

2

Abordagem Experimental

Neste capítulo, será apresentado o dispositivo experimental utilizado nos ensaios laboratoriais realizados na PUC-Rio. Será descrito o procedimento experimental utilizado na obtenção dos resultados e estes serão apresentados no Capítulo 3.

O objetivo é o estudo experimental da transferência de uma gota de líquido entre uma superfície plana e um cilindro de forma obter a fração de líquido transferida e a visualização deste fenômeno.

2.1

Dispositivo Experimental

Foram utilizados diversos equipamentos pertencentes ao Laboratório de Microhidrodinâmica e Escoamento em Meios Porosos (LMMP) do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio. A grande maioria dos equipamentos utilizados já pertenciam a este laboratório, com exceção da mesa de cobrimento recém adquirida para realização deste estudo. Nesta seção, serão apresentados os equipamentos, suas funcionalidades e a finalidade do seu uso.

2.1.1

Mesa de Cobrimento

O principal equipamento utilizado neste estudo foi adquirido pelo Laboratório de Microhidrodinâmica e Escoamento em Meios Porosos (LMMP) do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio. Este equipamento é composto basicamente por uma mesa de cobrimento e foi fornecido pela empresa Mathis. Esta empresa, com sede na Suíça, fornece equipamentos laboratoriais para aplicação tipo espatulagem de pastas e resinas sobre substratos tais como: papel, tecidos, não-tecidos, filmes orientados, poliéster, entre outros. O aparelho cujo modelo é SVM simula os processos industriais com diferentes tipos de aplicação, como por exemplo: faca suspensa, faca sobre cilindro, cilindro giratório, laminação. A opção que melhor

atende o requisito estudado é o cilindro giratório, composto por borracha de 85 shore A de dureza. O aparato ainda possui, no cabeçote de aplicação, dois relógios comparadores com precisão de centésimos de milímetro para o ajuste da posição do cilindro de borracha afim de obter uma espessura regular do material a ser aplicado. A área útil de aplicação é de 280 x 300 mm e a mesa é feita de aço inox. O equipamento ainda possui um dispositivo de acionamento da aplicação com velocidade constante, chave geral, potenciômetro de velocidade podendo variar de 0,25 a 4,0 metros por minuto, botão de STOP e limitadores de aplicação na lateral do equipamento. A figura 6 apresenta o aparato experimental.



Figura 6: Aparato Experimental.

Para que fosse possível observar o comportamento do líquido durante a transferência, foram utilizadas lâminas de vidro, e estas foram fixadas na mesa de revestimento.

A figura 7 apresenta o aparato experimental montado em conjunto com os demais equipamentos necessários para a execução dos ensaios: suporte da lâmina, câmera de alta velocidade e conjunto de lentes.

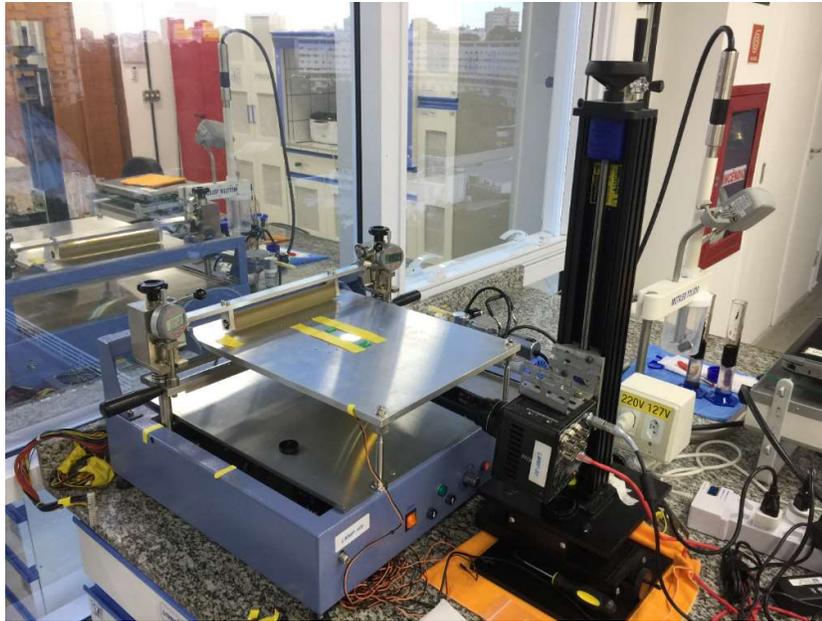


Figura 7: Vista frontal do suporte da lâmina, da mesa de cobertura com o cilindro de borracha, câmera de alta velocidade e conjunto óptico.

Em baixo da mesa de cobertura, o conjunto óptico foi posicionado de tal forma que com o auxílio de um espelho, fosse possível visualizar com exatidão a gota depositada sobre a superfície de vidro. Este detalhamento será mostrado a seguir.

2.1.2

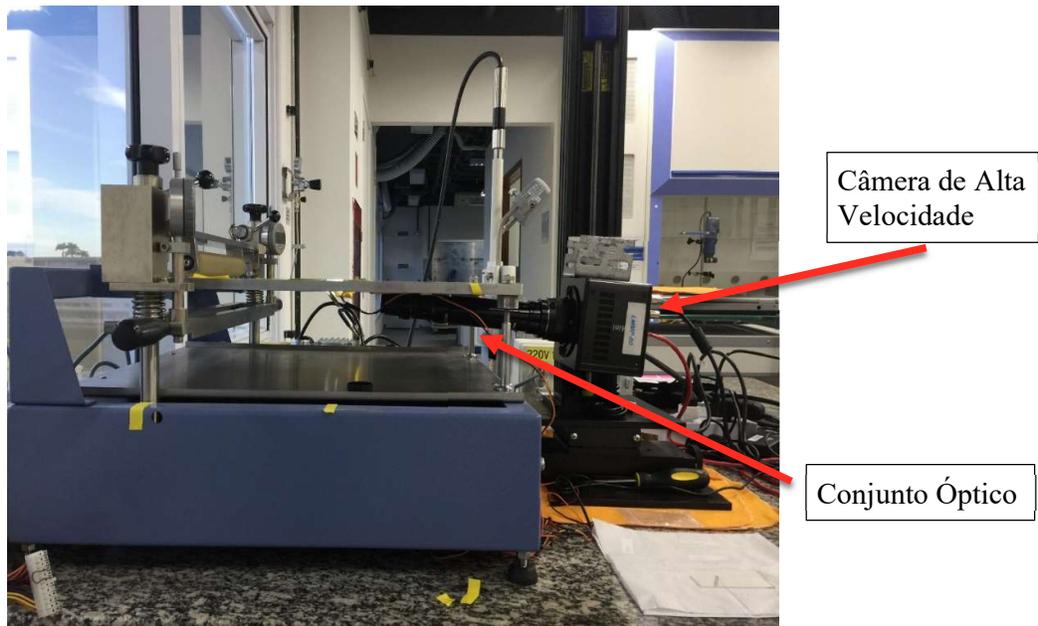
Câmera de Alta Velocidade

O ensaio consiste na análise baseada na visualização da transferência de líquido da lâmina de vidro para o cilindro através do movimento do cilindro de borracha sobre o suporte. Para isso está sendo utilizada uma câmera de alta resolução FastCam Mini UX100 modelo 800K capaz de obter registrar até 800.000 quadros por segundo e um software chamado Photron FASTCAM Viewer que possibilita a gravação de vídeos e fotos, além da edição. Estes equipamentos pertencem ao LMMP e sua utilização é destinada a visualização de diversos experimentos na área de microhidrodinâmica e em meios porosos. A figura 8 apresenta o modelo da câmera utilizada nestes ensaios.



Figura 8: Câmera FastCam UX100 Modelo 800K.

Foi utilizado um conjunto de lentes para ampliar a gota permitindo assim a visualização do processo de transferência. A figura 9 apresenta a vista lateral do aparato experimental mostrando o posicionamento do conjunto óptico. A figura 10 detalha melhor o posicionamento do conjunto com relação ao espelho utilizado para direcionar a imagem da gota sobre a lâmina para a câmera de alta velocidade.



Câmera de Alta Velocidade

Conjunto Óptico

Figura 9: Vista lateral do aparato experimental.

Foi montado um espelho para refletir as imagens provenientes da lâmina de vidro e também um conjunto de lâmpadas de diodo de emissão de luz, mais conhecida como lâmpadas de LED, capazes de iluminar a região de forma suficiente para uma boa captação de imagens. Estas imagens são capturadas pelo obturador da câmera que é capaz de obter imagens ou gerar vídeos que são analisados computacionalmente.

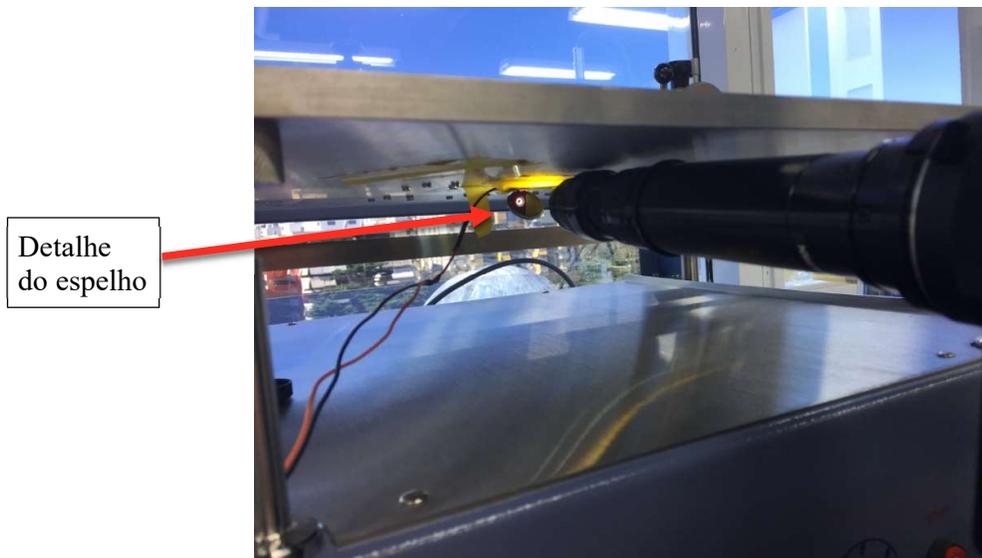


Figura 10: Vista do conjunto óptico posicionado em frente ao espelho.

2.1.3

Tensiômetro

O tensiômetro Teclis modelo TRACKER S foi utilizado para medir o volume inicial e final da gota. O volume inicial é definido pela quantidade de material depositado sobre a superfície vítrea antes da ocorrência do ensaio. O volume final é a quantidade residual de líquido após a execução do ensaio. Estes volumes são fundamentais para que cálculo da fração volumétrica de líquido transferido da lâmina de vidro para o cilindro de borracha. Este mesmo equipamento foi utilizado para medir o ângulo de contato formado entre a gota e o vidro em cada um dos líquidos testados, sendo este parâmetro de grande importância para entendimento da energia superficial em cada caso. A figura 11 apresenta este equipamento.



Figura 11: Foto à esquerda mostra a câmera, lâmina de vidro e a fonte de luz. A foto à direita apresenta o hardware que controla o aparato.

2.1.4

Reômetro

A viscosidade de cada uma das soluções utilizadas foi determinada em função da taxa de cisalhamento com um reômetro rotacional da marca TA Instruments do modelo DHR-3, como mostrado na figura 12. A geometria utilizada no ensaio foi cone-placa de 1° e 5 mm de diâmetro. Os resultados de viscosidade obtidos para cada líquido serão apresentados e discutidos na próxima seção.



Figura 12: Equipamento TA Instruments modelo Discovery HR-3.

2.1.5

Caracterização de Líquidos

Todas as caracterizações dos líquidos utilizados nos ensaios foram feitas no LMMP utilizando os equipamentos descritos anteriormente e com o suporte da área técnica do laboratório.

Com o objetivo de obter líquidos com viscosidades diferentes, foram preparadas cinco soluções diluídas e concentradas de glicerina em água. Estas soluções foram testadas afim de obter uma completa caracterização.

Uma das caracterizações feitas foi através da medição de viscosidade. As viscosidades das soluções são independentes da taxa de cisalhamento como mostrado na figura 13, porém as viscosidades apresentam diferentes ordem de grandezas. Foram realizados testes em duplicata e os resultados foram satisfatórios, não havendo necessidade da realização de mais testes.

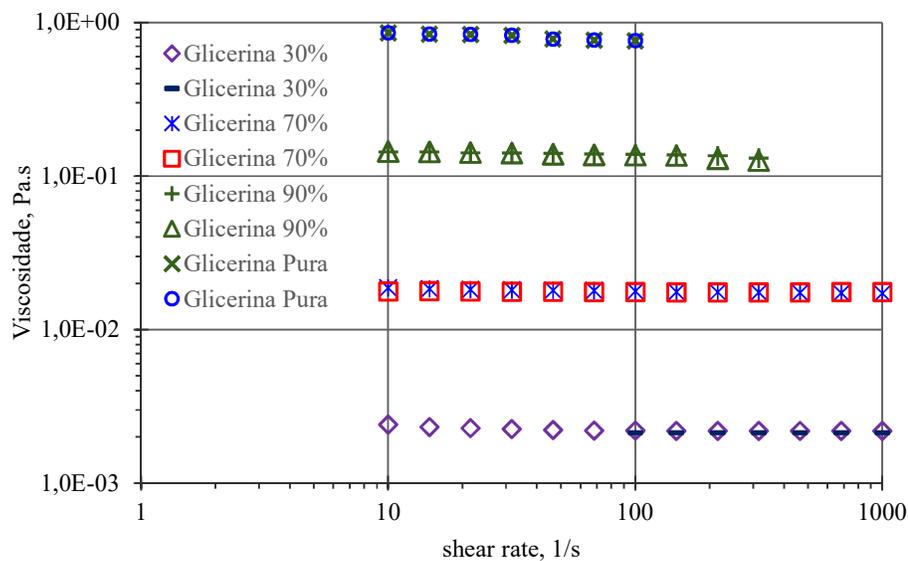


Figura 13: Viscosidade em função da taxa de cisalhamento.

Para obter a densidade das diferentes concentrações da solução de glicerina a partir das densidades da água e da glicerina pura, foi utilizado uma calculadora eletrônica¹. A caracterização das diversas soluções de glicerina foi concluída e os dados estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Caracterização de líquidos

Líquido	Densidade (kg/m ³)	Viscosidade (Pa.s)	Tensão Superficial (mN/m)
Água	1.000,0	0,001000	72,2
Glicerina 30%	1.071,1	0,002185	70,0
Glicerina 70%	1.178,8	0,018950	65,0
Glicerina 90%	1.233,2	0,174000	64,0
Glicerina 100%	1.258,6	0,987600	63,0

Pode-se notar que a variação da densidade de cada líquido está em torno de 20%, enquanto que a variação na tensão superficial está próxima a 15%. Por outro lado, a variação de viscosidade é muito mais ampla chegando a ter uma diferença de quase mil vezes. Espera-se que a viscosidade tenha um grande impacto durante os ensaios, visto que as demais propriedades são muito similares.

2.2 Procedimento Experimental

A principal preocupação está relacionada com a visualização do fenômeno de transferência da gota que está sobre a superfície do vidro para o cilindro de borracha. O uso da câmera de alta velocidade para visualização dos ensaios foi fundamental, porém esta requer uma boa iluminação. Este foi um ponto crucial para que pudessem ser obtidas imagens nítidas do fenômeno. Inúmeros tipos de lâmpadas e posição destas em relação ao orifício da mesa de cobrimento foram utilizados até que

¹ Calculadora eletrônica encontra-se no endereço eletrônico [https:// www.met.reading.ac.uk/~sws04cdw/viscosity_calc.html](https://www.met.reading.ac.uk/~sws04cdw/viscosity_calc.html) cujo método de cálculo está baseado no artigo de Cheng (2008) conforme referência obtida no próprio endereço eletrônico.

se obtivesse a melhor configuração. A figura 14 apresenta a melhor configuração para obtenção das imagens.

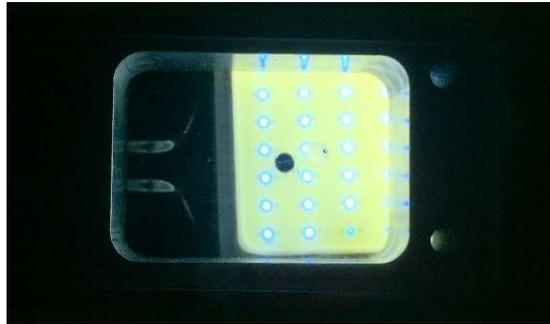


Figura 14: Detalhe da mesa de cobertura e do orifício na placa de iluminação.

Há um espelho posicionado em ângulo de 45° com relação à mesa de cobertura, este espelho está posicionado exatamente atrás da placa de LED utilizada na iluminação. O orifício na placa é proposital para que as imagens da gota depositada sobre a superfície vítrea possam ser captadas pelo conjunto óptico e conseqüentemente pela câmera de alta velocidade.

Sobre a mesa de cobertura, foram fixados gabaritos que fornecem um suporte para a lâmina de vidro e conferem maior rigidez a esta. O cilindro de borracha foi posicionado de forma a passar sobre estes suportes com um movimento rotacional, ou seja, para que o ensaio possa ocorrer de acordo com seu propósito, era necessário que o movimento de rotação provocado pelo atrito do rolo com o suporte ocorra, bem como também haja movimento de translação do eixo do cilindro para originar o movimento de cisalhamento durante o ensaio. A figura 15 apresenta os suportes de fixação da lâmina de vidro e também a gota depositada sobre a superfície vítrea.

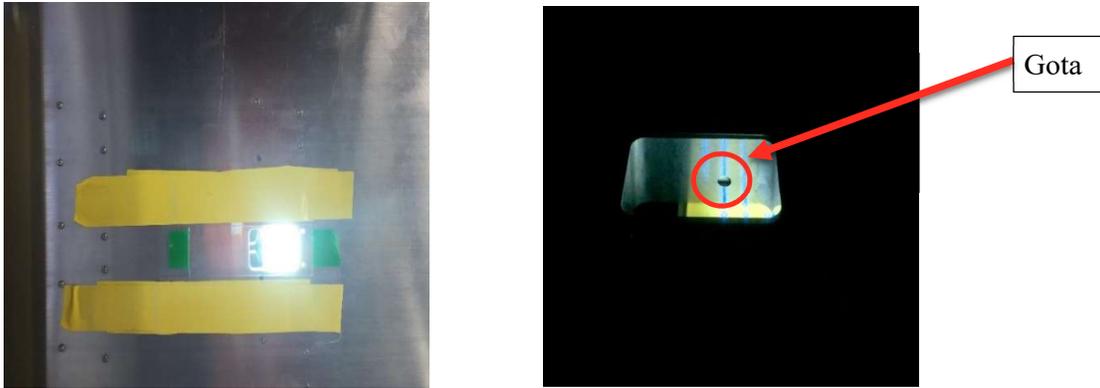


Figura 15: A figura à esquerda apresenta os gabaritos que suportam a lâmina de vidro e a figura à direita mostra a gota depositada sobre a lâmina de vidro.

Desta forma, o cilindro foi ajustado a uma altura superior à lâmina de vidro e inferior ao topo da gota sobre a superfície de vidro. A figura 16 define as alturas utilizadas e suas respectivas posições.

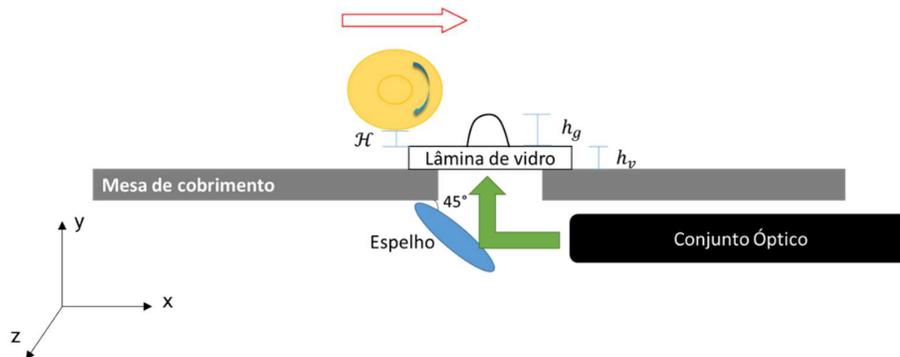


Figura 16: Altura H do cilindro com relação à lâmina de vidro; altura h_g da gota em relação a lâmina de vidro e a altura h_v da própria lâmina de vidro.

Para efetuar a visualização do fenômeno de transferência da gota da superfície vítrea para o cilindro e quantificar esta transferência foi realizado o seguinte procedimento:

1. Preparar as soluções de glicerina.
2. Limpar mesa de cobrimento, cilindro de borracha e lâmina de vidro.
3. Ajustar a altura H do cilindro na mesa de cobrimento de acordo com a altura desejada para ensaio desde que a altura utilizada possa rotacionar o cilindro de borracha sobre os suportes da lâmina de vidro.

4. Inserir uma gota sobre a lâmina de vidro com o auxílio de um pipetador de 2 μL . O volume da gota obtido através do pipetador não é relevante neste momento uma vez que este volume será quantificado de outra forma.
5. Levar a lâmina com a gota depositada ao tensiômetro onde é feita a medição do volume inicial da gota a partir da imagem da gota.
6. Encaixar a lâmina de vidro com a gota depositada na mesa de cobrimento, posicionando-a entre os suportes formados pelo gabarito.
7. Definir a velocidade de trabalho do cilindro de borracha na mesa de cobrimento.
8. Ligar o motor do cilindro de borracha na mesa de cobrimento para movimentar o cilindro sobre a superfície até que este fique próximo a gota. Quando este estiver próximo a gota, desligar motor da mesa de cobrimento para preparar a câmera de alta velocidade para a gravação.
9. Acionar a câmera de alta velocidade para gravação e ligar motor do cilindro na mesa de cobrimento, o cilindro passa sobre a gota com movimento de rotação. O cilindro para automaticamente quando este atinge a posição final na mesa de cobrimento desligando o motor que movimenta o cilindro. Durante o movimento do cilindro, este toca a gota e transfere parcialmente o volume da gota da superfície vítrea para o cilindro.
10. Aumentar a altura H do cilindro de borracha antes de acionar o motor do cilindro para retorno até a posição inicial do ensaio. Este processo deve ser feito para que o cilindro não retorne rotacionando sobre os suportes e toque novamente na superfície da gota.
11. Acionar o motor do cilindro para retorno do mesmo a posição inicial do ensaio.
12. Retirar a lâmina de vidro com o volume residual, ou seja, com o volume parcial da gota dos suportes do gabarito e levar novamente ao tensiômetro afim de mensurar o volume residual da gota.

Seguindo este procedimento é possível obter o volume residual da gota e calcular por subtração o volume transferido para o cilindro e assim, determinar o percentual de líquido transferido da superfície de vidro para o cilindro. Foram feitos testes em triplicatas para garantir a repetitividade do ensaio e obtenção de valores médios dos volumes iniciais e residuais.