

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL DE UM MODELO POROSO 2D
EMPREGANDO UMA GEOMETRIA HELE-SHAW PARA TESTES DE
PERMEABILIDADE DE FLUIDOS NEWTONIANOS

por

Douglas Mello Cardoso

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, agosto de 2024

CIP - Catalogação na Publicação

Cardoso, Douglas
DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL DE UM MODELO POROSO 2D
EMPREGANDO UMA GEOMETRIA HELE-SHAW PARA TESTES DE
PERMEABILIDADE DE FLUIDOS NEWTONIANOS / Douglas
Cardoso. -- 2024.
15 f.
Orientador: Guilherme Fiorot.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2024.

1. Permeabilidade. 2. Meio Poroso. 3. fluido
newtoniano. I. Fiorot, Guilherme, orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Douglas Mello Cardoso

DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL DE UM MODELO POROSO 2D
EMPREGANDO UMA GEOMETRIA HELE-SHAW PARA TESTES DE
PERMEABILIDADE DE FLUIDOS NEWTONIANOS

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Ignacio Iturrioz
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Energia e Fenômenos de Transporte

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Henrique Fiorot

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Guilherme H. Fiorot (Presidente)

Prof. Dr. Diogo E. V. Andrade

Prof. Dr. Eduardo Perondi

Prof. Dr. Ignacio Iturrioz

Porto Alegre, agosto de 2024

Cardoso, Douglas. **Desenvolvimento experimental de um modelo poroso 2D empregando uma geometria Hele-Shaw para testes de permeabilidade de fluidos newtonianos**. 2024. 13. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.

RESUMO

O estudo de meios porosos é essencial para diversas áreas da engenharia, como a engenharia de petróleo e a hidrogeologia, onde a compreensão da permeabilidade é fundamental para prever o comportamento de fluidos. Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo desenvolver um modelo experimental bidimensional de um meio poroso para verificar funções de permeabilidade e investigar a influência de fluidos newtonianos no escoamento. A bancada experimental foi projetada com uma bomba de infusão, três tipos de meios porosos (sem obstáculos, com obstáculos alinhados e com obstáculos desalinhados), um manômetro em U para medir a pressão e um béquer para coletar o fluido. A permeabilidade foi determinada através da Lei de Darcy, utilizando diferentes diluições de glicerina em água para variar a viscosidade dos fluidos. Os resultados experimentais indicaram que a permeabilidade do meio poroso sem obstáculos foi a mais alta, conforme esperado, enquanto a célula com obstáculos desalinhados apresentou a menor permeabilidade devido à maior tortuosidade do caminho do fluido. A comparação entre as permeabilidades teóricas e experimentais mostrou uma boa concordância, embora o erro tenha sido maior para o meio com obstáculos desalinhados, sugerindo a necessidade de um ajuste no coeficiente de tortuosidade utilizado nos meios porosos.

PALAVRAS-CHAVE: Permeabilidade, Meio Poroso, fluido newtoniano.

Cardoso, Douglas. **Experimental development of a 2D porous model employing Hele-Shaw geometry for testing the permeability of Newtonian fluids**. 2024. 13. Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.

ABSTRACT

The study of porous media is essential in various engineering fields, such as petroleum engineering and hydrogeology, where understanding permeability is crucial for predicting fluid behavior. In this context, the present work aimed to develop a two-dimensional experimental model of a porous medium to verify permeability functions and investigate the influence of Newtonian fluids on flow. The experimental setup was designed with an infusion pump, three types of porous media (without obstacles, with aligned obstacles, and with misaligned obstacles), a U-tube manometer to measure pressure, and a beaker to collect the fluid. Permeability was determined using Darcy's Law, employing different glycerin-water dilutions to vary fluid viscosity. The experimental results indicated that the permeability of the porous medium without obstacles was the highest, as expected, while the cell with misaligned obstacles showed the lowest permeability due to the higher tortuosity of the fluid path. The comparison between theoretical and experimental permeabilities showed good agreement, although the error was greater for the medium with misaligned obstacles, suggesting the need for an adjustment in the tortuosity coefficient used in porous media.

KEYWORDS: Permeability, Porous media, Newtonian fluid.

NOMENCLATURA

Símbolos

D_p	Diâmetro equivalente da partícula	[m]
K	Permeabilidade do meio	[m ²]
R_e	Número de Reynolds	[Adimensional]
u_D	Velocidade superficial do fluido	[m/s]
ΔP	Varição de pressão	[Pa]
n	Índice de escoamento	[adimensional]
V_v	Volume de vazios em um meio poroso	[m ³]
V_t	Volume total de um meio poroso	[m ³]
V_f	Volume de obstáculos em um meio poroso	[m ³]
Q	Vazão volumétrica	[m ³ /s]
t	Tortuosidade	[Adimensional]
τ_{xy}	Tensão de cisalhamento	[N/m ²]
$\dot{\gamma}$	Taxa de deformação	[s ⁻¹]
Símbolos gregos		
ρ	Massa específica do fluido	[kg/m ³]
ε	Porosidade do meio	[Adimensional]
μ	Viscosidade do fluido	[Pa.s]
A_t	Área de seção transversal	[m ²]

Sumário

RESUMO	iv
ABSTRACT	iv
NOMENCLATURA.....	v
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Objetivos.....	2
2. Fundamentação teórica.....	2
2.1. Meio Poroso.....	2
2.2. Porosidade	2
2.3. Tortuosidade	3
2.4. Permeabilidade	3
2.4.1. Lei de Darcy	3
2.4.2. Permeabilidades teóricas	4
2.5. Reologia.....	5
3. Materiais e métodos.....	5
3.1. Descrição da bancada	5
3.2. Bomba de infusão	6
3.3. Célula Hele-Shaw	7
3.4. Viscosímetro.....	9
3.5. Outros materiais.....	10
4. RESULTADO	10
4.1. Reometria dos fluidos teste.....	10
4.2. Permeabilidades experimentais	11
4.3. Verificação entre permeabilidade experimental e teórica	13
5. CONCLUSÃO.....	14
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço ao meu orientador, Professor Doutor Guilherme Henrique Fiorot, pelo apoio constante nos desafios enfrentados ao longo deste trabalho e pela confiança depositada em mim, mesmo quando eu estava desesperado, com apenas duas semanas para entregar o relatório de pré-TCC. Os aprendizados adquiridos sob sua orientação serão levados para diversas áreas da minha vida.

Sou grato ao laboratório REOSUL por proporcionar um ambiente propício ao crescimento acadêmico e por disponibilizar os recursos necessários ao desenvolvimento deste trabalho. Agradeço também à FAPERGS pelo financiamento da bancada experimental e dos equipamentos, viabilizado pelo Edital ARD/ARC 10/2021, através do projeto de pesquisa coordenado pelo Prof. Dr. Guilherme H. Fiorot "Modelagem experimental de funções de permeabilidade para escoamentos de fluidos não newtonianos através de meios porosos".

Gostaria de expressar minha gratidão ao Henrique Tramontina pelo suporte essencial nos meus primeiros dias no laboratório e pela valiosa ajuda na elaboração da bancada experimental.

Também gostaria de agradecer aos meus heróis de graduação Diego Nogueira e Lucas Santos, que estiveram ao meu lado durante todo o curso. Juntos, enfrentamos desafios, realizamos inúmeros trabalhos e, acima de tudo, compartilhamos risadas e momentos inesquecíveis. A parceria e amizade de vocês foram fundamentais para que eu chegasse até aqui.

Agradeço de coração à minha família pelo apoio emocional e financeiro ao longo de toda a graduação, especialmente à minha mãe, Nilta Mello, e ao meu pai, Atenor Cardoso. Ao meu irmão, Felipe Cardoso, sou imensamente grato pelos momentos compartilhados e pelo suporte nos momentos mais difíceis.

Por fim, agradeço à minha namorada, Kamila Perez, por todos os dias que passamos juntos ao longo desses anos e pelo amor e apoio incondicionais.

1. INTRODUÇÃO

O escoamento de fluidos por meio porosos ocorre em diversas ocasiões, sejam elas técnicas, como a extração de petróleo, ou sejam elas mais simples, como fazer café pela manhã. Talvez para o segundo caso apresentado, um estudo técnico sobre o caso não seja tão importante ou inovador, porém para o primeiro é fundamental, principalmente visando fins econômicos e ambientais. Além dos casos citados, existem muitos outros nos quais escoamentos por meios porosos estão presentes como: reatores empacotados catalíticos e inertes (gás ou água); filtração; secagem; reatores de leito poroso; escoamento de óleos; além de fenômenos naturais como erupções vulcânicas e deslizamento de terras, entre muitos outros (Kaviany, 1995).

Mais especificamente, extração do petróleo pode ser dividida em duas etapas: a primária e a secundária. Durante a extração primária, o petróleo escoar naturalmente devido à pressão interna armazenada na rocha porosa. Na extração secundária, o contrário acontece: não há pressão suficiente na rocha para que o petróleo escoar naturalmente, portanto, é necessária a injeção de um fluido na rocha para que essa pressão aumente e o petróleo possa escoar. A viscosidade do fluido escolhido pode ajudar, ou não, na extração. Por exemplo, a utilização de água em seu estado natural pode permitir que o óleo, que tem maior viscosidade, seja ultrapassado pela água, implicando em uma baixa eficiência do processo. Já um fluido mais viscoso do que a água pode bloquear as zonas de alta permeabilidade, além de aumentar o esforço na bomba e, conseqüentemente, aumentar o consumo de energia (Zorzetto, 1991).

Para compreender o escoamento de um fluido através de um meio poroso, é necessário pesquisar como é a dinâmica do escoamento pelos poros da rocha e a resistência ao escoamento oferecida por este meio poroso. Neste escopo, tal resistência é definida em função de um parâmetro chamado permeabilidade, que por sua vez depende de outras variáveis, como a porosidade do meio rochoso e as características reológicas do fluido. A porosidade é a relação entre os espaços livres e aqueles preenchidos por material sólido de um determinado meio (BEAR, 1972). Para o caso de fluidos newtonianos, a permeabilidade depende única e exclusivamente das características do meio, como tamanho médio das partículas e tortuosidade. Entretanto para fluidos complexos, como lei de potência e Herschel-Bulkley, a permeabilidade depende também das características reológicas do fluido, como índice de escoamento e a tensão limite de escoamento (Chevalier et al. 2013).

Procurando apoiar a solução dos problemas listados, este trabalho de conclusão de curso visa desenvolver uma metodologia experimental para testes em laboratório de permeabilidades de meios porosos. Este trabalho de conclusão de curso da continuidade aos trabalhos do laboratório de Reologia e Escoamentos de Fluidos Não Newtonianos (REOSUL) em nível de pesquisa (Braz, 2022). Para isso, foi desenvolvida uma bancada experimental que permite o teste de meios porosos bidimensionais, nos quais o escoamento se dará como rastejante (ou seja, o número de Reynolds é da ordem de 1). Diferentes fluidos newtonianos foram produzidos a partir de diluições controladas de glicerina em água, com concentrações variando de 10% a 100% de glicerina. Esses fluidos foram cuidadosamente preparados para cobrir uma ampla faixa de viscosidades, possibilitando uma análise abrangente da influência da viscosidade no escoamento através do meio poroso. A bancada experimental foi projetada para simular condições ideais de escoamento, incorporando uma bomba de infusão de alta precisão para controlar a injeção dos fluidos no sistema. O meio poroso foi constituído por duas placas planas de acrílico, montadas de forma a criar um pequeno espaço entre elas, permitindo o escoamento controlado do fluido. Este arranjo foi inspirado na célula de Hele-Shaw, conforme descrito em 1898. Ao monitorar a pressão e a vazão no sistema, foi possível estimar a permeabilidade do meio poroso, utilizando a Lei de Darcy como base teórica. A precisão na medição dessas variáveis foi fundamental para garantir a validade dos resultados experimentais. Além disso,

outras condições experimentais, como a temperatura e a concentração dos fluidos, foram controladas para minimizar erros e garantir a repetibilidade dos ensaios.

1.1. Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é o de desenvolver uma metodologia experimental para realizar a verificação de funções de permeabilidade de meios porosos bidimensionais e investigação do escoamento de fluidos newtonianos. Para atingir este objetivo geral, este trabalho define os seguintes objetivos específicos: estudo reométrico dos fluidos newtonianos a serem utilizados no experimento; dimensionamento e implementação de um modelo experimental bidimensional de um meio poroso controlado; execução de testes experimentais de escoamento de fluidos newtonianos através de meios porosos e medição das propriedades do escoamento para três geometrias distintas; determinação das permeabilidades experimentais; comparação com as permeabilidades teóricas.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Meio Poroso

Os meios porosos podem ser naturalmente formados como, por exemplo, as rochas, os leitos de rios e cursos de d'água, esponjas e madeiras, ou fabricados, como filtros. Um meio poroso pode ser definido como um corpo sólido com vazios internos, também chamados de poros, que podem ou não estar interconectados (Beijal, 1982). Quando o espaço poroso não forma canais de fluxo ele é dito impermeável; quando a maioria dos poros são interconectados ele é dito permeável, estando, portanto, o grau de permeabilidade do meio diretamente relacionado à quantidade de poros interconectados (Zorzetto, 1991). Os meios porosos também podem ser classificados em consolidados e não consolidados. Os meios consolidados possuem partículas fixas enquanto os não consolidados são formados por partículas justapostas e não coladas umas às outras, o que torna fácil a separação dessas partículas e a descaracterização do meio (Dullien, 1979).

2.2. Porosidade

A fração de volume ocupada por vazios (V_v), ou seja, o volume total de vazios dividido pelo volume total ocupado (V_t) pela matriz sólida (V_f) e pelos volumes de vazios, é chamada de porosidade (ε). Em um meio poroso, cada poro pode apresentar diferentes níveis de conectividade: ele pode estar interconectado a vários outros poros, formando uma rede contínua que facilita o escoamento de fluidos; pode estar conectado a apenas um outro poro, resultando em um caminho sem saída que limita o fluxo; ou pode estar completamente isolado, sem nenhuma conexão com outros poros, o que impede qualquer movimento de fluidos. O fluido flui apenas pelos poros interconectados. A fração de volume dos poros interconectados é chamada de porosidade efetiva. Em meios não consolidados, que é quando o meio poroso é composto por partículas soltas, a porosidade efetiva e a porosidade são iguais. Em alguns meios consolidados, a diferença entre os dois pode ser substancial (Kaviany, 1995). A equação 1 demonstra como a porosidade (ε) deve ser calculada.

$$\varepsilon = \frac{V_v}{V_t} = \frac{V_v}{(V_v + V_f)} \quad (1)$$

2.3. Tortuosidade

A tortuosidade é a relação quadrática entre o comprimento dos canais tortuosos mais longos que constituem o meio (L_e) e o comprimento total desse meio (L), basicamente indicando o quão sinuosos são os canais, formado por vazios interconectados. O coeficiente de tortuosidade (t) pode ser calculado pela Equação 2 (Carman, 1937).

$$t = \left(\frac{L_e}{L}\right)^2 \quad (2)$$

2.4. Permeabilidade

A permeabilidade é um parâmetro que reflete a condutância do meio poroso e determina a capacidade que o meio poroso tem de permitir que o fluido escoe por ele (Zorzetto, 1991). Espera-se que a permeabilidade tenha alguma relação com o conceito de porosidade, uma vez que um meio menos poroso deve resistir mais ao escoamento se comparado com um meio mais poroso. A permeabilidade de um fluido incompressível escoando por uma matriz sólida foi medida pela primeira vez por Darcy em 1856 (Kaviany, 1995).

2.4.1. Lei de Darcy

A equação de Darcy é uma relação empírica baseada nas observações de Henry Darcy e é fundamentada em princípios físicos básicos do escoamento em meios porosos. Esta equação tornou-se uma ferramenta essencial na hidrogeologia e na engenharia de reservatórios para modelar e prever o comportamento do escoamento de fluidos através de materiais porosos. A lei de Darcy é um modelo linear que relaciona o gradiente de pressão do escoamento à velocidade superficial do fluido (u_D) através da viscosidade do fluido escoante (μ) e permeabilidade (k). É amplamente utilizada para descrever o escoamento em meios porosos, apesar de ser uma relação empírica. O experimento de Darcy utilizou partículas de tamanho quase uniforme que estavam aleatoriamente e frouxamente empacotadas, ou seja, uma matriz sólida não consolidada, uniforme, rígida e isotrópica. O escoamento macroscópico era estável, unidimensional e impulsionado pela gravidade. Um esquema desse escoamento é apresentado na Figura 1 (Kaviany, 1995).

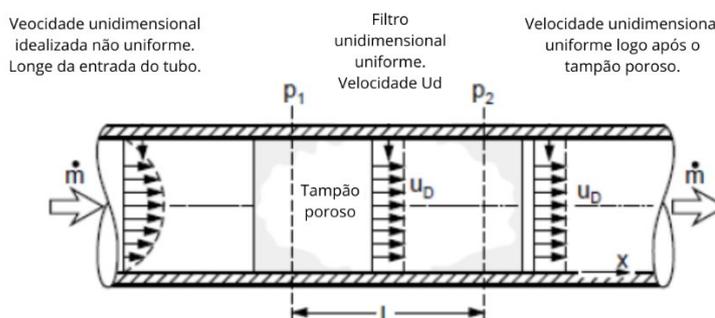


Figura 1. Esquema do experimento de Darcy (Adaptado Kaviany, 1995).

Aplicável a escoamentos laminares em baixos números de Reynolds, a lei de Darcy ignora efeitos inerciais e de fronteira, limitando-se a escoamentos laminares, isotérmicos, puramente

viscosos, incompressíveis e de fluidos newtonianos. Com esse experimento, foi mostrado que a velocidade média de um escoamento em regime laminar dentro de um meio poroso é proporcional ao gradiente de pressão e inversamente proporcional à distância como pode ser observado na Equação 3 (SOCHI, 2010). Essa equação será usada para equacionar a permeabilidade de fluidos newtonianos.

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu u_D}{K} = \frac{\mu Q}{KA_t} \quad (3)$$

Na Equação 3, K é a permeabilidade do meio em m^2 , μ é a viscosidade do fluido em Pa.s, u_D é a velocidade superficial do fluido em m/s e ΔP é a variação de pressão e L é o comprimento do meio em m. A velocidade superficial pode ser encontrada ao dividir a vazão (Q), em m^3/s , imposta, pela área de seção transversal, em m^2 , do meio poroso (A_t).

Para a lei de Darcy ser válida, o escoamento deve ser rastejante, ou seja, o número de Reynolds deve ser menor do que um. A equação 4 será usada para calcular o número de Reynolds para cada caso utilizando o diâmetro equivalente da partícula (D_p) e a porosidade (ε) como parâmetros do meio poroso. (KEMBLOWSKI; MICHNIEWICZ, 1979).

$$Re = \frac{\rho Q D_p}{A_t \mu (1 - \varepsilon)} \quad (4)$$

A lei foi modificada para incluir fenômenos mais complexos, como fluxos não newtonianos e multifásicos, e para acomodar não linearidades usando métodos de homogeneização ou média de volume.

2.4.2. Permeabilidades teóricas

As permeabilidades teóricas dependem unicamente da geometria do meio poroso. Desta forma, é possível calcular as permeabilidades sem a necessidade de um experimento, desde que as características geométricas do meio poroso sejam conhecidas. O cálculo da permeabilidade para escoamento de fluidos newtonianos em um meio poroso feito de esferas alinhadas pode ser obtido através da equação 5 (JACKSON; JAMES, 1986).

$$K = \frac{D_p^2}{2\varepsilon} (-\ln\varepsilon - 1,476 + 2\varepsilon - 1,774\varepsilon^2 + 4,07\varepsilon^2) \quad (5)$$

Já para um meio poroso feito de esferas desalinhadas, a Equação 6 pode ser utilizada (SAHRAOUI; KAVIANY, 1992).

$$K = D_p^2 0,01515\pi \left(\frac{\varepsilon^{5,1}}{1 - \varepsilon} \right) \quad (6)$$

Através das Equações 5 e 6 será possível calcular a permeabilidade do meio apenas com suas características estruturais e comparar com os resultados de ensaios.

2.5. Reologia

A reologia é o estudo da deformação e do escoamento da matéria, correlacionando a tensão de cisalhamento com a taxa de deformação do fluido. Para os casos em que essa relação é linear têm-se os chamados fluidos newtonianos, que possuem um comportamento reológico mais simples tendo uma viscosidade constante para cada fluido, desde que se mantenham as condições de temperatura e pressão. Os fluidos newtonianos recebem esse nome pois seguem a lei de Newton, mostrada na Equação 7, para um escoamento puramente viscoso em condições de cisalhamento simples.

$$\tau_{xy} = \mu \frac{du_x}{dy} \quad (7)$$

onde τ_{xy} é a tensão de cisalhamento, $\frac{du_x}{dy}$ é a taxa de deformação e μ é a viscosidade. A taxa de deformação é frequentemente representada por $\dot{\gamma}$.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Esse capítulo aborda a concepção e os materiais utilizados na bancada experimental onde os fluidos-tipo e os meios porosos serão testados.

3.1. Descrição da bancada

A bancada experimental possui cinco elementos principais: uma bomba de infusão e seringa para injetar o fluido-tipo no sistema a qual conta com seu próprio sistema de controle; um reservatório para preencher o sistema com o fluido de teste; meio poroso bidimensional; um manômetro em U para aferir os valores de diferencial de pressão antes e depois da célula Hele-Shaw; e por fim uma balança com um béquer para conferência da vazão mássica e validar os dados obtidos pela bomba. Na Figura 2 é possível verificar um esquema geral do sistema (a) e o sistema montado (b). Além dos itens da bancada, ainda foi utilizado um viscosímetro para estudar as características reológicas de cada um dos fluidos utilizados.

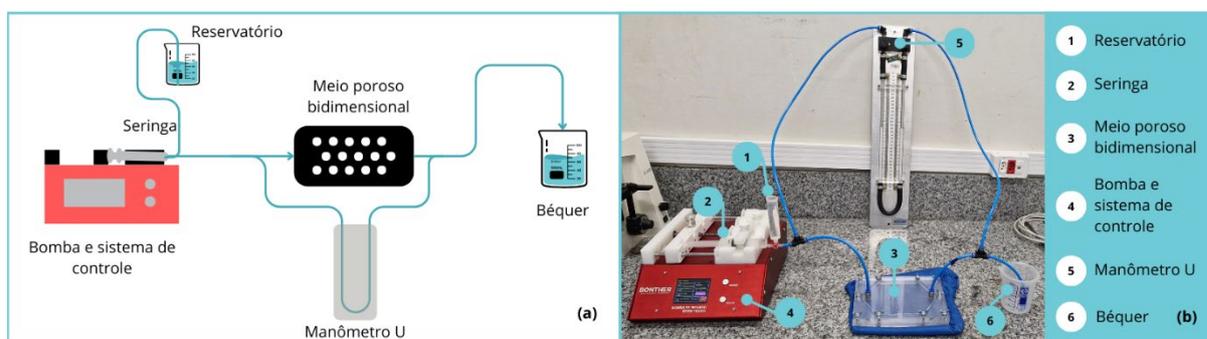


Figura 2. Esquema geral do sistema (a) e fotografia da bancada de testes (b).

Para garantir a efetividade dos testes, é imperativo que o sistema esteja devidamente saturado, ou seja, completamente preenchido com o fluido de teste e livre de bolhas de ar. O processo de saturação do sistema está esquematizado na Figura 3. Inicialmente, a seringa deve

ser preenchida completamente com o fluido de teste, assegurando-se de eliminar qualquer vestígio de ar. Em seguida, a seringa é conectada à bomba. O reservatório, a bomba e o sistema são equipados com uma válvula de três vias, permitindo o isolamento de cada elemento dos demais. O procedimento envolve a conexão da seringa à bomba e o ajuste da válvula para que a bomba injete fluido no sistema. Quando a seringa atingir 10% de sua capacidade, a bomba é desligada e a válvula é ajustada para conectar a bomba ao reservatório, permitindo que a bomba recue e puxe o fluido presente no reservatório para dentro da seringa. Em seguida, a válvula é reajustada para conectar novamente a bomba ao sistema, e o processo de avanço da bomba é retomado. Este ciclo deve ser repetido até que 10 ml do béquer de saída estejam preenchidos.

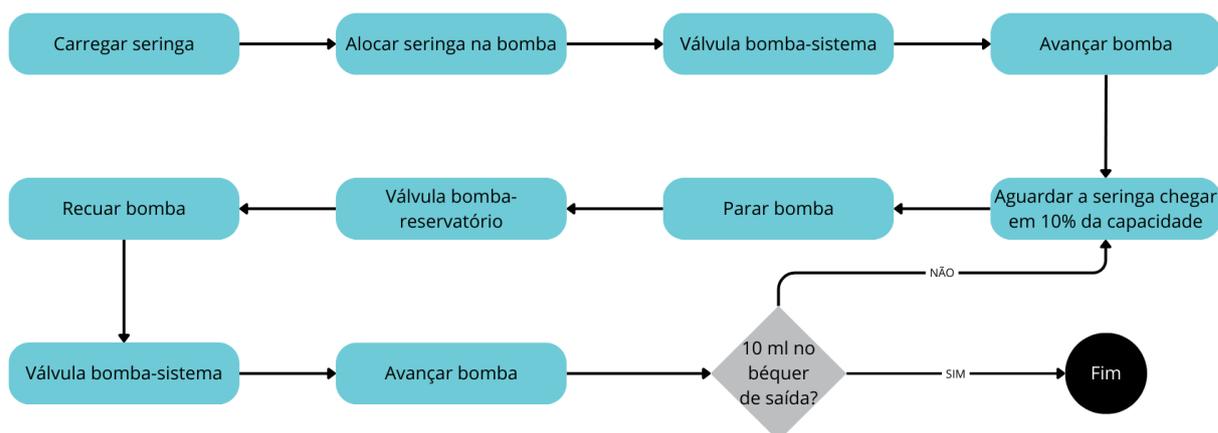


Figura 3. Esquema de saturação do sistema.

Com o sistema devidamente saturado, iniciam-se os testes de permeabilidade. O teste consiste em anotar as alturas iniciais no manômetro em U e configurar a bomba com a vazão devida. Então a bomba é acionada até que a pressão no manômetro se estabilize, nesse momento são anotados os deslocamentos do líquido do manômetro. Através da Equação 8 é possível calcular a pressão do sistema obtendo a vazão e o diferencial de alturas do manômetro.

$$\Delta P = \rho_m g \Delta h \quad (8)$$

Na equação 8, ρ_m é a massa específica do fluido manométrico (neste caso, água a temperatura ambiente), g é a gravidade e Δh é a diferença de altura visualizada no manômetro.

3.2. Bomba de infusão

A Figura 4 mostra a bomba utilizada no projeto, a qual é uma bomba de infusão de 4 seringas série *touch* da empresa *Bonther*. Esta bomba conta com suporte para duas ou quatro seringas de 40 ml e mecanismo motorizado tipo *microstepping*, oferecendo excelente resolução e precisão para taxas de infusão baixas. Apresenta também quatro tipos de injeção disponível: contínuo, rampa e pulsante com parâmetros programáveis, e taxa de infusão de 1 μ l (microlitro) por minuto até 60 ml (mililitro) por segundo.

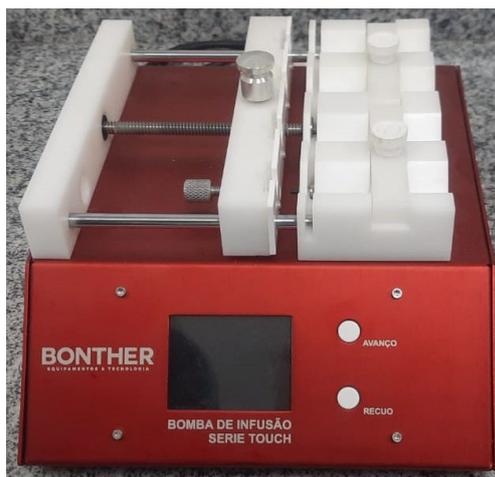


Figura 4. Bomba de infusão série *touch* da empresa Bonther.

A bomba deve ser calibrada para que seja possível validar as informações empregadas diretamente do sistema de controle. Para efetuar a calibração, primeiramente foi necessário saturar o sistema e, para isso, foram inseridas quatro seringas que irão até metade do seu curso, ou seja, 80 ml de fluido-tipo apenas para saturar o sistema e tirar bolhas de ar. Após a saturação, foi posicionado o béquer acima da balança e devidamente tarada para que possa iniciar uma segunda rodada de injeção. Com o sistema saturado, a bomba é acionada e o tempo cronometrado. Ao fim dos outros 80 ml, verifica-se a massa registrada na balança e se a vazão medida equivale àquela referenciada no sistema de controle. A tabela 1 mostra o passo a passo para calibrar a bomba.

Tabela 1. Passo a passo para calibração da bomba de injeção.

Passos	Atividades
1	Preencher quatro seringas
2	Posicionar as seringas
3	Zerar a balança
4	Ligar a bomba
5	Saturar o meio com metade da capacidade de cada seringa (80 ml)
6	Reiniciar o bombeamento com o restante da capacidade (80 ml)
7	Registrar o tempo de bombeamento
8	Registrar a massa medida na balança
9	Realizar cálculos para verificação

3.3. Célula Hele-Shaw

A célula Hele-Shaw é o componente que possui a função de simular o meio poroso. Esse sistema conta com duas placas planas com um espaço uniforme entre elas, sendo fundamental que a largura e comprimento dessas placas sejam muito maiores que esse espaço entre elas. O espaço vazio entre as placas permite que obstáculos sejam inseridos na geometria como forma de simular um meio poroso para o escoamento. Na Figura 5 observa-se três células que serão utilizadas no estudo, onde (a) é a célula sem obstáculo algum, (b) é a célula com obstáculos no formato de cilindros alinhados com a qual espera-se uma permeabilidade inferior a anterior e (c) uma célula que possui cilindros desalinhados de mesmo diâmetro característicos

(JACKSON; JAMES, 1986). A escolha de cada geometria se deu como forma de permitir o teste de diferentes funções de permeabilidade.

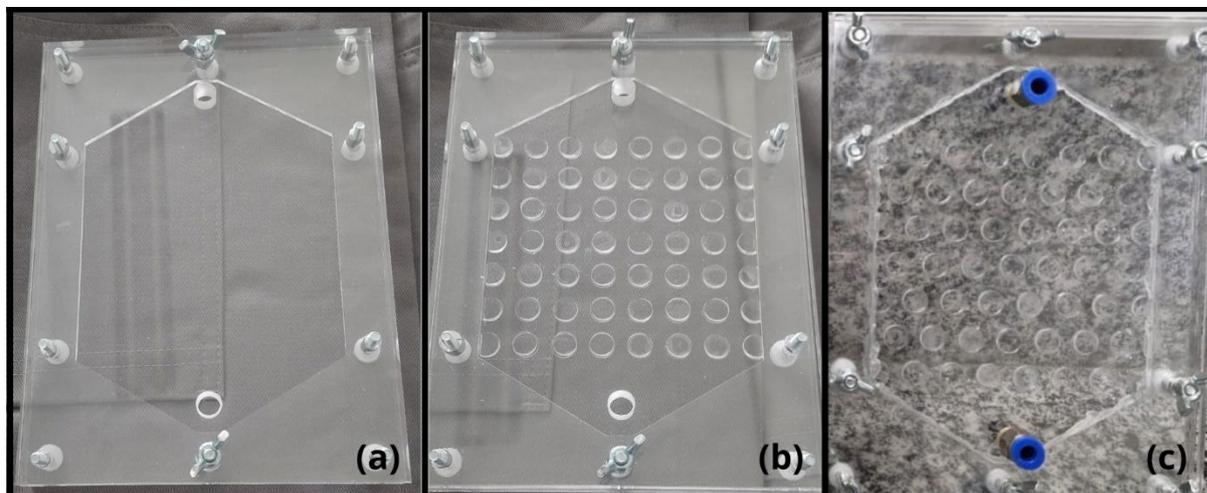


Figura 5. Células bidimensionais, sem obstáculo (a), com obstáculos em forma de cilindros alinhados (b), com obstáculos em forma de cilindros desalinhados com diâmetro equivalente da partícula igual à anterior e com coeficiente de tortuosidade maior (c).

A figura 6 mostra as cotas, em milímetros, de cada meio poroso. As cotas são fundamentais para o cálculo de porosidade e permeabilidade.

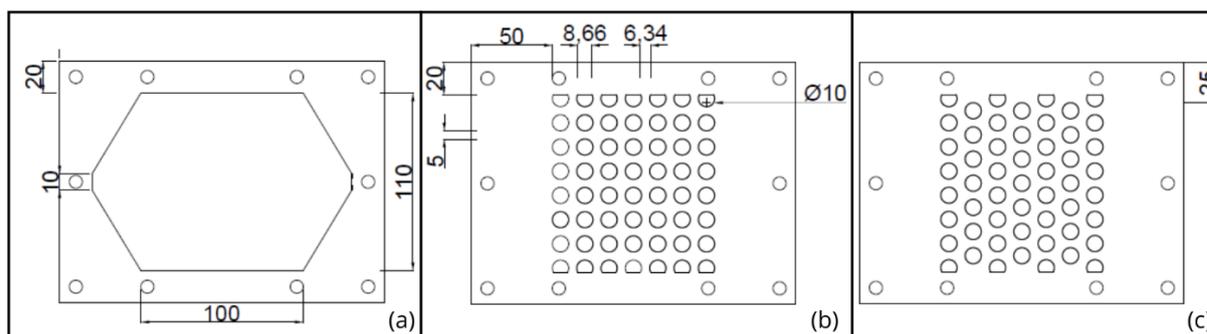


Figura 6. Cotas para a célula sem obstáculos (a), cota a a célula com obstáculos alinhados (b) e cota para célula com obstáculos desalinhados (c), todas as três geometrias em milímetro.

Visando ao cálculo da permeabilidade teórica para cada geometria, é importante obter a porosidade do meio e o diâmetro equivalente da partícula do meio. Calcular a porosidade da célula (a) é uma tarefa simples, já que a porosidade é uma relação entre o espaço vazio e o espaço total do meio podendo ser calculada pela Equação 1. Com essa definição, chega-se à conclusão de que a porosidade para esta célula é 1, sendo o diâmetro equivalente da partícula é igual a zero. Para as células (b) e (c) não é tão simples. Primeiramente, é necessário calcular o volume total da célula V_c . Em seguida, calcula-se o volume fixo V_f que é o volume total ocupado pelos cilindros. Portanto, para o cálculo dos volumes fixos soma-se o volume ocupado tanto pelos cilindros completos quanto cortados. A Tabela 2 mostra os valores calculados para cada uma das células. As células (b) e (c) possuem mesma porosidade, uma vez que possuem o mesmo diâmetro característico, sendo a diferença entre elas apenas o coeficiente de tortuosidade. As permeabilidades podem ser calculadas através das equações 5 e 6 que

consideram apenas características do meio poroso, como a porosidade e a tortuosidade. Este registro permitirá a comparação entre os resultados experimentais e os valores teóricos.

Tabela 2. características fundamentais de cada meio escolhido.

Célula	Volume Vazio V_v [m ³]	Volume Fixo V_f [m ³]	Porosidade ε [-]	Diâmetro dos cilindros D_p [m]	Permeabilidade teórica [m ²]
Sem obstáculos (a)	2,92E-05	0	1	0	-
Cilindros alinhados (b)	2,08E-05	8,37E-06	0,71	0,01	1,65E-04
Cilindros desalinhados (c)	2,08E-05	8,37E-06	0,71	0,01	2,97E-06

Como esperado, a geometria *b* possui uma permeabilidade maior que a geometria *c* mesmo ambas tendo a mesma porosidade e o mesmo diâmetro de partícula. Isso ocorre porque a geometria *c* possui um coeficiente de tortuosidade superior do da geometria *a*.

3.4. Viscosímetro

Para a caracterização do fluido e cálculo da permeabilidade do sistema, a caracterização reométrica é fundamental. Por isso, será utilizado o viscosímetro rotacional digital mostrado na Figura 7 da empresa SPLabor (a) e será apresentado um esquema do funcionamento de um viscosímetro (b).

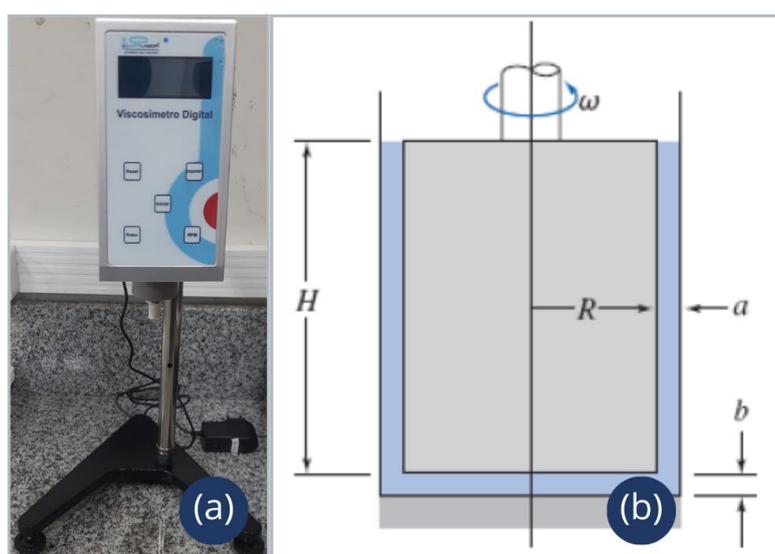


Figura 7. Viscosímetro rotacional digital da empresa SPLabor (a) e esquema de funcionamento (b) (Fox et al., 2014).

Um viscosímetro rotacional é um dispositivo usado para medir a viscosidade de um fluido aplicando uma força de cisalhamento e observando a deformação do fluido. Ele é amplamente utilizado devido à sua versatilidade e capacidade de medir uma ampla gama de viscosidades. O

viscosímetro possui um cilindro (do inglês *spindle*) que é imerso no fluido a ser testado. Quando o rotor começa a girar, ela aplica uma força de cisalhamento ao fluido. A velocidade de rotação pode ser ajustada para aplicar diferentes taxas de cisalhamento. O viscosímetro mede o torque necessário para manter a rotação da geometria rotativa. Este torque é proporcional à resistência que o fluido oferece ao cisalhamento.

O viscosímetro utilizado para os testes possui uma faixa de medição de 0,6 mPa a 6.000.000 mPa.s, faixa de rotação de 0,1 a 99,9 RPM e uma precisão de $\pm 1\%$ para fluidos newtonianos (SPLabor, 2024).

3.5. Outros materiais

Além dos materiais listados anteriormente, também foi necessário para a montagem da bancada utilizar mangueiras PU de 6 mm de diâmetro externo e 4 mm de diâmetro interno para a conexão entre os diferentes componentes (essa conexão deve ser feita via engate rápido). Além das mangueiras, foi usado um manômetro em U usando água como fluido manométrico, com escala milimétrica e de capacidade total de 350 mm, para aferir a diferença de pressão na entrada e saída da célula e uma balança digital para verificar a massa de água na calibração da bomba.

4. RESULTADO

4.1. Reometria dos fluidos teste

Os resultados reométricos dos fluidos testados são apresentados na Tabela 3, que mostra as médias, mínimos, máximos, amplitude e incerteza padrão, com 99,7% de confiança das viscosidades obtidas para cada fluido em três rotações diferentes. Dez tipos de fluidos foram preparados por diluições sucessivas de glicerina em água, variando de 100% glicerina a 10% glicerina, com incrementos de 10%. Para cada tipo de fluido, foram realizados 15 testes (5 testes em cada uma das 3 rotações), totalizando 135 medições a uma temperatura média de 18 graus celsius.

Tabela 3. Relações de concentrações e viscosidades

Glicerina [%]	Rotações			Média [mPa.s]	Mínimo [mPa.s]	Máximo [mPa.s]	Amplitude [%]	Incerteza com 99,7% de confiança
	1	2	3					
100	1	2,1	3,2	1825,52	1806,00	1886,30	4,40%	1,32%
90	20	22,5	25	252,43	247,30	256,60	3,68%	1,12%
80	30	37	45	105,13	104,30	105,70	1,33%	0,43%
70	90	95	99,9	37,95	36,90	38,90	5,27%	1,70%
60	90	95	99,9	20,27	20,10	20,50	1,97%	0,71%
50	90	95	99,9	12,93	12,60	13,20	4,64%	1,49%
40	95,9	97,9	99,9	8,76	8,66	8,87	2,40%	0,71%
30	95,9	97,9	99,9	6,82	6,67	7,05	5,57%	1,78%
20	95,9	97,9	99,9	5,46	5,24	5,55	5,68%	1,59%
10	95,9	97,9	99,9	4,51	4,42	4,59	3,77%	1,18%

Os resultados reométricos podem ser visualizados na figura 8, que mostra no eixo y o valor da viscosidade em escala logarítmica e a concentração de glicerina no eixo x.

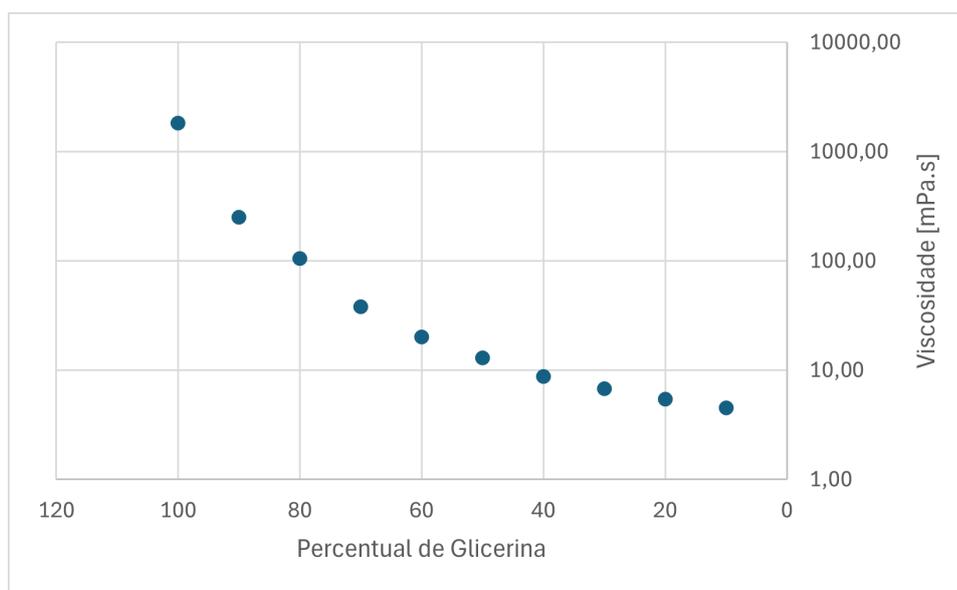


Figura 8. Viscosidade [mPa.s] em escala logarítmica pelos percentuais de glicerina.

A análise reológica é crucial para compreender o comportamento do escoamento desses fluidos em meios porosos, pois a viscosidade influencia diretamente a resistência ao escoamento e, conseqüentemente, a permeabilidade do meio poroso. Fluidos com maior concentração de glicerina apresentaram maiores viscosidades, como esperado, enquanto as diluições mais altas (menor concentração de glicerina) exibiram menores viscosidades. O comportamento reológico observado nos diferentes testes confirma a importância de caracterizar precisamente a viscosidade para prever o desempenho do escoamento em meios porosos.

4.2. Permeabilidades experimentais

Para a medição das permeabilidades experimentais foram realizados 225 testes de infusão de fluido nos meios porosos. Utilizou-se 5 fluidos de teste, iniciando em 50% água e 50% glicerina e incrementando 10% de glicerina até 90%. As diluições de 10% até 40% não foram testadas devido à baixa viscosidade desses fluidos, implicando em uma pequena variação de altura no manômetro U, dificultando a visualização e, conseqüentemente, aumentando o erro relativo associado. A glicerina pura não foi testada por motivos de proteção da bomba de infusão, haja vista que a pressão seria muito elevada, podendo danificar a bomba. Além disso, seria necessário um manômetro com maior capacidade do que o utilizado, devido à elevada pressão e altura alcançada pelo fluido manométrico, ultrapassando os limites físicos do equipamento.

O número de Reynolds deve ser calculado para o caso mais extremo do teste, pois todos os outros estarão abaixo dele. Portanto, o número de Reynolds deve ser calculado utilizando as características reológicas da diluição 50/50, já que é aquela que apresenta a menor viscosidade entre os fluidos de teste. Utilizando a Equação 4 e impondo a maior vazão dos testes, chega-se a um número de Reynolds de 0,016, o que indica que a lei de Darcy (Equação 3) pode ser empregada nos casos, já que se configuram com escoamentos rastejantes.

Os resultados experimentais obtidos com os ensaios podem ser visualizados na figura 9.

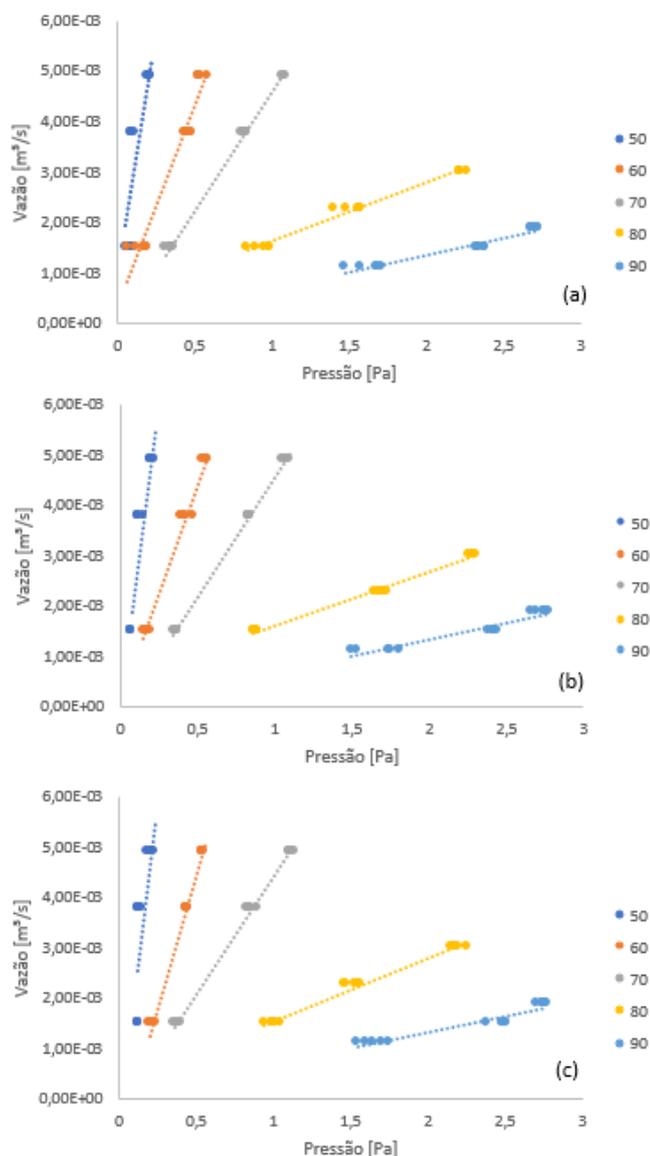


Figura 9. Velocidade superficial por variação de pressão separados por fluidos de teste para célula sem obstáculo (a), com obstáculo alinhado (b) e com obstáculo desalinhado (c).

Conforme a viscosidade do fluido aumentou, foi necessário diminuir a vazão da bomba para proteger o sistema de pressões elevadas. Para todos os fluidos, independente da célula, a relação entre a vazão e variação de pressão se mostra linear. Isso ocorre pois, independente da diluição de glicerina em água, o fluido escoante garante seu comportamento newtoniano. Assim, a relação entre ΔP e μ_D mostrou-se aproximadamente constante para um fluido em um dado meio poroso. A partir dos resultados de velocidade superficial por variação de pressão, pode-se calcular, portanto, a permeabilidade média para cada célula e cada fluido de teste através da equação da lei de Darcy (equação 3). A Figura 10 mostra essas permeabilidades com as incertezas do sistema completo calculado através do método GUM (do inglês, *Guide for Uncertainty Measurement*).

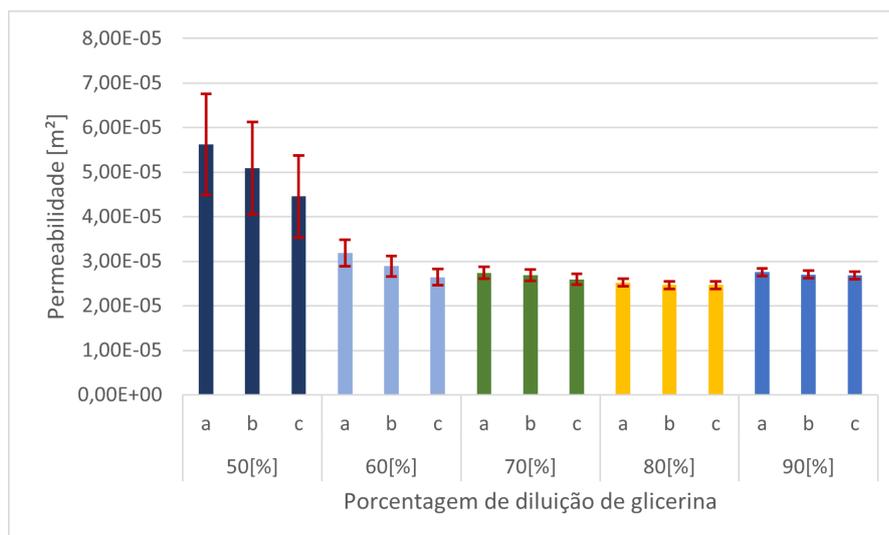


Figura 10. Permeabilidades para cada tipo de célula e fluido

Os resultados mostram que, para qualquer que seja o fluido, a célula *a* sempre possui a maior permeabilidade, seguido da célula *b* e pôr fim a célula *c*, como era esperado. Além disso, analisando os testes de 60% de glicerina até 90%, é possível perceber que a permeabilidade de cada célula se manteve em valores próximos, o que corrobora com a lei de Darcy, que diz que, para fluidos newtonianos, a reologia do fluido não altera a permeabilidade. O fluido com 50% de glicerina se destaca justamente por ter uma viscosidade inferior, o que dificulta a leitura no manômetro. Conforme a viscosidade aumenta, a leitura fica mais precisa. As incertezas padrão também mostram que, para menores viscosidades se tem maiores imprecisões, como citado. O fluido com 50% de glicerina possui uma incerteza padrão na ordem de 20%, enquanto o fluido de 90% de glicerina possui uma incerteza padrão na ordem de 3%.

4.3. Verificação entre permeabilidade experimental e teórica

Utilizando os resultados de permeabilidades experimentais e teóricas é possível realizar uma comparação entre as permeabilidades a fim de validar os testes. A Tabela 4 mostra os resultados experimentais para cada meio poroso e fluido testado, mostrando a diferença entre o teórico.

Tabela 4. Comparação entre permeabilidades experimentais e teóricas.

Fluido	Meios porosos	Permeabilidade			Desvios	
		Experimental	Incerteza (99,7% de confiança)	Teórica	Absoluto	Relativo
50	Alinhado	5,09E-05	± 20,49%	1,65E-04	-1,15E-04	31%
	Desalinhado	4,45E-05	± 20,76%	2,97E-06	4,16E-05	1500%
60	Alinhado	2,89E-05	± 7,99%	1,65E-04	-1,37E-04	17%
	Desalinhado	2,64E-05	± 6,97%	2,97E-06	2,34E-05	890%
70	Alinhado	2,69E-05	± 4,75%	1,65E-04	-1,39E-04	16%
	Desalinhado	2,60E-05	± 4,64%	2,97E-06	2,30E-05	874%
80	Alinhado	2,47E-05	± 3,42%	1,65E-04	-1,41E-04	15%
	Desalinhado	2,46E-05	± 3,39%	2,97E-06	2,17E-05	830%
90	Alinhado	2,70E-05	± 3,17%	1,65E-04	-1,38E-04	16%
	Desalinhado	2,68E-05	± 3,17%	2,97E-06	2,39E-05	904%

Os valores dos resultados experimentais ficaram entre os resultados teóricos. Era esperada uma permeabilidade maior para a célula com obstáculos alinhados, apresentando desvio da ordem de 20% com relação ao teórico. Entretanto, os desvios observados para a célula com obstáculos desalinhados são sensivelmente maiores que os da célula com obstáculos alinhados. Isto ocorre pois o coeficiente de tortuosidade da célula empregada neste trabalho é baixo quando se observa funções similares da literatura. Este texto também explica valores de permeabilidades entre as células com obstáculos tão próximos. Outro fator que pode influenciar significativamente as medições é a modelagem experimental bidimensional. A literatura apresenta os valores para meios tridimensionais. Portanto, na escala de D_p empregada neste trabalho, é possível que a dimensão da altura da Hele-Shaw esteja dominando as tensões viscosas no escoamento.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo desenvolver um modelo experimental de um meio poroso bidimensional para verificar as funções de permeabilidade e investigar a influência de fluidos newtonianos no escoamento através desses meios. Para isso, foi projetada e implementada uma bancada experimental composta por uma bomba de infusão, três meios porosos distintos, um manômetro em U e um bécquer para coleta do fluido, permitindo a medição das propriedades de escoamento e a determinação das permeabilidades experimentais.

Os testes realizados com fluidos newtonianos, utilizando diluições de água em glicerina, confirmaram a reologia esperada e demonstraram variações na permeabilidade conforme a configuração do meio poroso. Como esperado, o meio poroso sem obstáculos apresentou a maior permeabilidade, enquanto o meio com obstáculos desalinhados resultou na menor permeabilidade devido ao aumento da tortuosidade. A comparação entre as permeabilidades teóricas e experimentais mostrou alta coerência entre os valores obtidos, especialmente para os meios sem obstáculos e com obstáculos alinhados. No entanto, a permeabilidade do meio poroso com obstáculos desalinhados apresentou erros maiores, provavelmente devido ao baixo coeficiente de tortuosidade da célula empregada no estudo.

As limitações identificadas durante a realização deste trabalho incluem a precisão na leitura da pressão, que poderia ser melhorada com o uso de um manômetro digital ou dispositivo desenhado especialmente para baixas pressões. Além disso, a escolha de meios porosos com maior tortuosidade poderia proporcionar uma diferenciação mais evidente nas permeabilidades medidas, o que seria um avanço significativo em futuras pesquisas.

Pode-se, finalmente, concluir que o modelo experimental desenvolvido foi bem-sucedido em cumprir os objetivos propostos, proporcionando uma análise detalhada da permeabilidade de meios porosos teste. As discrepâncias identificadas sugerem que ajustes no coeficiente de tortuosidade e na instrumentação utilizada podem levar a resultados mais precisos. Assim, recomenda-se que trabalhos futuros explorem meios porosos com características geométricas mais complexas e utilizem instrumentos de medição mais precisos, para aprofundar o entendimento dos fenômenos acerca de escoamento em meios porosos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Barnes, H. A. (1989). **Shear-Thickening ('Dilatancy') in Suspensions of Nonaggregating Solid Particles Dispersed in Newtonian Liquids**. *Journal of Rheology*, 33(2), 329-366.

BEAR, J. **Dynamics of fluids in porous media**. 1. ed. New York: Dover Publications, Inc., 1972.

BEIJAL, S. K. **Flow Behavior of Polymers in Porous Media**. Pennwell publishing Co. Tulsa, 1982

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.

CARMAN, P. C. **Transactions of Iche**. Vol. 15, 1937

CHEVALIER, T. et al. Darcy's law for yield stress fluid flowing through a porous medium. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, 2013.

CHRISTOPHER, R. H.; MIDDLEMAN, S. Power-law flow through a packed tube. **Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals**, 1965.

Dullien, F. A. L. **Porous Media Fluid Transport and Pore Structure**. Academic Press Inc., New York, 1979

FOX, Robert W.; McDONALD, Alan T.; PRITCHARD, Philip J. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

HELE-SHAW, H. S. **The flow of water**. *Nature*, 1898.

JACKSON, G. W.; JAMES, D. F. **The permeability of fibrous porous media**. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 1986.

KAVIANY, M. **Principles of heat transfer in porous media**. 2. Ed. Springer, 1995.

KEMBLOWSKI, Z.; MICHNIEWICZ, M. **A new look at the laminar flow of power law fluids through granular beds**. *Rheologica Acta*, 1979.

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.

SOCHI, T. **Non-Newtonian flow in porous media**. *Polymer*, 2010.

SPLabor. **Viscosímetro rotacional para poucas amostras 12 a 6.000.000 mPa.s**. Disponível em: <https://www.splabor.com.br/produto/viscosimetro-rotacional-para-poucas-amostras-12-a-6-000-000-mpa-s/>. Acesso em: 02 ago. 2024.

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