

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ENGENHARIA DE ENERGIA

**ESTUDO EXPERIMENTAL DE ESCOAMENTOS DE FLUIDOS VISCOSOS ATRAVÉS
DE MODELOS POROSOS EM UMA CÉLULA HELE-SHAW**

por

Marcos Pereira Braz

Monografia apresentada à Comissão de Graduação do Curso de Engenharia de Energia da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Bacharel em Engenharia de Energia.

Porto Alegre, abril de 2022



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
ENGENHARIA DE ENERGIA

ESTUDO EXPERIMENTAL DE ESCOAMENTOS DE FLUIDOS VISCOSOS
ATRAVÉS DE MODELOS POROSOS EM UMA CÉLULA HELE-SHAW

por

Marcos Pereira Braz

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
BACHAREL EM ENGENHARIA DE ENERGIA.
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Flavio Antônio Becon Lemos
Coordenador do Curso de Engenharia de Energia

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Henrique Fiorot

Banca examinadora:

Prof. Dr. Cirilo Seppi Bresolin – DEMEC / UFRGS

Prof. L. Enrique Ortiz Vidal, Ph.D. – Instituto de Ciências da
Engenharia, Universidade de O'Higgins (UOH)

Prof. Dr. Paulo Smith Schneider – DEMEC / UFRGS

Porto Alegre, abril de 2022.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, professor Guilherme Fiorot, pela oportunidade desde a iniciação científica em 2019 até a conclusão deste trabalho. Obrigado por todo apoio, reconhecimento e auxílio na minha formação acadêmica, profissional e pessoal. Também pelo financiamento para este projeto do próprio bolso por acreditar em mim e no desenvolvimento da pesquisa dentro da universidade.

Às agências de fomento FAURGS e CNPq (através do programa Pibic) que financiaram este trabalho e o desenvolvimento de materiais para o laboratório e futuros alunos.

Aos laboratórios que me auxiliaram na construção, principalmente ao REOSUL, em que este trabalho foi desenvolvido durante sua formação. Ao LETA, principalmente ao Batista, que me auxiliou diversas vezes com ideias, dicas, soluções e operação de equipamentos para que este trabalho acontecesse. Ao LC pelo apoio na montagem e ao LIFEELAB pelo auxílio nos cortes em acrílico.

Ao meu amigo Dr. Júlio Santos-Terra pelas infinitas revisões, dicas, apoio moral e emocional ao longo deste trabalho, de toda graduação e da vida.

Aos meus pais por toda confiança, amor, afeto e apoio incondicional. Por acreditarem em mim e na educação minha e do meu irmão sem medir esforços para formar grandes pessoas. Agradeço também ao meu irmão, meus avós e toda minha família por tudo que já fizeram por mim e por criar um ambiente agradável para o desenvolvimento.

À minha namorada Júlia pelo amor, companheirismo e compreensão ao longo deste tempo. Por me fazer acreditar em um futuro bom e próspero e me fazer sonhar e olhar para frente.

Aos meus companheiros de pandemia de quatro patas Hermosa, Amora e Faisca, que alegraram minha vida em Palmares do Sul.

Aos meus amigos Otávio, Vitória, Nonino e Taís (também o já citado Júlio) por me inserirem em um ótimo rolê desde São Simão até Porto Alegre.

Aos meus amigos da universidade, desde a UFSC como o Rodolfo e o Léo até os da UFRGS como o Roberto, o Beirão, o Gus, a Ying, o Artur e o Alexandre por terem me carregado em diversas disciplinas.

Aos amigos de Renova Jr., Juliano (também parceiro do ciclismo), Thiago, Robinho, Danton e outros, que me ajudaram a crescer como profissional. Também ao Noob Gabriel, ao Vitor, ao Jeff, o Yan, o Deboquinha e outros por sempre estarem disponíveis no Discord para jogar alguma coisa.

BRAZ, M. P. Estudo experimental de escoamentos de fluidos viscosos através de modelos porosos em uma célula Hele-Shaw. 2022. 28 f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia de Energia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

RESUMO

A dinâmica dos fluidos em meios porosos é um tema de ampla importância em diferentes contextos industriais, especialmente na obtenção de petróleo, porém diferentes aspectos desse tema ainda são pouco conhecidos. O objetivo deste trabalho de conclusão de curso é analisar escoamentos de fluidos viscosos através de meios porosos de maneira experimental para entender a relação entre a permeabilidade e a geometria de um meio poroso. Montou-se uma bancada experimental para análises de escoamentos com baixo número de Reynolds, utilizando uma aproximação bidimensional (escoamento entre duas placas planas - célula Hele-Shaw) com obstáculos de diferentes geometrias que aproximam meios porosos. Para os ensaios utiliza-se diferentes vazões de água como fluido escoante para obtenção da variação de pressão entre entrada e saída da célula.

PALAVRAS-CHAVE: Fluidos Viscosos, Meios Porosos, Permeabilidade.

BRAZ, M. P. Experimental study of viscous flow through porous model in a Hele-Shaw cell. 2022.
28 p. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia de Energia) – Escola de Engenharia,
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

ABSTRACT

Fluid dynamics in porous media is a subject of great importance in different industrial contexts, especially in oil production, but different aspects of this subject are still poorly known. The objective of this undergraduate thesis is to analyze viscous fluid flow through porous media experimentally in order to understand the relation between the permeability and geometric features of a porous media. An experimental bench was set up for the analysis of low Reynolds number flows, using a two-dimensional approach (flow between two flat plates - Hele-Shaw cell) with obstacles of different geometries that approximate porous media. For the tests, different flow rates of water are used as a flowing fluid to obtain the pressure variation between the cell inlet and outlet.

KEYWORDS: Viscous Fluid, Porous Media, Permeability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Distribuições homogênea e heterogênea de sedimentos em uma camada de rocha formando diferentes tipos de meios porosos.....	2
Figura 2.2 – Reograma relacionando taxa de deformação com tensão de cisalhamento para fluidos de Bingham, Herschel-Bulkley, lei da potência e newtonianos.....	3
Figura 2.3 – Reograma para diferentes diluições de Carbopol®, água e glicerina, obtido de maneira experimental, apresentando tensão limite de escoamento, consistência e índice de escoamento.	4
Figura 3.1 – Esquema de montagem para bancada experimental.....	6
Figura 3.2 – Bomba seringa utilizada nos experimentos.....	7
Figura 3.3 – Esquema apresentando os passos para execução do experimento de calibração da bomba seringa.	8
Figura 3.4 – Esquema com passos para medir a máxima pressão suportada pela bomba seringa.	9
Figura 3.5 – Esquema utilizado na célula Hele-Shaw mostrando a região útil de escoamento considerada.	10
Figura 3.6 – Geometrias utilizadas para avaliação de escoamento, sendo a geometria do tipo 1 com círculos alinhados e a geometria do tipo 2 com círculos desalinhados. As duas geometrias apresentam a mesma porosidade e tamanho característico das partículas.....	12
Figura 3.7 – Passos para montagem da bancada experimental.....	13
Figura 3.8 – Passos de operação da bancada de testes.	13
Figura 4.1 – Curva de calibração para a bomba seringa, apresentando a equação obtida e o valor de R^2 . .	15
Figura 4.2 – Curva de operação utilizada para aplicação no sistema de controle, sendo válida de 10 a 1000 passos por segundo com sua equação.....	16
Figura 4.3 – Relação entre pressão máxima suportada pela bomba seringa e vazão volumétrica a partir de testes realizados.....	16
Figura 4.4 – Relação entre pressão medida no manômetro com o número do teste realizado cronologicamente. Cada separação equivale a um reabastecimento da bomba seringa.....	17
Figura 4.5 – Efeitos da variação da vazão volumétrica na pressão ao longo do escoamento para célula Hele-Shaw sem obstáculos.....	17
Figura 4.6 – Efeitos da variação da vazão volumétrica na pressão ao longo do escoamento para célula Hele-Shaw com obstáculos do tipo 1.	18
Figura 4.7 – Efeitos da variação da vazão volumétrica na pressão ao longo do escoamento para célula Hele-Shaw com obstáculos do tipo 2.	19
Figura 4.8 – Permeabilidade medida para cada tipo de meio poroso estudado.....	20

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Propriedade físico-químicas da água.....	10
Tabela 3.2 – Propriedade físico-químicas do glicerol.....	11
Tabela 3.3 – Características geométricas das geometrias estudadas no problema.....	12
Tabela 4.1 – Média, incerteza padrão, inclinação da reta e R^2 para escoamento sem obstáculos em célula Hele-Shaw. Dados referentes a relação da vazão volumétrica em m^3/s e a variação de pressão ao longo da célula em Pa.....	18
Tabela 4.2 – Média, incerteza padrão, inclinação da reta e R^2 para escoamento com obstáculos tipo 1 em célula Hele-Shaw. Dados referentes a relação da vazão volumétrica em m^3/s e a variação de pressão ao longo da célula em Pa.....	18
Tabela 4.3 – Média, incerteza padrão, inclinação da reta e R^2 para escoamento com obstáculos tipo 2 em célula Hele-Shaw. Dados referentes a relação da vazão volumétrica em m^3/s e a variação de pressão ao longo da célula em Pa.....	19
Tabela 4.4 – Variação de permeabilidade para os métodos estudados e sua variação em relação ao escoamento sem obstáculos.....	20

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

BKC	Blake-Kozeny-Carman
LED	Do inglês <i>light-emitting diode</i>
NEMA	Do inglês <i>National Electrical Manufacturers Association</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

b	Distância entre placas planas em célula Hele-Shaw [m]
C'	Coefficiente de tortuosidade de um meio poroso [adimensional]
D_p	Diâmetro equivalente da partícula [m]
g	Aceleração da gravidade [m/s^2]
k	Parâmetro de consistência [Pa s]
K	Coefficiente de permeabilidade do meio [m^2]
K_*	Coefficiente de permeabilidade do meio [m^2]
L	Comprimento do meio poroso [m]
L_e	Distância média percorrida pelo fluido em um meio poroso [m]
m	Massa medida na balança [g]
n	Índice de escoamento [adimensional]
q	Velocidade superficial do fluido [m/s]
R	Rotação do motor de passo [passos/s]
$R_{máx}$	Rotação máxima do motor de passo [passos/min]
R_{min}	Rotação mínima do motor de passo [passos/s]
v	Vazão volumétrica da bomba seringa [mm^3/s]
V_{pot}	Valor lido pelo Arduino para o potenciômetro [adimensional]
V_t	Volume total do meio poroso [m^3]
V_v	Volume livre do meio poroso [m^3]
$\dot{\gamma}$	Taxa de deformação [s^{-1}]
ΔP	Variação da pressão [Pa]
Δt	Tempo de operação da bomba [s]
μ	Viscosidade [Pa s]
ρ_A	Massa específica aparente do meio poroso [kg/m^3]
ρ_m	Massa específica do fluido manométrico [kg/m^3]
ρ_M	Massa específica do material do meio poroso [kg/m^3]
ρ_f	Massa específica do fluido de calibração [g/mm^3]
τ_{xy}	Tensão de cisalhamento [s^{-1}]
τ_y	Tensão limite de escoamento [s^{-1}]
ϕ	Porosidade do meio [adimensional]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	1
2.1	Meios porosos.....	2
2.2	Porosidade	2
2.3	Reologia.....	3
2.4	Escoamento de fluidos em meios porosos.....	4
3	METODOLOGIA DESENVOLVIDA.....	6
3.1	Descrição do experimento	6
3.2	Bomba seringa.....	7
3.3	Célula Hele-Shaw	9
3.4	Outros materiais.....	10
3.5	Fluidos utilizados.....	10
3.6	Geometria dos obstáculos.....	11
3.7	Execução do experimento.....	12
4	Resultados.....	13
4.1	Relato técnico do processo de montagem da bancada.....	13
4.2	Calibração.....	15
4.3	Escoamento livre na célula Hele-Shaw	17
4.4	Escoamento em célula com obstáculos	18
4.5	Análise de permeabilidade.....	19
5	Conclusões.....	21

1 INTRODUÇÃO

Entender o comportamento da permeabilidade oferecida por um meio poroso ao escoamento é uma questão de grande interesse, uma vez que escoamentos sob estas condições estão presentes em diferentes processos incluindo os de filtração, injeção de polímeros, escoamentos de óleo, deslizamento de terras, erupções vulcânicas e outros. Além dos processos e fenômenos citados anteriormente, uma das maiores aplicações industriais e comerciais nesse contexto é a exploração de petróleo, onde fluidos utilizados para perfuração ou injetados com finalidade de controlar o aproveitamento de um poço, entram em contato com a rocha reservatório, que é um meio poroso (CHRISTOPHER; MIDDLEMAN, 1965).

Dentro de um poço de extração de petróleo, o óleo é encontrado enclausurado entre gás e água, preenchendo os poros da rocha. Inicialmente, a energia armazenada no reservatório expulsa os fluidos lá encontrados. O processo de extração é complementado a partir da extração secundária, que consiste no controle da pressão no reservatório a partir da injeção de diferentes fluidos que preenchem o meio e ocupam o lugar do óleo, expulsando o mesmo. A viscosidade dos fluidos injetados para realizar esse controle pode facilitar ou dificultar este aumento de pressão em diferentes regiões da rocha devido às diferentes porosidades em um mesmo reservatório, apresentando uma relação entre a permeabilidade do meio e a viscosidade do fluido (ZORZETTO, 1991).

Com maiores exigências ambientais e limitação de recursos fósseis, empresas petrolíferas procuram aprimorar os métodos para realização da extração secundária com finalidade de obter um maior aproveitamento de um mesmo poço de petróleo. As técnicas atuais para atingir este objetivo consomem muita energia e levam a tópicos sensíveis politicamente e ambientalmente. Entender a relação entre o fluido escoante e o meio poroso é uma questão fundamental para maximizar a extração através da escolha de características do fluido injetado (MUGGERIDGE et al., 2014).

As principais variáveis que alteram a permeabilidade do meio são a porosidade do meio e a reologia do fluido escoante, como demonstrado por Savins (1969). A porosidade pode ser obtida a partir da geometria do meio, fazendo uma relação entre espaços livres e fixos (BEAR, 1972). Um fluido viscoso é caracterizado por apresentar uma taxa de deformidade ao ser submetido a uma tensão de cisalhamento. Esta relação pode ser linear para os fluidos newtonianos como a água, ou mais complexa no caso dos fluidos lei de potência, Bingham ou Herschel-Bulkley, exemplificados por lamas e géis (IRGENS, 2014).

Na interação entre um fluido newtoniano e uma matriz porosa a permeabilidade depende apenas de características do meio, como sua porosidade, diâmetro equivalente das partículas e sua tortuosidade (SOCHI, 2010). Quando o fluido através do meio poroso tem uma reologia mais complexa, a permeabilidade começa a apresentar relações com características do fluido, como o índice de escoamento e a tensão limite de escoamento. Esta característica é apresentada para fluidos lei de potência por Christopher e Middleman (1965) e para fluidos Herschel-Bulkley por Chevalier et al. (2013).

O objetivo deste trabalho é montar uma bancada experimental para estudar o comportamento de fluidos viscosos ao atravessar uma matriz porosa, observando a influência de diferentes características geométricas do meio na permeabilidade. Estuda-se este comportamento para diferentes vazões volumétricas de fluidos e diferentes modelos que aproximam meios porosos.

A bancada experimental foi desenvolvida para se aproximar do problema a partir de uma geometria bidimensional. Para escoamentos com baixo número de Reynolds são utilizadas duas placas planas com um pequeno espaço entre elas, como proposto por Hele-Shaw (1898). Nesta placa também são adicionados obstáculos para o escoamento, como geometrias que aproximam um meio poroso. Uma bomba seringa injeta o fluido na célula Hele-Shaw e com o auxílio de marcadores de escoamento são visualizados os caminhos preferenciais do escoamento. Utilizando uma ferramenta de processamento digital de imagens é possível adquirir características do escoamento como a variação de pressão e a permeabilidade do meio em função de diferentes interações entre fluidos e geometrias.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este trabalho tem como interesse estudar a interação entre meios porosos e fluidos-tipo de maneira experimental. Nesse contexto, é necessário apresentar as definições de meios porosos, porosidade, reologia, e apresentar a interação entre estas características, para fluidos newtonianos ou não newtonianos. Essa seção aborda estes temas, com objetivo de contextualizar o estudo.

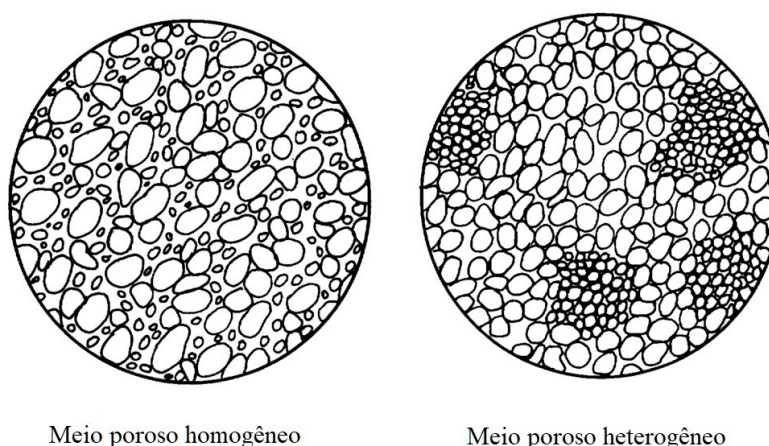
2.1 Meios porosos

A mais básica definição possível para um meio poroso é que ele seria um sólido com “buracos”. Esta definição é muito abrangente, uma vez que sólidos com um único furo, como uma casca, não são considerados como um meio poroso. Então, adiciona-se a esta definição a necessidade de que estes poros estejam conectados entre si e que existam caminhos contínuos para o fluido (BEAR, 1972).

Um fator importante na caracterização de um meio poroso é sua permeabilidade, que pode variar em função da pressão aplicada e do fluido escoante em uma mesma geometria. Um meio poroso pode ser também impermeável, quando não há conexão entre os poros (DULLIEN, 1979).

A homogeneidade da matriz porosa também é um fator característico para diferentes meios porosos. Um meio pode ser um homogêneo, onde analisando o meio de maneira macroscópica podemos observar a distribuição de diferentes tamanhos de partículas de maneira homogênea, ou heterogêneo, onde há uma separação mais caracterizada entre diferentes tamanhos nos obstáculos (DULLIEN, 1979). A Figura 2.1 demonstra esta diferença entre os dois tipos.

Figura 2.1 – Distribuições homogênea e heterogênea de sedimentos em uma camada de rocha formando diferentes tipos de meios porosos.



Fonte: Adaptado de MORROW, 1971.

Na Figura 2.1 estão apresentados meios porosos homogêneos e heterogêneos, onde ambos apresentam diferentes tamanhos de partículas constituintes, o meio homogêneo apresenta essa diferença de tamanhos espalhada de maneira uniforme, sem formar grupos de partículas pequenas e grupos de partículas grandes, oposto do que acontece no meio heterogêneo.

2.2 Porosidade

A porosidade é a característica mais relevante de um meio poroso. Uma das maneiras de definir a porosidade para qualquer sólido é através da fração do volume dos espaços vazios em relação ao volume total do meio como apresentado na Equação 2.1 (BEAR; ZASLAVSKY; IRMAY, 1968).

$$\phi = \frac{V_V}{V_T} \quad (2.1)$$

onde ϕ é a porosidade do meio adimensional, V_V é o volume dos espaços vazios em m^3 e V_T é o volume total do meio em m^3 , sendo a soma de espaços vazios e fixos.

Esta característica também pode ser obtida utilizando o método óptico, onde a relação entre espaços vazios e o espaço total pode ser observada em um corte do material. Também há o método da massa específica que utiliza a massa específica do material que compõe o meio poroso e a massa específica aparente do meio, a partir da Equação 2.2 (SCHEIDEGGER, 1974).

$$\phi = 1 - \frac{\rho_A}{\rho_M} \quad (2.2)$$

onde, ρ_A é a massa específica aparente do meio poroso em kg/m^3 e ρ_M é a massa específica do material em kg/m^3 .

2.3 Reologia

Reologia foi um termo cunhado pelo Professor Eugene Bingham e definido como o estudo da deformação e escoamento da matéria. Esta definição foi aceita e difundida a partir da fundação da Sociedade Americana de Reologia (do inglês, *American Society of Rheology*) (IRGENS, 2014).

Os fluidos podem ser classificados por sua relação entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação. Quando em condições viscométricas e de cisalhamento simples, pode-se identificar algumas relações simplificadas entre ambas as grandezas. Quando esta relação é linear o fluido é considerado um fluido newtoniano e sua equação constitutiva está apresentada na Equação 2.3. Quando a tensão de cisalhamento é dada por uma potência da taxa de deformação temos um fluido lei de potência, caracterizado pela Equação 2.4. Com características semelhantes aos fluidos newtonianos, porém com uma tensão de cisalhamento inicial, temos os fluidos de Bingham, com equação constitutiva apresentada na Equação 2.5. Da mesma forma, os fluidos de Hershel-Bulkley se comportam como os lei de potência, mas com uma tensão limite de escoamento, apresentado na Equação 2.6 (SOCHI, 2010).

$$\tau_{xy} = \mu \dot{\gamma} \quad (2.3)$$

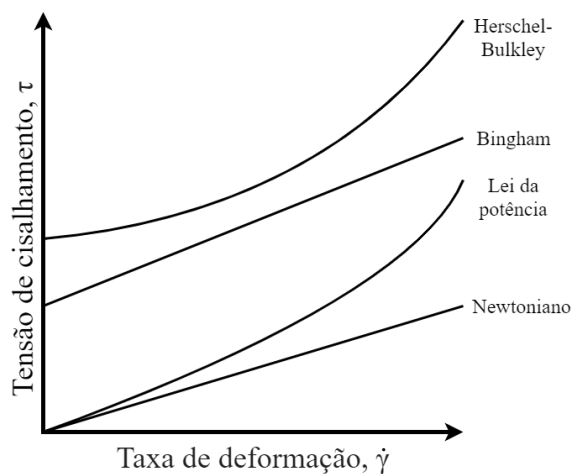
$$\tau_{xy} = k \dot{\gamma}^n \quad (2.4)$$

$$\tau_{xy} = \tau_y + \mu_B \dot{\gamma} \quad (2.5)$$

$$\tau_{xy} = \tau_y + k \dot{\gamma}^n \quad (2.6)$$

onde τ_y é a tensão limite de escoamento para o fluido com a unidade sendo s^{-1} , τ_{xy} é a tensão de cisalhamento do fluido sendo dado em s^{-1} , μ a viscosidade do fluido em Pa s , n é o índice de escoamento adimensional, k é o parâmetro de consistência em Pa s^n , $\dot{\gamma}$ é a taxa de deformação em Pa e μ_B é a consistência para o fluido de Bingham expressa em Pa s . A maneira gráfica de relacionar taxa de deformação e tensão de cisalhamento para diferentes fluidos é com um reograma, como apresentado na Figura 2.2.

Figura 2.2 – Reograma relacionando taxa de deformação com tensão de cisalhamento para fluidos de Bingham, Herschel-Bulkley, lei da potência e newtonianos.

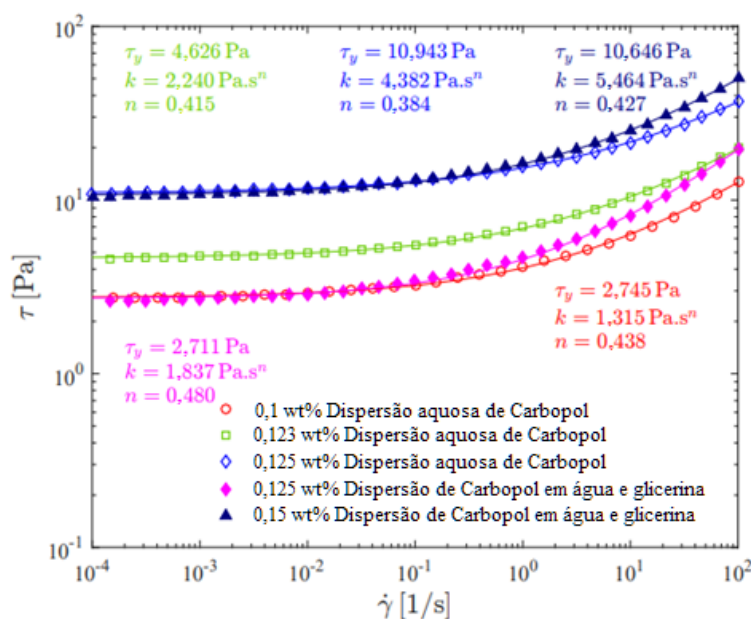


Fonte: AUTOR.

A Figura 2.2 apresenta graficamente as relações para cada um dos tipos de fluidos citados anteriormente, onde para os fluidos newtonianos e de Bingham pode-se observar a linearidade apresentadas nas Equações 2.3 e 2.5, porém com um fator de tensão limite de escoamento somado no caso dos fluidos de Bingham. De maneira semelhante o comportamento dos fluidos lei de potência e de Herschel-Bulkley seguem as Equações 2.4 e 2.6, onde os fluidos de Herschel-Bulkley apresentam uma tensão limite de escoamento.

Para obtenção de fluidos de fácil utilização experimental com diferentes características reológicas, é possível utilizar diluições de Carbopol® em água e glicerina, podendo controlar o índice de escoamento, a consistência e a tensão limite de escoamento do fluido resultante (VARGES et al., 2019). A Figura 2.3 apresenta resultados obtidos por Varges e colaboradores (2019) para diferentes diluições de Carbopol®.

Figura 2.3 – Reograma para diferentes diluições de Carbopol®, água e glicerina, obtido de maneira experimental, apresentando tensão limite de escoamento, consistência e índice de escoamento.



Fonte: VARGES et al., 2019.

Pode-se observar que variações na dispersão aquosa alteram a tensão limite de escoamento e o índice de escoamento do fluido. Quando se aumenta a dispersão a tensão limite de escoamento aumenta e o índice de escoamento do fluido diminui. Quando glicerina é adicionada à mistura há uma redução na tensão limite de escoamento, porém uma aumento mais significativo no índice de escoamento (VARGES et al., 2019).

2.4 Escoamento de fluidos em meios porosos

Os modelos mais aceitos para aproximação do comportamento do escoamento de fluidos em meios porosos parte da lei de Darcy, apresentada na Equação 2.7. A forma original desta equação é para fluidos newtonianos e foi obtida de maneira empírica a partir das equações de Navier-Stokes por homogeneização. A partir deste modelo é possível utilizar diferentes características do meio para obtenção da permeabilidade (K) (SOCHI, 2010).

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu q}{K} \quad (2.7)$$

onde ΔP é a variação da pressão piezométrica em pascal, L é o comprimento do meio poroso em m, q é a velocidade superficial do fluido em m/s e K é a permeabilidade do meio em m².

Uma consideração importante para utilização destes modelos é o número de Reynolds do escoamento, apresentado na Equação 2.8 (KEMBLAWSKI; MICHNIEWICZ, 1979). Para escoamentos com número de Reynolds muito menores que um, o modelo mais utilizado para aproximação do escoamento de um fluido newtoniano em meio poroso é o modelo de Blake-Kozeny-Carman (BKC), apresentado na Equação 2.9. Este modelo é obtido por uma relação semiempírica e apresenta melhores resultados para escoamentos não-newtonianos com baixo número de Reynolds (SOCHI, 2010).

$$Re = \frac{\rho v_0 D_p}{\mu(1 - \phi)} \quad (2.8)$$

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{72C' \mu q(1 - \phi)^2}{D_p^2 \phi^3} \quad (2.9)$$

onde D_p é o diâmetro equivalente da partícula em metros e C' é o coeficiente de tortuosidade adimensional.

Quando comparado com lei de Darcy, percebe-se que a permeabilidade do meio, apresentada na Equação 2.10, não depende de características do fluido escoante, apenas do meio poroso.

$$K = \frac{D_p^2 \phi^3}{72C'(1 - \phi)^2} \quad (2.10)$$

O coeficiente de tortuosidade pode ser definido como a razão entre a distância média percorrida por um fluido e a mínima distância percorrida pelo fluido. Desta maneira a tortuosidade de um meio poroso quando o escoamento é de um fluido newtoniano pode ser definida a partir da Equação 2.11 (BEAR, 1972).

$$C' = \frac{L_e}{L} \quad (2.11)$$

onde L_e é a distância média percorrida pelo fluido em m. Muitas vezes este fator é obtido experimentalmente, como para o caso de sedimentos compactados (do inglês, *packed beds*), onde o foi obtido experimentalmente o coeficiente de 2,083, obtendo a equação de Blake-Kozeny apresentada na Equação 2.12 (CHRISTOPHER; MIDDLEMAN, 1965).

$$K = \frac{D_p^2 \phi^3}{150(1 - \phi)^2} \quad (2.12)$$

Para escoamentos de fluidos newtonianos em um meio poroso composto por esferas alinhadas utiliza-se a Equação 2.13 (JACKSON; JAMES, 1986).

$$K = \frac{D_p^2}{2\phi} (-\ln \phi - 1,476 + 2\phi - 1,774\phi^2 + 4,076\phi^2) \quad (2.13)$$

Já para esferas escalonadas, a equação que aproxima a permeabilidade de um meio poroso atravessado por um fluido newtoniano a partir dos resultados das teorias de Carman-Kozeny é a apresentada na Equação 2.14 (SAHRAOUI; KAVIANY, 1992).

$$K = D_p^2 0,01515 \pi \left(\frac{\phi^{5,1}}{1 - \phi} \right) \quad (2.14)$$

Para fluidos não newtonianos, a relação de permeabilidade muda, apresentando uma dependência não só em características do meio, mas também em características do fluido (FIOROT; MACIEL, 2019).

A permeabilidade do sistema quando um fluido lei de potência atravessa um meio poroso foi modelada de maneira analítica por Christopher e Middleman (1965) e está apresentada na Equação 2.15.

$$K = \frac{6}{25} \left(\frac{n\phi}{3n+1} \right) \left(\frac{D_p\phi}{3(1-\phi)} \right)^{n+1} \quad (2.15)$$

Neste caso, a permeabilidade depende do índice de escoamento (n) que é uma característica dos fluidos lei de potência. Além disso, depende também de características do meio como a porosidade (ϕ) e o diâmetro equivalente das partículas (D_p).

Para fluidos de Herschel-Bulkley um modelo bastante aceito é o de Chevalier e colaboradores (2013) que obteve uma variação lei de Darcy de maneira experimental, analisando a variação de pressão do escoamento relacionada com a vazão. A Equação 2.16 apresenta a lei de Darcy modificada para fluidos de Herschel-Bulkley (CHEVALIER et al., 2013) (FIOROT; MACIEL, 2019).

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\tau_y}{K_*} + \frac{k}{K} q^n \quad (2.16)$$

onde K_* é o coeficiente plástico de permeabilidade do meio.

Para estes fluidos também são utilizadas características do fluido escoante para obtenção dos coeficientes de permeabilidade, assim como na obtenção da lei de Darcy modificada.

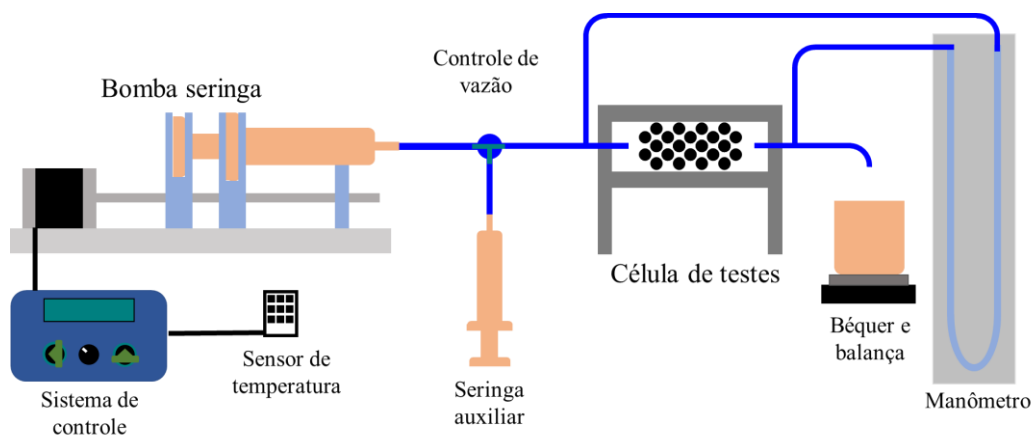
3 METODOLOGIA DESENVOLVIDA

Esta seção apresenta as considerações, materiais e procedimentos utilizados para a realização dos experimentos, assim como o método utilizado para a obtenção dos resultados.

3.1 Descrição do experimento

A Figura 3.1 apresenta o esquema simplificado para a montagem da bancada experimental. Esta bancada foi constituída por uma bomba seringa e seu sistema de controle, que permitiram regular a vazão de fluido no sistema e controle da temperatura ambiente como uma variável de controle. Uma célula de testes com obstáculos equivalentes a um meio poroso é utilizada como base de testes conectada a um manômetro em U, que afere os valores de diferencial de pressão entre a entrada e a saída da célula. Além disso, utilizou-se um béquer de vidro em uma balança para estimar a vazão mássica e conferir se a concordância está de acordo com os valores utilizados no sistema de controle. Uma seringa auxiliar também é utilizada para controlar a entrada de fluido e evitar a formação de bolhas antes da realização de testes na bancada, enquanto o experimento é preparado. A Figura 3.1 apresenta o esquema montado na bancada experimental.

Figura 3.1 – Esquema de montagem para bancada experimental.



Fonte: AUTOR.

3.2 Bomba seringa

A bomba seringa, apresentada na Figura 3.2, foi montada utilizando uma seringa de cinquenta mililitros acoplada a peças de acrílico, um sistema de eixos e rolamentos e um fuso com castanha para transformar a rotação de um motor de passo em movimento linear. O sistema de controle para esta bomba foi criado utilizando um microcontrolador Arduino e um controlador de motor de passo para adquirir dados de temperatura ambiente e mostrar a vazão volumétrica aplicada pela bomba.

Figura 3.2 – Bomba seringa utilizada nos experimentos.



Fonte: AUTOR.

Esta bomba seringa possui um controle regulável de velocidade e vazão volumétrica para o fluido escoante devido a características de dois equipamentos utilizados para sua construção. O motor de passo NEMA 17 (do inglês, *National Electrical Manufacturers Association*) utilizado apresenta a capacidade de separar uma rotação completa em 200 passos, neste caso cada passo do motor equivale a $1,8^\circ$ de rotação e seu controle é realizado utilizando o número de passos por segundo. Acoplado ao motor, um conjunto composto por um fuso trapezoidal e uma castanha transforma o movimento de rotação em um movimento linear de compressão. Este conjunto tem um passo de 2 mm, ou seja, para cada rotação do motor o êmbolo da seringa se desloca 2 mm. Combinando estas duas características, a mínima velocidade possível para o êmbolo da seringa seria de 0,001 mm/s.

A calibração da bomba seringa foi realizada em termos de vazão mássica, relacionando a vazão mássica da bomba seringa com o número de passos dados pelo motor. O número de passos do motor é definido pela leitura analógica de um potenciômetro utilizado no sistema de controle de bomba. Para a calibração da bomba são registrados o valor obtido no potenciômetro, que define a velocidade de acionamento do motor de passo, o tempo de escoamento e a diferença de massa registrada no escoamento.

A partir da leitura analógica da tensão no potenciômetro obtém-se um valor entre 0 e 5 V, sendo este valor lido pelo sistema Arduino como um número entre 0 e 1023. Este valor então é convertido entre a velocidade mínima e máxima do motor, em passos por segundo, correspondendo 0 à velocidade mínima e 1023 à velocidade máxima. A Equação 3.1 apresenta a relação entre o valor lido pelo potenciômetro e o valor utilizado para alimentar o número de passos.

$$R = \frac{V_{pot}}{1023}(R_{m\acute{a}x} - R_{min}) + R_{min} \quad (3.1)$$

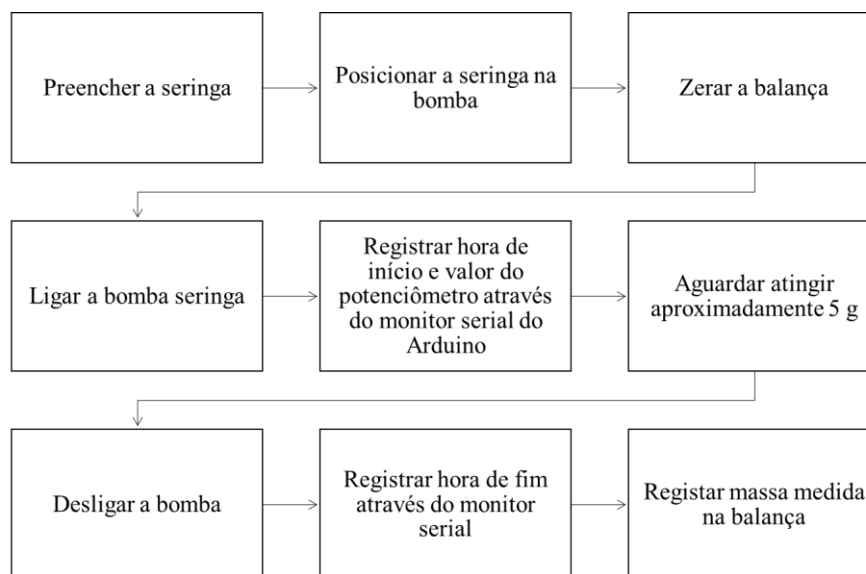
onde R é a rotação do motor em passos por segundo, V_{pot} é o valor lido pelo Arduino para o potenciômetro entre 0 e 1023, $R_{m\acute{a}x}$ é a rotação máxima do motor em passos por segundo e R_{min} é a rotação mínima do motor em passos por segundo.

Para obter a vazão mássica da bomba seringa se utiliza uma balança e o contador de tempo do monitor serial do Arduino a partir da Equação 3.2.

$$v = \frac{m}{\Delta t \rho_f} \quad (3.2)$$

onde v é a vazão volumétrica em milímetros cúbicos por segundo, m é a massa medida na balança, Δt é o tempo de operação da bomba e ρ_f é a massa específica do fluido de calibração em gramas por milímetro cúbico. O procedimento de calibração segue os passos elucidados no esquema da Figura 3.3.

Figura 3.3 – Esquema apresentando os passos para execução do experimento de calibração da bomba seringa.



Fonte: AUTOR.

Faz-se a operação da bomba seringa por diversas vezes, adquirindo os dados de tempo, massa e rotação do motor de passo. A partir destes valores é possível obter uma curva de calibração e uma curva de operação relacionando os dados de rotação do motor de passo e vazão volumétrica da bomba.

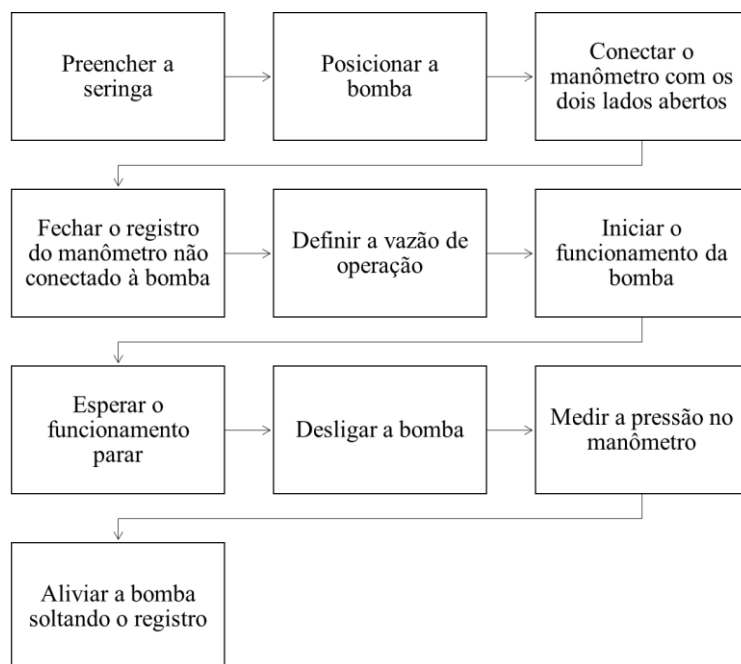
Também é realizado o teste de máxima pressão na bomba seringa utilizando um manômetro em U, relacionando a vazão na qual a bomba seringa para de operar com a máxima vazão possível para o escoamento. Esta medida é realizada para diferentes vazões volumétricas para que possa ser relacionada com a pressão máxima suportada pela seringa. A Equação 3.3 apresenta a relação entre a altura superior e inferior no manômetro e a pressão suportada na bomba seringa.

$$\Delta P = \rho_m g \Delta H \quad (3.3)$$

onde ΔP é a diferença de pressão entre a entrada e a saída do manômetro em Pa, ρ_m é a massa específica do fluido manométrico em m^3/kg , g é a aceleração da gravidade em m/s^2 e ΔH é a variação de altura de fluido para os dois lados do manômetro em m.

A medida é realizada com uma das pontas do manômetro fechada e a operação da bomba comprimindo o fluido até o motor de passo apresentar uma falha. A sequência de operação para este teste é a apresentada na Figura 3.4.

Figura 3.4 – Esquema com passos para medir a máxima pressão suportada pela bomba seringa.



Fonte: AUTOR.

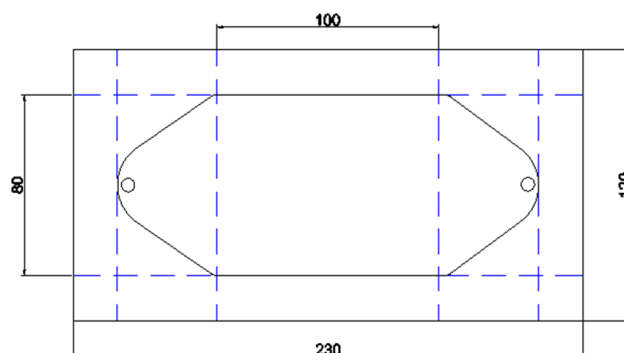
Os dados utilizados neste procedimento são os de vazão da bomba seringa, pressão de falha da bomba e quando é realizado o preenchimento da seringa. Isto permite analisar a pressão máxima de operação da bomba e registro de qual a faixa de preenchimento da bomba é favorável para diferentes pressões.

3.3 Célula Hele-Shaw

Uma célula Hele-Shaw é uma aproximação bidimensional para escoamentos com baixo número de Reynolds. Esta aproximação é feita utilizando duas placas planas de material translúcido com um espaço uniforme entre elas e muito menor que seu comprimento e largura, permitindo a visualização do corte em um escoamento (HELE-SHAW, 1898).

A célula Hele-Shaw utilizada foi composta por três placas com dois milímetros de espessura de acrílico translúcido, sendo a placa do meio utilizada como borda para o escoamento e onde os obstáculos são inseridos. As dimensões da região útil do sistema foram criadas como dez centímetros por oito centímetros. Nesta região útil foram colocados obstáculos criando um meio poroso equivalente. Alterando a geometria dos obstáculos foram testados meios porosos com diferentes características. A Figura 3.5 apresenta o esquema da célula utilizada, com a entrada e saída do fluido apresentadas pelos círculos, e sua região útil e dimensões apresentadas nas cotas.

Figura 3.5 – Esquema utilizado na célula Hele-Shaw mostrando a região útil de escoamento considerada.



Fonte: AUTOR.

Esta célula foi construída com objetivo de facilitar a visualização interna do escoamento para realização de análises por meio de imagem. Com uma célula translúcida é possível adicionar marcadores de escoamento para observar linhas de corrente e velocidade em diferentes pontos do meio poroso levando a identificação de possíveis zonas de recirculação ou zonas mortas no escoamento.

3.4 Outros materiais

O manômetro em U utilizado é montado a partir de dois tubos de vidro de 1 m de comprimento ligados por uma mangueira acoplado a dois conectores para mangueira pneumática de 6 mm com engate rápido. Utiliza-se uma régua milimétrica por trás dos tubos de vidro para realizar as medições de nível de fluido manométrico. O fluido manométrico utilizado foi a água. A pressão entre as duas pontas do manômetro pode ser obtida a partir da Equação 3.3 com a variação de altura de fluido manométrico entre os tubos. A incerteza de medição associada ao manômetro é de 1 mm devido à precisão da régua utilizada.

A balança utilizada é uma balança digital que registra valores de 0,01 g até 200 g. A incerteza associada a balança é de 0,01 g.

As mangueiras flexíveis utilizadas são mangueiras pneumáticas de 6 mm. Todos os conectores utilizados são compatíveis com as mangueiras. Estes conectores são de engate rápido e têm diversas utilizações como bifurcar escoamentos com o formato T e ligar as mangueiras à célula. Outras mangueiras flexíveis foram utilizadas como conectores onde não foi possível utilizar um conector adequado. Utiliza-se uma mangueira mais grossa por fora da mangueira pneumática para fazer conexões ou ligar as seringas no escoamento.

A seringa utilizada para a bomba seringa é uma seringa de vidro de 60 ml e a seringa utilizada como seringa auxiliar é uma seringa descartável plástica também de 60 ml.

3.5 Fluidos utilizados

O fluido utilizado para os experimentos de teste foi a água. A água é uma das moléculas mais abundantes nos seres vivos. A molécula de água é composta por dois átomos de hidrogênio e um átomo de oxigênio, formando ligações de alta polaridade. Além das funções biológicas, a água tem inúmeras aplicações na indústria, tendo em vista que é um solvente com capacidade de dissolver tanto substâncias com características polares quanto apolares (NELSON; COX, 2017). Também existem aplicações na geração de energia elétrica em usinas hidrelétricas, responsáveis por 12,6% da produção de energia interna no Brasil (EPE, 2021).

Tabela 3.1 – Propriedade físico-químicas da água.

Propriedade	Valor
Massa específica a 25 °C	995,0 kg/m ³
Ponto de fusão	0 °C
Ponto de ebulição	100 °C
Tensão superficial a 20 °C	71,97 mN/m

Condutividade térmica	80,2 W/(m·K)
Viscosidade a 25°C	0,89E-3 Pa·s

Fonte: “water (CHEBI:15377)”, (2022).

O fluido utilizado para a calibração da bomba seringa e foi o glicerol. É um fluido atóxico amplamente utilizado na indústria alimentícia com a função de espessante, estabilizante, emulsificante, dentre outros. Outra aplicação industrial é como lubrificante para equipamentos das indústrias alimentícia e farmacêutica. Além disso, é muito utilizado na área biológica como por exemplo na confecção de géis de eletroforese (MORTENSEN et al., 2017).

Tabela 3.2 – Propriedade físico-químicas do glicerol.

Propriedade	Valor
Massa específica a 25 °C	1265,3 kg/m ³
Ponto de fusão	18 °C
Ponto de ebulição	290 °C
Tensão superficial a 20 °C	63,4 mN/m
Condutividade térmica	0,28 W/(m·K)
Viscosidade a 20 °C	1,412 Pa·s

Fonte: “glycerol (CHEBI:17754)”, (2022).

3.6 Geometria dos obstáculos

Define-se a geometrias que aproximam um meio poroso observando as características úteis para a compreensão do problema. São avaliadas características do meio poroso, como a sua porosidade, dada a partir da área livre para o escoamento e da área total e o diâmetro equivalente das partículas que constituem o meio poroso. Estes dados são utilizados para obtenção de características que definem o escoamento, como o número de Reynolds para o escoamento e a permeabilidade do meio. As geometrias propostas são compostas por círculos alinhados de maneiras diferentes que aproximam meios porosos com diferentes permeabilidades.

Fez-se uma análise utilizando uma célula sem obstáculos que aproximam um meio poroso. Esta célula é montada como uma referência de escoamento na célula Hele-Shaw. Esta referência é importante para montar uma base de comparação para os outros experimentos. A célula base de escoamento é composta por duas placas de acrílico apenas com as restrições apresentadas na Figura 3.5.

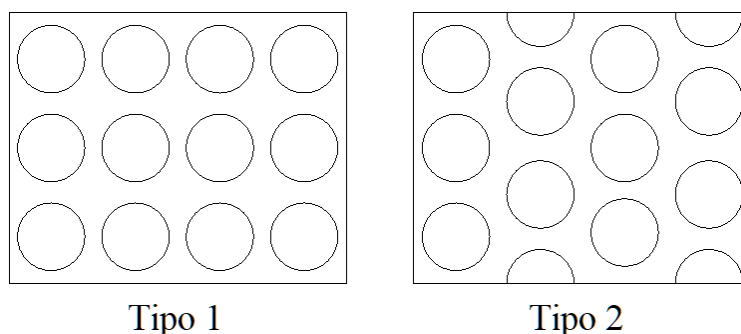
$$\frac{q}{\Delta P} = \frac{K}{L\mu} \quad (3.4)$$

A Equação 3.4 apresenta a relação entre a razão de vazão volumétrica por variação de pressão ao longo da célula ($q/\Delta P$) e a permeabilidade do meio poroso (K). Como o comprimento do meio poroso (L) e a viscosidade do fluido (μ) são constantes é possível dizer que a permeabilidade do meio é diretamente proporcional à vazão volumétrica pela variação de pressão no meio poroso quando avaliado para um fluido newtoniano.

A variável estudada é a posição das partículas, referente à matriz porosa, mostrando a mesma porosidade e tamanho característico para partícula e apresentando diferentes permeabilidades.

Figura 3.6 apresenta quatro geometrias utilizadas para os obstáculos do meio poroso. As geometrias são compostas por círculos referentes à matriz porosa, aproximando partículas. A variável estudada é a posição das partículas, referente à matriz porosa, mostrando a mesma porosidade e tamanho característico para partícula e apresentando diferentes permeabilidades.

Figura 3.6 – Geometrias utilizadas para avaliação de escoamento, sendo a geometria do tipo 1 com círculos alinhados e a geometria do tipo 2 com círculos desalinhados. As duas geometrias apresentam a mesma porosidade e tamanho característico das partículas.



Fonte: AUTOR.

Os obstáculos utilizados são os apresentados na Figura 3.6 que aproximam meios porosos, sendo o tipo 1 composto por círculos alinhados e o tipo 2 por círculos intercalados em relação à direção de escoamento. Com isso espera-se que o meio caminho médio do tipo 2 seja maior que o do tipo 1 sendo diretamente proporcional ao coeficiente de tortuosidade do meio e inversamente proporcional à permeabilidade. Espera-se que a razão entre vazão volumétrica e variação de pressão ao longo do escoamento para o tipo 1 seja maior que para o tipo 2 e que ambas sejam menores que para o escoamento base.

Para cada uma dessas geometrias foi medida sua porosidade de maneira geométrica, uma vez que a altura na célula é constante. Sendo assim foi possível calcular a porosidade a partir da razão entre as áreas livre e sólida. As características para cada uma das geometrias estão apresentadas na Tabela 3.3. Além da porosidade também é mostrado o tamanho característico da partícula.

Como a permeabilidade do meio poroso para fluidos newtonianos depende apenas de características geométricas do meio, pode-se aplicar os valores de porosidade e tamanho característico das partículas para obtenção da permeabilidade tanto na Equação 2.13 para a geometria do tipo 1 e na Equação 2.14 para a geometria do tipo 2.

Tabela 3.3 – Características geométricas das geometrias estudadas no problema.

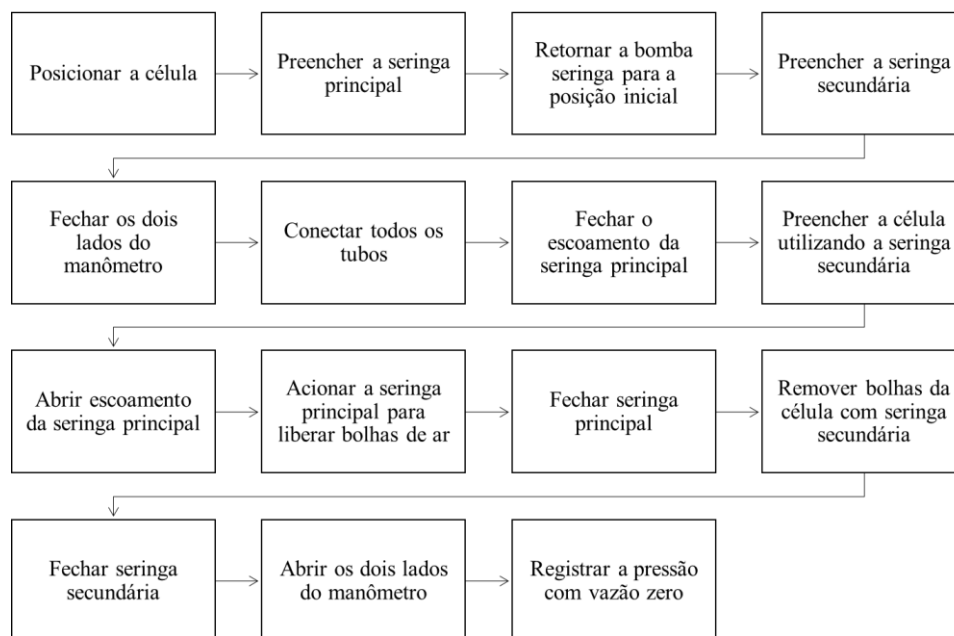
Geometria	Área livre [m ²]	Área fixa [m ²]	Porosidade	Tamanho característico da partícula [m]	Permeabilidade estimada [D]
Tipo 1	4,23E-3	3,77E-3	0,529	20E-3	3,26E-04
Tipo 2	4,23E-3	3,77E-3	0,529	20E-3	1,57E-06

Fonte: AUTOR.

3.7 Execução do experimento

Para a realização do experimento de registro de pressão para escoamentos com uma célula Hele-Shaw foram efetuados os seguintes passos de montagem da bancada experimental:

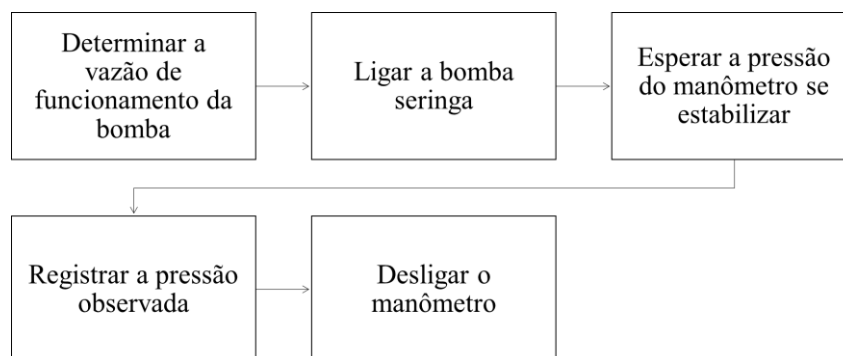
Figura 3.7 – Passos para montagem da bancada experimental.



Fonte: AUTOR.

Após os passos de montagem da bancada são realizados os testes a partir dos passos apresentados na Figura 3.8 para realizar as medições de vazão mássica e pressão ao longo da célula.

Figura 3.8 – Passos de operação da bancada de testes.



Fonte: AUTOR.

Estes passos são repetidos até o esvaziamento da seringa principal, registrando os valores de vazão volumétrica e pressão entre entrada e saída da célula Hele-Shaw. Com estes dados é possível fazer uma análise entre a vazão volumétrica na bomba seringa e a variação de pressão entre a entrada e a saída da célula.

Esse teste é repetido três vezes para diferentes geometrias, sendo o primeiro teste realizado com a geometria base, apenas a célula Hele-Shaw sem a presença de obstáculo e nas outras vezes com obstáculos equivalentes às geometrias apresentadas na Figura 3.6 para o tipo 1 e tipo 2 de escoamento.

4 RESULTADOS

4.1 Relato técnico do processo de montagem da bancada

A bancada foi concebida a partir da montagem e operação da bomba seringa, utilizando uma metodologia iterativa de testes com diferentes propostas, de forma que permitisse a escolha da montagem

mais adequada. A primeira montagem foi realizada utilizando uma seringa plástica e um formato de encaixe capaz de operar com seringas de diversas capacidades. Esta montagem levou a uma baixa confiabilidade devido ao fato de que o eixo da seringa sofria desalinhamento em relação ao eixo do motor de acordo com seu movimento longitudinal. Resolveu-se este problema modificando as partes de suporte da seringa cortadas em acrílico por partes específicas apenas para um tipo de seringa. Outro problema encontrado neste processo foi a rápida degradação da seringa de plástico, o que ocasionava um aumento do atrito entre o embolo e as paredes internas da seringa, comprometendo a confiabilidade sobre a curva de calibração da bomba em um intervalo de tempo curto. Este problema levou a uma baixa vida útil para a seringa, sendo necessária a calibração da bomba diversas vezes. Por isso se fez necessária a substituição da seringa plástica por uma seringa de vidro. A primeira versão da bomba seringa está apresentada na Figura A.1.

O sistema de controle foi inicialmente pensado utilizando: uma chave *on/off* para decidir a direção de acionamento; um potenciômetro para definir a vazão volumétrica na bancada; e um botão para ligar e desligar. Em uma segunda etapa construtiva, o botão foi substituído por uma chave de liga e desliga e a função de expansão da seringa foi retirada, aplicando apenas uma função de retorno com velocidade constante próxima da velocidade máxima do motor. O sistema de controle utilizado atualmente é o apresentado na Figura A.2.

A montagem da célula Hele-Shaw foi feita utilizando três placas de acrílico cortadas de acordo com o meio poroso simulado. Uma das placas funciona como base para o escoamento, na qual uma placa central com cortes simulando um meio poroso é colada, enquanto a placa superior é utilizada para entrada e saída dos fluidos de testes, operando como uma tampa removível, facilitando a limpeza e manutenção da célula. Uma das tentativas de junção foi a soldagem química do acrílico entre as três placas utilizadas, porém a dificuldade da junção da tampa conduz à danificação da placa de acrílico superior, o que compromete a visualização do escoamento. Outro problema encontrado neste teste foi a impossibilidade de se efetuar a limpeza do fluido escoante dentro da célula com facilidade, uma vez que são criadas zonas de recirculação e de difícil acesso dentro do meio poroso. Com a opção por uma tampa removível foram encontrados problemas relacionados a vazamentos nas placas. A primeira tentativa foi unir as placas a partir de prendedores de nylon, que foram substituídos por parafusos distribuídos uniformemente na lateral da célula. As tentativas de montagem da célula Hele-Shaw estão apresentadas na Figura A.4.

Finalmente, em sua configuração final, a montagem empregou perfis de alumínio para prender as laterais da placa, o que proporciona uma distribuição uniforme das tensões e reduz os vazamentos, enquanto as pontas são presas por prendedores. Nesta montagem final os problemas relacionados a vazamentos para os fluidos estudados foram reduzidos. Deve-se salientar que as conexões de entrada e saída do fluido para a célula também apresentaram problemas de vazamento que foram minimizados utilizando conectores de mangueiras pneumáticas unidos a furos no acrílico e vedados utilizando fita veda rosca. A montagem final de célula está apresentada na Figura A.5.

Pensando na visualização e na identificação de propriedades do escoamento através da aquisição de imagens, é de alta importância uma boa iluminação sem ofuscações, constante e contrastante com os marcadores de fluido. Inicialmente, utilizou-se uma iluminação comum sendo uma lâmpada fluorescente posicionada imediatamente acima da célula. Neste caso, sendo esta uma fonte pontual, difusa, de alta intensidade, proporcionou reflexos na superfície da célula feita de acrílico, que impediram a visualização clara do escoamento. Em seguida, utilizou-se de uma fita LED (do inglês *light-emitting diode*) em uma caixa fechada com a saída luminosa condicionada por um tecido claro operando como difusor de luz. Esta configuração luminosa foi posicionada por baixo do escoamento, o que reduziu as ofuscações na geometria de testes, e proporcionou uma reprodução nítida da imagem do escoamento. Entretanto, nesta configuração, o problema encontrado se deu por uma questão construtiva, no qual os fios do tecido interferiam na qualidade da imagem, apresentando linhas de tonalidade significativamente discrepantes. A partir desta experiência, a decisão final foi a de empregar uma luminária LED quadrada, que foi capaz de iluminar o escoamento por baixo de maneira clara e uniforme, sem ofuscações e sem interferir na qualidade da imagem. Este recurso não foi utilizado no atual trabalho, mas foi considerado para futuras análises na bancada utilizando marcadores de escoamento para aplicar metodologias de processamento digital de imagem.

Com relação à operação da bancada, problemas relacionados ao fluido escoante e às pressões presentes no escoamento foram encontrados. Utilizando glicerina pura como fluido escoante, a pressão no escoamento foi mais alta que o suportado pela bomba seringa. Os problemas encontrados foram tanto na

força do motor de passo quanto na estrutura da bomba seringa em acrílico que apresentava deformações por conta da elevada resistência ao movimento oferecida pelo fluido viscoso. Estas limitações impossibilitaram os testes utilizando fluidos com alta viscosidade que oferecem um elevado gradiente de pressão dentro da célula. Este problema foi resolvido alterando o fluido escoante para o fluido menos viscoso (água). Esta decisão para diminuição da pressão de escoamento foi baseada na Lei de Darcy, apresentada na Equação 2.7, onde a relação entre a viscosidade do fluido e o gradiente de pressão apresenta uma relação proporcional.

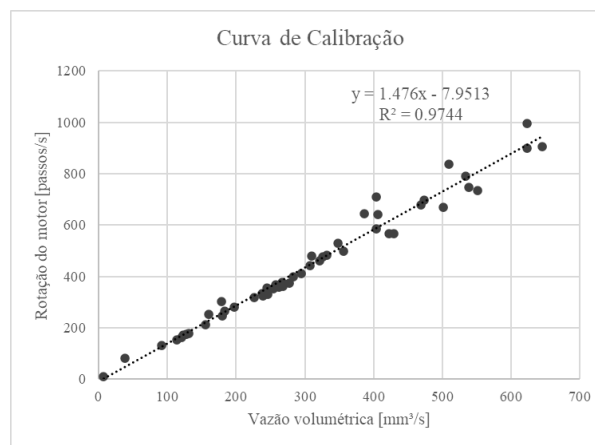
Problemas relacionados ao surgimento de bolhas no escoamento também ocorreram devido à dificuldade de operar a bomba seringa de maneira contínua durante o tempo necessário para preencher totalmente a célula e realizar os testes de escoamento. Como solução para este problema, foi utilizada uma seringa auxiliar junto com uma válvula para os três sentidos de escoamento. Assim, a seringa auxiliar é utilizada para injetar líquido na célula e eliminar as bolhas antes do início do escoamento controlado. Utiliza-se também um registro na conexão com o reservatório final do escoamento com o objetivo de controlar o escoamento para que este não aconteça antes da bomba seringa entrar em operação.

O APÊNDICE A apresenta imagens do projeto durante o período em que foi desenvolvido, incluindo diversas iterações de montagem citadas a cima. Este apêndice apresenta uma linha do tempo de montagem e operação da bancada experimental.

4.2 Calibração

A calibração da bomba seringa foi realizada em um único dia, utilizando como fluido a glicerina. Foram obtidos 50 valores em testes na bancada com objetivo de conseguir uma boa curva de calibração capaz de reproduzir o valor real de vazão mássica na bancada. Com isso a curva de calibração para a bomba seringa está apresentada na Figura 4.1. Esta curva relaciona o valor de vazão volumétrica para o escoamento com a rotação do motor. Com isso foi possível obter um R^2 de 0,974.

Figura 4.1 – Curva de calibração para a bomba seringa, apresentando a equação obtida e o valor de R^2 .

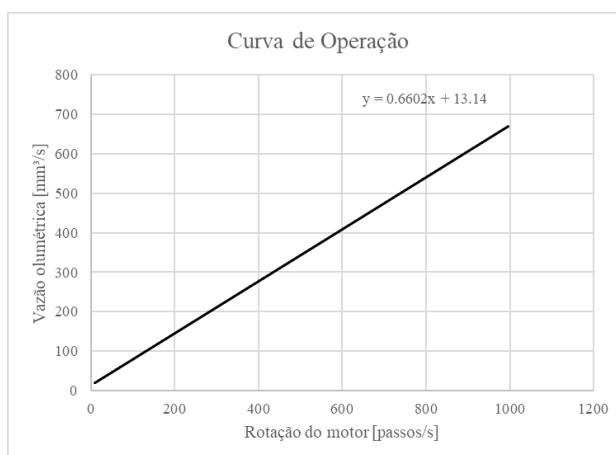


Fonte: AUTOR.

A partir dos resultados obtidos na curva de calibração foi possível obter a curva de operação para a bomba, utilizando-se como faixa de operação o intervalo entre 10 e 1000 passos por segundo, equivalente ao intervalo de vazão entre 19,77 a 673,34 mm³/s. A equação que modela a curva de operação e foi aplicada no sistema de controle para apresentar o valor de vazão volumétrica correto está apresentada na Equação 4.1 e a curva de operação está apresentada na Figura 4.2.

$$q = 0,6602 R + 13,14 \quad (4.1)$$

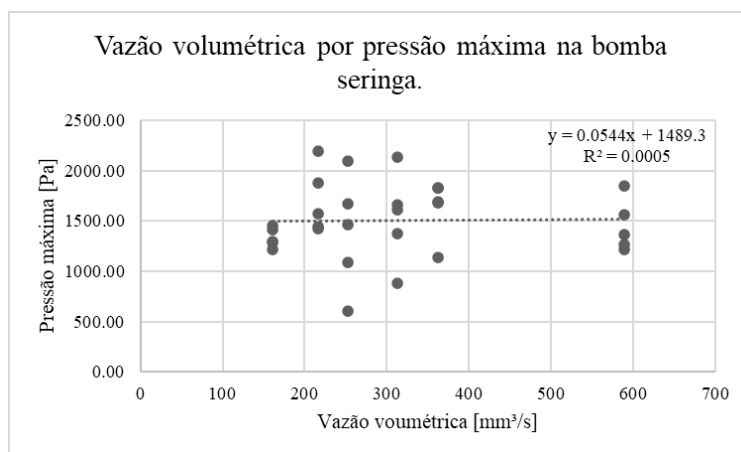
Figura 4.2 – Curva de operação utilizada para aplicação no sistema de controle, sendo válida de 10 a 1000 passos por segundo com sua equação.



Fonte: AUTOR.

Com a vazão volumétrica da bomba seringa calibrada foi possível seguir nos próximos experimentos de bancada. Buscando identificar problemas relacionados à pressão máxima de operação da bomba seringa quando diferentes fluidos são utilizados, foi necessário realizar testes de máxima pressão de operação. A Figura 4.3 mostra os resultados deste teste e a relação de vazão mássica com pressão máxima exercida pela bomba. A partir dos valores de vazão mássica e máxima pressão apresentado pela bomba, não foi possível notar uma tendência de pressão. Espera-se que a máxima pressão seja constante devido às características construtivas da bomba, mas os valores de pressão registrados tiveram uma média de 1506 Pa com um desvio padrão de 358 Pa. Como esperado, a inclinação da reta foi de 0,054, próxima de zero, indicando pouca influência da vazão sobre a pressão máxima, porém apresentou R^2 de 0,0005, o que aponta baixa correlação entre os parâmetros.

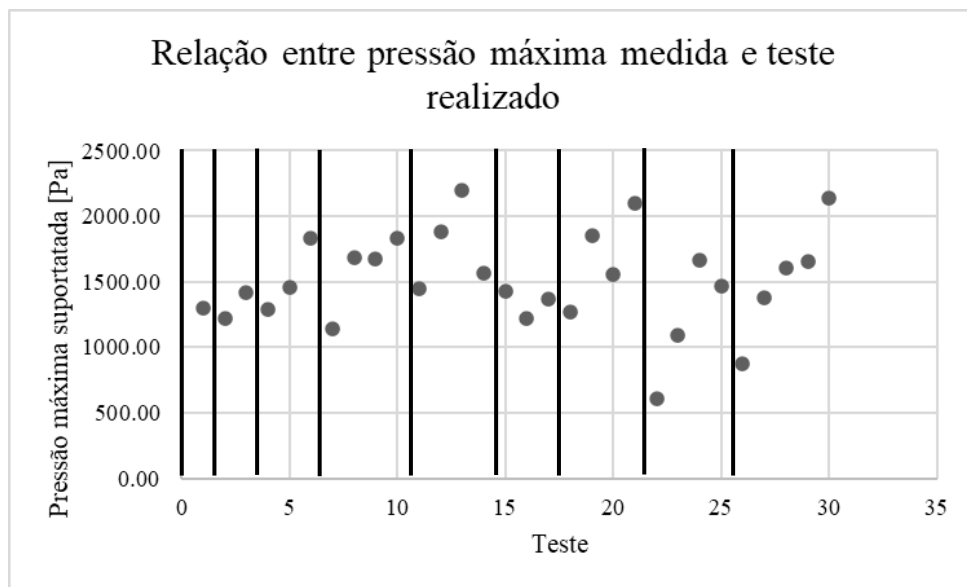
Figura 4.3 – Relação entre pressão máxima suportada pela bomba seringa e vazão volumétrica a partir de testes realizados.



Fonte: AUTOR.

Pode-se considerar como limite de faixa de operação o menor valor de pressão medido neste ensaio, que é de 605 Pa. Mas também é importante notar no gráfico apresentado na Figura 4.4 os pontos de testes realizados em ordem cronológica com marcadores de momentos em que a seringa foi encheda até 60 ml. A partir destes resultados é possível observar que há também uma limitação física na operação da seringa para volumes grandes. O nível de líquido na bomba influencia na pressão máxima exercida, então é necessário reduzir a operação ótima da bomba para apenas volumes menores que 40 ml.

Figura 4.4 – Relação entre pressão medida no manômetro com o número do teste realizado cronologicamente. Cada separação equivale a um reabastecimento da bomba seringa.



Fonte: AUTOR.

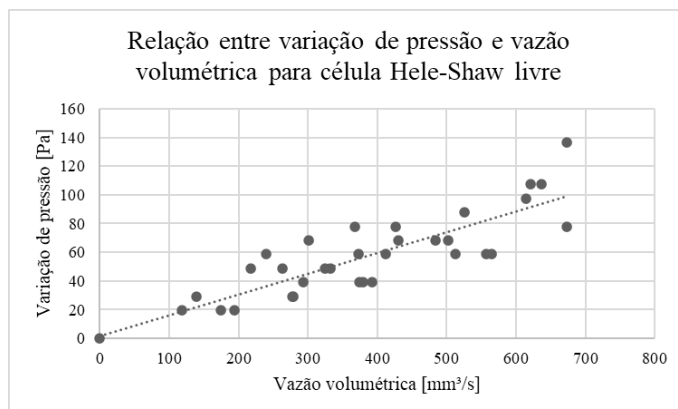
Este efeito acontece devido a desalinhamentos no êmbolo da seringa quando esta se encontra totalmente preenchida. Este desalinhamento se apresenta como mais uma resistência para o motor de passo, além da pressão exercida pela seringa no escoamento, uma vez que o atrito nas paredes da seringa aumenta.

4.3 Escoamento livre na célula Hele-Shaw

A partir da Equação 2.8 é possível obter o número de Reynolds máximo para o escoamento livre na célula Hele-Shaw. Têm-se a máxima vazão da bomba seringa sendo $673,34 \text{ mm}^3/\text{s}$, as propriedades físico-químicas da água e a geometria da célula avaliada. Com isso é possível chegar ao máximo número de Reynolds possível no escoamento, que é de $0,032$. Neste valor, tem-se que o escoamento pode ser considerado como laminar rastejante (do inglês, *creeping flow*), no qual $Re \ll 1$.

Com os resultados de variação de pressão e vazão volumétrica é possível plotar o gráfico da Figura 4.5. Neste resultado é possível observar uma tendência linear nas medidas, representado um valor constante para a relação de vazão volumétrica por variação de pressão ao longo da célula. Pode-se obter o este valor através da média desta relação em cada medida e também através da inclinação da reta obtida a partir de uma regressão linear dos pontos obtidos.

Figura 4.5 – Efeitos da variação da vazão volumétrica na pressão ao longo do escoamento para célula Hele-Shaw sem obstáculos.



Fonte: AUTOR.

Para o meio poroso sem obstáculos a Tabela 4.1 apresenta os valores obtidos para $q/\Delta P$ pela média e pela inclinação do gráfico, assim como seus parâmetros de qualidade de desvio padrão e R^2 .

Tabela 4.1 – Média, incerteza padrão, inclinação da reta e R^2 para escoamento sem obstáculos em célula Hele-Shaw. Dados referentes a relação da vazão volumétrica em m^3/s e a variação de pressão ao longo da célula em Pa.

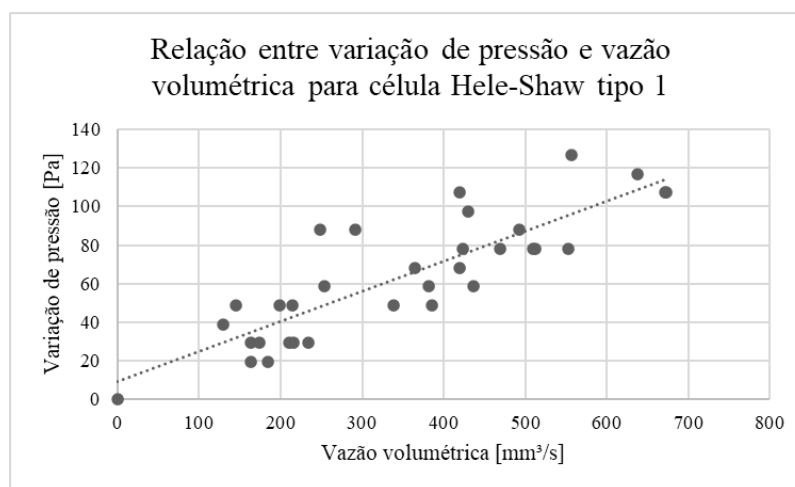
Medida	Valor [$m^3/(s \cdot Pa)$]	Incerteza padrão	R^2
Média	7,10E-09	3,41E-10	-
Inclinação	4,97E-09	-	0,719

Fonte: AUTOR.

4.4 Escoamento em célula com obstáculos

Para as células com obstáculos foram realizados 96 testes de vazão, sendo 3 por vazão testada. Os resultados apresentados são de 32 pontos obtidos para diferentes vazões a partir da média de cada teste. A Figura 4.6 apresenta a relação entre a vazão volumétrica e a variação de pressão ao longo da célula para a célula do tipo 1.

Figura 4.6 – Efeitos da variação da vazão volumétrica na pressão ao longo do escoamento para célula Hele-Shaw com obstáculos do tipo 1.



Fonte: AUTOR.

Na Figura 4.6 é possível observar o comportamento da pressão ao longo da célula com em relação à vazão volumétrica e sua tendência de linearidade. A partir da metodologia utilizada foi possível obter os valores de média e incerteza padrão para o quociente destes valores, assim como a inclinação da reta e seu R^2 , estes valores estão apresentados na Tabela 4.2.

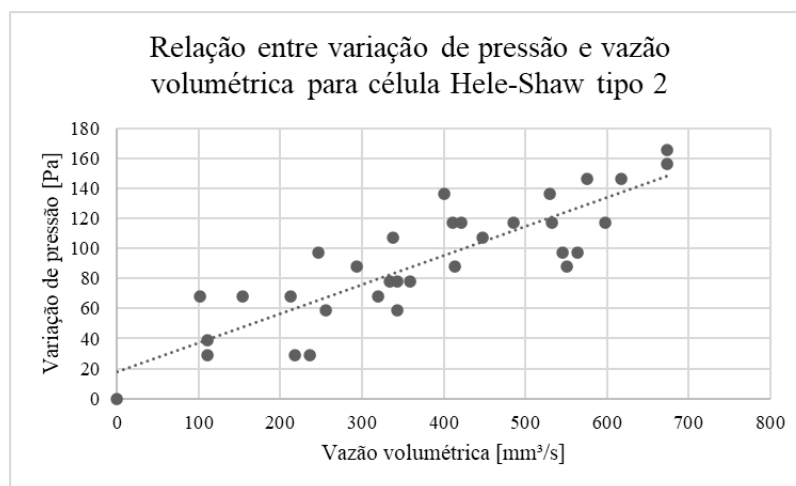
Tabela 4.2 – Média, incerteza padrão, inclinação da reta e R^2 para escoamento com obstáculos tipo 1 em célula Hele-Shaw. Dados referentes a relação da vazão volumétrica em m^3/s e a variação de pressão ao longo da célula em Pa.

Medida	Valor [$m^3/(s \cdot Pa)$]	Incerteza padrão	R^2
Média	5,80E-09	2,95E-10	-
Inclinação	4,61E-09	-	0,723

Fonte: AUTOR.

A relação entre vazão volumétrica e variação de pressão ao longo do escoamento para a célula com obstáculos do tipo 2 está apresentada na Figura 4.7, onde estão mostrados os 32 pontos de vazão avaliados com a vazão mássica selecionada e a variação de pressão que ocorreu entre a entrada e a saída da célula ao aplicar esta vazão. Neste resultado é possível ver a maior inclinação da reta que modela estes pontos.

Figura 4.7 – Efeitos da variação da vazão volumétrica na pressão ao longo do escoamento para célula Hele-Shaw com obstáculos do tipo 2.



Fonte: AUTOR.

A Tabela 4.3 apresenta os valores obtidos para média e incerteza padrão para os valores de $q/\Delta P$ e a inclinação e o valor de R^2 avaliando a reta apresentada na Figura 4.7.

Tabela 4.3 – Média, incerteza padrão, inclinação da reta e R^2 para escoamento com obstáculos tipo 2 em célula Hele-Shaw. Dados referentes a relação da vazão volumétrica em m^3/s e a variação de pressão ao longo da célula em Pa.

Medida	Valor [$m^3/(s \cdot Pa)$]	Incerteza padrão	R^2
Média [$m^3/(s \cdot Pa)$]	4,28E-09	2,46E-10	-
Inclinação [$m^3/(s \cdot Pa)$]	3,82E-09	-	0,737

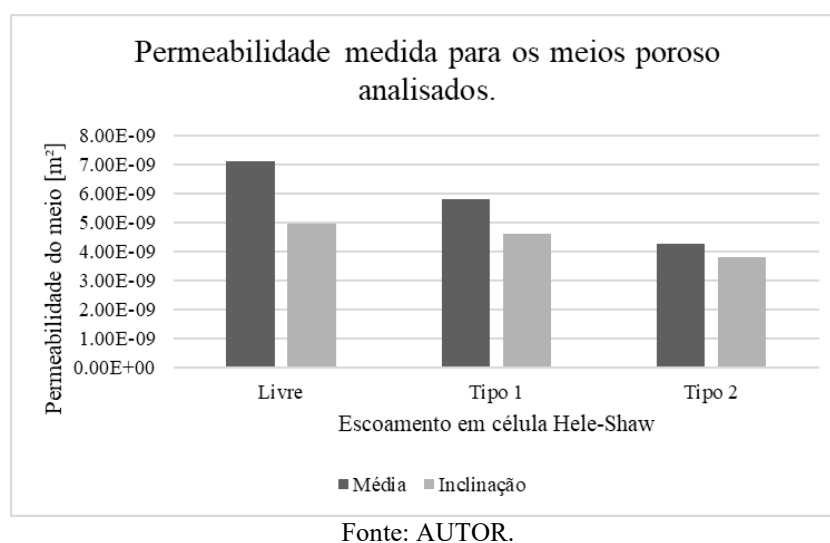
Fonte: AUTOR.

4.5 Análise de permeabilidade

Partindo das relações estabelecidas de vazão volumétrica por pressão ao longo da célula é possível realizar uma análise de permeabilidade para os meios poroso. Esta análise é feita utilizando a Equação 3.4 para obter um valor de permeabilidade para o meio poroso. Também são utilizadas as Equações 2.13 e 2.14 para obtenção das permeabilidades estimadas teoricamente para cada um dos meios porosos.

Os valores aplicados na Equação 3.4 são os valores obtidos anteriormente para a permeabilidade do meio, tanto para o escoamento livre na célula, quanto para obstáculos do tipo 1 e do tipo 2. São feitas duas análises diferentes para obtenção do termo de $q/\Delta P$ como avaliado. A primeira maneira é pela média do quociente dos valores de vazão mássica e variação de pressão ao longo do escoamento, obtidos experimentalmente, e a segunda maneira é utilizando a inclinação da reta obtida a partir de uma regressão linear dos valores. A Figura 4.8 apresenta os valores de permeabilidade obtidos para cada geometria a partir de cada método de maneira gráfica.

Figura 4.8 – Permeabilidade estimada para cada tipo de meio poroso estudado.



Comparando as permeabilidades estimadas para cada célula estudada é possível obter o resultado apresentado na Tabela 4.4, onde estão apresentados os valores de permeabilidade para cada um dos escoamentos e sua variação em relação ao escoamento na célula sem obstáculos. Com este resultado é possível observar que para o escoamento base existe a maior permeabilidade em relação a cada um dos escoamentos.

Tabela 4.4 – Variação de permeabilidade para os métodos estudados e sua variação em relação ao escoamento sem obstáculos.

	Livre	Tipo 1		Tipo 2	
	Perm.	Perm.	Var.	Perm.	Var.
Média	1,14E-12	9,29E-13	-18,4%	6,859E-13	-39,7%
Inclinação	7,97E-13	7,39E-13	-7,2%	6,115E-13	-23,2%

Fonte: AUTOR.

A permeabilidade da célula com obstáculos do tipo 1 é maior que a da célula com obstáculos do tipo 2. Isso condiz com o esperado, uma vez que o meio com obstáculos que se intercalam de posição na direção do escoamento apresenta um caminho médio para o escoamento maior que o escoamento livre. Com isso é possível validar relação entre vazão volumétrica e pressão ao longo do escoamento para um meio poroso, mesmo com estes valores não se adequando ao estimado matematicamente.

Entre os métodos de avaliação por média ou pela inclinação da reta o método utilizando a inclinação da reta parece mostrar uma maior confiabilidade, uma vez que o método através da média mostrou uma grande variação na permeabilidade, de até 40% e apresenta uma incerteza padrão muito alta para fins estatísticos.

É possível comparar os resultados obtidos experimentalmente com os valores obtidos a partir das Equações 2.13 e 2.14. O valor de permeabilidade obtido para a geometria do tipo 1 foi de $3,26E-04$ D e para a geometria do tipo 2 de $1,57E-06$ D. Neste resultado não é possível observar a relação entre a permeabilidade medida e a estimada pelas equações. Estas permeabilidades não apresentam nem a mesma ordem de grandeza neste caso. Isso se dá pela relação entre área molhada e diâmetro de partícula utilizado para obtenção destes valores. Para meios porosos tridimensionais como os estudados para obtenção das equações de permeabilidade a aproximação realizada para relacionar a área molhada do escoamento com a porosidade do meio não é a mesma que para a aproximação bidimensional. Não foram encontradas na literatura equações que modelem o escoamento de meios porosos bidimensionais, em uma avaliação matemática deste problema ainda não seria possível chegar a valores obtidos experimentalmente para meios porosos tridimensionais como fatores de tortuosidade do meio.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho avaliou uma metodologia experimental para aquisição de características fundamentais para análise de escoamentos em modelos porosos a partir de uma aproximação bidimensional. A importância do entendimento desse tipo de escoamento pode ser aplicada em diversas áreas de conhecimento onde há interação entre um meio poroso como uma rocha sedimentar ou um filtro na presença de um fluido de interesse, como água, óleos ou lamas.

Neste Trabalho de Conclusão de Curso, uma bancada experimental foi projetada, orçada, construída, instrumentada, calibrada e operada. O projeto envolveu a construção da bancada, exigiu a implementação de uma bomba seringa e resolveu problemas ligados a montagem da bancada. Foi realizado um processo de calibração desta bomba e definidos limites de funcionamento e uma curva de operação para diferentes vazões. Com isso foram montadas geometrias que aproximam um meio poroso em células Hele-Shaw e foram medidos valores de vazão mássica e pressão ao longo do escoamento para poder caracterizar a permeabilidade esperada para o meio. Apresentou-se, ainda, um relato completo sobre as etapas construtivas que participaram da execução deste projeto.

Com a análise dos resultados obtidos de testes em meios porosos a partir de ensaios realizados foi possível observar a relação da geometria de um meio poroso com sua permeabilidade, demonstrando a variação da permeabilidade medida para diferentes meios porosos em uma mesma condição experimental. Foi possível observar que mesmo para uma célula sem obstáculos, como ocorre uma aproximação bidimensional, a permeabilidade não é nula. Os resultados obtidos caracterizam bem o problema, e apontam que a estrutura da bancada e as análises conduzidas podem ser utilizadas para outros estudos, com diferentes fluidos e diferentes meios porosos, atentando-se para os limites de operação aqui apresentados.

Este trabalho contribuiu com análises que caracterizam a permeabilidade para um meio poroso em diferentes situações, além de estruturar uma metodologia experimental e preparar materiais para futuros trabalhos na área de Mecânica dos Fluidos em meios porosos para o Laboratório de Reologia e Escoamentos de Fluidos Não Newtonianos. Foram adquiridos diversos conhecimentos de engenharia com a execução deste trabalho como a utilização de ferramentas de projeto, procedimentos de aquisição de equipamentos, aprimoramento de métodos para resolução de problemas, criação de metodologias experimentais, entre outros. Como próximos estudos sugeridos estão a análise do efeito de fluidos com diferentes características reológicas e sua implicação na permeabilidade do meio poroso, a aplicação de um sistema de visualização de escoamento com processamento digital de imagem para poder estimar o meio caminho médio do escoamento e observar zonas que se formam no escoamento. Além disso também podem ser realizados diversos trabalhos diferentes que necessitem de um controle de fluido preciso utilizando a bomba seringa construída.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BEAR, J. **Dynamics of fluids in porous media**. 1. ed. New York: Dover Publications, Inc., 1972.
- BEAR, J.; ZASLAVSKY, D.; IRMAY, S. **Physical Principles of Water Percolation and Seepage**. 7. ed. Paris: UNESCO, 1968.
- CHEVALIER, T. et al. Darcy's law for yield stress fluid flowing through a porous medium. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, v. 195, p. 57–66, 2013.
- CHRISTOPHER, R. H.; MIDDLEMAN, S. Power-law flow through a packed tube. **Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals**, v. 4, n. 4, p. 422–426, 1965.
- DULLIEN, F. A. L. **Porous media: fluid transport and pore structure**. 2. ed. Waterloo: Academic Press, Inc., 1979.
- EPE [Empresa de Pesquisa Energética] **Balanco Energético Nacional (BEN) 2021: Ano base 2020**. Disponível em: < <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2021>>. Acesso em: 30 mar. 2022.
- FIOROT, G. H.; MACIEL, G. DE F. Free-surface laminar flow of a Herschel–Bulkley fluid over an inclined porous bed. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, v. 272, n. April, p. 104164, 2019.
- glycerol** (CHEBI:17754). Disponível em: <<https://www.ebi.ac.uk/chebi/searchId.do?chebiId=CHEBI:17754>>. Acesso em: 25 mar. 2022.
- HELE-SHAW, H. S. The flow of water. **Nature**, v. 58, n. 1489, p. 34–36, 1898.
- IRGENS, F. **Rheology and Fluids**. 1a. ed. Trondheim, Norway: Springer, 2014.
- JACKSON, G. W.; JAMES, D. F. The permeability of fibrous porous media. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 64, n. 3, p. 364–374, 1986.
- KEMBLOWSKI, Z.; MICHNIEWICZ, M. A new look at the laminar flow of power law fluids through granular beds. **Rheologica Acta**, v. 18, n. 6, p. 730–739, 1979.
- MORROW, N. R. Small-Scale Packing Heterogeneities in Porous Sedimentary Rocks. **AAPG Bulletin**, v. 55, n. 3, p. 514–522, 1971.
- MORTENSEN, A. et al. Re-evaluation of glycerol E 422 as a food additive. **EFSA Journal**, v. 15, n. 3, p. 4720-4784, 2017.
- MUGGERIDGE, A. et al. Recovery rates, enhanced oil recovery and technological limits. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 372, n. 2006, p. 20120320–20120344, 2014.
- NELSON, D. L.; COX, M. M. **Lehninger Principles of Biochemistry**. 7^a ed. New York: w.h.freeman, 2017.
- SAHRAOUI, M.; KAVIANY, M. Slip and no-slip velocity boundary conditions at interface of porous, plain media. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 35, n. 4, p. 927–943, 1992.
- SAVINS, J. G. Non-newtonian flow through porous media. **Industrial and Engineering Chemistry**, v. 61, n. 10, p. 18–47, 1969.

SCHEIDEGGER, A. E. **The Physics of Flow Through Porous Media**. 3. ed. Toronto: University of Toronto Press, 1974.

SOCHI, T. Non-Newtonian flow in porous media. **Polymer**, v. 51, n. 22, p. 5007–5023, 2010.

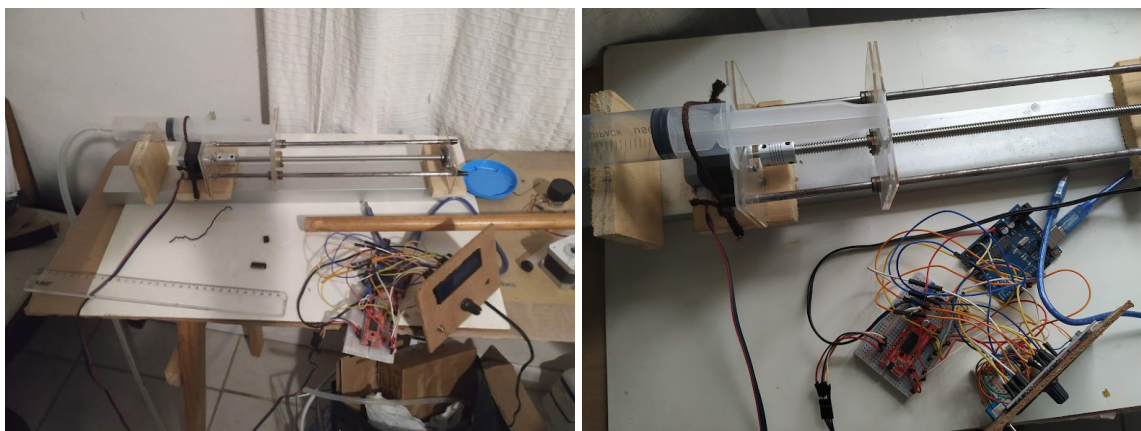
VARGES, P. R. et al. Rheological characterization of carbopol ® dispersions in water and in water/glycerol solutions. **Fluids**, v. 4, n. 1, p. 3–22, 2019.

water (CHEBI:15377). Disponível em:
<<https://www.ebi.ac.uk/chebi/searchId.do?chebiId=CHEBI:15377>>. Acesso em: 25 mar. 2022.

ZORZETTO, L. F. M. **Estudo experimental do escoamento de fluidos não-newtonianos em meios porosos não consolidados**. [s.l.] Universidade Estadual de Campinas, 1991.

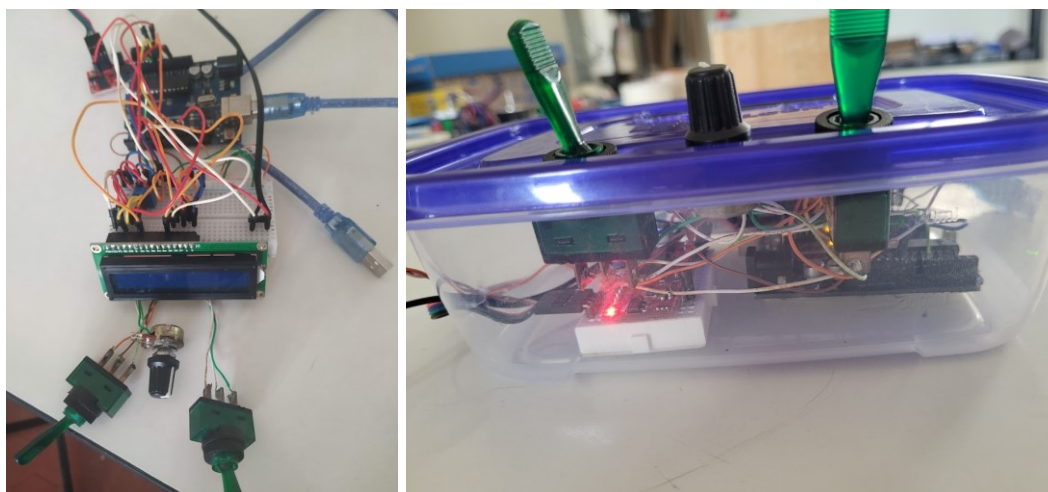
APÊNDICE A – Imagens da Bancada Experimental

Figura A.1 – Montagem adaptada durante a pandemia.



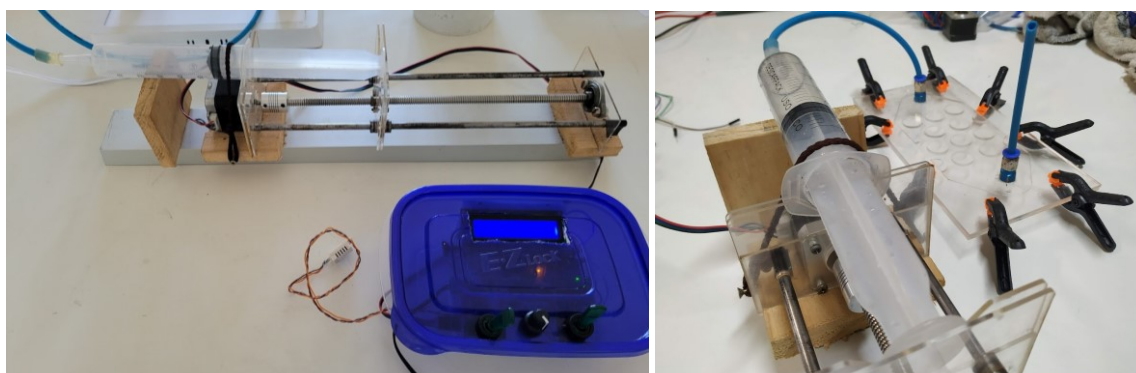
Fonte: AUTOR.

Figura A.2 - Montagem do Arduino, com controlador de motor de passos e controles para operação da bancada em *protoboard*.



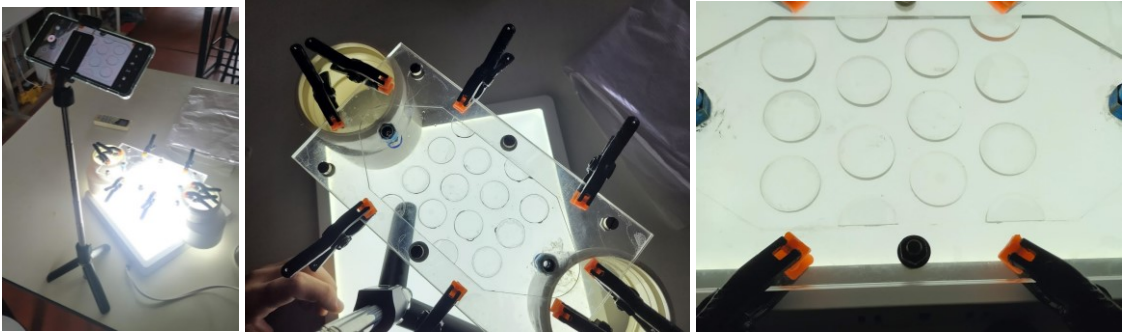
Fonte: AUTOR.

Figura A.3 - Primeira iteração da bomba seringa criada para o projeto com sistema de controle e testes iniciais em célula Hele-Shaw.



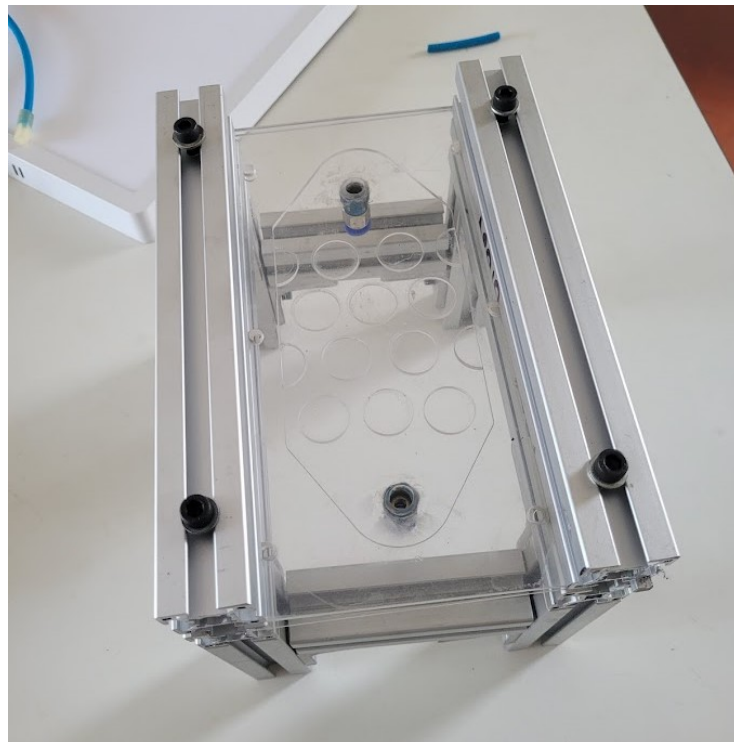
Fonte: AUTOR.

Figura A.4 - Testes de sistema de captação de imagem,



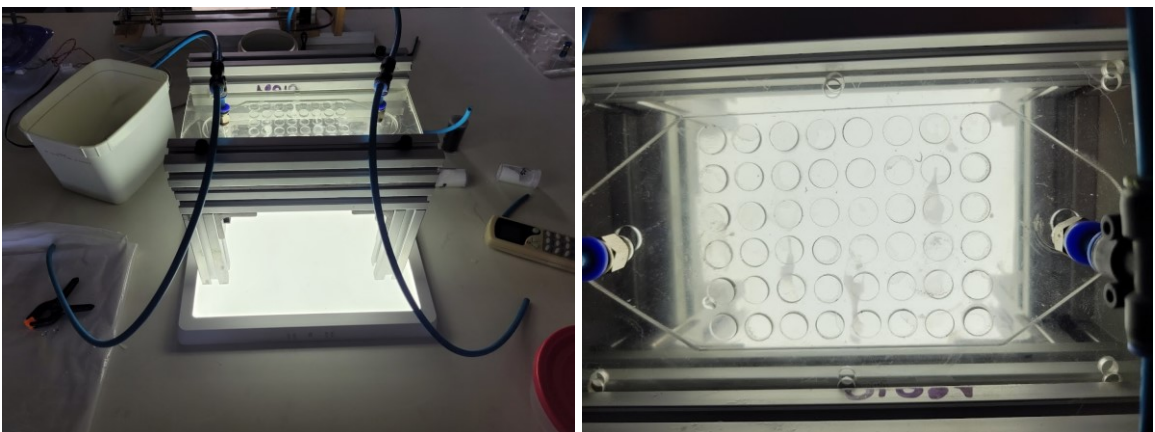
Fonte: AUTOR.

Figura A.5 - Suporte para bancada feito utilizando perfis de alumínio.



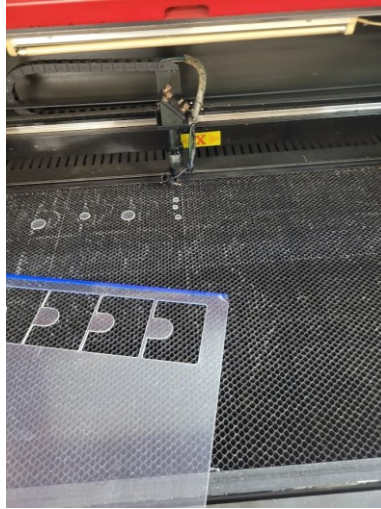
Fonte: AUTOR.

Figura A.6 – Testes de visualização utilizando perfis de alumínio.



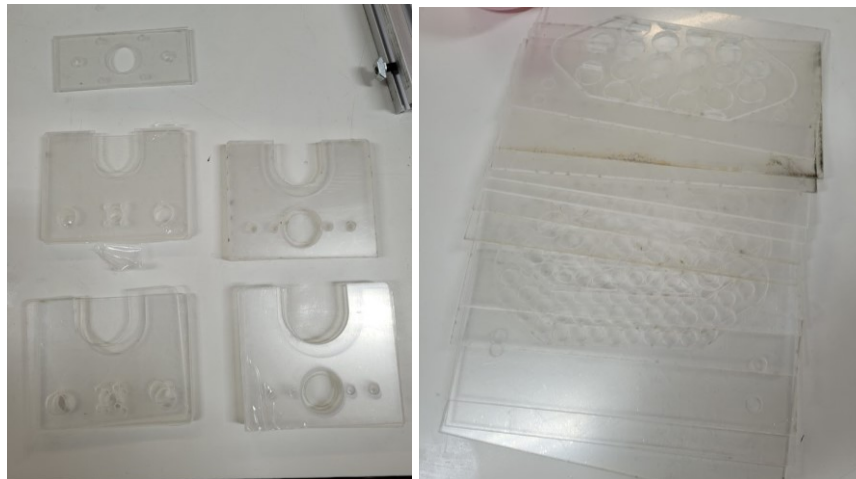
Fonte: AUTOR.

Figura A.7 - Máquina de corte a laser após realização dos cortes no Laboratório de Inovação e Fabricação Digital da Escola de Engenharia da UFRGS.



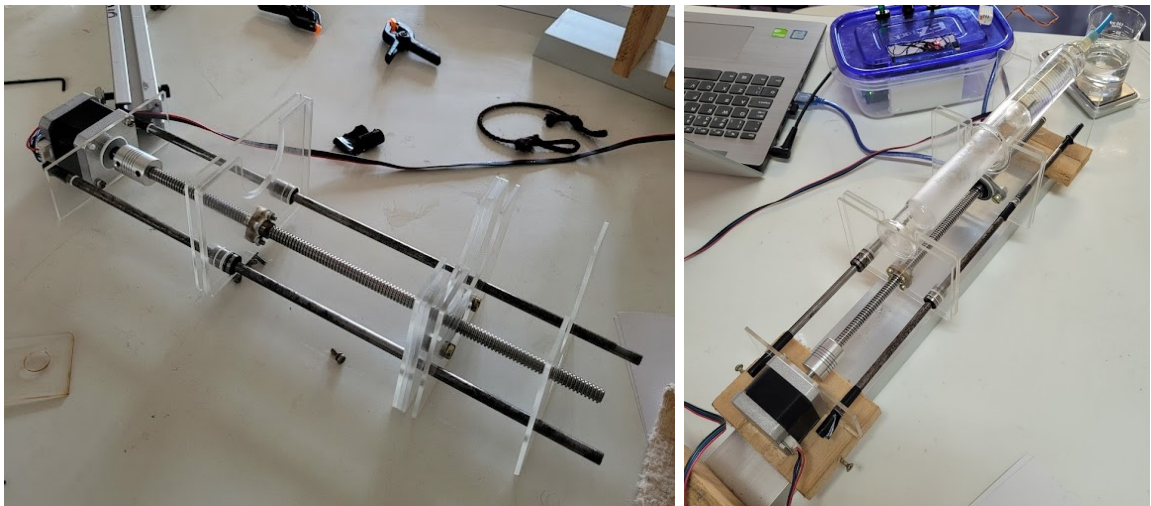
Fonte: AUTOR.

Figura A.8 - Projeto de cortes em acrílico necessários para montagem da bomba e das células e da bomba.



Fonte: AUTOR.

Figura A.9 - Primeira montagem da versão atualizada da bomba seringa.



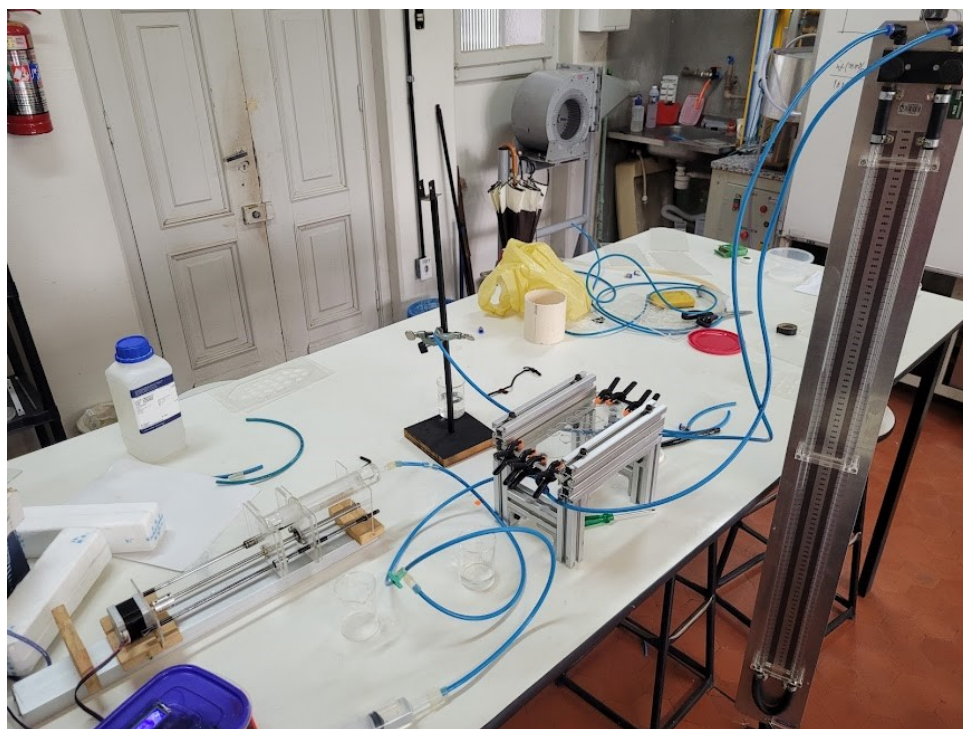
Fonte: AUTOR.

Figura A.10 - Primeiros testes de bancada.



Fonte: AUTOR.

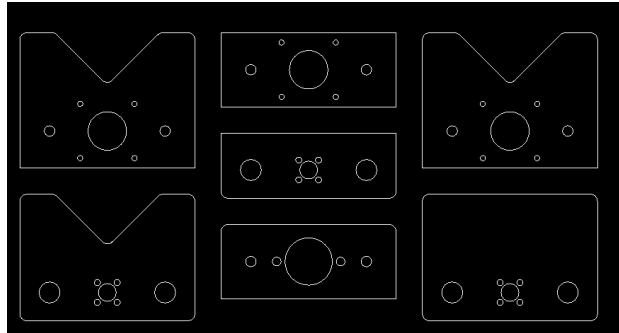
Figura A.11 – Teste final na bancada experimental.



Fonte: AUTOR.

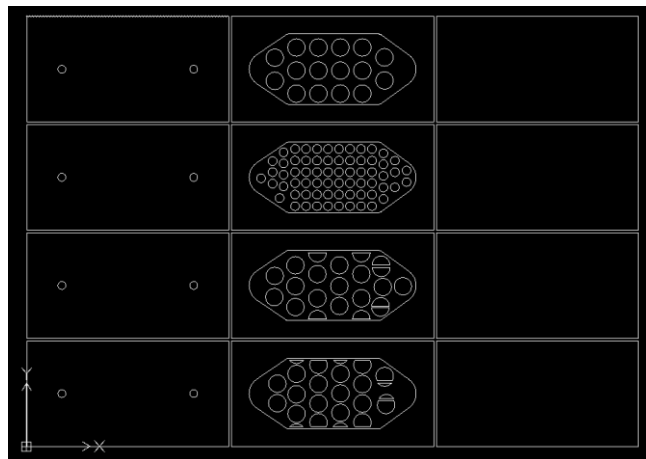
APÊNDICE B – Imagens de projetos para cortes realizados em acrílico

Figura B.1 - Primeiros cortes para montagem da bomba seringa.



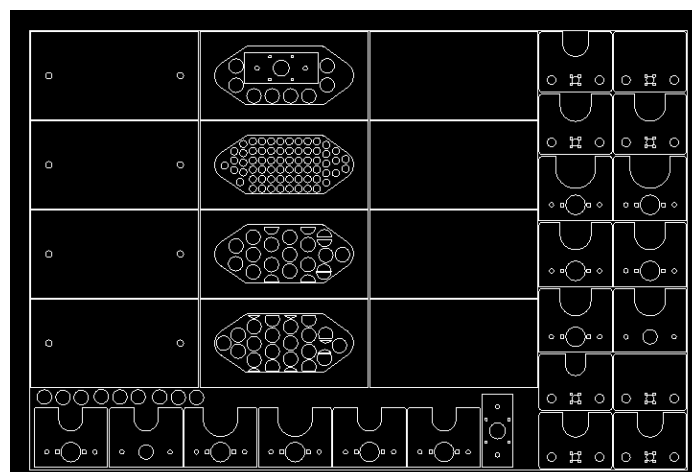
Fonte: AUTOR.

Figura B.2 - Primeiros cortes para montagem da célula Hele-Shaw.



Fonte: AUTOR.

Figura B.2 – Versão final de cortes para seringa e célula.



Fonte: AUTOR.