

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**

**ESTUDO DO COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE DE  
MÍDIA FILTRANTE DE CELULOSE E SUA VARIAÇÃO COM  
DEPOSIÇÃO DE CONTAMINANTES**

**GABRIEL TAVARES FERREIRA**

**São Carlos - SP, fevereiro de 2024**

**GABRIEL TAVARES FERREIRA**

**ESTUDO DO COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE DE MÍDIA  
FILTRANTE DE CELULOSE E SUA VARIAÇÃO COM DEPOSIÇÃO DE  
CONTAMINANTES**

Trabalho de conclusão de curso apresentado  
junto ao programa de **Graduação em  
Engenharia Física** da **Universidade Federal  
de São Carlos**, como requisito à obtenção do  
título de **Graduado em Engenharia Física**.

**Orientador:**

Prof. Dr. Vivaldo de Leiria Campo Jr..

**São Carlos - SP, fevereiro de 2024**

**GABRIEL TAVARES FERREIRA**

**ESTUDO DO COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE DE MÍDIA  
FILTRANTE DE CELULOSE E SUA VARIAÇÃO COM DEPOSIÇÃO DE  
CONTAMINANTES**

Monografia apresentada ao programa de **Graduação em Engenharia Física** da **Universidade Federal de São Carlos**, como requisito à obtenção do título de **Graduado em Engenharia Física**.

**Data de aprovação:**

21/02/2024

**Banca Examinadora:**

---

**Prof. Dr. Vivaldo de Leiria Campo Jr.**

Universidade Federal de São Carlos

---

**Prof. Dr. Claudio Antonio Cardoso**

Universidade Federal de São Carlos

---

**Prof. Dr. Leonardo Kleber Castelano**

Universidade Federal de São Carlos



*Dedico este trabalho que simboliza a conclusão do meu curso ao meu amigo Paco, que foi o guardião dos meus segredos e uma companhia constante, mesmo durante a solidão.*

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a Deus por ter me dado Jesus como esperança e sustento até aqui e por ter permitido que eu encontrasse alegria mesmo em meio às minhas maiores dificuldades. Agradeço à minha família que esteve comigo desde o princípio e nunca mediu esforços por mim, meu pai que investiu nos meus estudos desde a minha infância, minha mãe que me ensinou a escrever minhas primeiras palavras e minhas irmãs por serem minhas primeiras amigas. Agradeço à minha namorada que nunca me deixou desanimar e muitas vezes celebrou minhas vitórias mais do que eu mesmo. Agradeço aos amigos que fiz durante a jornada, especialmente meu grande amigo João Antônio Ferreira, que enfrentou o desafio da graduação com perseverança e dedicação ao meu lado desde o primeiro dia. Agradeço à cada professor que contribuiu para a formação que hoje possuo. Agradeço à excelentíssima secretária da graduação de Engenharia Física, Fulvia Vieira Carezzato.

*“A fé mostra a realidade daquilo que esperamos; ela nos dá convicção de coisas que não vemos.”*

**Autor desconhecido**, Carta aos Hebreus

## RESUMO

Esta monografia trata da correlação entre aplicações automotivas de papéis de celulose aplicados à filtragem de ar para o motor a combustão e o coeficiente de permeabilidade. A monografia apresenta dados experimentais de uma aplicação específica de filtragem por mídia de celulose e faz a correlação entre com as leis físicas que regem o escoamento, além de aplicar essas leis para o estudo da variação do coeficiente de permeabilidade de uma mídia filtrante com a deposição de contaminantes em seu meio (poeira depositada na superfície e no interior do elemento filtrante).

O estudo propõe encontrar uma correlação entre a variação do coeficiente de permeabilidade da mídia de celulose e a variação de pressão no sistema de admissão do ar do motor a combustão, de forma que se torne possível prever a perda de carga do motor e a vida útil do elemento filtrante com base no tamanho médio de poros e a espessura média da mídia em questão. Além disso, procura-se correlacionar a variação da permeabilidade do papel em função da massa de poeira depositada no filtro.

Os resultados apresentados embasam uma correlação relevante e buscam justificar uma bateria de estudos mais aprofundada.

**Palavras-chave:** Filtragem, motor a combustão, poeira, permeabilidade, micragem, papel de celulose, perda de carga, variação de pressão, sistema de admissão do ar, elemento filtrante, mídia de celulose, porosidade.

## ABSTRACT

This work addresses the correlation between automotive applications of cellulose papers used for air filtration in combustion engines and the permeability coefficient. The work presents experimental data from a specific cellulose media filtration application and correlates it with the physical laws governing flow. It also applies these laws to study the variation of the permeability coefficient of a filter media with the deposition of contaminants in its medium (dust deposited on the surface and inside the filter element).

The study aims to find a correlation between the variation of the permeability coefficient of the cellulose media and the pressure variation in the engine's air intake system, so that it becomes possible to predict the engine's pressure drop and the filter element's lifespan based on the average pore size and the average thickness of the media in question. In addition, it seeks to correlate the variation of the permeability of the paper as a function of the mass of dust deposited on the filter.

The results presented support a relevant correlation and aim to justify further in-depth studies.

**Keywords:** Filtration, combustion engine, dust, permeability, micron, cellulose paper, pressure drop, pressure variation, air intake system, filter element, cellulose media, porosity.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Imagem microscópica de um papel filtrante Whatman No.4 . . . . .	20
Figura 3.1 – Setup experimental utilizado. . . . .	28
Figura 3.2 – Comparação entre o elemento filtrante original (sanfonado) e o elemento protótipo (reto). . . . .	30
Figura 3.3 – Montagem do elemento filtrante reto para o teste de $\Delta P$ x Vazão. . . . .	30
Figura 3.4 – Ilustração do sistema utilizado para a dosagem de poeira no filtro. . . . .	31
Figura 4.1 – Gráfico da diferença de pressão <i>versus</i> vazão. . . . .	35
Figura 4.2 – Elemento filtrante após a saturação do primeiro teste. . . . .	38
Figura 4.3 – Gráfico da diferença de pressão <i>versus</i> poeira. . . . .	40
Figura 4.4 – Gráfico da variação da permeabilidade <i>versus</i> quantidade real de poeira depositada no elemento filtrante. . . . .	41

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Tabela poeira . . . . .	29
Tabela 4.1 – Papel . . . . .	33
Tabela 4.2 – Dados experimentais . . . . .	34
Tabela 4.3 – Coeficientes . . . . .	36
Tabela 4.4 – Teste 1 . . . . .	37
Tabela 4.5 – Teste 2 . . . . .	38
Tabela 4.6 – Teste 3 . . . . .	39
Tabela 4.7 – Permeabilidades . . . . .	41

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CNTP	Condições Normais de Temperatura e Pressão
ISO	International Organization for Standardization
NBR	Norma Brasileira

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\Phi$	Porosidade
$V$	Volume ( $\text{m}^3$ )
$\Delta$	Letra grega Delta (Variação)
$\rho$	Densidade ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
$v$	Velocidade ( $\text{m}/\text{s}$ )
$P$	Pressão (Pa)
$\mu$	Viscosidade ( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ )
$\nabla$	Operador Nabla
$d$	Diâmetro (m)
$Re$	Número de Reynolds
$\beta$	Coefficiente de compressibilidade volumétrica ( $\text{Pa}^{-1}$ )
$K$	Módulo de elasticidade volumétrica (Pa)
$c$	Velocidade do som ( $\text{m}/\text{s}$ )
$Ma$	Número de Mach
$Q$	Fluxo volumétrico ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
$q$	Velocidade média ( $\text{m}/\text{s}$ )
$\alpha$	Letra grega alpha (utilizado como coeficiente angular)
$k$	Permeabilidade ( $\text{m}^2$ )

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> . . . . .	<b>16</b>
1.1	Definição de filtragem . . . . .	16
1.2	A filtragem em sistemas de admissão de ar de motores a combustão	17
1.3	Objetivo do estudo . . . . .	18
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b> . . . . .	<b>19</b>
2.1	Mídia filtrante . . . . .	19
2.1.1	CARACTERÍSTICAS RELEVANTES . . . . .	19
2.1.2	POROSIDADE . . . . .	20
2.1.3	ÁREAS INTERNAS . . . . .	21
<b>2.2</b>	<b>FLUIDOS</b> . . . . .	<b>22</b>
2.2.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DO MEIO . . . . .	22
2.2.2	INCOMPRESSIBILIDADE . . . . .	24
<b>2.3</b>	<b>LEI DE DARCY</b> . . . . .	<b>25</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> . . . . .	<b>28</b>
3.1	MATERIAIS UTILIZADOS . . . . .	28
3.2	TÉCNICAS UTILIZADAS . . . . .	29
3.2.1	CURVA DE $\Delta P$ EM FUNÇÃO DA VAZÃO . . . . .	30
3.2.2	CURVA DE $\Delta P$ EM FUNÇÃO DA DEPOSIÇÃO DE POEIRA . . . . .	31
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b> . . . . .	<b>33</b>
4.1	DETERMINAÇÃO DA PERMEABILIDADE DA MÍDIA FILTRANTE EM SEU ESTADO LIMPO . . . . .	33
4.2	ESTUDO DA VARIAÇÃO DA PERMEABILIDADE DA MÍDIA FILTRANTE COM A DEPOSIÇÃO DE POEIRA . . . . .	37
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> . . . . .	<b>43</b>

REFERÊNCIAS .....	46
-------------------	----

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 DEFINIÇÃO DE FILTRAGEM

De acordo com o dicionário Michaeliss: Fluidos são: "Qualquer substância que, em razão da pouca adesão das moléculas entre si, flui como os líquidos e os gases e não apresenta uma forma independente, cedendo facilmente às mudanças de forma provocadas pela pressão do recipiente ou do espaço em que se encontra."(DICIONÁRIO... , 2007).

A fluidez da matéria é necessária para a vida como a conhecemos, desde as coisas mais simples, como o ar que respiramos ou a água que bebemos, até as mais complexas aplicações, como a dinâmica do núcleo externo da Terra. Porém, em grande parte das aplicações da matéria fluida, desde as mais básicas supracitadas, existe a necessidade de garantir a pureza dessa matéria. O nome dado ao processo que separa as impurezas do fluido puro é filtragem.

A filtragem pode ser feita de diversas maneiras, tais como:

- **Filtragem mecânica:** Quando o fluido atravessa uma barreira física e as impurezas ficam contidas nessa barreira.
- **Física:** Quando forças físicas, como a gravidade, ou a tendência inercial centrífuga são utilizadas para separar as impurezas de um fluido.
- **Química:** Quando as impurezas são removidas através de reações químicas, de forma que são retiradas do fluxo do fluido.
- **Biológica:** Quando as impurezas são removidas através de reações biológicas com o material filtrante.
- **Eletrostática:** Quando uma diferença de potencial é utilizada para atrair e capturar partículas suspensas no ar, como poeira e fumaça.

Este trabalho tratará do processo de filtragem mecânica, mais especificamente, tratará o comportamento de um meio filtrante mecânico de celulose aplicado na filtragem do ar. Este tema se fez relevante durante a aplicação de filtragem do ar em meio automobilísticos, devido à dualidade que existe entre eficiência de filtragem e perda de vazão durante a filtragem.

## 1.2 A FILTRAGEM EM SISTEMAS DE ADMISSÃO DE AR DE MOTORES A COMBUSTÃO

Sabe-se que a reação de combustão tem como um dos seus reagentes o gás oxigênio, o qual está presente abundantemente no ar da atmosfera terrestre. Entretanto, este ar carrega diversas impurezas, principalmente na faixa de altitude próxima ao solo. Uma vez que a maior parte dos veículos movidos a combustão requer que o ar da reação seja obtido nas regiões de impureza do ar, é necessário que este ar chegue às câmaras de combustão livre de todas as impurezas, visto que mesmo granulados de tamanho  $< 2,5\mu m$  podem causar abrasão e desgaste na superfície interna do motor, de forma a danificá-lo permanentemente.

A esmagadora maioria dos filtros desenvolvidos para esta aplicação (filtrar o ar que é utilizado no motor a combustão) utiliza uma camada de papel de celulose como meio filtrante, a fim de filtrar mecanicamente as partículas contidas no ar que escoam através do filtro.

Dessa forma, para aumentar a eficiência de um filtro de ar é necessário que sejam retidas até mesmo as partículas de menor dimensão que estão contidas no fluido. Para isso, utilizam-se papéis de celulose com fibras mais abundantes e com melhores geometrias, de forma que os caminhos através do meio filtrante sejam mais complexos e retenham uma maior quantidade de partículas com dimensões ainda menores.

Entretanto, este incremento de complexidade na geometria interna do meio dificulta também a passagem do fluido em questão, por esse motivo, há uma perda de vazão durante a travessia do meio filtrante. Esta queda na vazão após atravessar o filtro gera uma diferença de pressão entre o lado limpo do sistema de admissão do ar (após a filtragem) e o lado sujo do sistema de admissão (antes da filtragem).

A diferença de pressão gerada entre o lado limpo e o lado sujo do sistema de admissão do motor a combustão é chamada de "perda de carga".

A perda de carga é um problema durante o desenvolvimento de filtros para a combustão, pois uma perda de carga muito alta resultará em perda direta de potência do motor, uma vez que este estará sujeito a um "esforço" maior para admitir a quantidade de ar necessária para a combustão da mesma quantidade de carburante.

Motores a combustão são utilizados em contextos diversos, desde foguetes até máquinas de cortar grama. Cada uma dessas aplicações requer uma funcionalidade de filtragem que atenda as especificações de potência do motor, juntamente com a expectativa

de durabilidade deste. Alguns destes motores se encontram em ambientes mais extremos, como uma máquina colheitadeira em meio a uma plantação de soja (quantidades extremas de poeira no ar durante a movimentação de máquinas agrícolas no solo exposto). Outros encontram-se em ambientes controlados, como o filtro de um motor a combustão aplicado dentro de um ambiente fabril esterilizado.

Devido a esta pluralidade de aplicações, existe uma alta complexidade no desenvolvimento de filtros que atendam as aplicações específicas de cada um destes motores. Encontrar uma mídia filtrante que atenda a especificação de eficiência de filtração é um processo simples, já que as mídias são caracterizadas pelo tamanho médio dos seus menores poros. Porém, a aplicação de certa eficiência pode acabar aumentando a perda de carga deste sistema, de modo a inviabilizar o uso correto do motor.

### **1.3 OBJETIVO DO ESTUDO**

O estudo apresentado a seguir tem como objetivo correlacionar a perda de carga de um fluido dentro de um filtro de admissão do motor a combustão com as propriedades físicas do meio filtrante de celulose, de modo que, através das informações concernentes à mídia utilizada para a filtração, seja possível estimar de maneira eficiente a perda de carga deste papel.

O entendimento do escoamento de um fluido por entre as camadas fibrosas de celulose da mídia filtrante pode ser interessante para agilizar o processo de escolha das propriedades do papel, de forma que o desenvolvimento de um filtro seja mais ágil e o resultado prático dessa aplicação se mantenha preciso.

O estudo a seguir apresenta e justifica os resultados obtidos em uma aplicação específica de filtração, uma mídia filtrante de celulose aplicada no sistema de admissão do ar de uma moto.

## 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Antes que se inicie a descrição dos métodos adotados para este experimento, é importante descrever e justificar múltiplas definições que serão utilizadas ao longo desta monografia.

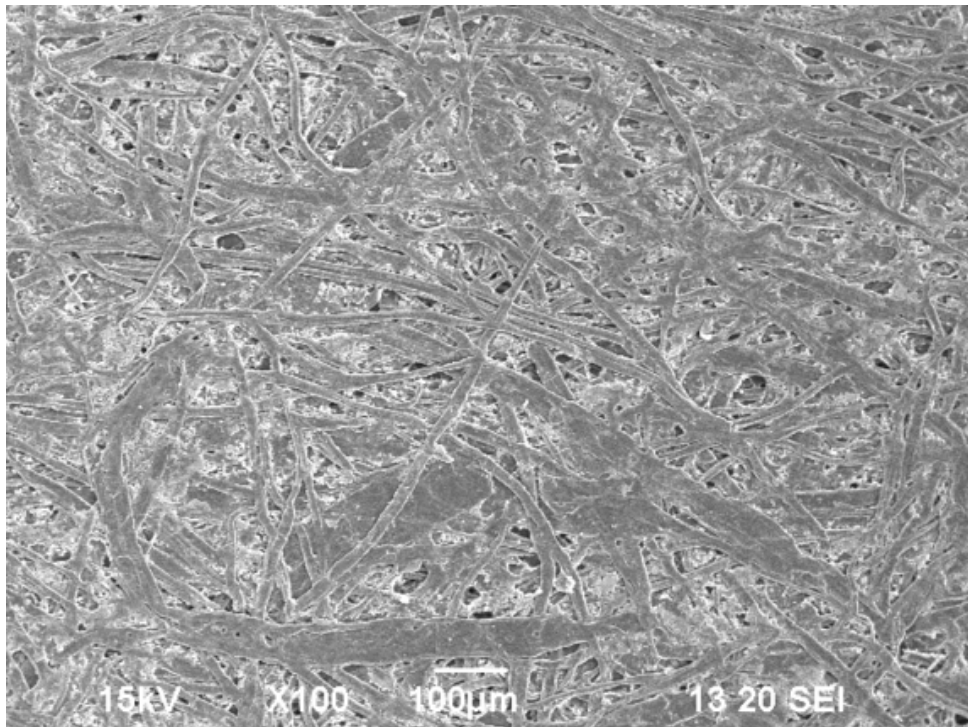
### 2.1 MÍDIA FILTRANTE

Mídia filtrante: Porção do espaço ocupada por matéria multifásica, em que pelo menos uma das fases que o compõem não é sólida, podendo ser líquida ou gasosa. A parte sólida é chamada de matriz sólida. O espaço livre nos poros dentro do material que não é a matriz sólida é chamado de espaço vazio (espaço poroso) (BEAR, 1972).

#### 2.1.1 CARACTERÍSTICAS RELEVANTES

A mídia filtrante possui uma propriedade significativa: Alta superfície específica. Devido às longas camadas internas de fibras de celulose conectadas umas nas outras, as superfícies específicas internas à mídia filtrante são extremamente extensas quando comparadas com o volume que ocupam e a abertura entre elas é estreita, de modo que a maior parte do espaço ocupado pela mídia está ocupado por camadas de superfície. A Figura 2.1 ilustra um papel filtrante da marca "Whatman" do tipo "No. 4". Na figura é possível enxergar a variedade da distribuição e da direção das fibras de celulose na mídia filtrante.

**Figura 2.1 – Imagem microscópica de um papel filtrante Whatman No.4**



Fonte: Disponível em: <[https://www.ndsu.edu/em\\_lab/images/sem\\_images/papers/](https://www.ndsu.edu/em_lab/images/sem_images/papers/)>. Acesso em: 20 nov. 2024.

Além disso, nem todo o espaço poroso interno à mídia filtrante é efetivo. Poros desconectados podem ser considerados como parte da matriz sólida, já que através desses não ocorre fluxo de fluidos, uma vez que são um caminho sem saída ou de alta obstrução (BEAR, 1972).

### **2.1.2 POROSIDADE**

A geometria interna de uma mídia filtrante de celulose fibrosa é impossível de ser descrita geometricamente com todas as sutilezas que competem a ela em nível microscópico e molecular. Entretanto, a definição do conceito de porosidade transporta nosso estudo para um âmbito de mecânica estatística que nos permite enxergar o meio filtrante como um meio contínuo.

De maneira análoga à definição de "densidade" para sólidos, utilizaremos a definição de "porosidade" ( $\Phi$ ) como propriedade característica da mídia filtrante.

Seja  $X$  um ponto matemático dentro do domínio ocupado pela mídia porosa. Considere um volume  $V$  em formato de esfera ao redor deste ponto, maior do que o tamanho de um poro ou de uma partícula de poeira, porém menor do que a espessura total

dessa mídia. A hipótese de que o volume desta esfera esteja contido entre essas dimensões é essencial para que a continuidade do meio seja observada como desejamos. No caso em que este volume é pequeno demais (menor do que o tamanho de um único poro) começam a ser observadas variações grotescas na razão descrita a seguir. Da mesma forma, para o caso em que o volume é maior do que a espessura desse papel, não é coerente calcular a razão descrita.

Chamamos de porosidade  $\Phi$  a razão entre o volume  $V_v$  e o volume  $V$  total, onde  $V_v$  é o volume do vácuo ou de fluidos dentro da matriz sólida da mídia (BEAR, 1972).

$$\Phi(X) = \frac{V_v}{V} \quad (1)$$

Ressalta-se que essa porosidade está definida para o ponto  $X$  arbitrário que foi escolhido inicialmente. Entretanto, pelo fato do volume arbitrário  $V$  ser grande o suficiente, tomando um ponto imediatamente ao lado ( $X + \Delta$ ) do ponto escolhido encontraríamos valores praticamente iguais ao valor de  $\Phi(P)$ .

Logo:

$$\lim_{\Delta \rightarrow 0} \Phi(X + \Delta) = \Phi(X) = \frac{V_v}{V} \quad (2)$$

Portanto, podemos considerar a porosidade como uma propriedade do material filtrante de celulose, uma vez que a razão entre o volume de vácuo e o volume total no intervalo arbitrário descrito permanece a mesma ao longo de toda a mídia. Essa generalização pode ser feita pois estamos tratando de uma mídia homogênea em sua formação e no material utilizado na mesma, do contrário essa generalização não poderia ser feita, de forma que a função porosidade permaneceria atrelada ao ponto  $X$  onde foi calculada (BEAR, 1972).

### 2.1.3 ÁREAS INTERNAS

Como descrito no tópico 2.1.1, a mídia filtrante possui uma grande superfície específica, de forma que as áreas internas ao meio são bastante extensas. Assim, a orientação em que estão distribuídas estas áreas também é relevante para o estudo em questão.

De maneira análoga à definição de porosidade:

Seja  $X$  um ponto qualquer dentro do meio filtrante, seja  $V$  um volume esférico centrado em  $X$  e seja  $A_i$  a área interna ao volume  $V$  de forma que  $i$  é a direção que define

a orientação dessa área. Analogamente, é essencial que o volume  $V$  siga as mesmas regras do tópico 2.1.2.

Devido ao princípio de aleatoriedade da estatística e ao comportamento imprevisível das fibras de celulose do papel, a razão entre as áreas com diferentes orientações e o volume arbitrário escolhido é a mesma, para espaços amostrais grandes o suficiente (BEAR, 1972). Entretanto, uma vez que a média descrita e utilizada para o caso específico desta monografia é uma média com menos de 1 milímetro de espessura, não é válido argumentar que as áreas paralelas à área do papel sejam encontradas na mesma proporção que as áreas perpendiculares a ele. Por esse motivo, consideraremos a seguinte convenção.

$$\frac{A_x}{V} = \frac{A_y}{V} < \frac{A_z}{V} \quad (3)$$

Onde  $A_z$  representa as áreas cujo vetor aponta sentido no fluxo e  $A_x$  e  $A_y$  representam as áreas cujos vetores são perpendiculares ao sentido do fluxo.

Logo, não existem deslocamentos favorecidos em direções perpendiculares à direção do fluxo do fluido dentro da mídia. Ainda que as áreas caracterizadas pelo vetor paralelo ao fluxo sejam favorecidas, elas não alteram a direção de propagação do fluido dentro da mídia.

## 2.2 FLUIDOS

Tratando-se de fluidos e seus comportamentos em diferentes contextos, é importante que sejam estabelecidos quais os tipos de fluidos relevantes para o estudo e também qual o contexto em que estes estão sendo aplicados.

### 2.2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO MEIO

Para descrever o comportamento do fluido que será observado e analisado nos resultados apresentados nesta monografia, é necessário que estejam estabelecidas as leis que governam o regime em que o experimento é realizado.

#### 2.2.1.1 EQUAÇÃO DA CONTINUIDADE

Técnicas que incluem e garantem a conservação de massa dentro do sistema são passíveis de, à partir da equação da continuidade, descreverem o comportamento do fluido:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \Delta \cdot (\rho v) = 0 \quad (4)$$

Para casos em que se assume incompressibilidade do fluido ( $\rho = \text{constante}$ ), simplifica-se para:

$$\Delta \cdot v = 0 \quad (5)$$

### 2.2.1.2 EQUAÇÃO DE NAVIER-STOKES

Para descrever a conservação de momento de um fluido dentro de um ambiente experimental controlado, utiliza-se a equação de Navier-Stokes (WHITE, 2016). Em coordenadas cartesianas, a equação para um fluido incompressível pode ser expressa como:

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + (v \cdot \nabla)v \right) = -\nabla \vec{P} + \mu \nabla^2 v + f \quad (6)$$

Onde:

- $\rho$ : Densidade do fluido ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
- $\frac{\partial v}{\partial t}$ : Aceleração local do fluido em um ponto fixo
- $(v \cdot \nabla)v$ : Termo convectivo (não linear), que descreve a aceleração advectiva, atrelado à turbulência.
- $-\nabla \vec{P}$ : Gradiente de pressão ( $\text{Pa}/\text{m}$ ).
- $\mu \nabla^2 v$ : Termo viscoso (difusivo), onde  $\mu$  é a viscosidade dinâmica do fluido ( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ). Representa os efeitos da viscosidade, responsáveis pelo amortecimento das variações de velocidade.
- $f$ : Força volumétrica por unidade de massa ( $\text{N}/\text{m}^3$ ). Inclui forças externas como gravidade ( $\rho g$ ) ou outras forças aplicadas.

### 2.2.1.3 NÚMERO DE REYNOLDS

A análise do número de Reynolds é uma avaliação para determinar se o fluxo é laminar ou turbulento. O número de Reynolds é dado pela relação (7).

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\mu} \quad (7)$$

A análise do número de Reynolds é fundamental para a caracterização do tipo de escoamento que existe dentro do fluxo em análise. Através do cálculo de  $Re$  é possível

justificar a análise de um sistema como sendo laminar, de forma a desprezar os comportamentos turbulentos contidos no escoamento. Será essencial para a análise desenvolvida no tópico referente à Lei de Darcy 2.3. Observa-se que, para a aplicação da equação do número de Reynolds em meios porosos utiliza-se  $d$  ao invés de  $L$ , em que  $d$  é o diâmetro médio dos poros do meio filtrante.

## 2.2.2 INCOMPRESSIBILIDADE

A incompressibilidade de um fluido é uma assunção frequentemente utilizada em aplicações de mecânica dos fluidos, especialmente em casos que envolvem escoamento de líquidos. Tal assunção implica que a densidade do fluido ( $\rho$ ) permanece constante ao longo do escoamento, mesmo quando o fluido está sujeito a variações de pressão. No presente estudo, que investiga o coeficiente de permeabilidade de uma mídia filtrante de celulose e a variação após a deposição de contaminantes, a incompressibilidade é uma premissa fundamental para a aplicação da Lei de Darcy, a qual será descrita e explicada em 2.3.

### 2.2.2.1 COMPRESSIBILIDADE DO FLUIDO

A incompressibilidade do fluido depende diretamente de sua natureza. No caso de líquidos, como água ou soluções aquosas, a densidade é praticamente constante devido ao baixo coeficiente de compressibilidade (8) (WHITE, 2016).

$$\beta = -\frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial P} = \frac{1}{K} \quad (8)$$

Aqui:

- $\beta$  é o coeficiente de compressibilidade volumétrica, usualmente expresso em  $Pa^{-1}$ .
- $V$  é o volume do fluido.
- $\frac{\partial V}{\partial P}$  representa a variação infinitesimal do volume em relação à pressão aplicada.
- $K$  é o módulo de elasticidade volumétrica, que, para líquidos como a água tem valores muito altos ( $K \approx 2,2 \cdot 10^9$  Pa), enquanto para o ar atmosférico em CNTP possui o valor do inverso de 1 atm ( $K \approx 1,01 \cdot 10^5$  Pa) para compressões isotérmicas.

Para gases, a compressibilidade pode ser relevante, mas sob certas condições (como baixas velocidades e variações moderadas de pressão) pode-se assumir incompressibilidade, apesar do alto coeficiente de compressibilidade ( $\beta$ ) (8).

### 2.2.2.2 CRITÉRIOS DE COMPRESSIBILIDADE

A incompressibilidade também pode ser avaliada por meio de parâmetros adimensionais, como o número de Mach ( $Ma$ ). Além da razão entre a variação de pressão e o módulo de elasticidade volumétrica ( $\beta$ ).

Sendo o número de Mach ( $Ma$ ):

$$Ma = \frac{v}{c} \quad (9)$$

Onde:

- $v$  é a velocidade do fluido ( $m/s$ );
- $c$  é a velocidade do som no fluido ( $m/s$ ).

Para um gás, de acordo com múltiplos autores tais como Yunus A. Çengel e John M. Cimbala, a incompressibilidade é uma boa aproximação se o número de Mach ( $Ma$ ) do escoamento for pequeno ( $< 0,3$ ), indicando que a velocidade do fluido é muito menor do que a velocidade do som no gás (ÇENGEL; CIMBALA, 2018).

Unindo os conhecimentos do coeficiente de compressibilidade volumétrica ( $\beta$ ) e a análise do número de Mach ( $Ma$ ) justificaremos a hipótese da incompressibilidade com os resultados experimentais obtidos.

## 2.3 LEI DE DARCY

A Lei de Darcy é uma formulação fundamental para escoamentos que atravessam barreiras físicas em regimes laminares. Ela descreve o escoamento de fluidos através de meios porosos. Foi derivada em 1856 pelo engenheiro francês Henry Darcy, a partir de experimentos com o fluxo de água em areia. Empiricamente ele formulou a relação que se tornou a base da hidrologia, da engenharia de petróleo e gás, e de sistemas de filtração (JOSEPH, 1982).

A Lei de Darcy estabelece que o fluxo de um fluido em um meio poroso é proporcional ao gradiente de pressão e inversamente proporcional à viscosidade do fluido.

Esta lei deriva da aplicação de um caso específico da lei geral de Navier-Stokes (6). Para um meio poroso homogêneo e no qual a permeabilidade não varia na direção do fluxo, temos:

- $\frac{\partial v}{\partial t} = 0$  (Em escoamento estacionário)
- $(v \cdot \nabla)v$  é desprezado quando  $Re$  é muito baixo (forças viscosas predominam no comportamento do fluido)
- $\nabla \cdot v = 0$  (fluido incompressível)

Utilizando esse caso específico da lei de Navier-Stokes, obtem-se: (10).

$$0 = -\nabla \vec{P} + \mu \nabla^2 v + f \quad (10)$$

Para muitas situações em meios porosos, a força externa  $f$  é devido à gravidade, podendo ser expressa como  $f = \rho g$ , onde  $g$  é a aceleração gravitacional.

No fluxo através de um meio poroso, a velocidade  $v$  não é diretamente observada. Ao invés disso, consideraremos a velocidade média ou "fluxo volumétrico específico"  $q$ , definido como:

$$q = \Phi v \quad (11)$$

Como já mencionado,  $\Phi$  é a porosidade do meio 2.1.2.

Analisando a interação entre a força viscosa e a estrutura interna da mídia filtrante no regime laminar: a resistência viscosa é proporcional à velocidade média do fluido dentro da mídia. Isso permite substituir  $\nabla^2 v$  por uma relação linear de  $q$ , tal que:

$$\mu \nabla^2 v \approx -\frac{\mu}{k} q \quad (12)$$

Onde  $k$  é a permeabilidade do meio poroso, uma propriedade intrínseca que depende do tamanho, forma e conectividade dos poros.

Substituindo (12) e (11) em (10) temos:

$$-\nabla \vec{P} + \rho g = -\frac{\mu}{k} q \quad (13)$$

Ou:

$$q = -\frac{k}{\mu}(\nabla \vec{P} - \rho g) \quad (14)$$

A Equação (14) é a Lei de Darcy na forma vetorial.

Considerando um fluxo unidimensional, podemos substituir  $\nabla P$ :

$$\nabla \vec{P} = \frac{\Delta P}{L} \quad (15)$$

$$q = -\frac{k}{\mu} \left( \frac{\Delta P}{L} - \rho g \right) \quad (16)$$

No caso em que a força volumétrica pode ser desprezada devido às condições geométricas do problema encontramos o caso clássico da Lei de Darcy:

$$q = -\frac{k}{\mu} \frac{\Delta P}{L} \quad (17)$$

Essa lei é fundamental para o estudo apresentado nessa monografia e será referenciada diversas vezes durante a discussão dos resultados apresentados. Para consultar a dedução completa da dedução da Lei de Darcy recomenda-se ao leitor consultar a referência de Jacob Bear ([BEAR, 1972](#)).

### 3 METODOLOGIA

A fim de contextualizar o leitor, estão descritos, a seguir, todos os materiais e métodos utilizados para a realização deste experimento.

#### 3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Para a realização deste experimento foram utilizados os seguintes materiais:

1. Turbina;
2. Filtro de admissão do ar NXR 160 / XRE 190 - HONDA 2009/2016, evidenciado na Figura 3.1;

**Figura 3.1 – Setup experimental utilizado.**



Fonte: Autor, 2024

3. Elementos filtrantes do ar NXR 160 / XRE 190 modificado;
4. Catman Professional - Plataforma HBM (Software de medição);
5. Sistema de computadores do laboratório;

## 6. ISO 12103-1, A4 COARSE TEST DUST

**Tabela 3.1 – Dados técnicos referentes à poeira utilizada (ISO 12103-1, A4 COARSE TEST DUST).**

ISO 12103-1 ARIZONA TEST DUST CONTAMINANTS A4 Coarse Grades	
Iso Test Dust Particle Size Distributions by Volume %	
Size Micrometer	ISO 12103-1, A4 Course Test Dust % Less Than
0.97	0.74 – 0.83
1.38	1.8 – 2.1
2.75	5.5 – 6.3
5.50	11.5 – 12.5
11.00	21.0 – 23.0
22.00	36.0 – 38.5
44.00	58.0 – 60.0
88.00	85.0 – 86.5
124.50	93.0 – 94.0
176.00	97.2 – 98.2
248.90	99.0 – 100.0

Fonte: Powder Technology, Inc, 2023. Disponível em: <https://www.powdertechologyinc.com/product/iso-12103-1-a4-coarse-test-dust/>

### 3.2 TÉCNICAS UTILIZADAS

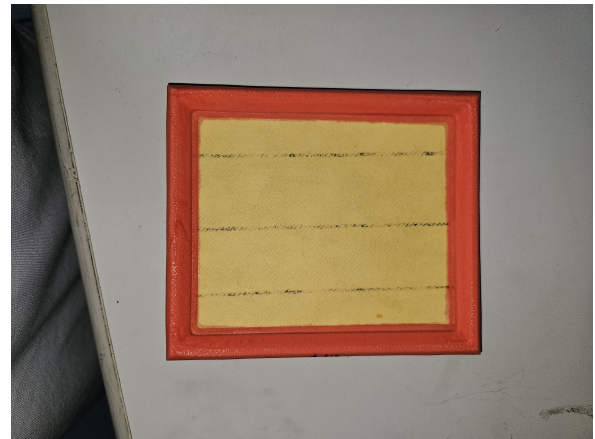
Para analisar o mecanismo de filtragem mecânica do ar através do papel, foram desenvolvidos 7 protótipos experimentais, a fim de simplificar a geometria do problema abordado.

Elementos filtrantes do ar possuem, tipicamente, um formato sanfonado do papel. Essa geometria existe para que as dobras deste papel atuem como aletas, que aumentam a superfície filtrante disponível para a deposição de poeira. Entretanto, esse sistema sanfonado, com múltiplas dobras, interferiria na geometria do problema.

Com o intuito de obter melhores resultados para o experimento, foi desenvolvido um filtro sem aletas, apenas com uma única seção de papel recortada de acordo com a dimensão do filtro. Ambos elemento filtrante original, e o protótipo desenvolvido para o experimento são mostrados na Figura 3.2



(a) Elemento filtrante original.



(b) Elemento filtrante protótipo.

Figura 3.2 – Comparação entre o elemento filtrante original (sanfonado) e o elemento protótipo (reto).

Fonte: Autor, 2024

### 3.2.1 CURVA DE $\Delta P$ EM FUNÇÃO DA VAZÃO

Para caracterizar e analisar o estado inicial do papel, foi realizada a montagem do elemento filtrante protótipo dentro do sistema de admissão do ar [3.3](#).

Figura 3.3 – Montagem do elemento filtrante reto para o teste de  $\Delta P$  x Vazão.



Fonte: Autor, 2024

Neste sistema o elemento filtrante foi selado dentro do filtro e analisado através do software Catman Professional - Plataforma HBM. Todos os 7 elementos filtrantes retos foram utilizados para essa caracterização.

### 3.2.2 CURVA DE $\Delta P$ EM FUNÇÃO DA DEPOSIÇÃO DE POEIRA

Para a análise da variação do coeficiente de permeabilidade do papel após a deposição de contaminantes, foi realizada a pesagem de pequenas quantidades de poeira em placas de petri, de modo que essas seriam aspiradas pelo sistema de filtragem durante o teste. Isso foi necessário porque o sistema de dosagem de poeira disponível no laboratório não possui configuração para a dosagem de baixas quantidades de poeira por minuto (faixa entre 0,5 e 4 g/m).

Por esse motivo, antes da montagem do elemento filtrante no filtro e a ativação da turbina de aspiração foram preparadas sequências de placas de petri, as quais seriam aspiradas pelo sistema, quando aproximadas manualmente pelo operador, conforme a Figura 3.4.

**Figura 3.4 – Ilustração do sistema utilizado para a dosagem de poeira no filtro.**



Fonte: Autor, 2024

Entretanto, como medida de segurança do sistema, o teste foi realizado com uma programação que não permite que o aumento da diferença de pressão seja maior do que

20 mbar, uma vez que isso já indicaria a saturação completa do filtro de ar do veículo. Diferenças de pressão maiores do que esta poderiam causar uma ruptura no filtro, fazendo com que a poeira escoasse em grande quantidade para dentro do contador de partículas, danificando a máquina.

## 4 RESULTADOS

Todos os experimentos registrados à seguir foram realizados dentro do laboratório particular da MANN+HUMMEL BRASIL LTDA, com a devida autorização dos gerenciadore do laboratório, bem como a operação das máquinas e equipamentos sendo realizada por um colaborador experiente.

Estes experimentos utilizaram uma mídia filtrante cujo nome é confidencial, porém suas características mais relevantes estão listadas na Tabela 4.1.

**Tabela 4.1 – Caracterização do papel.**

<b>Informações relativas ao papel utilizado</b>		
Espessura do papel	mm	$0,74 \pm 0,05$
Largura	mm	$90 \pm 1$
Comprimento	mm	$110 \pm 1$
Tamanho médio de poros	$\mu\text{m}$	$71 \pm 5$

Fonte: Autor, 2024.

### 4.1 DETERMINAÇÃO DA PERMEABILIDADE DA MÍDIA FILTRANTE EM SEU ESTADO LIMPO

Utilizando a metodologia descrita na seção 3.2.1, foi realizado o experimento para a análise da permeabilidade da mídia filtrante limpa, antes da adição de contaminantes no sistema.

A Tabela 4.2 expressa os valores medidos em cada uma das 7 amostras, além do valor medido antes da adição do elemento filtrante no sistema.

No dia e ambiente em que se realizou o experimento tivemos a condição de:

- **Umidade relativa do ar:** 45%
- **Temperatura da sala:** 23°C
- **Pressão atmosférica:** 0,935 mmHg

Tabela 4.2 – Dados experimentais - Diferença de pressão x vazão.

Vazão [m <sup>3</sup> /min]	Diferença de pressão [mbar]							
	OFF-SET	1	2	3	4	5	6	7
0,1	0,057	2,237	1,980	2,334	2,206	2,045	2,334	2,225
0,2	0,705	3,751	3,578	4,026	3,790	3,440	4,026	3,295
0,3	1,215	4,505	4,494	4,882	4,650	4,432	4,882	4,207
0,4	1,696	5,708	5,586	5,778	5,502	5,380	5,778	5,189
0,5	2,361	6,269	6,463	6,315	5,943	5,955	6,315	5,808
0,6	3,031	7,014	6,790	7,017	6,961	6,780	7,017	6,479

É importante destacar que os valores registrados para cada uma das 7 amostras na Tabela 4.2 já estão subtraídos do off-set encontrado no sistema, de modo que a diferença de pressão causada pela geometria do filtro e o arrasto nas paredes da tubulação não interferirão com o resultado real da diferença de pressão causada pelo fluxo do ar através da mídia filtrante.

Sabendo que a temperatura ambiente e a pressão atmosférica estão próximas da CNTP, utilizaremos:  $\mu_{ar} = 1,81 \cdot 10^{-5}$  Pa  $\cdot$  s (ÇENGEL; CIMBALA, 2018) e  $\rho_{ar} = 1,184$  kg/m<sup>3</sup> (CALCULATOR, ).

Aplicando a análise do critério de Mach para a incompressibilidade (9), temos:

$$q = \frac{Q}{A} = \frac{0,6}{9 \cdot 10^{-2} \cdot 11 \cdot 10^{-2} \cdot 60} = 1,0101 \quad (18)$$

$$Ma = \frac{v}{c} = \frac{1,01}{340} = 0,00297 \quad (19)$$

Portanto, vemos que o fator de Mach é muito menor do que 0,3. Aplicaremos portanto as simplificações que a incompressibilidade permite.

Calculando o número de Reynolds (7) para o caso de maior vazão (caso mais crítico, com maior risco de turbulência dentro da mídia):

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\mu} = \frac{1,184 \cdot 1,01 \cdot 71 \cdot 10^{-6}}{1,81 \cdot 10^{-5}} = 4,853786 \quad (20)$$

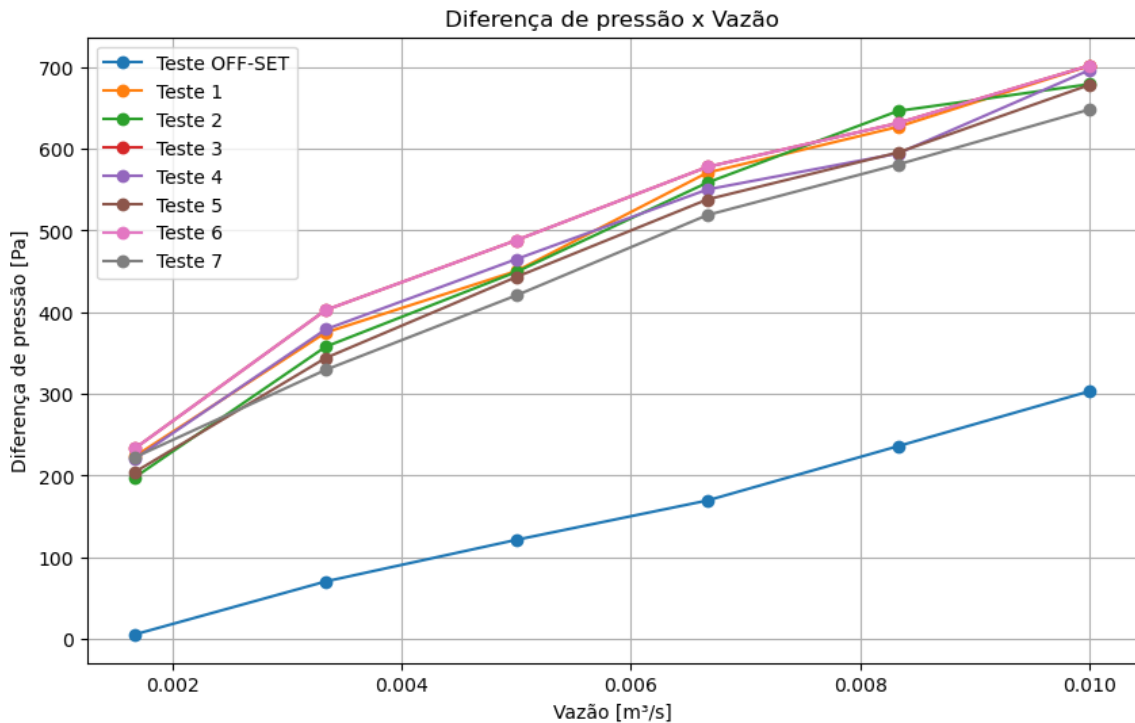
Onde  $d$  é o diâmetro médio dos poros da mídia filtrante e  $v$  é a velocidade média  $q$  do fluido no fluxo. Uma vez que a faixa de transição entre o regime laminar de escoamento

e o regime turbulento está na faixa de  $Re = 2300$ , podemos considerar todos os casos observados neste experimento como escoamentos laminares, ou seja, casos em que as forças viscosas são predominantes no comportamento do fluido.

Durante o experimento garantiu-se que as medições fossem feitas após alguns segundos das variações de fluxo, de forma que o escoamento fosse completamente estacionário. Provado que o fluxo dentro da mídia é laminar e que a velocidade do fluxo é baixa o suficiente para que o ar possa ser tratado como fluido incompressível é possível aplicar a Lei de Darcy para fluxos (17) ao sistema. Os dados expressos na Tabela 4.2 estão dispostos no gráfico da Figura 4.1.

Fonte: Autor, 2024.

Figura 4.1 – Gráfico da diferença de pressão *versus* vazão.



Fonte: Autor, 2024

Sabendo que o comportamento da Lei de Darcy (17) é linear com relação ao fluxo e o  $\Delta P$ , considerando apenas o módulo da diferença de pressão, podemos reescrever em função de um coeficiente angular  $\alpha$  como:

$$\alpha = \frac{\Delta P}{Q} \quad (21)$$

Onde  $Q$  é a vazão volumétrica. Sabendo que a velocidade média  $q$  é dada por:

$$q = \frac{Q}{A} \quad (22)$$

Temos:

$$\alpha = \frac{\mu L}{k A} \quad (23)$$

Calculando os coeficientes angulares dos gráficos apresentados na Figura 4.1 temos:

**Tabela 4.3 – Coeficientes angulares.**

	<b>Coeficientes angulares (<math>\alpha</math>):</b>	<b>Incerteza</b>
1	55958,849	4189,598
2	57938,665	5385,535
3	53448,914	5394,319
4	53291,333	4676,732
5	55146,312	3828,848
6	53448,914	5394,319
7	51071,462	2586,016

Fonte: Autor, 2024

Portanto, a média dos coeficientes angulares ( $\alpha$ ) é de:  $54186,35 \pm 1737,776 \frac{Pa \cdot s}{m^3}$ .

Logo:

$$k = \frac{\mu \cdot L}{\alpha \cdot A} = \frac{1,81 \cdot 10^{-5} \cdot 7,4 \cdot 10^{-4}}{54186,35 \cdot 9,9 \cdot 10^{-3}} \quad (24)$$

$$k = 2,4968 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2 \quad (25)$$

Sendo assim, a permeabilidade do papel em questão é de  $2,4968 \cdot 10^{-11} \pm 0,0008 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$ .

O experimento foi conduzido de forma que cada uma das amostras utilizadas fosse completamente conservada, afim de que as informações encontradas e expostas nessa seção do experimento pudessem ser utilizadas na seção seguinte para a análise da variação da permeabilidade.

## 4.2 ESTUDO DA VARIAÇÃO DA PERMEABILIDADE DA MÍDIA FILTRANTE COM A DEPOSIÇÃO DE POEIRA

Os resultados apresentados à seguir foram obtidos a partir do método descrito na seção 3.2.2. No primeiro teste realizado foram utilizadas placas de petri com 4 g de poeira para cada dosagem. Essas dosagens foram realizadas a cada 1 minuto, ademais do primeiro minuto, durante o qual não houve dosagem.

Os dados correspondentes ao primeiro teste estão disponíveis na Tabela 4.4.

**Tabela 4.4 – Dados experimentais do primeiro teste de dosagem, com 4g de poeira por dosagem.**

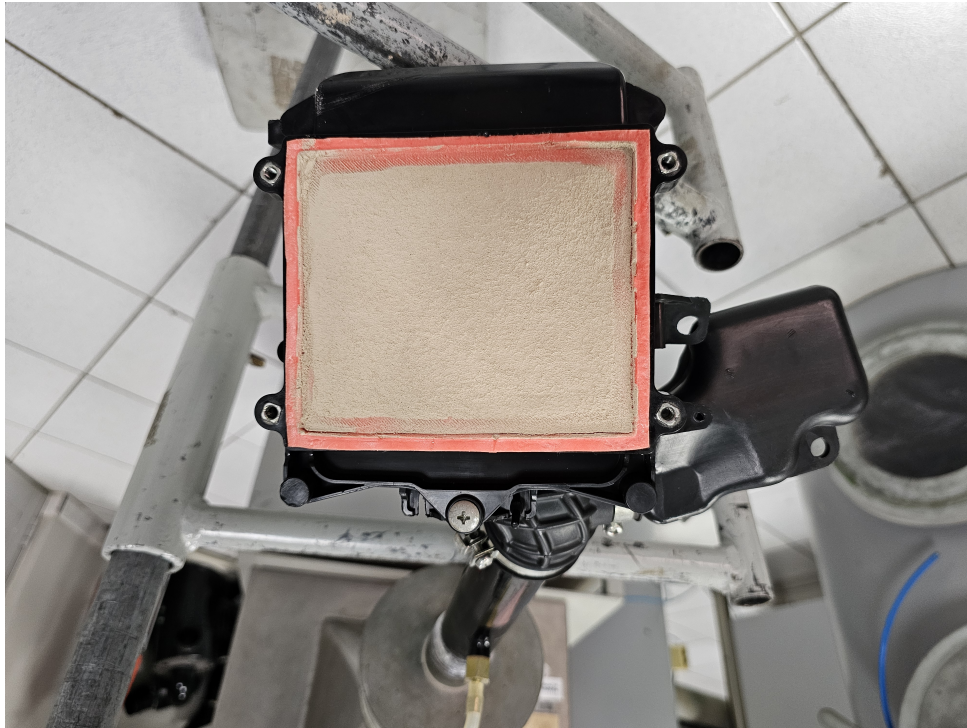
Tempo [s]	Vazão [m <sup>3</sup> /min]	Poeira [g]	$\Delta P$ [mbar]
0	0,628	0	9,931
60	0,617	0	9,827
120	0,583	4	57,239

Fonte: Autor, 2024

Observa-se que, após a dosagem dos primeiros 4 g de poeira, a diferença de pressão subiu consideravelmente, chegando a causar um aumento de quase 40 mbar, o que significa uma saturação completada do filtro, além do esperado. A Figura 4.2 evidencia o estado do elemento filtrante completamente saturado após esse teste. Utilizando este conhecimento, foi reduzida a quantidade de poeira preparada nas placas de petri. A Tabela 4.5 contém os resultados experimentais do segundo teste realizado (dosagem de 1g de poeira a cada minuto).

É importante ressaltar que aproximadamente 25% da poeira utilizada nesta dosagem foi retida na carcaça do filtro. Esse valor foi constatado através da pesagem do elemento filtrante antes do teste e a pesagem do elemento filtrante após o teste.

**Figura 4.2 – Elemento filtrante após a saturação do primeiro teste.**



Fonte: Autor, 2024

**Tabela 4.5 – Dados experimentais do segundo teste de dosagem, com 1g de poeira por dosagem.**

Tempo [s]	Vazão [m <sup>3</sup> /min]	Poeira (g)	$\Delta P$ [mbar]
0	0,584	0	9,779
60	0,616	0	10,182
120	0,617	1	14,379
180	0,613	1	14,53
240	0,6	2	28,801
244	0,598	3	30,217

Fonte: Autor, 2024

Os dados apresentados na Tabela 4.5 mostram que a utilização de quantidades menores de poeira durante o teste geram resultados melhores para a avaliação do comportamento do filtro, uma vez que foi possível encontrar a variação de pressão no filtro duas vezes, antes da saturação completa na terceira dosagem, a qual encerrou o teste antes de ser completamente absorvida.

Para este caso, apenas 12% da quantidade de poeira utilizada foi retida na carcaça (elementos pesados antes e depois do teste), provavelmente devido ao fato de este ser um

segundo teste, no qual os cantos vivos internos ao filtro já foram preenchidos com poeira da dosagem anterior.

Enxergando uma progressão nessa técnica, foi realizada uma redução ainda maior na quantidade de poeira adicionada ao filtro por minuto. Foram preparadas novas placas de petri, dessa vez contendo 0,5 g em cada uma delas para a realização do último experimento dessa monografia. Os resultados desse teste estão na Tabela 4.7

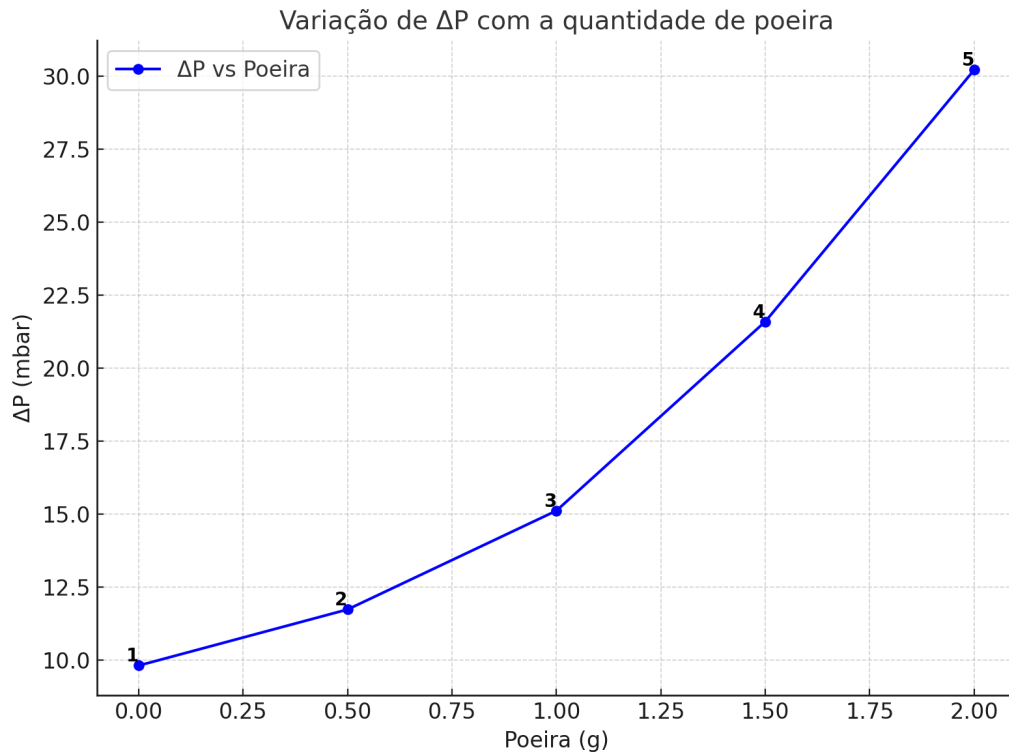
**Tabela 4.6 – Dados experimentais do terceiro teste de dosagem, com 0,5g de poeira por dosagem.**

Tempo [s]	Vazão [m <sup>3</sup> /min]	Poeira [g]	$\Delta P$ [mbar]
0	0,616	0	10,012
60	0,601	0	9,817
120	0,581	0,5	11,737
180	0,578	1	15,119
240	0,594	1,5	21,595
300	0,576	2	30,212

Fonte: Autor, 2024

Observando o comportamento do  $\Delta P$  e considerando o resultado obtido na seção anterior, avaliaremos a variação da pressão com relação a vazão como sendo uma relação direta com a variação da permeabilidade do papel, devido à deposição de partículas de poeira no meio desse. A Figura 4.3 mostra o gráfico do  $\Delta P$  em função da quantidade de poeira depositada no filtro. Este gráfico é amplamente utilizado na análise do comportamento da vida útil de um filtro.

Figura 4.3 – Gráfico da diferença de pressão *versus* poeira.



Fonte: Autor, 2024

Considerando que apenas 9,5% da poeira foi retida na carcaça do filtro neste teste, considerando que o coeficiente de permeabilidade é a única variável passível de variação no sistema 17, temos:

$$\frac{\text{m}^3}{\text{s}} = \frac{\text{m}^3 \cdot 60}{\text{min}} \quad (26)$$

$$k = \frac{\mu}{A} \frac{L}{\Delta P} Q \quad (27)$$

• **Ponto 1**

$$k_1 = \frac{1,81 \cdot 10^{-5}}{0,0099} \frac{7,4 \cdot 10^{-4}}{981,7} \frac{0,601}{60} \quad (28)$$

• **Ponto 2**

$$k_2 = \frac{1,81 \cdot 10^{-5}}{0,0099} \frac{7,4 \cdot 10^{-4}}{1173,7} \frac{0,581}{60} \quad (29)$$

• **Ponto 3**

$$k_3 = \frac{1,81 \cdot 10^{-5}}{0,0099} \frac{7,4 \cdot 10^{-4}}{1511,9} \frac{0,578}{60} \quad (30)$$

- Ponto 4

$$k_4 = \frac{1,81 \cdot 10^{-5}}{0,0099} \frac{7,4 \cdot 10^{-4}}{2159,5} \frac{0,594}{60} \quad (31)$$

- Ponto 5

$$k_5 = \frac{1,81 \cdot 10^{-5}}{0,0099} \frac{7,4 \cdot 10^{-4}}{3021,2} \frac{0,576}{60} \quad (32)$$

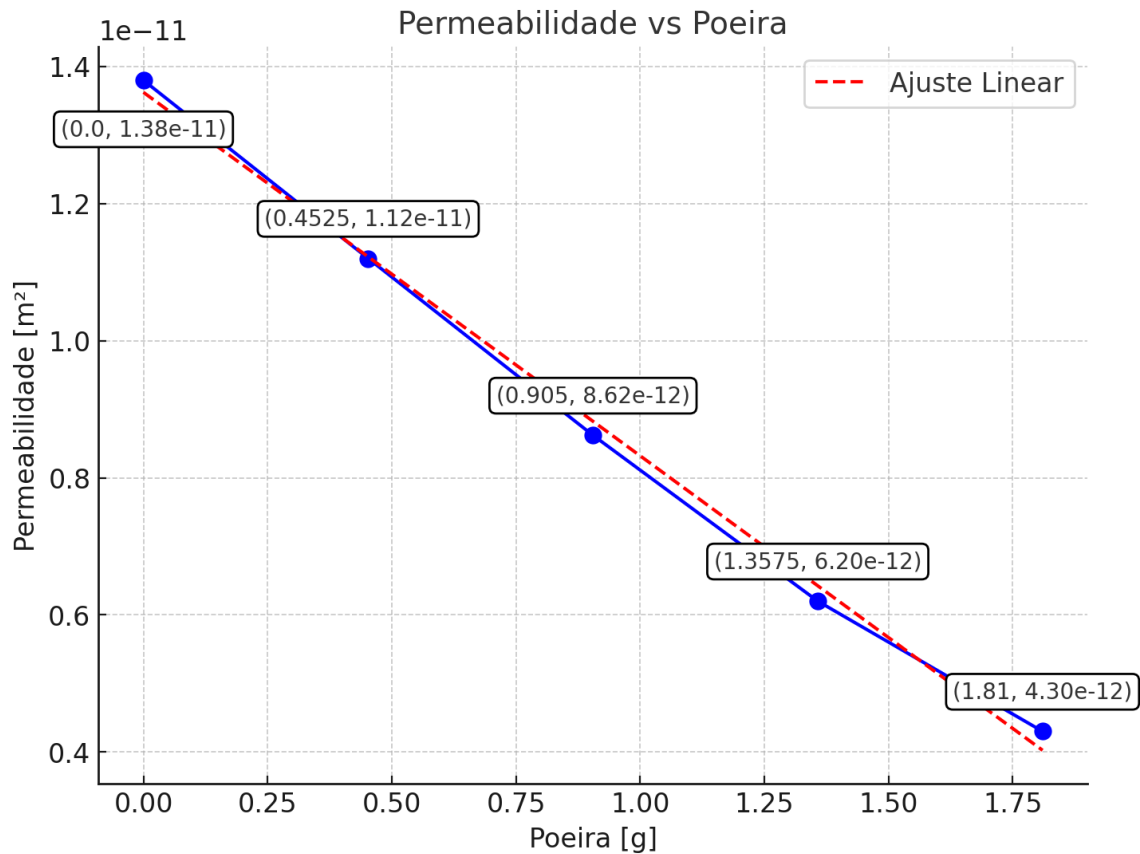
A Tabela 4.7 mostra os valores de  $k$  em cada um dos pontos calculados.

Tabela 4.7 – Valores calculados da variação da permeabilidade com a deposição de poeira na mídia.

Ponto	Permeabilidade [m <sup>2</sup> ]
1	$1,38 \cdot 10^{-11}$
2	$1,12 \cdot 10^{-11}$
3	$8,62 \cdot 10^{-12}$
4	$6,20 \cdot 10^{-12}$
5	$4,30 \cdot 10^{-12}$

O gráfico da Figura 4.4 permite a visualização da diminuição da permeabilidade conforme há deposição de poeira nos poros e na superfície do papel.

Figura 4.4 – Gráfico da variação da permeabilidade *versus* quantidade real de poeira depositada no elemento filtrante.



Fonte: Autor, 2024

A Figura 4.4 evidencia o comportamento linear da variação da permeabilidade em função da massa de poeira depositada na mídia. Dessa forma, é possível extrapolar o comportamento da permeabilidade em função da massa de poeira depositada através da Equação (33)

$$k = k_i - C \cdot m \quad (33)$$

Onde  $C$  é um coeficiente de proporcionalidade que pode ser encontrado através do coeficiente angular do gráfico expresso na Figura 4.4 e é característico da mídia filtrante utilizada no teste.

De modo que  $C = 5,30 \cdot 10^{-12} \pm 0,18 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{g}$ .

## 5 CONCLUSÃO

O valor do coeficiente de permeabilidade calculado através dos dados experimentais da seção 4.1 é inferior aos valores previstos por Jacob Bear em seu livro "Dynamics of Fluids in Porous Media" (BEAR, 1972), o qual foi utilizado como base bibliográfica para esta monografia. O valor encontrado para a permeabilidade do papel utilizado é de  $2,4968 \cdot 10^{-11} \pm 0,008 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$ , o qual é dez vezes menor do que a faixa de valores prevista por Jacob (BEAR, 1972). Isso se deve ao fato de que a mídia utilizada é uma mídia de alta eficiência, aplicada na filtragem do ar de motores a combustão, a qual não foi prevista por Jacob.

Analisando os resultados obtidos neste experimento e correlacionando eles com o objetivo proposto para a realização destes testes é possível perceber que os objetivos foram alcançados em sua parcialidade.

Não é possível correlacionar o coeficiente de permeabilidade com o tamanho médio dos poros do papel utilizando apenas um papel. Para obter uma relação empírica relevante entre o coeficiente de permeabilidade da mídia filtrante de celulose e o tamanho médio dos poros seria necessário submeter mídias filtrantes com diferentes tamanhos médios de poros ao teste, para então analisar os coeficiente de permeabilidade encontrados em cada uma delas com o tamanho médio de poros. Esse estudo é viável e pode resultar em dados extremamente relevantes, de modo a prever o comportamento da permeabilidade e, conseqüentemente, a diferença de pressão entre o lado sujo e o lado limpo do sistema de admissão de ar do motor. Uma correlação confiável entre a porosidade e o  $\Delta P$  transformaria a maneira de desenvolver e prever os resultados no desenvolvimento de filtros em diferentes aplicações.

O tamanho médio de poros influencia diretamente o valor do coeficiente angular  $\alpha$ , o qual é determinante para o valor da permeabilidade do papel. Conhecendo os valores dos tamanhos médios de poros de outros papéis e correlacionando eles com novos valores do coeficiente  $\alpha$  encontrados, pode-se encontrar uma relação empírica entre estes.

Entretanto, analisando a variação do coeficiente de permeabilidade em função da quantidade de poeira depositada no filtro através do gráfico da Figura 4.4 é possível observar que a permeabilidade varia linearmente com a massa de poeira depositada no elemento filtrante, de modo que:

$$k = k_i - C \cdot m \quad (34)$$

Onde:

- $k_i$ : é a permeabilidade do elemento filtrante limpo.
- $C$ : é um coeficiente de proporcionalidade.
- $m$ : é a massa de poeira depositada no filtro.

Por esse motivo, a variação linear do coeficiente de permeabilidade gera um comportamento curvo na variação de pressão em função da massa de poeira aspirada pelo filtro, uma vez que a permeabilidade é inversamente proporcional ao  $\Delta P$  e a quantidade de massa  $m$  é diretamente proporcional à permeabilidade. Substituindo (34) em (17):

$$\Delta P = -\frac{q \cdot \mu \cdot L}{k_i - C \cdot m} \quad (35)$$

Ou

$$\Delta P = -\frac{Q}{A} \frac{\mu \cdot L}{(k_i - C \cdot m)} \quad (36)$$

Extrapolando esta análise, seria possível prever a perda de pressão no sistema de admissão do ar do motor em função da quantidade de massa de poeira depositada, uma vez conhecido o comportamento de uma curva parcial de perda de pressão em função da deposição de poeira.

A comprovação dessa teoria é passível de novas experimentações em diferentes níveis de fluxos de aspiração do motor, quantidades mais extremas de poeira, médias com outros tamanhos médios de poros e, principalmente, a geometria normal de aplicação. A geometria normal de aplicação de filtros de papel é a de aletas (dobras de papel), como o exemplo da Figura 3.2.

Comparar os resultados encontrados nessa monografia com resultados de testes em elementos filtrantes originais é o próximo passo para o desenvolvimento desse estudo e pode abrir portas para informações de grande importância. Sendo positiva a comparação, seria justificável uma pesquisa mais extensa.

Estabelecer uma base de dados contendo o coeficiente de permeabilidade  $k$  e o coeficiente angular  $C$  para diferentes médias com diferentes espessuras e diferentes tamanhos

médios de poros forneceria uma base de dados que poderia prever o comportamento da mídia em sua condição específica de aplicação antes de que fosse testada.

Essas informações seriam uma bússola para o desenvolvimento e podem reduzir em grande escala os "loopings" de desenvolvimento de produto.

## REFERÊNCIAS

BEAR, J. **Dynamics of Fluids in Porous Media-Dover Publications**. [S.l.]: New York: American Elsevier Pub. Co., 1972. v. 2.

CALCULATOR, O. **Calculadora de Densidade do Ar**. Densidade do ar a 25 °C e 1 atm. Disponível em: <<https://www.omnicalculator.com/pt/fisica/calculadora-densidade-do-ar>>.

DICIONÁRIO Brasileiro da Língua Portuguesa. **Editora Melhoramentos**, São Paulo, 27 nov. 2007. Disponível em: <<https://michaelis.uol.com.br/moderno-portugues/busca/portugues-brasileiro/>>. Acesso em: 1 nov. 2024.

JOSEPH, D. D. **Flow Through Porous Media**. New York: Elsevier, 1982.

WHITE, F. M. **Fluid Mechanics**. 8th. ed. [S.l.]: McGraw-Hill Education, 2016.

ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications**. 4th. ed. [S.l.]: McGraw-Hill Education, 2018.