

## ESTUDO E ANÁLISE EXPERIMENTAL DA DISPERSÃO DA PERMEABILIDADE DE MEIOS POROSOS NÃO CONSOLIDADOS

Larissa D' Oliveira Verly<sup>1</sup> (UERJ) E-mail: [larissa.verly@gmail.com](mailto:larissa.verly@gmail.com)

Plínio A. Tavares Neto<sup>1</sup> (UERJ) E-mail: [ionilp@hotmail.com](mailto:ionilp@hotmail.com)

Leônicio Diógenes Tavares Câmara<sup>3</sup> (UERJ) E-mail: [diogenescamra@gmail.com](mailto:diogenescamra@gmail.com)

**Resumo:** O escoamento de fluidos em meios porosos é um fenômeno presente tanto na natureza como no ambiente da indústria. Este tipo de escoamento é considerado complexo devido à diversidade de estruturas porosas existentes, e a análise estatística destes meios porosos pode ser de grande importância na compreensão destas estruturas. Através de um aparato experimental desenvolvido no laboratório, foram realizados ensaios de permeabilidade, através de um novo Permeômetro o qual foi utilizado na análise estatística. O Permeômetro consiste num circuito fechado com reservatório de água e uma bomba que realiza a elevação para uma coluna de água acima de um leito poroso não-consolidado. O equipamento é de fácil operação e possui alta reprodutibilidade de resultados. Foi avaliado o escoamento por um modelo de Darcy em um mesmo leito de esferas de vidro empacotadas inúmeras vezes a fim de avaliar o efeito da variação das heterogeneidades do meio poroso não consolidado. A variação das heterogeneidades foi mensurada através do desvio padrão da permeabilidade, sendo obtido o valor médio da permeabilidade igual a  $4,002E-09$  m<sup>2</sup> e um desvio padrão de  $0,297E-09$  m<sup>2</sup> para um meio poroso não consolidado de esferas de vidro de 3mm de diâmetro. Este resultado reforça a necessidade de realização de estudos de dispersão estatística em aparatos de permeabilidade de leitos não consolidados, mesmo para meios formados de “esferas quase perfeitas”.

**Palavras-chave:** Permeabilidade, Modelo de Darcy, Leito não consolidado

## EXPERIMENTAL STUDY AND ANALYSIS OF THE PERMEABILITY DISPERSION OF NON-CONSOLIDATED POROUS MEDIA

**Abstract:** Fluid flow in porous media is a phenomenon present both in nature and in the industry environment. This type of flow is considered complex due to the diversity of existing porous structures, therefore, the possibility of improving the understanding of phenomena through the statistical analysis of unconsolidated porous media proved to be of great importance. Using an experimental apparatus developed in the laboratory, permeability tests were carried out, using a new Permeameter which was used in the statistical analysis. The Permeameter consists of a closed circuit with a water reservoir and a pump that performs the elevation to a water column above an unconsolidated porous bed. The equipment is easy to operate and has high reproducibility of results. The flow was evaluated by a Darcy model in the same bed of packaged glass spheres countless times in order to evaluate the effect of the variation of the heterogeneities of the unconsolidated porous media. The variation in heterogeneities was measured using the permeability standard deviation, being obtained an average permeability value of  $4.002E-09$  m<sup>2</sup> and a standard deviation of  $0.297E-09$  m<sup>2</sup> for an unconsolidated porous media of 3 mm glass spheres diameter. This result reinforces the need to carry out studies of statistical dispersion in non-consolidated bed permeability apparatus, even for media formed from “almost perfect spheres”.

**Keywords:** Permeability, Darcy model, Unboundbed

## **1. Introdução**

O escoamento de fluidos em meios porosos é um fenômeno comum tanto em ambiente industrial, assim como na natureza. Dentre as aplicações industriais, pode-se citar: a recuperação de gás e petróleo; migração de contaminantes e fertilizantes em solos; processos de separação com catalisadores, membranas, filtros; preparação de cimentos e concretos (ROSA J. A ET AL, 2011)

Uma propriedade essencial do escoamento é a permeabilidade ( $k$ ), que é caracterizada pela facilidade que os fluidos escoam através do material poroso (BEAR J., 1972) (DIAS R.P. ET AL, 2008). Na dinâmica dos fluidos e hidrologia, a lei de Darcy é uma equação que descreve o fluxo de um fluido através de um meio poroso. A lei, publicada em 1856, formulada por Henry Darcy, foi elaborada através de experimentos sobre o fluxo de água através de leitos de areia. Este experimento deu origem a uma lei que correlaciona a taxa de perda de energia da água (gradiente hidráulico) no solo com a sua velocidade de escoamento (DARCY, H, 1856).

Na caracterização de meios porosos, a relação entre porosidade e permeabilidade foi estudada inicialmente por Kozeny-Carman, que desenvolveu um modelo que a descreve (DULLIEN, F. A. L, 1979) (CARMAN, P. C, 1936). A maior parte do empacotamento granular encontrado na natureza tem estruturas randômicas e, por isso, o empacotamento bifásico tem sido extensivamente estudado (YU, A.B., 1991).

O fluxo de um fluido é dependente da direção da trajetória das partículas que o compõe, e do estado de organização do escoamento, que pode ser laminar ou turbulento. No escoamento laminar as partículas tendem a percorrer trajetórias paralelas, já no turbulento as partículas percorrem trajetórias irregulares, podendo ser curvilíneas e assimétricas.

A complexidade da simulação de fenômenos de escoamento em meios porosos se dá pela natureza da geometria e topologia de seu espaço, e pela heterogeneidade na composição química de suas paredes internas (BIRD, ROBERT B. ET AL; 2004). Na natureza, a permeabilidade age de forma não ordenada, pois os materiais porosos não são uniformes. Nos reservatórios de petróleo, por exemplo, as rochas variam de tamanho e forma, interferindo diretamente no escoamento do fluido através da permeabilidade, sendo esse um fator muito importante, pois afeta diretamente a produtividade de poços de petróleo (BARROCA, NETO O, A., 2012). Diante disso, a análise experimental é uma alternativa viável e um ponto de partida para a aplicação de técnicas numéricas que as solucionem (MACIEL, H. E., 2015).

Com o propósito de estudar o escoamento de água em um meio poroso não consolidado, foi desenvolvida uma unidade experimental de permeabilidade (Figura 1), com a capacidade de caracterizar escoamento de fluidos em meios porosos não consolidados sob condições Darcianas e/ou não-Darcianas. O Permeômetro inovador funciona a partir de uma carga de fluido vertical acima do meio poroso, sendo de fácil operação e com alta reprodutividade de resultados.

Na unidade experimental é utilizada uma bomba para conservação de uma carga hidráulica sobre o leito poroso de esferas de vidro. Através da variação do gradiente de pressão, por efeito da coluna d'água acima do meio poroso, obtém-se a vazão de água (l/min) através do leito. Assim, obtém-se um gráfico da vazão em função da pressão, onde, através do coeficiente angular, é calculada a permeabilidade.

Foi avaliado o escoamento por um modelo de Darcy em um mesmo leito de esferas de

vidro empacotadas inúmeras vezes a fim de avaliar o efeito da variação das heterogeneidades do meio poroso não consolidado. A variação das heterogeneidades foi mensurada através do desvio padrão da permeabilidade.



Figura 1 – Unidade experimental de permeabilidade

Na unidade experimental é utilizada uma bomba para conservação de uma carga hidráulica sobre o leito poroso de esferas de vidro. Através da variação do gradiente de pressão, por efeito da coluna d'água acima do meio poroso, obtém-se a vazão de água (l/min) através do leito. Assim, obtém-se um gráfico da vazão em função da pressão, onde, através do coeficiente angular, é calculada a permeabilidade.

Foi avaliado o escoamento por um modelo de Darcy em um mesmo leito de esferas de vidro empacotadas inúmeras vezes a fim de avaliar o efeito da variação das heterogeneidades foi mensurada através do desvio padrão da permeabilidade.

### 1.1. Empacotamento do leito

O material utilizado no leito foram esferas de vidro de 0,003 m. A porosidade é calculada através da razão do volume de poros  $V_p$  [m<sup>3</sup>] pelo volume total da amostra  $V_t$  [m<sup>3</sup>],

$$\epsilon = \frac{V_p}{V_t} \quad (1)$$

Para a amostra estudada foi obtido o valor 0,38 ou 38%. Em seguida, o material foi inserido no tubo de acrílico até a altura de 0,20 m, para a formação do leito no tubo do Permeâmetro. O leito descrito e o material utilizado para o experimento são apresentados

conforme Figura 2 e 3.



Figura 2 – Esferas de vidro 0,003 m



Figura 3 – Esferas de vidro no leito

## 1.2. Experimento

Para realização dos testes, o reservatório é preenchido com água até 0,03 m de sua borda, sendo a bomba acionada iniciando o fluxo de água pela linha de PVC. As válvulas são vagarosamente abertas para a formação de uma coluna de água acima do leito de esferas de vidro. As válvulas eram controladas para atingir as alturas da coluna de água no tubo a cada 0,05 m, no intervalo de 0,30 m a 0,70 m, mensurados numa escala métrica afixado ao lado do tubo de acrílico, totalizando assim nove diferentes medidas. A cada altura era registrada a vazão marcada no rotâmetro. Todos os testes foram realizados em triplicata para viabilizar a maior precisão das medidas. O esquema do Permeômetro é ilustrado conforme Figura 4:

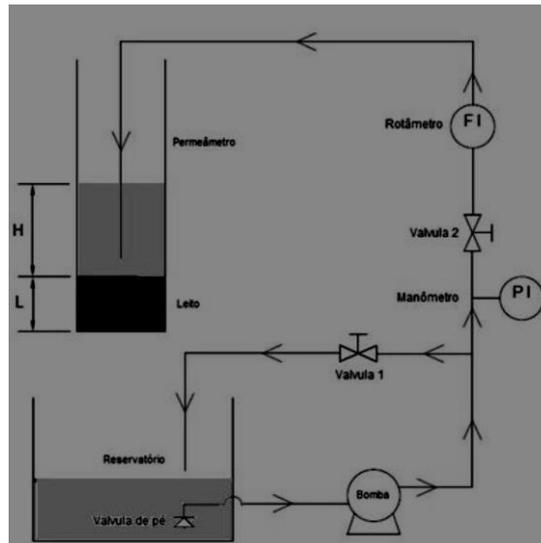


Figura 3 – Esquema do Permeâmetro

A pressão de água sobre o leito era determinada pela altura da coluna d’água acima deste. Através do controle das válvulas, variava-se a altura da coluna d’água acima do leito e, assim que era alcançada e estabilizada, iniciava-se a medição da altura da coluna e vazão pelo rotâmetro.

Foi verificada também a temperatura da água no reservatório por meio de um termômetro, a fim de determinar a variação de viscosidade do fluido. Para a determinação da permeabilidade utilizamos a lei de Darcy, apresentada na equação 2, que estabelece que a vazão de um fluido é diretamente proporcional ao gradiente de pressão aplicado no meio poroso, isso para um domínio de baixa velocidade do fluido (BEAR J., 1972), (DULLIEN F. A. L, 1979), (SCHEIDEGGER A. E., 1974).

$$Q = \frac{A}{\mu L} \Delta p \quad (2)$$

onde Q [m<sup>3</sup>/s] é vazão, K [m<sup>2</sup>] é a permeabilidade, A [m<sup>2</sup>] é a área transversal acessível, Δp [Pa] é o queda de pressão aplicado no leito, μ [Pa x s] é a viscosidade do fluido, e L [m] o comprimento do leito.

Pela equação da reta temos que y = ax, onde a é o coeficiente angular. Chegando assim na equação 3 que determina a permeabilidade K em função de a:

$$a = \frac{KA}{\mu L} \Rightarrow K = a \frac{\mu L}{A} \quad (3)$$

A área transversal acessível A corresponde a:

$$A = A_T \cdot \varnothing \quad (4)$$

Em que a área total é calculada pela área da circunferência.

$$A_T = \frac{\pi D^2}{4} \tag{5}$$

Onde D é o diâmetro interno do tubo.

Podemos observar o comportamento do gráfico (vazão/pressão, segundo o coeficiente angular, conforme Figura 5:

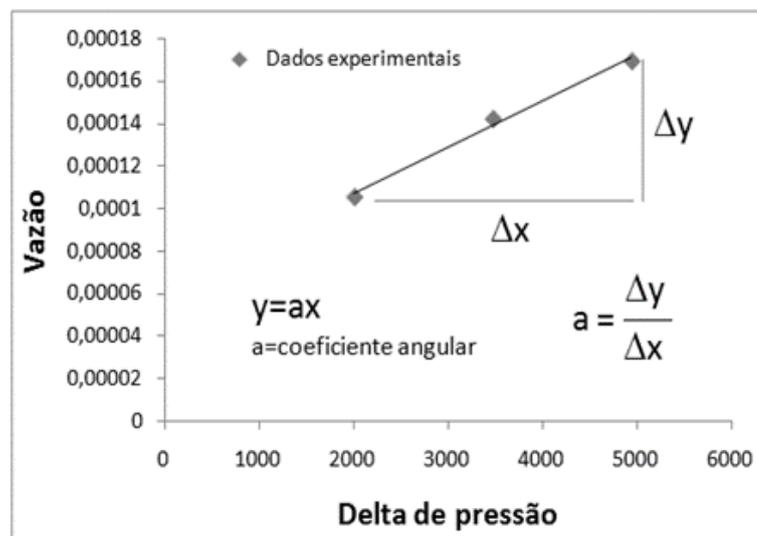


Figura 5 – Representação esquemática dos dados de vazão x pressão

A equação da estática abaixo assume pressão atmosférica na saída de água após o leito poroso (Eq. 7).

$$p = p - p_0 = p_0 + gH - p_0 = gH \tag{7}$$

onde  $\Delta p$  [Pa] é a diferença de pressão,  $p$  [Pa] é a pressão absoluta,  $p_0$  [Pa] é a pressão atmosférica,  $\rho$  é a densidade [kg/m<sup>3</sup>],  $g$  [m/s<sup>2</sup>] é a aceleração da gravidade e  $H$  [m] é a altura da coluna de água.

Os dados das constantes utilizadas para o cálculo das equações são apresentados conforme a Tabela 1 (VISCOPEdia, 2021).

Tabela 1: Dados Tabela

$\mu$	0.001 Pa.s
$L$	0.20 m
$D$	0.0445 m
$\rho$	1000 kg/m <sup>3</sup>
$g$	9.8 m/s <sup>2</sup>
$\varepsilon$	38%
$A_T$	0,00155 m <sup>2</sup>
$A$	0,00058 m <sup>2</sup>

Fonte: O autor

## 2. Resultados e Discussões

### 2.1 Determinação da Permeabilidade

Para realizar o cálculo desvio da média da permeabilidade das esferas de vidro de 0,003 m, foram realizados 15 testes, todos eles em triplicata para defini-la com maior acurácia.

Antes que o experimento fosse realizado, o tubo de acrílico do Permeômetro era desmontado sendo inserido um mesmo volume de esferas de vidro, previamente misturado a fim de garantir uma melhor homogeneidade. Posteriormente, depois de iniciado o ensaio, media-se a altura da coluna de água e, através do rotâmetro, era determinada a vazão. O gráfico de pressão por vazão, dos testes realizados, é apresentado conforme Figura 6:

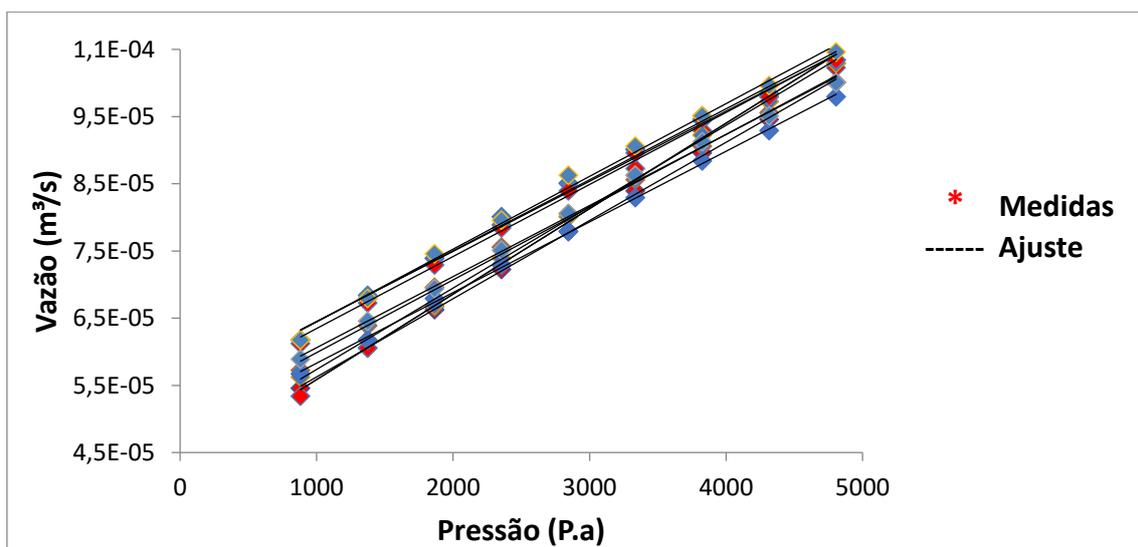


Figura 6 – Resultados dos ensaios dos eventos estatísticos

A partir desta figura podemos observar o comportamento linear de cada ensaio. Cada linha representa o resultado de um teste, com seu coeficiente angular determinado, como

mostrado na Figura 5. Com as informações estatísticas, foi calculado o coeficiente angular médio da Figura 6 acima, determinando-se a permeabilidade média dos ensaios, no valor de  $4,002 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$  descrito na Tabela 2:

Tabela 2: Permeabilidade média dos testes

D = Diâmetro do tubo (m):	4,45000E-02
AT = Área transversal acessível (m):	1,55400E-03
A = Área total transversal (m):	5,75000E-04
H = Altura do leito (m):	2,00000E-01
Coeficiente angular (a):	1,08253E-08
K = Permeabilidade (m <sup>2</sup> ):	4,00242E-09

Fonte: O autor

## 2.2. Cálculo de Erro e Desvio Padrão

O desvio padrão é uma medida da dispersão usada para medir a variabilidade dos valores de uma dada amostra em relação à média desta. Ele indica o quanto um conjunto de dados é uniforme, ou seja, quanto mais próximo de 0 for o desvio padrão, mais homogêneos são os dados (MAGALHÃES M. N. ET AL, 2009).

A fórmula de cálculo do desvio padrão ( $\sigma$ ) para os valores  $y_1, y_2, \dots, y_n$ , de uma amostra, é expressa na equação 8:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}} \quad (8)$$

Foi calculado o desvio padrão com o resultado médio da permeabilidade através da equação 8, obtendo os resultados conforme Tabela 3:

Tabela 3: Desvio Padrão

Desvio Padrão (m <sup>2</sup> )	0,297E-09
Permeabilidade Média (m <sup>2</sup> )	4,002E-09
Intervalo Erro	3,708E-09 – 4,302E-09

Fonte: O autor

Os resultados estatísticos estão plotados nas Figuras 7 e 8, abaixo:

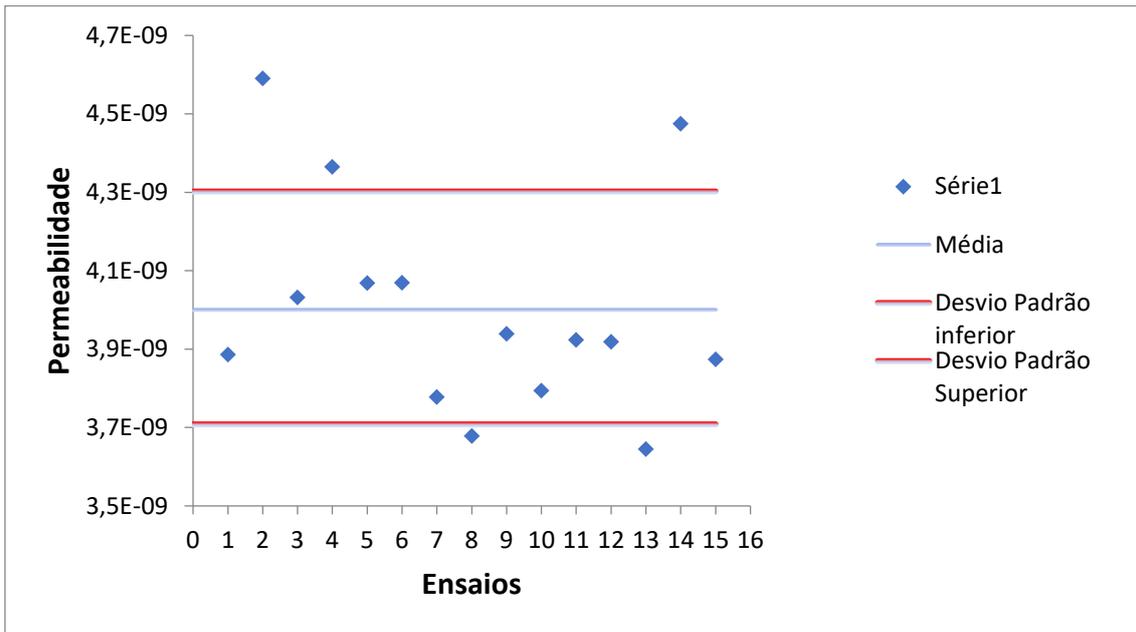


Figura 7– Domínio do desvio padrão

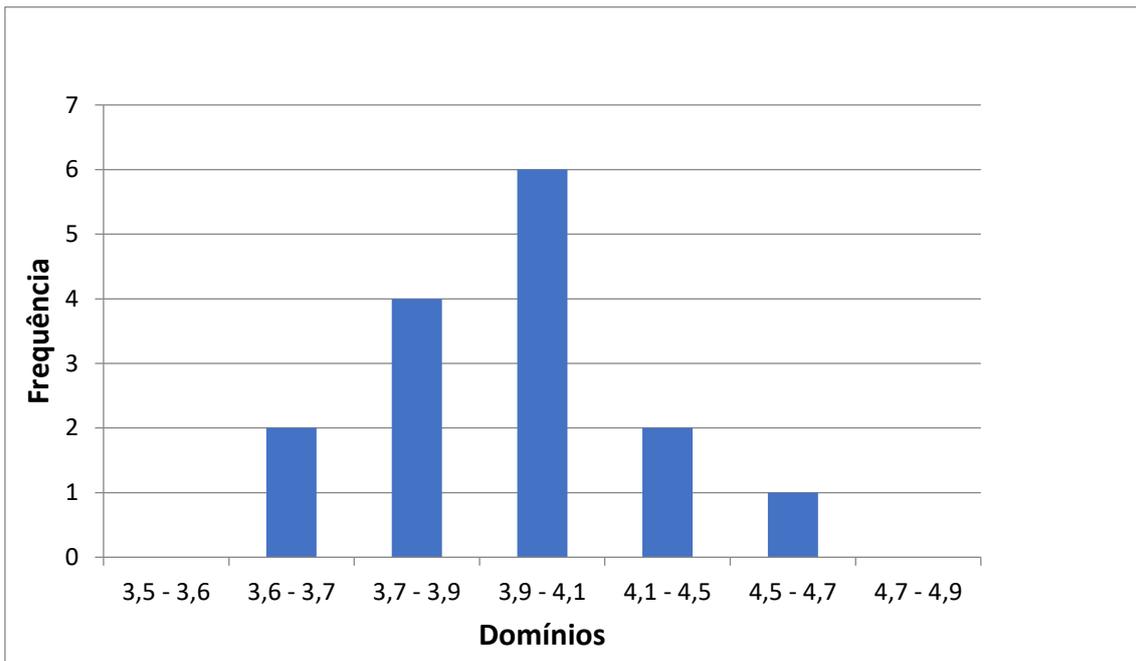


Figura 8 – Frequência nos intervalos de permeabilidade

Os valores fora do intervalo definidos pelas margens em vermelho são os que estão fora do desvio padrão. Dentro de 15 testes, 10 deles estão dentro do intervalo, o que representa uma variabilidade dos valores da amostra em relação à média. Com os dados obtidos foi possível constatar a necessidade de uma análise estatística de meios porosos não consolidados, pois sempre que a estrutura do leito é alterada, mesmo em um leito de esferas quase perfeitas, existe uma alteração significativa do valor da permeabilidade obtida.

### 2.3. Influência da variação da viscosidade na permeabilidade

Cada teste que determina a vazão é feito em triplicata com duração de 15 minutos. A média dos valores obtidos é levada em consideração no resultado dos experimentos. Porém, com o funcionamento da bomba hidráulica e a rotação da água no Permeômetro, se observou uma variação de temperatura na água do reservatório. A lei de Darcy estabelece que a vazão do fluido é diretamente proporcional ao gradiente de pressão aplicado ao meio poroso, sendo o coeficiente dependente da microestrutura do meio e da viscosidade absoluta do fluido (BEAR, J., 1972), (DULLIEN, F. A. L., 1979), (SCHEIDEGGER, A. E. 1974).

Dessa forma, observamos a importância da variação de temperatura e como ela pode interferir no resultado dos testes. Sabendo disso, em cada teste realizado foi feito o cálculo da permeabilidade com a devida interpolação do valor da viscosidade de acordo com a temperatura da água no momento do teste.

Assim, no experimento seguinte, cujos resultados estão apresentados na Fig. 9, foram feitas medidas de permeabilidade com o mesmo empacotamento do leito e temperatura da água do primeiro experimento. Os testes foram realizados ao longo de dias, pois a unidade experimental não dispõe de um sistema de controle de temperatura da água, necessitando aguardar a temperatura se igualar aos primeiros experimentos. Pode-se observar na Fig. 9 que as retas apresentam um coeficiente angular muito próximo, levando a um mesmo valor de permeabilidade, o que é esperado.

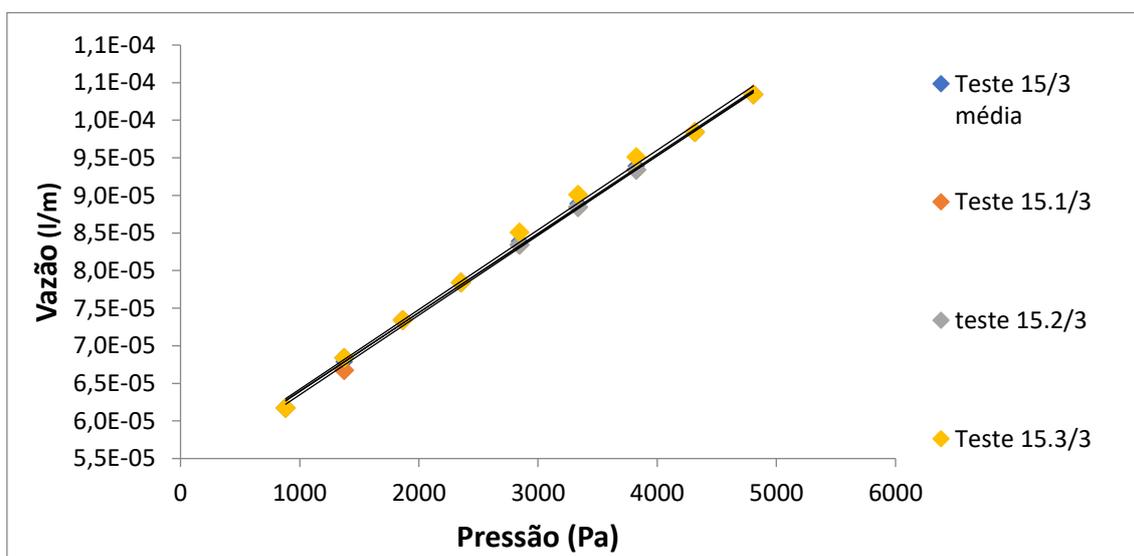


Figura 9 – Gráfico Vazão x Pressão (condições similares de temperatura)

### 3. Conclusão

O escoamento de fluidos em meios porosos é um fenômeno presente tanto na natureza como no ambiente da indústria, e devido à complexidade deste escoamento, é de grande importância uma análise estatística dos meios porosos para sua compreensão. Tal análise foi realizada através de um Permeômetro em um circuito fechado com reservatório de

água e uma bomba para a elevação do fluido acima de um leito poroso não-consolidado.

Os experimentos consistiram numa avaliação do escoamento por um modelo de Darcy em um mesmo leito de esferas de vidro, sendo estas empacotadas inúmeras vezes, a fim de verificar o efeito da variação das heterogeneidades do meio poroso não consolidado. A variação das heterogeneidades foi mensurada através do desvio padrão da permeabilidade, sendo obtido o valor médio da permeabilidade igual a  $4,002E-09$  m<sup>2</sup> e um desvio padrão de  $0,297E-09$  m<sup>2</sup> para um meio poroso não consolidado de esferas de vidro de 0,003 m de diâmetro. Este resultado reforça a necessidade de realização de estudos de dispersão estatística em aparatos de permeabilidade de leitos não consolidados, mesmo para meios formados de “esferas quase perfeitas”.

Foi estudado também o efeito da variação de temperatura e como ela pode interferir no resultado dos testes. Sendo que para cada teste feito foi realizado o cálculo da permeabilidade, com a devida interpolação, resultando no valor da viscosidade de acordo com a temperatura da água no momento do teste. As medições de permeabilidade foram realizadas com o mesmo empacotamento do leito e temperatura da água do primeiro experimento, onde se observou no gráfico gerado retas com coeficientes angulares muito próximos.

Concluimos então, que o Permeômetro construído em laboratório, foi eficaz para a realização do estudo, pois, além de ser um equipamento de fácil operação, constatou-se, durante os experimentos, sua alta reprodutibilidade de resultados. Através dele foi obtido o valor da permeabilidade de um leito não consolidado de esferas de vidro, no qual foi realizada a aplicação de uma análise de dispersão estatística.

## Referências

- BARROCA, NETO O, A.** *Simulação de fluxo de fluido em meios porosos desordenados: uma análise de efeito de escala na estimativa da permeabilidade e do coeficiente de arrasto*. 2012. 201 f. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia do Petróleo) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.
- BEAR, J.** *Dynamics of fluids in porous media*. New York: Editora American Elsevier, 1972.
- BIRD, ROBERT B.; STEWAR, WARREN E.; LIGHTFOOT, EWIN N.** *Fenômenos de transporte*. 2.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004. 840 p.
- CARMAN, P. C.** *Fluid flow through granular beds*. Trans. Inst. Chem. Eng., v. 15, p. 150-167, 1937
- DARCY, H.** *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*. Paris: Dalmont, 1856.
- DIAS, R.P.; FERNANDES, C.S.; TEIXEIRA, J.A.; MOTA, M.; YELSHIN, A.** *Permeability and effective thermal conductivity of bisized porous media*. Journal of Hydrology, v. 349, p. 470–474, 2008.
- DULLIEN, F. A. L.** *Porous Media: Fluid Transport and Pore Structure*. New York: Academic, 1979.
- KOZENY, J.** *Ueberkapillareleitung des wassers in bonden*. Sitzungsber Akad Wiss Wien, v. 136, p. 271-306, 1927.
- MACIEL, HUGO EMERICH.** *Avaliação de Modelos de Permeabilidade em Meios Porosos não consolidados*. 2015. 78 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional) – Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2015.
- MAGALHÃES, M. N.; LIMA, A. C. P.** *Noções de Probabilidade e Estatística*. 7.ed. São Paulo: Edusp, 2009. 392 p.
- ROSA, J. A.; CARVALHO, R. S.; XAVIER, J. A. D.** *Engenharia de reservatórios de petróleo*. Rio de Janeiro: Interciência. 2011.
- SCHEIDEGGER, A. E.** *The Physics Of Flow Through Porous Media*. 3.ed. Toronto: University of Toronto Pres, 1974. 255p.]

**VISCOPIEDIA**, *A Free Encyclopedia for Viscosity*. Dica de leitura. Disponível em: <http://www.viscopedia.com/viscosity-tables/substances/water/>. Acesso em: 14 setembro 2021.

**YU, A.B.; STANDISH, N.** *Estimation of the Porosity of Particle Mixtures by a Linear-Mixture Packing Model*. Ind. Eng. Chem. Res., v. 30, p. 1372-1385, 1991.