11,0
16	Nylon 11 [®]	10	143	589	Laminar	25,1
17	Nylon 11 [®]	20	291	1200	Laminar	22,0
18	Nylon 11 [®]	30	439	1810	Laminar	20,1
19	Nylon 11 [®]	50	735	3032	Turbulento	14,2
20	Nylon 11 [®]	60	883	3643	Turbulento	10,1
21	DLC	10	143	589	Laminar	26,5
22	DLC	20	291	1200	Laminar	24,1
23	DLC	30	439	1810	Laminar	22,0
24	DLC	50	735	3032	Turbulento	17,3
25	DLC	60	883	3643	Turbulento	13,7

3.7. Procedimento Experimental

A seguir é apresentado um resumo do procedimento experimental aplicado para realizar cada uma das medidas da matriz de teste. O procedimento experimental detalhado, contendo as operações de abertura e fechamento da seção de teste; troca da placa de teste e fixação dos sensores; e procedimento para realizar as medidas se encontra no apêndice B.

Uma vez montada a seção de teste com a placa que se desejava medir a espessura de depósito, era realizado o aquecimento do sistema utilizando circulação com óleo quente (isento de parafina) pouco acima de 35°C, valor da temperatura selecionada para os testes. Paralelamente, os banhos termostáticos eram ligados e a temperatura ajustada também para 35°C. Todos os parâmetros de temperatura e fluxo de calor eram constantemente acompanhados através do programa de aquisição de dados desenvolvido em plataforma *Labview*. Quando todo sistema (tanque, entrada e saída da seção de teste e temperatura das placas) estivesse acima de 35°C, a circulação era interrompida, o óleo drenado e se iniciava o bombeamento de solução de parafina (previamente aquecida a 35°C). A frente inicial de solução de parafina, com volume igual ao volume do sistema, era enviada para o tanque de descarte para evitar contaminação da solução. Ao fim do descarte a solução de parafina passava a circular no sistema com a vazão que se desejava realizar a medida segundo a matriz de teste. A temperatura de entrada da seção de teste era mantida a 35°C através do ajuste de voltagem nas fitas térmicas controladas pelo variador de tensão.

A partir deste momento a circulação de fluido frio no trocador inferior era interrompida através do fechamento das válvulas a montante e a jusante do mesmo, e o banho termostático era ajustado para a temperatura de teste, conforme indicado na seção 3.6.1. A temperatura do banho termostático que alimentava o trocador de calor superior era mantida em 35°C. Uma vez atingida a temperatura de teste para o fluido frio, era iniciada a captura de imagens pela câmera com intervalos de 10 s na primeira 1 hora, e depois em intervalos de 5 minutos para o restante do tempo. As válvulas de entrada e saída do trocador de calor eram então abertas e a placa de aço era resfriada rapidamente iniciando a deposição de parafina. Paralelamente, era acompanhada a redução de fluxo de calor com o

tempo e através das imagens capturadas era possível estabelecer o momento onde não havia mais crescimento na espessura do depósito. Neste momento o sistema havia atingido regime permanente e a captura de imagens era cessada.

Uma vez finalizada a aquisição das imagens, a temperatura do banho termostático era elevada até 40°C para permitir a limpeza do sistema. Solução de parafina quente circulava pela seção de teste por pelo menos 30 minutos em altas vazões para remover e dissolver o depósito. Quando a placa estava completamente limpa, a circulação de parafina era interrompida e o sistema estava pronto para efetuar uma nova medida. Para que o sistema pudesse ser desligado, era necessário substituir a parafina por óleo quente, evitando que a mesma cristalizasse no sistema em caso de resfriamento.

É relevante informar que o sistema foi projetado para operar com dois fluidos permitindo que se fizesse a substituição dos fluidos no sistema sem necessidade de manter a placa de teste aquecida. Este procedimento permitiria que a solução de parafina encontrasse a placa já na temperatura de teste a partir do instante inicial minimizando os efeitos do regime transiente de transferência de calor. Entretanto esta metodologia foi descontinuada, devido à grande quantidade de fluido descartada (cerca de 3 litros por medida) e devido ao risco de contaminação da solução.