

2

Metodologia Experimental

Através da análise da revisão bibliográfica, pode ser observado que diversos grupos de pesquisadores construíram células de Hele-Shaw para estudar os padrões de deslocamento em que há a formação de *viscous fingering*. Em função das diferentes motivações e objetivos traçados para análise deste problema, cada grupo de pesquisa desenvolveu uma bancada específica com dimensões e formatos bem diferentes entre si.

A maioria dos trabalhos encontrados na literatura contempla fluidos (newtonianos ou não newtonianos) sendo deslocados por ar em diferentes tipos de células de Hele-Shaw. Na prática, trabalhar com a injeção de ar é mais fácil e menos trabalhoso do que com líquidos. Não foi encontrado nenhum artigo ou livro com detalhamento de construção de uma célula retangular de Hele-Shaw com enfoque no deslocamento de um líquido por outro líquido.

2.1

Fluidos

Foi definido um conjunto de fluidos de modo que pudesse ser observada tanto a formação de *fingers* quanto a de uma interface estável. O fluido deslocador é um fluido newtoniano e o deslocado é um fluido não newtoniano com características pseudoplásticas. Assim, o fluido deslocador é representado por um óleo mineral da marca União Química e o fluido deslocado utilizado é uma solução aquosa com 0,86% de goma xantana (fornecido pela Plury Química), conforme o anexo B.

2.2

Bancada experimental

O maior desafio deste projeto foi construir uma célula de Hele-Shaw de maneira simples e a baixo custo. O anexo C apresenta uma evolução das etapas percorridas neste trabalho até o desenvolvimento final de uma célula de Hele-Shaw.

Com o objetivo de simular o deslocamento de um fluido não newtoniano por um newtoniano em um meio poroso foi projetada e construída uma bancada

experimental. As Figuras 2.1 e 2.2 ilustram fotos da bancada e a Fig. 2.3 apresenta um desenho esquemático da bancada construída e seus principais componentes.

A bancada é composta por uma célula retangular de Hele-Shaw, um negatoscópio, uma câmera fotográfica, três reservatórios para os fluidos de trabalho, duas garrafas de transferência, uma bomba peristáltica da marca Cole-Parmer e duas helicoidais da marca Netzsch, um banho térmico e alguns suportes para os equipamentos.



Figura 2.1: Foto da bancada experimental

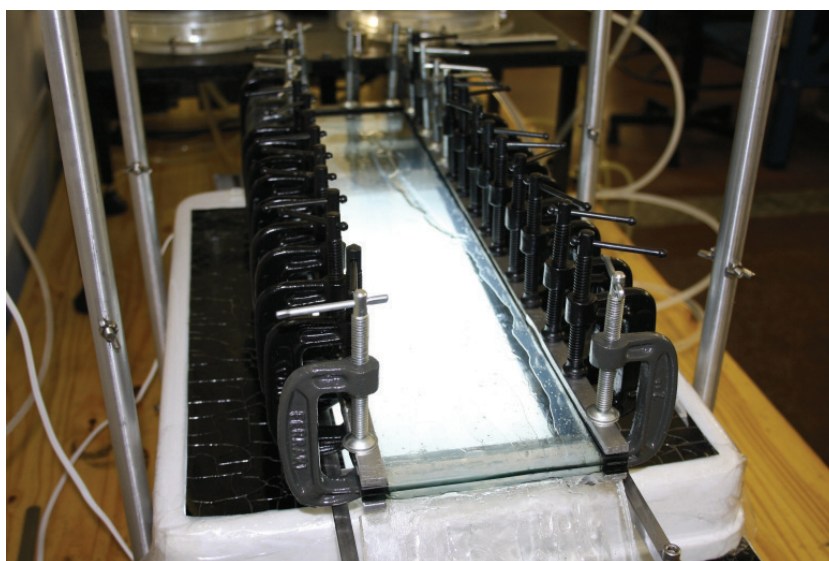


Figura 2.2: Foto da célula de Hele-Shaw

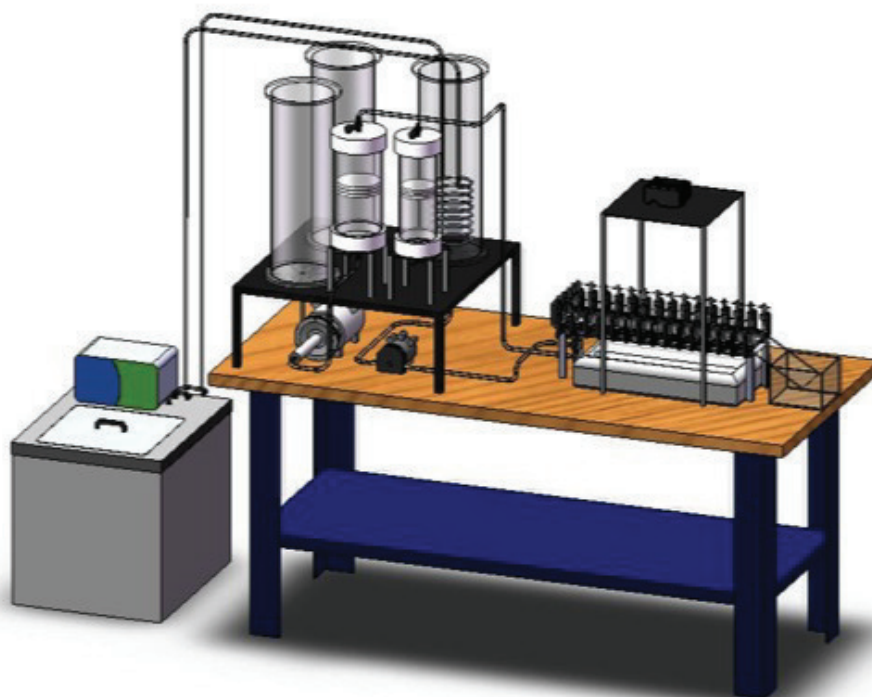


Figura 2.3: Desenho esquemático da bancada experimental

2.2.1

Célula de Hele-Shaw

Para construir a célula, a primeira etapa foi determinar as dimensões ideais. Alguns aspectos importantes foram levados em consideração, como:

- Garantir que o escoamento não seria afetado pelas paredes,
- Garantir que a folga é pequena o suficiente para poder considerar o regime bi-dimensional,
- Verificar se o comprimento da célula é razoável para que um bom espectro de situações possa ser observado em função do tempo de deslocamento,
- Verificar se a folga é pequena o suficiente para que não haja escoamento de um fluido sobre o outro,
- Verificar a viabilidade de construção.

A Tabela 2.1 apresenta dimensões de largura e folga de células utilizadas por alguns grupos de pesquisadores. De acordo com Chevalier et al. (16), razões de aspecto de 28 já são o suficiente para garantir que o experimento é quase bi-dimensional. Baseado nesses valores, foram definidas as dimensões, como pode ser visto na Fig. 2.4.

Tabela 2.1: Dimensões características de uma célula de Hele-Shaw

Artigo	Largura W [mm]	Folga b [mm]	Razão de aspecto W/b
Presente trabalho	110,4	0,7	158
Saffman et al. (47)	120	0,9	134
Bonn et al. (11)	40	0,25	160
Chevalier et al. (16)	40	0,25	160
	80	0,75	107
	40	0,75	54
	40	1,43	28
Kawaguchi et al. (28)	50	0,50	100
Lindner et al. (30)	40	0,25	160
Lindner et al. (32)	20	0,25	80
	40	0,25	160
	80	0,25	320
Yamamoto et al. (56, 57, 58)	120	0,2	600
Yamamoto et al. (58)	120	0,3	400
Yamamoto et al. (58)	120	0,5	240

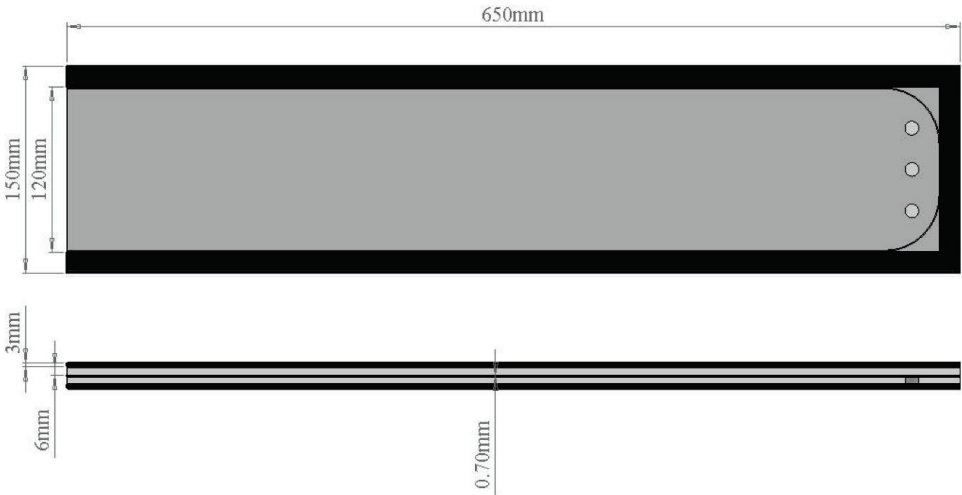


Figura 2.4: Dimensões da célula de Hele-Shaw

Com a folga definida, pode-se calcular a permeabilidade através da eq. 1-1. Nesse caso, a permeabilidade é de 41.374,4 D. Esse valor não corresponde a realidade de um meio poroso, por isso essa pesquisa tem caráter qualitativo e não quantitativo.

A Figura 2.5 ilustra a célula de Hele-Shaw. Ela é composta por duas placas planas de vidro temperado com 6 mm de espessura para evitar que haja flexão. As placas foram encomendadas em uma empresa especializada em usinagem de vidros (Qualitá Lab.) para garantir que a espessura do vidro fosse constante ao longo de seu comprimento. A escolha do vidro temperado deve-se ao aumento da resistência mecânica, especialmente em relação à flexão e compressão (36).



Figura 2.5: Célula de Hele-Shaw

Para garantir a vedação e a distância entre as placas, foi utilizado um pedaço de linha de pesca de nylon de 0,70 mm de espessura. Duas tiras de um calibrador de folga de 0,25 mm cada (marca Starrett, modelo 666M-25) foram utilizadas com a finalidade de delimitar a região de contato da linha de pesca com os vidros e para facilitar a compressão do vidro através do uso grampos. A Figura 2.6 apresenta a visão superior da placa de vidro inferior exemplificando o uso da linha de pesca e dos calibradores de folga.

Foram utilizados quinze grampos de fixação do tipo C de cada lado da célula e mais três na parte traseira para fixar os vidros. Para que o vidro não fosse diretamente pressionado pelos grampos e para que a pressão fosse uniformemente distribuída ao longo da célula, foram colocadas tiras de borracha natural sobre as bordas do vidro superior e tiras de calibradores de folga sobre a borracha. Processo análogo foi feito no vidro inferior. Esse efeito “sanduíche” é ilustrado nas Figs. 2.7 e 2.8.

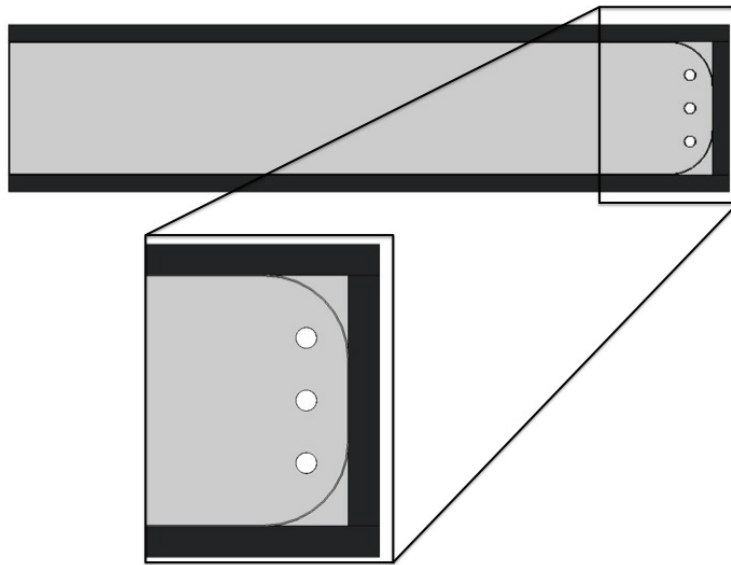


Figura 2.6: Visão superior da placa de vidro inferior

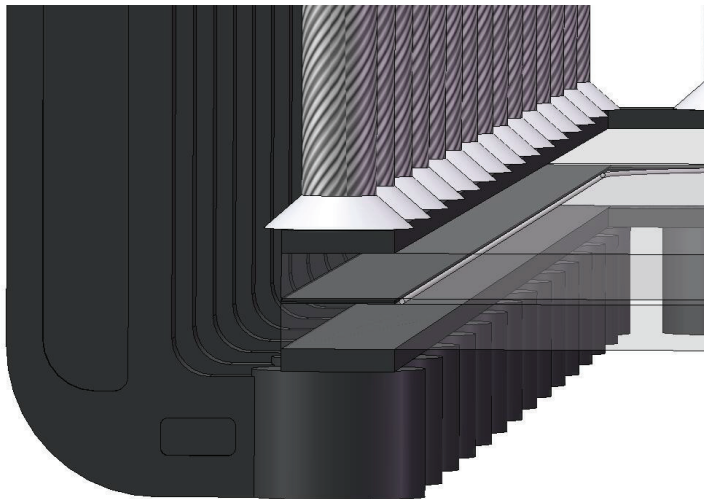


Figura 2.7: Efeito “sanduiche”

A placa de vidro inferior possui três furos, cada um com 10 mm de diâmetro. Esses furos foram feitos para permitir a injeção dos fluidos deslocados e deslocadores de forma independente. Os furos das extremidades são utilizados para preenchimento da célula com o fluido deslocado e o furo central, para injeção do fluido deslocador. A Figura 2.9 apresenta os detalhes de um suporte feito em alumínio e colado com silicone sobre os furos da placa de vidro para fixação das válvulas agulha que foram utilizadas para permitir o escoamento e sua eventual interrupção.

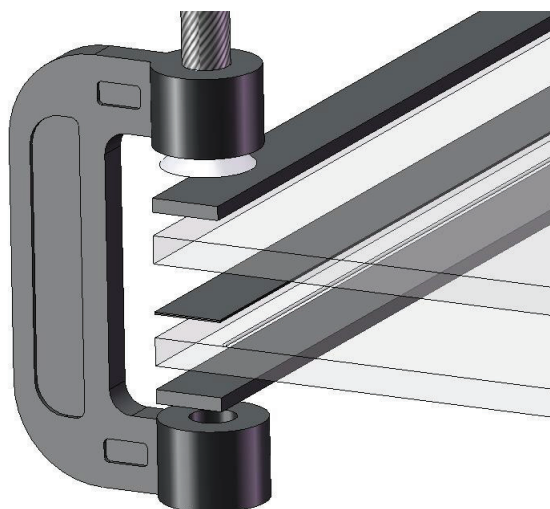


Figura 2.8: Vista explodida da fixação das placas de vidro

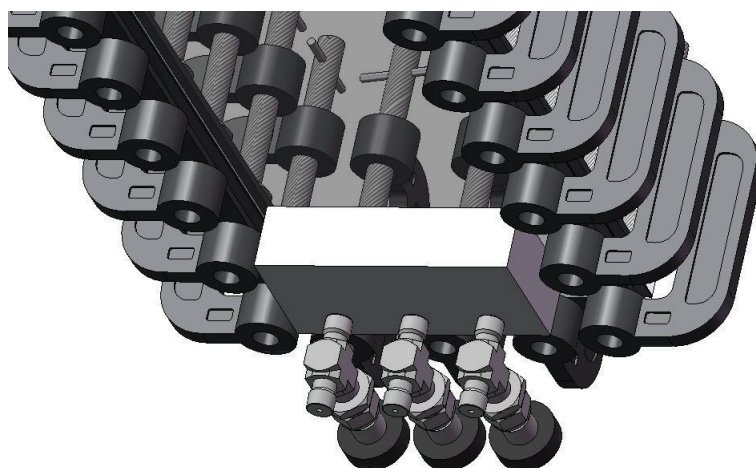


Figura 2.9: Peça colada sobre o vidro para permitir a injeção de fluidos

2.2.2

Negatoscópio

Foi utilizado um negatoscópio tomográfico ¹ da marca Blue Equipamentos sob a célula de Hele-Shaw para iluminar a seção de testes e facilitar a visualização do escoamento. Como a célula é pesada e a chapa de acrílico do negatoscópio é muito fina, foi construído um suporte para sustentar a célula. Esse suporte possui pés (marca Vibra-Stop, modelo Micro III) que são fundamentais para o nivelamento do célula, além de atuarem como amortecedores e antiderrapantes. A distância entre a célula e o negatoscópio é de 54 mm.

2.2.3

Câmera fotográfica

Uma câmera fotográfica (marca Canon, modelo EOS40D) com uma lente EFS 18-55mm foi utilizada para capturar imagens contínuas da interface durante o escoamento. Em função das dimensões da bancada experimental, um suporte foi feito para viabilizar a distância focal necessária e permitir um posicionamento fixo da câmera fotográfica em relação à bancada. Deste modo, as fotos podem ser obtidas sempre com o mesmo posicionamento e o tratamento das imagens torna-se mais fácil.

A Tabela 2.2 apresenta os principais parâmetros definidos na câmera fotográfica. As fotos foram obtidas no modo monocromático (fotos em preto e branco) e com as luzes do Laboratório apagadas para evitar a presença de sombras e reflexos. Para cada teste, foi tirada uma sequência de três fotos por segundo capturando imagens da interface desde o início do escoamento até o final da célula. Foi definido o parâmetro *Al Focus AF* o qual é um controle automático de foco indicado para objetos em movimento.

Tabela 2.2: Parâmetros da câmera fotográfica

Parâmetro	Valor
Velocidade Iso	1000
Velocidade do obturador	640
Abertura	5,6

A Figura 2.10 ilustra a visão obtida através da câmera fotográfica sem utilizar o efeito de zoom. Como o objetivo é focar a imagem na região iluminada da célula de Hele-Shaw, a região de entrada e saída dos fluidos na célula não são visualizadas nas imagens apresentadas no capítulo 4. O retângulo vermelho

¹ Aparelho dotado de iluminação especial para perfeita observação dos negativos ou chapas radiográficas.

apresenta a seção de análise, onde o lado esquerdo é a região de entrada e consequentemente a saída dos fluidos ocorre no lado direito.

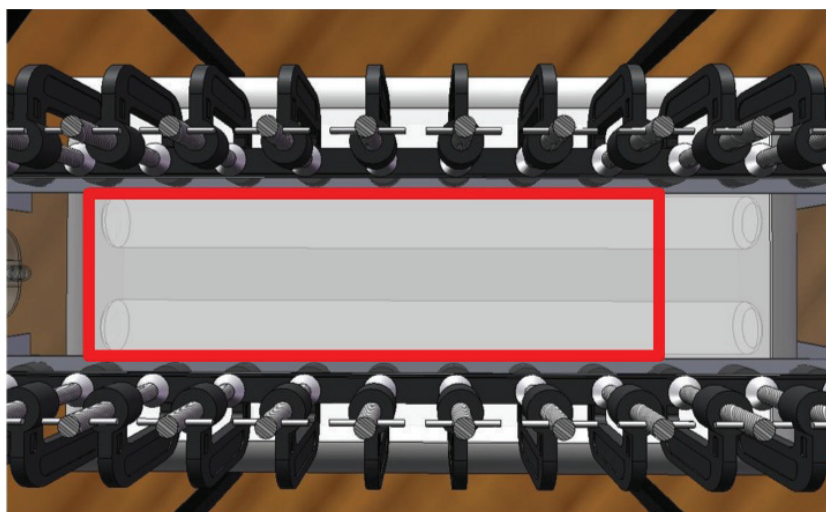


Figura 2.10: Definição da área de corte das imagens em relação a célula de Hele-Shaw

2.2.4 Bombas

Para que o maior número possível de vazões de deslocamento pudessem ser investigados, foram utilizadas três bombas: uma peristáltica e duas helicoidais.

Para os casos investigados de menor vazão, foi utilizada uma bomba da marca Cole-Parmer, modelo Masterflex KH 07553-80 (1-100 rpm) com dois diferentes diâmetros de mangueira *double-y*: 1,6mm (modelo L/S 14) e 7,9mm (modelo L/S 18). As mangueiras *double-y* e um *pulse dampener* foram utilizados para minimizar os efeitos de pulsação do escoamento. Vale ressaltar que essas bombas são indicadas para deslocamento de fluidos pouco viscosos.

Pulse dampener é simplesmente um reservatório, na forma de um semi círculo, posicionado após a saída da bomba para armazenar o fluido de trabalho. Como o ar é muito mais compressível que os líquidos, o fluido com pulsação entra no reservatório e o ar preso acima do fluido absorve a pulsação suavizando a saída do fluido.

Para os casos de deslocamento em vazões maiores e com maiores viscosidades, foram utilizadas bombas helicoidais da marca Netzsch nos modelos Nemo NM015BY02S12B e NM011BY02S12B. Para que uma maior faixa de vazões e viscosidades pudessem ser alcançadas, as bombas foram especificadas para bombear água e uma garrafa de transferência da marca Labconte foi uti-

lizada. Para controlar a vazão dessas bombas, foram utilizados inversores de frequência (marca WEG, modelo CFW-08).

A Figura 2.11 ilustra uma garrafa de transferência que é um sistema cilindro-pistão vedado com uma tampa rosqueada superior e uma inferior. No centro das tampas há uma válvula agulha para permitir a entrada e saída de fluidos. O pistão possui dois *o-rings* para vedação. A garrafa é feita de acrílico e o pistão de teflon para evitar qualquer tipo de corrosão ou deterioração da garrafa.

Inicialmente, o pistão é posicionado na parte inferior do cilindro e a parte superior é preenchida com o fluido de interesse. Assim, água é injetada pela entrada inferior da garrafa e o pistão se desloca conseqüentemente deslocando o fluido de interesse. Assim, para cada fluido utilizado uma calibração da bomba deve ser feita em função da variação da perda de carga. As calibrações das bombas utilizadas são apresentadas no anexo D. Um suporte foi projetado para manter as garrafas na vertical para facilitar o manuseio e otimizar o espaço da bancada.

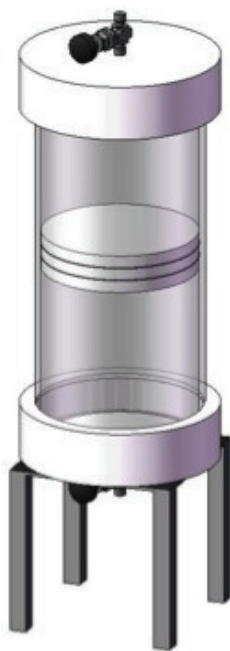


Figura 2.11: Garrafa de transferência

2.2.5

Controle de temperatura do fluido newtoniano

A goma xantana é um fluido que não é muito sensível à variação de temperatura ao contrário do óleo mineral. Inicialmente, para controlar a temperatura do fluido newtoniano tentou-se manter a temperatura da sala

constante. Entretanto a variação de 4°C , típica no Laboratório, foi o suficiente para não permitir a repetibilidade nos dados da calibração da bomba. Assim, foi desenvolvido um projeto para estabilizar a temperatura do óleo presente no reservatório.

Conforme pode ser visto na Fig. 2.12, foi utilizado um banho térmico (marca Nova Ética, modelo 521-3DE) com circulação externa, uma mangueira de silicone de 10 mm de diâmetro e uma serpentina de aço inox com 6,5 mm de diâmetro externo e 4,5 mm de diâmetro interno.

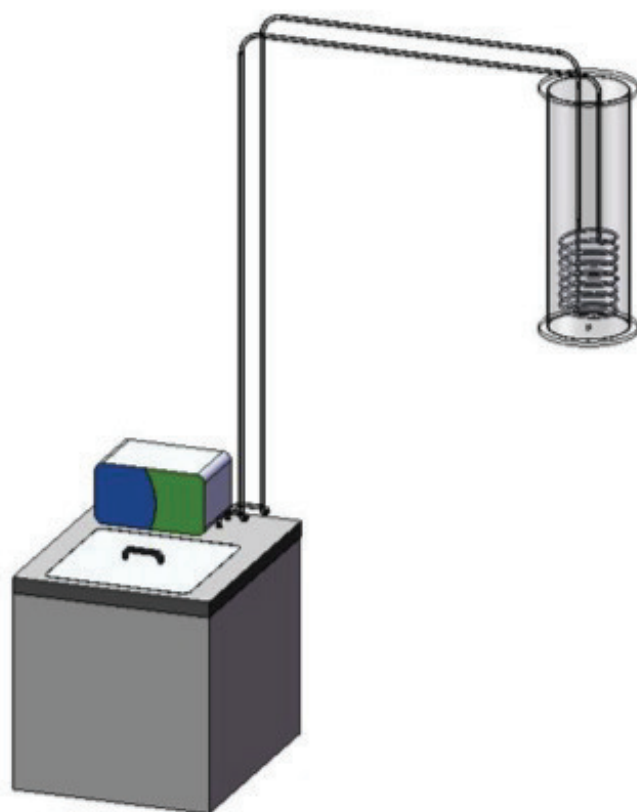


Figura 2.12: Sistema de controle de temperatura do fluido newtoniano

A serpentina foi posicionada dentro do reservatório de óleo de modo que ficasse completamente coberta. Um suporte de acrílico foi colocado no fundo do reservatório para apoiar a serpentina a fim de evitar que seu peso fosse responsável por vazamentos na conexão com a mangueira de silicone. Essa mangueira possui 4m de comprimento. O banho térmico possui uma vazão de 10 l/min para proporcionar estabilidade na temperatura. A temperatura foi ajustada em $24,7^{\circ}\text{C}$ para garantir que a temperatura medida dentro do reservatório fosse de 25°C . Durante a realização dos testes, um termopar foi posicionado dentro do reservatório para verificar se a temperatura estava constante em 25°C .

2.3

Procedimento experimental

Para a execução dos testes, foi utilizada uma garrafa de transferência e uma bomba helicoidal para preencher a célula de Hele-Shaw com o fluido não newtoniano. A bomba peristáltica não pode ser empregada nessa etapa, pois a goma xantana possui viscosidade muito alta a baixas taxas de deformação. Assim, a goma xantana foi bombeada com vazão de 108 g/min que é a menor vazão possível (em função das especificações da bomba e do inversor de frequência). Vale ressaltar que é importante trabalhar com vazões baixas para evitar a formação de bolhas. A goma xantana já retém muitas bolhas durante o preparo e o aumento da velocidade de deslocamento geralmente implica em geração de bolhas o que prejudica a visualização.

Após a célula ser preenchida com goma xantana através do uso das válvulas laterais (Fig. 2.9), a célula deve ser nivelada para garantir um escoamento uniforme e sem efeitos de gravidade.

O próximo passo consiste em ligar o negatoscópio e posicionar a câmera fotográfica no suporte. A câmera deve estar perfeitamente alinhada com a célula para que haja concordância entre os testes. Em seguida, define-se a vazão de injeção do óleo mineral e abre-se a válvula central para permitir o deslocamento. Para deslocar o óleo, qualquer uma das bombas mencionadas anteriormente podem ser utilizadas. Simultaneamente, uma sequência de imagens é obtida. É importante capturar imagens da célula preenchida apenas com o fluido deslocado para que o tratamento de imagens torne-se viável.

Após cada teste, a célula é lavada. Para garantir uma repetibilidade qualitativa dos resultados, cada teste em uma determinada vazão é repetido pelo menos três vezes.