

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA

JOÃO PEDRO ANUTO SILVA

DESENVOLVIMENTO DE BANCADA DE TESTES PARA AVALIAR EMISSÃO DE
MATERIAL PARTICULADO DE SISTEMA DE FREIOS AUTOMOTIVO

Joinville
2023

JOÃO PEDRO ANUTO SILVA

DESENVOLVIMENTO DE BANCADA DE TESTES PARA AVALIAR EMISSÃO DE
MATERIAL PARTICULADO DE SISTEMA DE FREIOS AUTOMOTIVO

Trabalho apresentado como requisito para
obtenção do título de bacharel em Engenharia
Automotiva do Centro Tecnológico de Joinville
da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Dr. Andrea Piga Carboni

Joinville
2023

JOÃO PEDRO ANUTO SILVA

DESENVOLVIMENTO DE BANCADA DE TESTES PARA AVALIAR EMISSÃO DE
MATERIAL PARTICULADO DE SISTEMA DE FREIOS AUTOMOTIVO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Automotiva, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 08 de dezembro de 2023.

Banca Examinadora:

Orientador: Dr. Andrea Piga Carboni
Orientador(a)
Presidente

Prof. Dr. Thiago Antonio Fiorentin
Membro(a)
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Marcos Alves Rabelo
Membro(a)
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho a minha mãe Cleuza e a meu pai João Luiz, sem vocês nada disso seria possível, devo tudo que conquistar.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor Dr. Andrea Piga por me orientar neste trabalho, assim como todos os integrantes do projeto que faço parte, em especial ao Laboratório de Acústica e Vibrações, ao programa ROTA 2030, à Fundação de Ensino e Engenharia de Santa Catarina e à FRAS-LE por todo o apoio técnico, logístico e financeiro.

Agradeço ao Laboratório de Sistemas Veiculares e ao Laboratório de Microfluídica por disponibilizarem espaço e equipamentos para a montagem da bancada e análise de material. Igualmente à todas as empresas e pessoas que prestaram serviço à este trabalho ou ao projeto.

Agradeço a Universidade Federal de Santa Catarina por fornecer meios para meu desenvolvimento profissional e social. Assim como a todas as instituições, professores e laboratórios da universidade que entrei em contato em algum momento.

Por fim, e mais importante, agradeço à Deus, à minha família e aos meus amigos, que me apoiaram durante todo o percurso universitário e me possibilitaram alcançar meus objetivos mais otimistas, nunca esquecerei vocês.

O Senhor Deus tomou o homem e colocou-o no jardim do Éden para cultivá-lo e guardá-lo (Gn 2,15).

RESUMO

A emissão de material particulado pelo sistema de freios contribui para a poluição do ar. Atualmente, com a restrição mais severa vinculada à emissão de poluentes provenientes da combustão, a fração correspondente ao sistema de freios se torna mais representativa, juntamente com a fração relacionada ao desgaste de pneus e da pista. O estudo deste fenômeno, porém, não é suportado por métodos de análise e investigação padronizados e unanimemente reconhecidos e adotados. Este trabalho tem como objetivo desenvolver uma bancada de testes simplificada referente à emissão de particulados provenientes da interação disco-rotor em um freio a disco. Ainda como objetivo está avaliar a repetibilidade e confiança dos resultados para a posterior utilização da bancada no desenvolvimento da tecnologia de pastilhas de freio visando reduzir a poluição do ar. A bancada é baseada em uma motocicleta fixa e adaptada à receber um enclausuramento no conjunto de freio traseiro capaz de fornecer um fluxo de ar filtrado, controlado e apto a recolher partículas aerotransportadas por amostragem em filtro. Após a aquisição, o material é analisado em microscópio, com suas imagens sendo processadas a fim de resultar na contagem de partículas. Fontes de erros e incertezas na medição foram mitigadas com a aplicação de normas individuais para testes e desenhos dos componentes da câmara. Os resultados foram baseados de acordo com a análise e comparação da contagem de partículas em função do espectro do diâmetro aerodinâmico da mesma, na faixa de 100 nanômetros a 10 micrômetros, portanto, nas categorias MP_{10} , $MP_{2,5}$ e MP_1 (partículas finas). Por fim, a análise das amostras induz ao cumprimento dos objetivos, pois, após montagem e testes da bancada, amostragens distintas foram realizadas e, após a análise, verificou-se que ambas estão na mesma faixa de incertezas e condizem com os resultados obtidos na literatura.

Palavras-chave: Emissão de Material Particulado, Bancada de Testes, Poluição do Ar, Freio a Disco.

ABSTRACT

The emission of particulate matter from brake systems contributes to air pollution. Currently, with increasingly stringent restrictions on combustion-related pollutant emissions, the fraction associated with brake systems becomes more significant, along with that related to tire and road wear. However, the study of this phenomenon lacks standardized and universally recognized and adopted analytical and investigative methods. This work aims to develop a simplified test bench for particulate emissions resulting from the disc-rotor interaction in a disc brake. Another objective is to evaluate the repeatability and reliability of the results for the subsequent use of the test bench in the development of brake pad technology to reduce air pollution. The test bench is based on a fixed motorcycle adapted to receive an enclosure in the rear brake assembly capable of providing a filtered, controlled airflow and collecting airborne particles through filter sampling. After acquisition, the material is analyzed under a microscope, with images processed to yield particle counts. Sources of errors and uncertainties in the measurement are mitigated by applying individual standards for testing and designing chamber components. The results are based on the analysis and comparison of particle counts as a function of the aerodynamic diameter spectrum, ranging from 100 nanometers to 10 micrometers, corresponding to the categories MP_{10} , $MP_{2.5}$, and MP_1 (fine particles). Finally, the analysis of the samples leads to the fulfillment of the objectives, as, after the assembly and testing of the test bench, distinct samplings were performed, and upon analysis, it was found that both are within the same range of uncertainties and align with the results obtained in the literature.

Keywords: Particulate Matter Emission, Test Bench, Air Pollution, Disc Brake.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Emissão de particulado MP ₁₀ na Alemanha entre 2000 e 2016	15
Figura 2 – Freio a disco Dunlop de 1957	18
Figura 3 – Formação de platôs no material de atrito	20
Figura 4 – Classificação por tamanho do MP atmosférico em relação à sua fonte	21
Figura 5 – Tempo de vida médio de particulado na atmosfera	22
Figura 6 – Amostragem isocinética	23
Figura 7 – Amostragem sobre-isocinética	24
Figura 8 – Amostragem sub-isocinética	25
Figura 9 – Comportamento da eficiência de aspiração	25
Figura 10 – Partículas por frenagem	28
Figura 11 – Distribuição de particulado para diferentes classificações de pastilhas	29
Figura 12 – Espectro de partículas durante frenagem	30
Figura 13 – Esquemático da bancada	32
Figura 14 – Posicionamento e alterações na motocicleta	33
Figura 15 – Sistemas de freio da motocicleta	33
Figura 16 – Montagem da câmara e sistema de coleta em programa CAD	34
Figura 17 – Modelo CAD do bocal de entrada de ar	35
Figura 18 – Modelo CAD do bocal de saída	36
Figura 19 – Montagem em corte do sistema de amostragem	37
Figura 20 – CFD: linhas de corrente	40
Figura 21 – CFD: vetores velocidade no plano médio	40
Figura 22 – CFD: velocidade no plano de amostragem	41
Figura 23 – Montagem final	43
Figura 24 – Montagem final do duto de saída e amostragem	43
Figura 25 – Temperatura do disco durante o teste 1	44
Figura 26 – Filtro de amostragem do teste 1	45
Figura 27 – Amostra de particulado retirada da câmara	46
Figura 28 – Imagens geradas por microscópio com ampliação de 200 (A) e 630 (B) vezes da amostra 1	46
Figura 29 – Imagens tratadas para contagem de particulado da amostra 1	47
Figura 30 – Distribuição por ampliação da amostra 1	48
Figura 31 – Distribuição e porcentagem de MP da amostra 1	49
Figura 32 – Imagens geradas por microscópio com ampliação de 200 (A) e 630 (B) vezes da amostra 2	50
Figura 33 – Imagens tratadas para contagem de particulado da amostra 2	50
Figura 34 – Distribuição e porcentagem de MP da amostra 2	51

Figura 35 – Distribuição e porcentagem de MP das amostras 1 e 2 52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MP	<i>Material Particulado</i>
LOWBRASYS	<i>Low Environmental Impact Brake System</i>
ABS	<i>Anti-lock braking system</i>
EBD	<i>Electronic Brake Distribution</i>
ESC	<i>Electronic Stability Control</i>
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
HEPA	<i>High Efficiency Particulate Air</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
RPM	Rotações por Minuto
TPS	<i>Throttle Position Sensor</i>
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

μ	Coeficiente de atrito [-]
d_p	Diâmetro aerodinâmico [μm]
v_s	Velocidade do gás no duto [m/s]
v_n	Velocidade do gás no bocal [m/s]
C_{nzi}	Concentração de particulado no interior do bocal [m^{-3}]
C_{amb}	Concentração de particulado no fluxo de gás [m^{-3}]
k	Parâmetro de deposição na entrada do bocal [-]
St	Número de Stokes [-]
Re	Número de Reynolds [-]
ρ	Densidade do fluido [kg/m^3]
μ_{fluido}	Viscosidade dinâmica do fluido [$Pa.s$]
\dot{V}	Vazão de ar na câmara de amostragem [m^3/h]
V	Volume livre na câmara de amostragem [m^3]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS	15
1.1.1	Objetivo Geral	16
1.1.2	Objetivos Específicos	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	SISTEMAS DE FREIOS	17
2.1.1	Contextualização histórica	17
2.1.2	Freios a disco	19
2.2	AEROSSÓIS	20
2.2.1	Medições de particulado	23
2.2.1.1	Amostragem isocinética	23
2.2.1.2	Perda mecânica de amostras	26
2.3	ESTUDOS DE CASO	26
2.3.1	General Motors - 2000	26
2.3.2	Ford Motor Company - 2003	28
2.3.3	Bergische Universität Wuppertal - 2019	30
3	MÉTODO	32
3.1	CÂMARA DE COLETA	34
3.1.1	Entrada de ar	35
3.1.2	Duto de saída	35
3.1.3	Amostragem	36
3.2	PARÂMETROS DE OPERAÇÃO	37
3.2.1	Fluxo de ar	38
3.2.2	Ciclo de teste	38
3.3	MODELO NUMÉRICO	39
3.3.1	Parâmetros da simulação	39
3.3.2	Análise do modelo	39
3.4	EXTRAÇÃO E ANÁLISE DE PARTICULADO	41
3.4.1	Extração	42
3.4.2	Análise de amostras	42
3.5	MONTAGEM FINAL DA BANCADA	42
4	RESULTADOS	44
4.1	DADOS DOS ENSAIOS	44
4.2	MATERIAL PARTICULADO	46

5	CONCLUSÃO	54
	REFERÊNCIAS	56

1 INTRODUÇÃO

No contexto da crescente preocupação ambiental e da busca por soluções sustentáveis na indústria automotiva, a análise da emissão de material particulado proveniente dos sistemas de freio torna-se um tema de relevância inquestionável.

A poluição do ar é o maior risco ambiental na Europa e causa 80% das mortes prematuras estando relacionada a doenças no coração e acidentes vasculares cerebrais. É estimado pela Comissão Europeia que 330 a 940 bilhões de Euros foram destinados a despesas relacionados à poluição do ar em 2010, incluindo dias não trabalhados, saúde pública e danos a construções (EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY, 2015). Segundo Kendrick (2019) o perigo na emissão de particulado na atmosfera está, também, relacionada ao conteúdo do material de fricção, visto que o grau de toxicidade do particulado difere pela presença de determinados elementos como cobre e, o já proibido, amianto.

No Brasil a situação é semelhante. Rodrigues et al. (2015) concluem que a expectativa de óbitos relacionados à material particulado no período entre 2012 e 2030 pode chegar à 250 mil, somente referentes ao Estado de São Paulo, considerando os níveis de 2011. Ainda, o número de internações hospitalares somaria 1 milhão, gerando gastos próximos de R\$1,5 bilhão neste período.

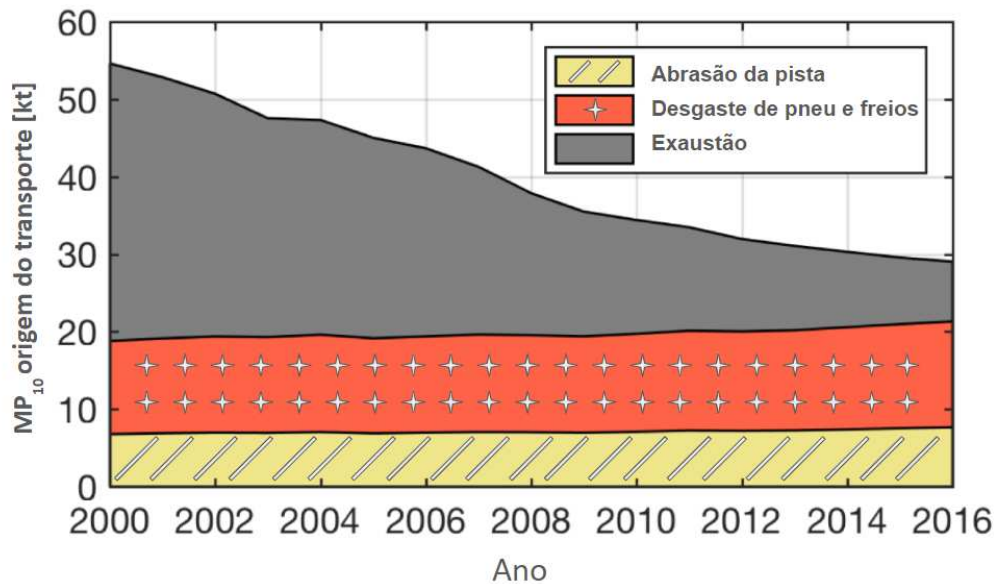
O material particulado também pode causar alterações climáticas. As partículas causam espalhamento ou absorção da radiação solar e ainda podem alterar a formação de nuvens em função da aceleração na condensação da água pelo fenômeno de condensação (BRITO; SODRÉ; ALMEIDA, 2018).

Segundo Grigoratos e Martini (2014), a emissão de particulados por automóveis pode ser dividida em função de fonte: as relacionadas à combustão, como reação incompleta e vaporização de lubrificantes, e não relacionadas à combustão, como desgaste de pneus, freios e da via. Um particulado é uma partícula sólida ou líquida que está suspensa no ar e pode ser divididas em MP_{10} , partículas com diâmetro até 10 μm , $MP_{2,5}$, diâmetro até 2,5 μm , $MP_{1,0}$ e particulado ultrafino, menor que 1 e 0,1 μm , respectivamente, ambos capazes de atingir a região de trocas gasosas no interior do pulmão (BRUNEKREEF; HOLGATE, 2002).

Conforme ilustrado na Figura 1, no passado, as emissões de particulado eram predominantemente provenientes da combustão nos motores e que, com o grande esforço global de limitar o impacto ambiental causado por este componente, outras fontes de emissão se tornaram igualmente relevantes na atualidade, incluindo a emissão pelo sistema de freios. Diante dessa realidade, diversas instituições focam em criar novas regulamentações e metas para redução de material particulado emitido pelo sistema de freios, entre essas iniciativas está LOWBRASYS (Sistema de freios com

baixo impacto ambiental) e EURO 7 (HAGEN; FERDINAND, 2019).

Figura 1 – Emissão de particulado MP_{10} na Alemanha entre 2000 e 2016



Fonte: Adaptado de UBA (2019).

Este trabalho vem de encontro com a necessidade de se aprofundar no assunto, desta forma, pretende-se desenvolver uma bancada preliminar de testes experimentais para a coleta de material particulado emitido por um sistema de frenagem automotivo. O experimento visa obter e avaliar quantidade de partículas emitidas, com foco na repetibilidade dos resultados. A bancada será empregada na análise de amostras de pastilhas de freio correspondente ao modelo original. O desenvolvimento da bancada é parte de um projeto científico com a participação de diversos alunos e professores que tem como objetivo desenvolver materiais de atrito que apresentam emissão de particulado com menor impacto ambiental e à saúde da população, mantendo as características necessárias para correto funcionamento e segurança no sistema de freios.

Esta bancada de ensaios visa fornecer estudo e prática ao grupo além de servir de local de experimentação e validação de métodos para posterior implementação em bancada dinamoétrica de maiores dimensões e maior capacidade de controle.

1.1 OBJETIVOS

Para orientar o desenvolvimento do trabalho é importante especificar objetivos a serem cumpridos. Nos tópicos seguintes serão descritos o objetivo geral e objetivos específicos para tal.

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver uma bancada preliminar para a realização de experimentos para análise de emissão de particulado por sistema de freios veicular.

1.1.2 Objetivos Específicos

1. Levantar estado da arte e revisar bibliografia.
2. Utilizar normas cabíveis para suportar o desenvolvimento da bancada.
3. Garantir que o sistema em teste emita quantidade de particulado suficiente e representativa para a correta avaliação posterior.
4. Desenvolver sistema de amostragem de particulado, que posteriormente, possa ser aplicado em maior escala.
5. Avaliar e desenvolver métodos de análise de particulado.
6. Validar medições experimentais com dados da literatura.
7. Examinar a repetibilidade do processo, visando assegurar resultados confiáveis.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para fortalecer o entendimento do assunto e tecer referências, este capítulo tem como objetivo introduzir historicamente e descrever o funcionamento de um sistema de freios, além de detalhar bancadas produzidas e validadas anteriormente assim como fenômenos físicos importantes para sua concepção.

2.1 SISTEMAS DE FREIOS

Nesta seção, serão abordados os principais aspectos relacionados ao sistema de freio, iniciando com a contextualização histórica, analisando as diferentes filosofias de projeto utilizadas durante a história e principais pontos de inflexão no desenvolvimento desse sistema.

2.1.1 Contextualização histórica

Para realizar a contextualização histórica do desenvolvimento dos sistemas de frenagem, toma-se aqui, como referência para todo o item, Breuer e Bill (2008).

O desenvolvimento de sistemas de frenagem é anterior ao automóvel, visto que já era utilizado em veículos movidos à tração animal e carros de mão, porém, o avanço desse desenvolvimento só ocorreu após a implementação do motor de combustão interna, com os veículos atingindo maiores velocidades e transportando maior carga.

No início do século XIX, os sistemas de frenagem, em geral, eram acionados de forma mecânica, atuando diretamente sobre as rodas do veículo utilizando materiais simples como fitas de couro usadas como material de atrito.

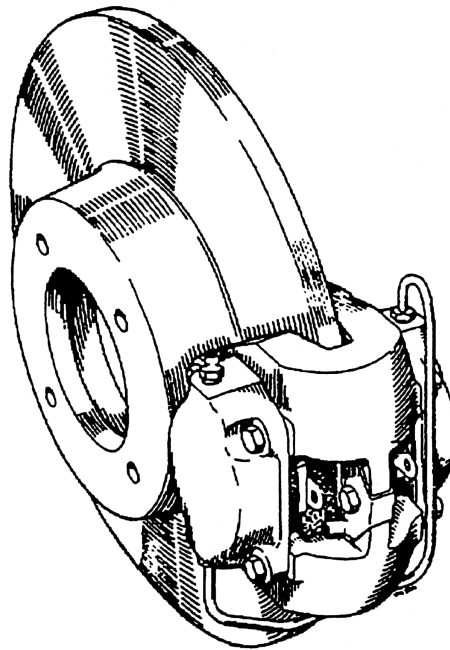
Em 1917, Malcolm Lockheed patenteou o sistema de freios moderno, atuado hidráulicamente e acionado pelo pé do motorista. O sistema inovador era baseado em um cilindro hidráulico operado por pedal que pressuriza o sistema de freios. Os atuadores presentes no sistema são responsáveis por pressionar o material de atrito contra o rotor. Entre as vantagens do sistema hidráulico destaca-se o ganho mecânico de força, previsto pela lei de Pascal, isso significa que a força aplicada pelo motorista no pedal é multiplicada pelo cilindro hidráulico, proporcionando uma maior força de frenagem nos componentes de atrito. Além disso, o sistema hidráulico apresenta maior eficiência em comparação ao sistema mecânico, com coeficientes de eficiência que variam de 0,4 a 0,5 para valores entre 0,8 a 0,9.

Outra vantagem do sistema hidráulico é a menor histerese, descrita como a perda de energia entre a aplicação e liberação do acionamento. Isto contribui para um acionamento mais preciso e responsivo do sistema de freios, aumentando o conforto e segurança no uso do veículo.

O sistema vastamente utilizado até a década de 1950 em veículos de passeio era baseado em tambores como rotores e lonas como material de atrito suportada por sapatas. Porém, em 1957 a fabricante Dunlop reprojeto o já existente freio a disco e garantiu sucesso nas competições automobilísticas. Com a produção em massa do sistema aprimorado, este se tornou o novo padrão de sistema no eixo dianteiro, muito semelhante estruturalmente aos sistemas utilizados atualmente, como apresentado na Figura 2.

A introdução do freio a disco proporcionou várias melhorias em relação ao sistema de freio a tambor. O freio a disco oferecia uma dissipação de calor mais eficiente, reduzindo a possibilidade de superaquecimento e perda de desempenho. Além disso, o freio a disco proporcionava uma resposta de frenagem mais rápida e precisa, permitindo ao condutor uma maior capacidade de modulação da força de frenagem.

Figura 2 – Freio a disco Dunlop de 1957



Fonte: Breuer e Bill (2008).

Entre as décadas de 1970 e 1990 deu-se início ao estabelecimento de sistemas eletrônicos de suporte e controle à frenagem, entre estes estão: ABS (Sistema de freios anti travante) que permite a manobrabilidade do veículo durante uma situação de emergência além de reduzir a distância de frenagem. Outros sistemas implementados na indústria são os chamados EBD (Distribuição eletrônica de força de frenagem) e ESC (Controle eletrônico de estabilidade) que visam estender o desempenho e segurança veicular em situações dinamicamente críticas.

2.1.2 Freios a disco

O sistema de freios a disco moderno é baseado na força de atrito gerado pelo contato entre o disco, que está fixo à roda e a pastilha, fixa à pinça e, conseqüentemente, à manga e ao chassi do veículo. A força normal aplicada ao sistema é gerada por um ou mais pistões hidráulicos acionados pela atuação mecânica do motorista ou por bombas hidráulicas como as utilizadas no sistema ABS (BREUER; BILL, 2008).

Segundo Grigoratos e Martini (2015) para veículos leves, as pastilhas de freio são feitas de materiais compósitos que podem ser separadas em cinco grupos: aglutinantes, fibras, enchimento, aditivos e abrasivos. Os aglutinantes mantêm os compostos unidos fornecendo rigidez ao conjunto durante o carregamento de frenagem, estes são responsáveis por entre 20 e 40% da massa da pastilha e são compostos geralmente de resinas de fenol-formaldeído.

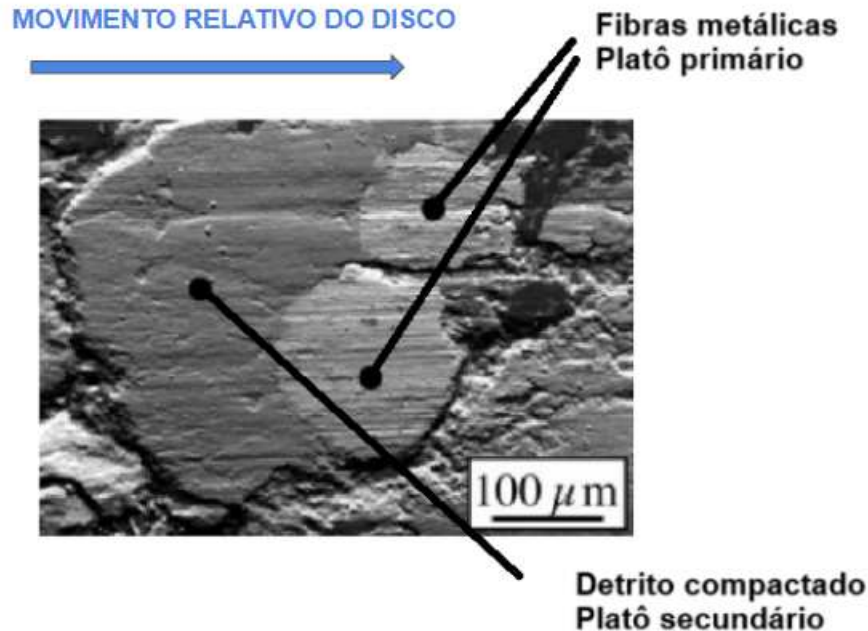
As fibras promovem mais resistência mecânica e estrutural à pastilha e correspondem de 6 a 35% da massa, podem ser separadas em: metálicas, minerais, cerâmicas e orgânicas, normalmente compostas por ferro, latão, sílica, Kevlar. Os enchimentos são importante na composição do material de atrito pois são projetados para fornecer resistência e estabilidade térmica além de absorção de ruído. São usualmente constituídos de materiais inorgânicos como óxidos de bário, magnésio ou cromo, podem ser responsáveis por até 70% da massa da pastilha.

Os aditivos e lubrificantes são adicionados para propósitos específicos como resistência ao desgaste e vibração, partículas de borracha e grafite são geralmente utilizadas. Por fim, os abrasivos são usados para elevar o coeficiente de atrito entre a pastilha e o disco mantendo o contato ideal entre as superfícies.

Outro fator importante na interação entre o disco e a pastilha é o desgaste. O princípio de funcionamento do sistema de frenagem é baseado na conversão de energia cinética em energia térmica, porém, parte da energia não é dissipada em energia térmica, mas sim, com a deformação e a destruição do material de atrito (HAGEN; FERDINAND, 2019). Segundo Eriksson, Bergman e Jacobson (1999) três camadas são observadas na interface de atrito: o material de atrito, o rotor e a camada intermediária, esta última é composta por materiais proveniente das outras duas camadas, além de produtos de reações químicas entre os mesmos. Na análise da interface de atrito, é importante observar duas superfícies, denominadas "platôs". O platô primário é composto por material original da pastilha, usualmente fibras metálicas, ou do rotor presente na camada intermediária, já o platô secundário consiste na região formada pelo acúmulo de partículas previamente soltas em frente a platôs primários devido à velocidade relativa entre as camadas. Na Figura 3 é exibida uma pastilha desgastada, a qual foi analisada por meio da técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Nota-se os platôs primários à direita e os secundários à esquerda, portanto o sentido

de translação do disco de freio é da esquerda para a direita.

Figura 3 – Formação de platôs no material de atrito



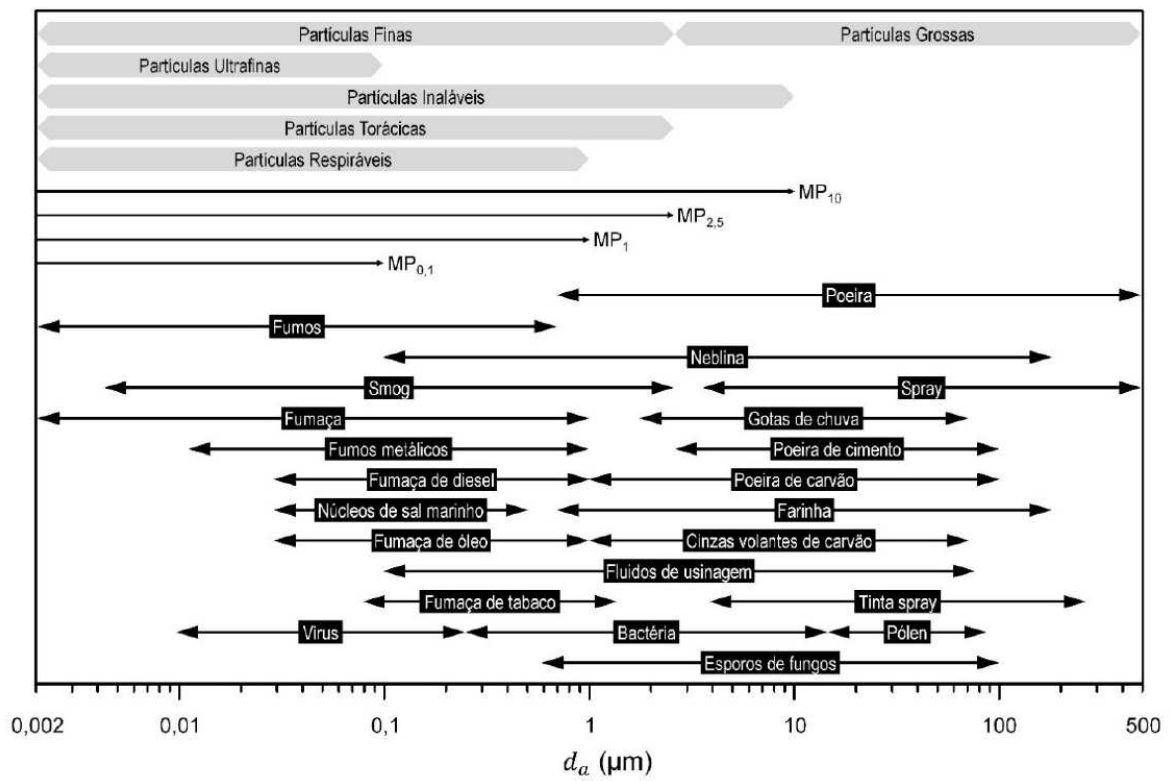
Fonte: Adaptado de Eriksson e Jacobson (2000).

De acordo com Eriksson e Jacobson (2000) a emissão de particulado está intrinsecamente ligada à formação de platôs primários e secundários. A existência dos platôs secundários é instável e dinâmica, baseada no balanço entre os processos formadores e destruidores do fenômeno, com sua presença podendo variar entre 10 % e a quase totalidade da área da pastilha dependendo da pressão de contato e da temperatura de operação. O platô secundário não se mantém sem o suporte das fibras do platô primário, portanto, quando esta se desgasta ou sofre uma ruptura, em função do atrito ou de sujeira no disco, os detritos acumulados e compactados se desprendem instantaneamente (ERIKSSON; JACOBSON, 2000).

2.2 AEROSSÓIS

Os aerossóis são a mistura de partículas sólidas e/ou líquidas em meio gasoso (KULKARNI; BARON; WILLEKE, 2011). Esta definição descreve a abrangência e complexidade do termo, os aerossóis são classificados por diferentes características, sendo as mais utilizadas a sua composição e geometria, primariamente diâmetro aerodinâmico (d_p). Segundo Yamano e Brockmann (1989) a variação no diâmetro resulta em comportamentos dinâmicos distintos na interação entre as partículas e o gás, assim como com as superfícies próximas.

Figura 4 – Classificação por tamanho do MP atmosférico em relação à sua fonte



Fonte: Brito, Sodré e Almeida (2018).

Na Figura 4, é apresentada a principal classificação de material particulado, juntamente com suas principais fontes. O autor ainda indica a profundidade de penetração do particulado no sistema cardiorrespiratório humano. MP₁₀ são consideradas inaláveis, chegando até a laringe, já o material particulado classificado como MP_{2,5} pode penetrar mais fundo, até a cavidade torácica. MP_{1,0} podem atingir regiões mais profundas como alvéolos pulmonares e são consideradas respiráveis. Por fim, MP_{0,1} ou menores podem até mesmo chegar ao sistema circulatório (BRITO; SODRÉ; ALMEIDA, 2018).

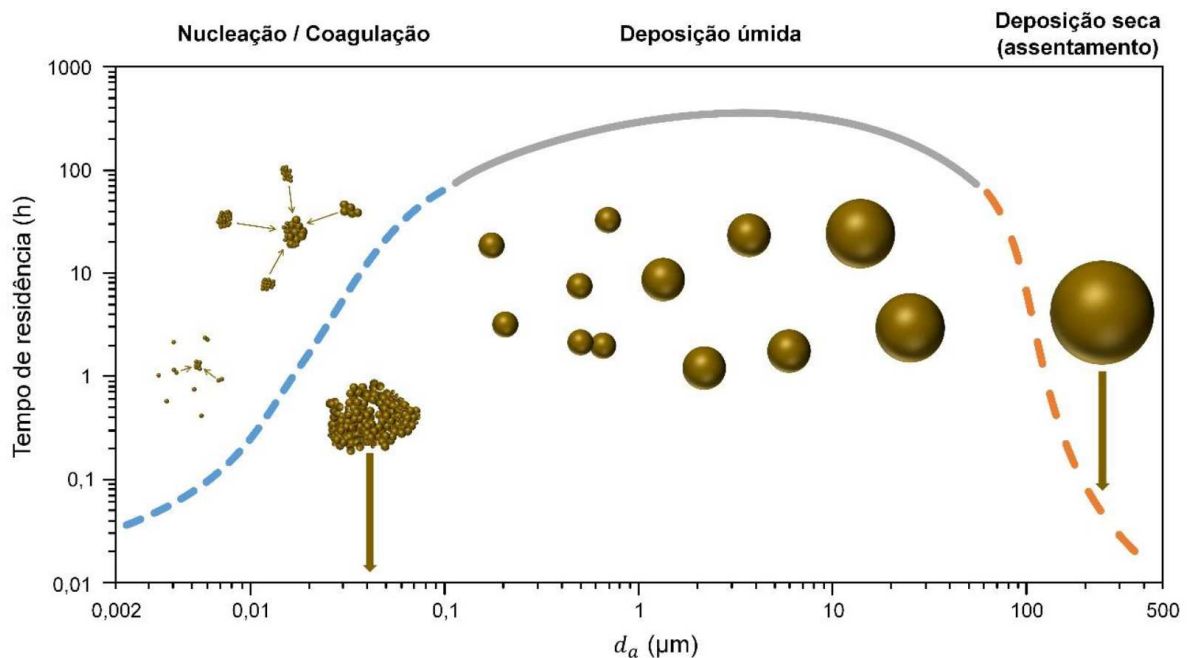
Anderson, Thundiyil e Stolbach (2012) citam que a exposição a longo prazo à material particulado pode aumentar em 18% a mortalidade relacionada a doenças cardiovasculares e 13% a mortalidade por arritmia e outros problemas cardíacos. Os autores ainda alegam que MP gera oxidação e inflamação pulmonar e é responsável pelo aumento de 9% na hospitalização infantil relacionada a bronquiolite, quando a concentração de MP_{2,5} sobe 10 µg/m³.

De acordo com Kulkarni, Baron e Willeke (2011) os aerossóis podem ser divididos em origem natural ou antropogênica. Entre os aerossóis naturais se destacam o spray marítimo, poeira de regiões áridas e fumaça de vulcões, já entre as fontes relacionadas à atividades humanas estão a emissão industrial e agrícola, geralmente

relacionada à combustão. Outra classificação aplicada aos aerossóis é relacionada a sua forma de emissão: quando o particulado é diretamente inserido na atmosfera o aerossol é classificado como primário, porém, se é oriundo de gases já presentes é denominado secundário (KULKARNI; BARON; WILLEKE, 2011).

Ainda segundo Kulkarni, Baron e Willeke (2011), o particulado secundário pode ter origem homogênea ou heterogênea. A origem homogênea é definida pela nucleação de vapores supersaturados de um mesmo elemento, já na heterogênea a nucleação ocorre em torno de uma partícula já existente na atmosfera, geralmente de outra substância, necessitando de ambientes menos saturados.

Figura 5 – Tempo de vida médio de particulado na atmosfera



Fonte: Brito, Sodr e e Almeida (2018).

Na figura 5 nota-se a vida média de uma partícula na atmosfera em fun o do diâmetro aerodinâmico. De acordo com Brito, Sodr e e Almeida (2018) o processo de deposi o pode ser separado em três categorias: a anteriormente citada nuclea o, deposi o úmida e deposi o seca. A nuclea o gera partículas maiores formadas de partículas menores, este fenômeno   significativo para partículas menores que $0,1 \mu m$. Ademais, partículas maiores que $50 \mu m$ sofrem grande efeito da gravidade, depositando-se em poucos minutos ou horas. Partículas entre $0,1 \mu m$ e $50 \mu m$ podem se manter em suspensão por até 10 dias em média e provavelmente será depositada por meio das chuvas, a chamada deposi o úmida. Esta faixa de particulado  , portanto crítica para a polui o em longos prazos (BRITO; SODR E; ALMEIDA, 2018).

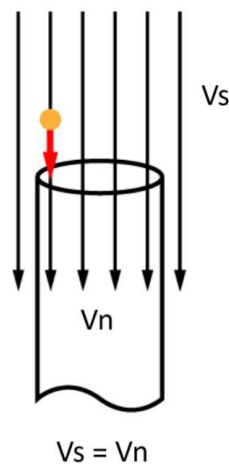
2.2.1 Medições de particulado

A coleta de amostras de particulado para análise requer grande atenção visando a obtenção de repetibilidade dos resultados. A forma mais comum de obtenção de amostras é por meio de um fluxo de ar em um duto contendo as partículas a serem analisadas. Os dois principais problemas nesse processo são: amostragem isocinética e perda mecânica de amostras (HAGEN; FERDINAND, 2019).

2.2.1.1 Amostragem isocinética

Segundo a (ISO, 2017), a amostragem isocinética é caracterizada de tal forma que a direção e velocidade do gás entrando no bocal de amostra, V_n , são os mesmos do gás no duto nos pontos de amostra, V_s , como apresenta a Figura 6. Devido as variações da velocidade de entrada, o estado isocinético é difícil de ser atingido durante todo o teste, portanto a amostragem pode ser caracterizada de duas outras formas: sobre-isocinética, quando $V_n > V_s$, e sub-isocinética quando, $V_n < V_s$ (YAMANO; BROCKMANN, 1989).

Figura 6 – Amostragem isocinética



Fonte: Adaptado de Hagen e Ferdinand (2019).

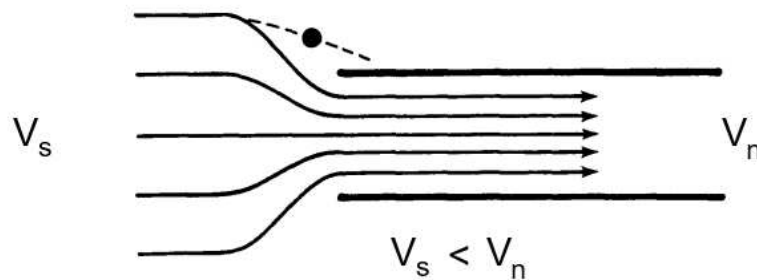
Quantitativamente, esse efeito pode ser calculado utilizando o conceito de eficiência de aspiração definido pela razão entre a concentração de particulado no interior bocal de amostragem e a concentração de particulado no fluxo de gás, $\eta_{asp} = C_{nzi}/C_{amb}$, desenvolvido experimentalmente por Belyaev e Levin (1974) e sintetizado na Equação 1.

$$\eta_{asp} = 1 + \left(\frac{V_s}{V_n} - 1 \right) [1 - (1 + k * St(V_s))^{-1}] \quad (1)$$

Sendo k o parâmetro de deposição na entrada do bocal e $St(V_s)$ igual ao número adimensional de Stokes calculado com base na velocidade do fluxo do gás V_s .

Segundo Hagen e Ferdinand (2019), a relação entre as velocidades V_n e V_s configuram diferentes resultados nas medições das amostras. O motivo está na diferença de comportamento dinâmico entre partículas maiores e menores quando submetidas a mudanças no fluxo de gás. Na amostragem sobre-isocinética as partículas maiores tendem, em função de sua maior massa, a manter seu caminho retilíneo enquanto partículas menores seguem as linhas de corrente do fluxo convergentes para o interior do bocal, este fenômeno resulta em número menor de partículas de dimensões maiores observadas pela sonda em relação ao esperado (YAMANO; BROCKMANN, 1989). Na Figura 7 pode ser observada, de forma ilustrativa, a dinâmica citada.

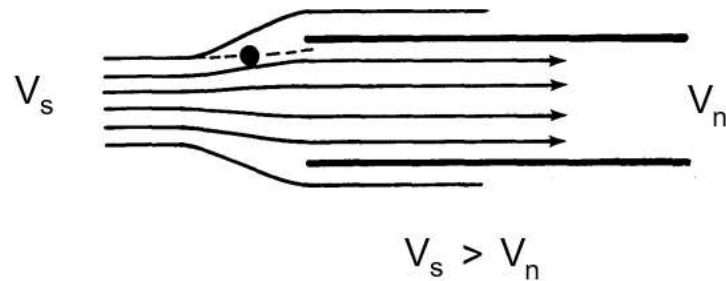
Figura 7 – Amostragem sobre-isocinética



Fonte: Adaptado de Yamano e Brockmann (1989).

Entretanto, no caso em que $V_n < V_s$, a citada amostragem sub-isocinética, ocorre o inverso, as partículas maiores não corrigem sua trajetória seguindo as linhas de corrente do fluxo e adentram no bocal de sondagem, como mostrado na Figura 8. Neste fenômeno, a quantidade de partículas de grandes dimensões observada é maior que o esperado.

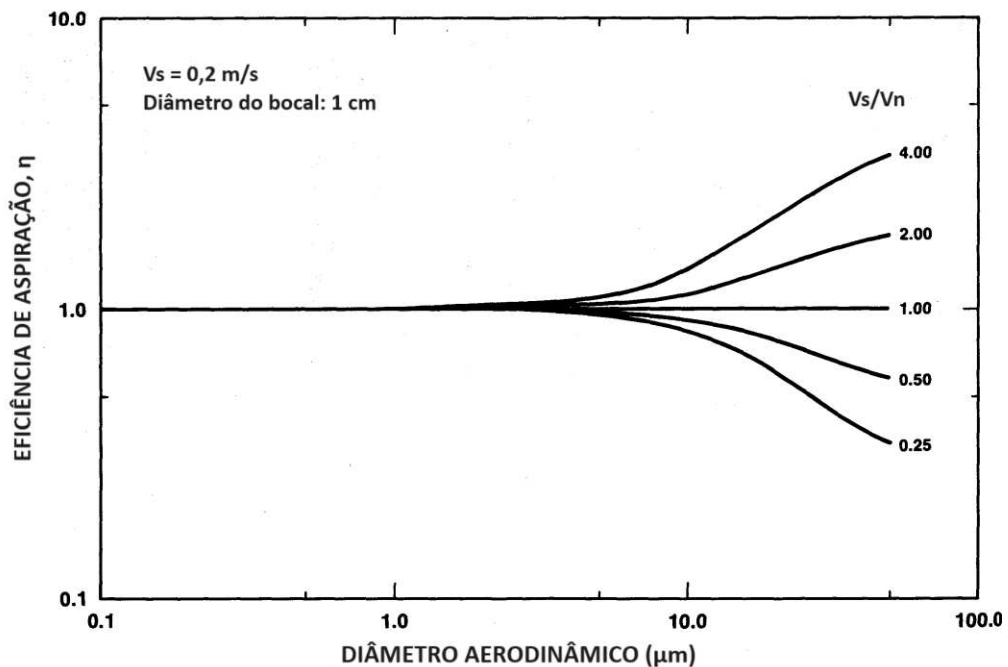
Figura 8 – Amostragem sub-isocinética



Fonte: Adaptado de Yamano e Brockmann (1989).

Na Figura 9 é possível observar a relação entre o diâmetro aerodinâmico, a razão V_s/V_n e a eficiência de aspiração calculados por Yamano e Brockmann (1989) de acordo com a Equação 1. Nota-se que a distorção na amostragem é mais significativa quanto maior a partícula e mais distante da igualdade a relação das velocidades (amostragem isocinética).

Figura 9 – Comportamento da eficiência de aspiração



Fonte: Adaptado de Yamano e Brockmann (1989).

2.2.1.2 Perda mecânica de amostras

Devido à sua massa, as partículas podem não seguir o comportamento das linhas de corrente no interior da tubulação entre a emissão do aerossol e o bocal de amostragem. Este fenômeno, semelhante ao problema da amostragem não isocinética, pode alterar a distribuição de particulado no espectro do diâmetro aerodinâmico (HAGEN; FERDINAND, 2019). O fenômeno mais significativo de perda de amostra é a deposição gravitacional, que atua primariamente em partículas maiores e pode ser afetada diminuindo seções horizontais na tubulação assim como reduzindo o diâmetro desta, aumentando assim a velocidade do escoamento (YAMANO; BROCKMANN, 1989).

Segundo Hagen e Ferdinand (2019), outra fonte importante de perda é a deposição inercial, que também atua de forma mais significativa em partículas maiores. Para evitar o descrito é necessário aumentar os raios de curvatura na tubulação e evitar juntas e discontinuidades, além disso, reduzir a velocidade do escoamento também é benéfico. Portanto, é necessário encontrar um equilíbrio entre ambas as causas citadas para atingir o ponto mínimo de perdas. Estes fenômenos são justificados pela relação: a massa da partícula é proporcional ao cubo do diâmetro da partícula, porém, a força de arrasto é relacionada à área projetada, logo, ao quadrado do diâmetro, desta forma, com o aumento do diâmetro do particulado as forças relacionadas à massa se tornam mais relevantes (FOX; MCDONALD; PRITCHARD, 2014).

Partículas menores são mais suscetíveis à deposição por difusão, onde estas sofrem colisões aleatórias com as paredes do duto devido ao efeito Browniano. Reduzir a velocidade do escoamento no duto mitiga este fenômeno, além disso, campos elétricos e gradientes de temperatura também podem interferir na trajetória das partículas, porém, estes fenômenos são menos relevantes comparativamente à deposição gravitacional e inercial (HAGEN; FERDINAND, 2019).

2.3 ESTUDOS DE CASO

Durante a década de 2000 e 2010 alguns estudos se tornaram pioneiros na emissão de particulado por sistemas de freios, seus métodos e análises são de extrema importância para este trabalho assim como para o desenvolvimento do estudo na área. Nesta seção serão abordados dois destes estudos, além disso, o estudo desenvolvido por Hagen e Ferdinand (2019) também será discutido pois este fornece base sólida para o desenvolvimento da metodologia deste trabalho.

2.3.1 General Motors - 2000

O primeiro deles foi desenvolvido na General Motors por Garg et al. (2000) com o objetivo de determinar a quantidade de partículas emitidas por sete formulações de

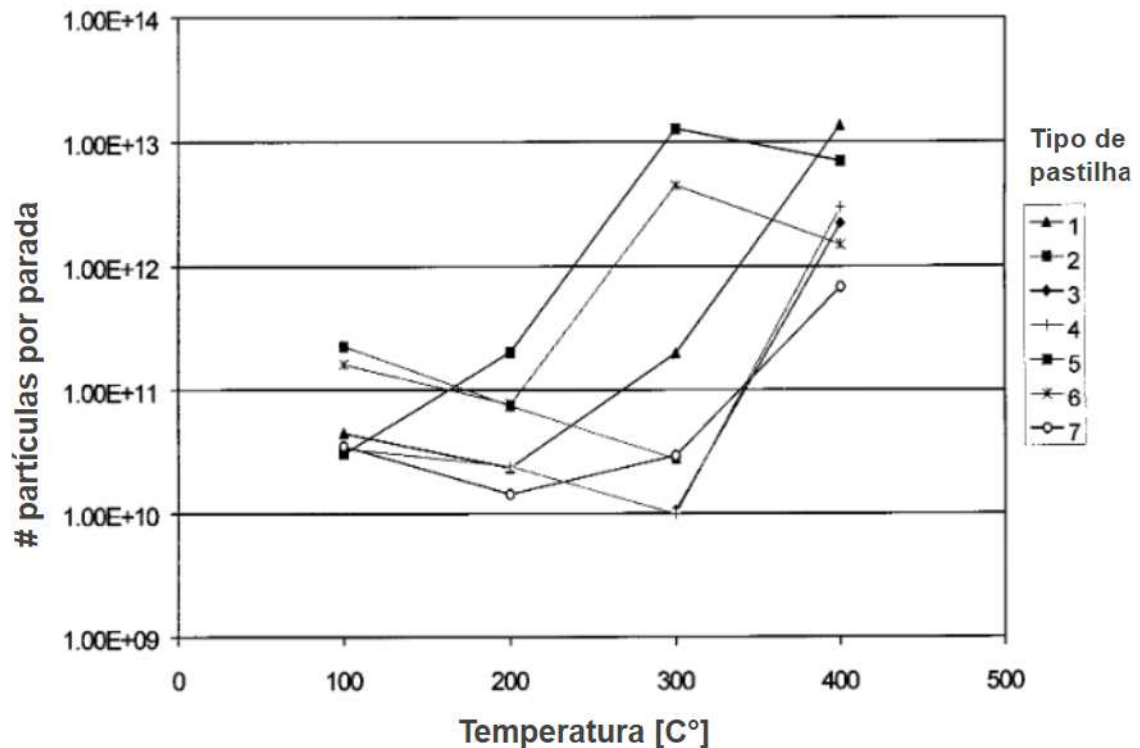
pastilhas de freios disponíveis para carros novos na época da publicação. O estudo foi baseado em um dinamômetro inercial e utiliza a montagem original do sistema de frenagem do veículo correspondente, com a atuação por um sistema hidráulico externo. As frenagens foram todas realizadas de 50 a 0 km/h com desaceleração de 0,3 g . O número de frenagens variou entre 300 a 1.000 para determinadas temperaturas iniciais distintas.

A sistema foi montado interno à uma clausura de 0,15 m^3 com fluxo de ar variando de 11,9 a 80,4 m^3/min , o maior fluxo usado é equivalente a 5,72 m/s no duto de saída. Na entrada da câmara, um filtro de alta eficiência HEPA é posicionado para evitar contaminação da amostra, além disso, na saída os pontos de amostragem foram montados a 6,7 metros do sistema de freio em um duto horizontal de 0,55 metros de diâmetro.

Para a amostragem de partículas dois métodos foram aplicados: para a análise de elementos e de massa foram utilizados filtros com diâmetro de 47 milímetros e diâmetro de poro de 2 μm , insuflando fluxo de ar no enclausuramento de 4,6 a 1,1 L/m . Para a distribuição de partículas foi selecionado o impactador de baixa pressão elétrico fabricado pela Dekati com 13 estágios de impactação, de 0,03 a 10 μm .

Garg et al. (2000) verificaram dados importantes para o início do estudo sobre particulado emitido por pastilhas de freio. Entre eles destaca-se que, considerando a média de todos os sistemas analisados, a emissão de particulado por veículos, variando de carros de passeio a picapes, está na faixa de 3,2 a 8,8 miligramas por quilômetro. Além disso, foi constatado também pelo mesmo artigo que, entre 100 e 200 $^{\circ}C$ a fração de massa aerotransportada no desgaste da pastilha está entre 24 e 35%.

Figura 10 – Partículas por frenagem



Fonte: Adaptado de Garg et al. (2000).

Na Figura 10, o autor conclui que a divergência entre a emissão de pastilhas diferentes varia entre 10 e 100 vezes, podendo chegar a 1000 vezes em determinadas situações, portanto, há grande espaço para avanço na formulação e método de fabricação dos componentes afim de minimizar este efeito.

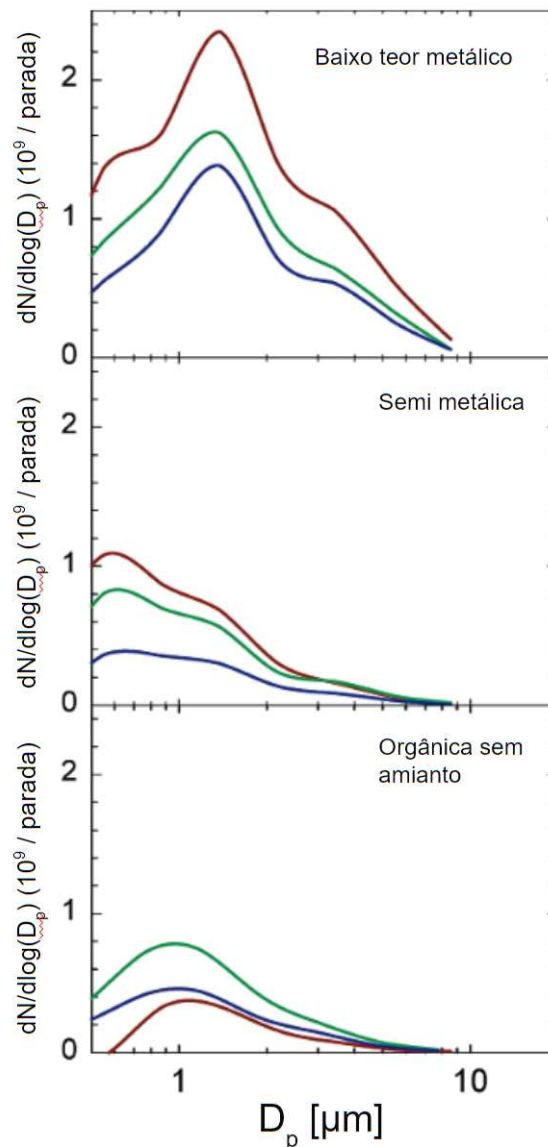
2.3.2 Ford Motor Company - 2003

O objetivo do estudo publicado por Sanders et al. (2003), juntamente com a Ford MC, é semelhante ao citado anteriormente, porém, é focado na diferença de emissão entre três classificações de materiais de atrito: baixo teor metálico, semi-metálico e orgânico sem amianto. A metodologia utilizada nos testes possui diferenças importantes quando comparadas ao exemplo anterior, pois, foram realizadas medições com o sistema instalado no veículo e montado em túnel de vento. Além disso, diferentes padrões de frenagem foram utilizados, variando entre frenagens cotidianas e abusos do sistema buscando o sobreaquecimento do rotor.

Os resultados obtidos pelos autores foram complementares aos encontrados por Garg et al. (2000), portanto, unindo a outros trabalhos, valida-se a metodologia. Como grande complemento ao tópico, Sanders et al. (2003) discutem a emissão característica de pastilhas separadas nas três categorias citadas anteriormente.

Os resultados obtidos pelos autores foram complementares aos encontrados por Garg et al. (2000), de forma que acrescenta discussão ao tópico devido à variação de metodologia. Os autores, Sanders et al. (2003), concluíram que a metodologia empregada no teste causou perda significativa de amostras por deposição na tubulação, calculado em até 25% para partículas de $5\mu m$, desta forma, métodos que visam minimizar este efeito deve ser empregados nos demais trabalhos.

Figura 11 – Distribuição de particulado para diferentes classificações de pastilhas



Fonte: Adaptado de Sanders et al. (2003).

Na Figura 11 é possível analisar o espectro de dimensão das partículas analisadas pelos autores, sendo que cada uma das três curvas em cada gráfico representam medições de amostras diferentes que foram feitas com a intenção de

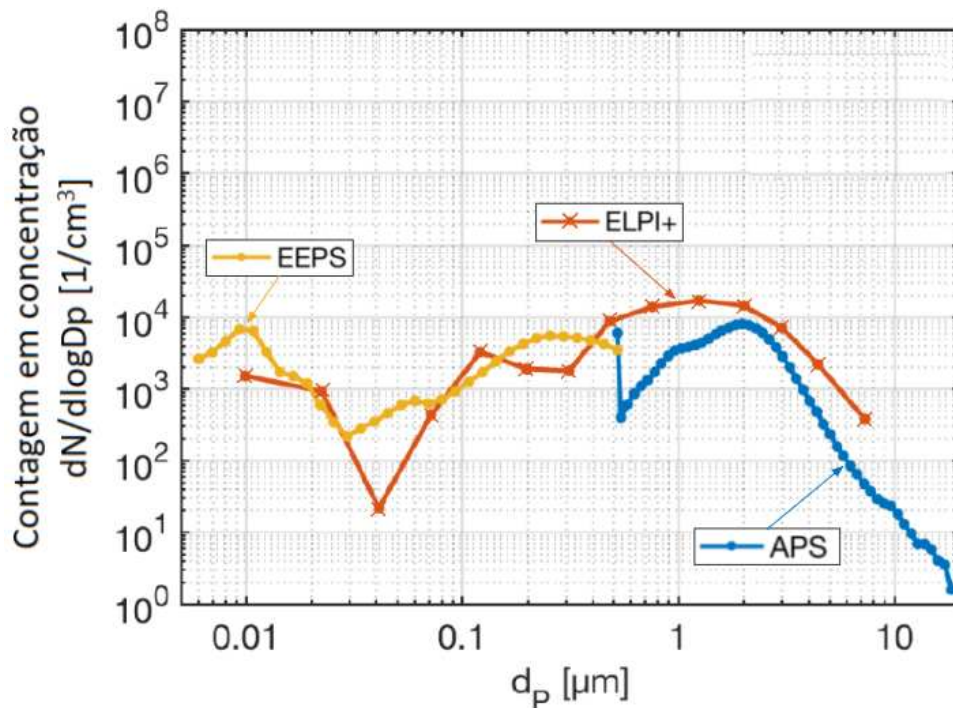
analisar a repetibilidade do processo. Uma das divergências de resultados expostas por pelos autores em relação ao trabalho de Garg et al. (2000) está na porção de material de atrito liberada de forma aerotransportada em relação ao total perdido pela pastilha. Para Sanders et al. (2003) este valor foi estimado entre 50 e 70% e esta diferença pode estar relacionada, segundo os autores, a perdas de amostra visto que, quando há a correção de dados, os valores encontrados por Garg et al. (2000) chegam a 64%.

2.3.3 Bergische Universität Wuppertal - 2019

Este estudo, publicado por Hagen e Ferdinand (2019), serve como referência atual para os estudos na área de emissões particulado por sistema de freio. Nele, os autores fazem o comparativo de diferentes metodologias, testes em dinamômetros de laboratório e testes com veículos adaptados em situações reais de estrada. Além disso, assim como Sanders et al. (2003), utiliza-se diferentes aparelhos para o monitoramento da emissão.

A metodologia utilizada no desenvolvimento da bancada de testes foi amplamente discutida, atendendo a normas atuais de amostragem de particulado, como a ISO 9096:2017, modelando detalhadamente os efeitos de perda de particulado. Outra análise vital discutida no texto se refere à diferentes ciclos de condução simulados no dinamômetro.

Figura 12 – Espectro de partículas durante frenagem



Fonte: Adaptado de Hagen e Ferdinand (2019).

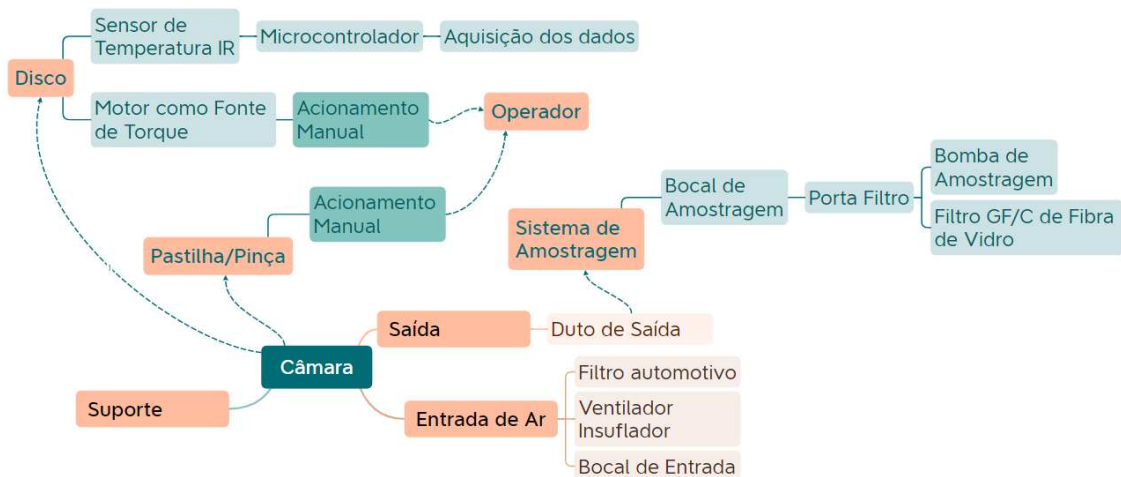
Na Figura 12 é mostrada a distribuição de partículas emitidas em teste em dinamômetro utilizando três sistemas de aquisição diferentes. A figura faz parte da discussão presente no artigo sobre a variação da emissão no início e no fim de frenagens de alta energia. Observa-se a grande flutuação dos dados e a variação significativa nos resultados em função do método de coleta e análise utilizados. Este fato, assim como pontuado por outros autores, deixa claro a dificuldade de se atingir repetibilidade suficiente e desenvolver normatização sobre este tema.

3 MÉTODO

A Bancada de testes é baseada em uma motocicleta fixada ao chão com a roda traseira suspensa e com o conjunto disco e pinça enclausurado por uma câmara com fluxo de ar controlado e filtrado. Este fluxo garante um escoamento de ar similar ao encontrado em condição de uso em estrada, permitindo a suspensão do material particulado. O sistema é alimentado pelo motor da motocicleta, fornecendo torque no sentido contrário ao gerado pelo atrito do rotor com a pastilha. O escoamento de ar é, então, direcionado ao duto de saída, onde é instalado um sistema de aquisição de particulado por amostra isocinética.

O fluxo de ar, as dimensões da câmara e o trajeto da tubulação devem ser determinados e projetados de forma a minimizar a perda de partículas e garantir a repetibilidade das amostras. O sistema proposto é semelhante aos desenvolvidos e validados pelos autores citados anteriormente na seção de estudos de caso. O modelo esquemático da bancada está representado na Figura 13 e suas partes e componentes serão descritos em detalhes no decorrer deste capítulo

Figura 13 – Esquemático da bancada



Fonte: Autor (2023).

A bancada foi instalada no Laboratório de Sistemas Veiculares no campus da UFSC em Joinville. A motocicleta utilizada é do modelo G 310 GS fabricada pela BMW Motorrad e foi fixada ao solo utilizando um suporte especial montado no quadro do veículo e parafusado ao chão de concreto. O sistema de exaustão do motor foi modificado em função da instalação da câmara, com alteração na sua posição original, como mostra a Figura 14.

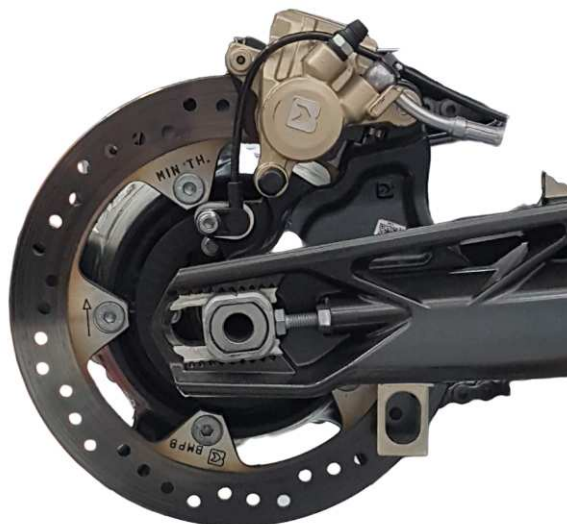
Figura 14 – Posicionamento e alterações na motocicleta



Fonte: Autor (2023).

O sistema de freio traseiro utilizado, como mostrado na Figura 15, é composto por disco sólido com furação autolimpante e de refrigeração, possui 240 milímetros de diâmetro e 4,5 milímetros de espessura e é fabricado em aço inoxidável. A pinça é do modelo deslizante com acionamento manual por pedal e é fabricada pela ByBre, empresa do grupo BREMBO focada no mercado indiano (BREMBO, 2018).

Figura 15 – Sistemas de freio da motocicleta



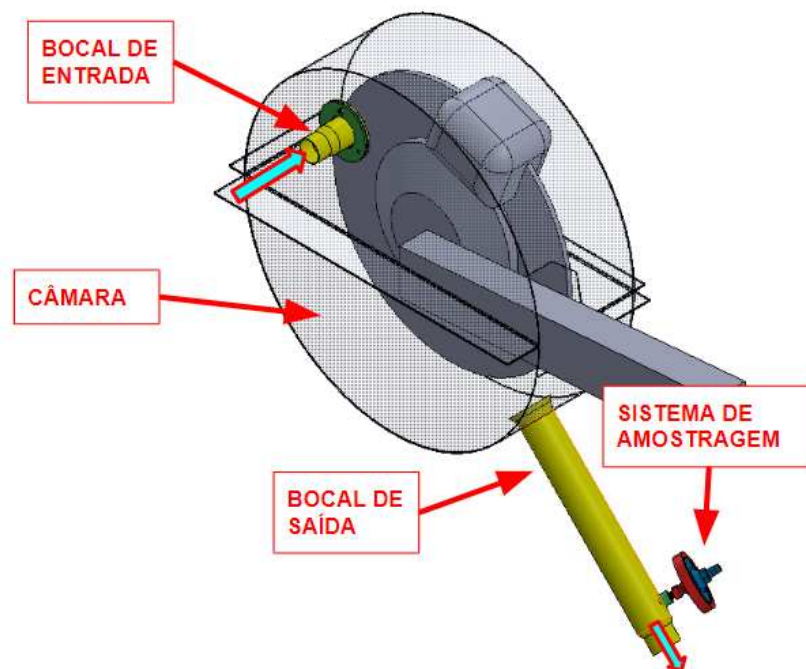
Fonte: Autor (2023).

3.1 CÂMARA DE COLETA

A câmara de coleta, feita de chapas de polietileno de alta densidade, tem o objetivo de enclausurar o sistema de freios de forma a impedir vazamentos ou contaminações. Tal objetivo é difícil de ser completamente atingido devido à geometria complexa da motocicleta, para tal, foram utilizadas fitas adesivas e de borracha para mitigar este efeito. As dimensões da câmara são restringidas pelo diâmetro interno da roda traseira e o espaçamento entre o disco a mesma, além disso, o suporte do enclausuramento é feito através do coxim do escapamento e sua montagem é bipartida.

O bocal de insuflamento de ar é posicionado na lateral externa da câmara, distribuindo o ar no seu interior de forma homogênea, e o duto de saída é posicionado radialmente ao conjunto, próximo e orientado à região onde o particulado é gerado e lançado, favorecendo a coleta. Por fim, a lateral externa da câmara serve de suporte para o sensor de temperatura infravermelho direcionado ao disco. Na Figura 16 são apresentadas as peças da clausura, juntamente com o sistema de coleta de particulado por amostragem, porém, os ventiladores e os filtros não estão representados para facilitar a visualização.

Figura 16 – Montagem da câmara e sistema de coleta em programa CAD



Fonte: Autor (2023).

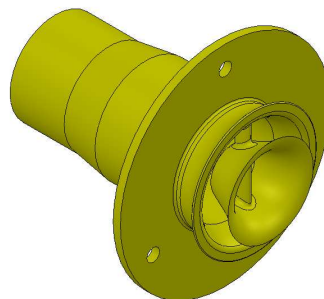
3.1.1 Entrada de ar

O subsistema de entrada de ar tem a função de fornecer um fluxo constante de ar filtrado em vazão controlada. Este consiste em um ventilador insuflador, dutos, filtro e bocal de entrada. O ventilador utilizado foi do tipo radial, com potência de 273 Watts e indução trifásica controlada por um inversor de frequência WEG modelo CFW100. O uso do inversor foi essencial para o ajuste fino da vazão de ar, sendo essa, medida utilizando um anemômetro de fio quente modelo KR865, fabricado pela AKROM.

Para atingir a pureza necessária para não contaminar as amostras, o ar insuflado precisa, obrigatoriamente, ser filtrado com eficácia, para tal, foi adicionado em série ao fluxo um filtro cilíndrico de uso automotivo.

O bocal de entrada foi desenhado com o objetivo de distribuir o escoamento de forma mais eficaz, garantindo que não há pontos de estagnação em regiões que possam interferir na dispersão do particulado. A vista isométrica do bocal de entrada pode ser observada na Figura 17. A peça foi produzida utilizando manufatura aditiva em polímero Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) para resistir à temperatura radiada pelo disco durante a operação.

Figura 17 – Modelo CAD do bocal de entrada de ar



Fonte: Autor (2023).

3.1.2 Duto de saída

O duto de saída tem como objetivo garantir que o particulado emitido no interior da clausura pela interação disco/pastilha seja recolhido para posterior análise, seguindo diretrizes de projeto.

O método de coleta consiste em utilizar um bocal de amostra no interior do duto, redirecionando uma pequena quantidade do fluxo para um filtro plano de pequenas dimensões produzido com fibra de vidro específico para uso em laboratório. O desenvolvimento do sistema de amostras e do duto de saída foi amparado pela norma internacional para amostragem de particulado em aerossóis ISO 9096:2017. A escolha

deste método foi baseada na necessidade de validação de um método capaz de ser empregado em escoamentos de grande vazão, assim como descrito nos objetivos do trabalho. O método aqui desenvolvido será reutilizado com poucas modificações em um dinamômetro de maior porte, em que seria inviável filtrar todo o gás circulante na câmara de coleta.

Figura 18 – Modelo CAD do bocal de saída



Fonte: Autor (2023).

De acordo com a norma citada, parâmetros geométricos específicos do duto de saída são determinados. Os de maior impacto nos desenhos das peças está relacionado ao comprimento do duto a jusante e montante sem qualquer curvatura, obstáculo ou alteração de diâmetro, respectivamente, cinco e duas vezes o diâmetro. Na Figura 18 visualiza-se que a peça possui dois furos, o furo mais próximo da câmara é útil para inserir o sensor de velocidade do escoamento e deve ser fechado quando em operação, já o furo de maior diâmetro permite a montagem do conjunto de amostragem. A peça também foi produzida por manufatura aditiva, porém em ácido poliláctico (PLA) já que não sofre grande aporte térmico devido à sua posição de montagem.

3.1.3 Amostragem

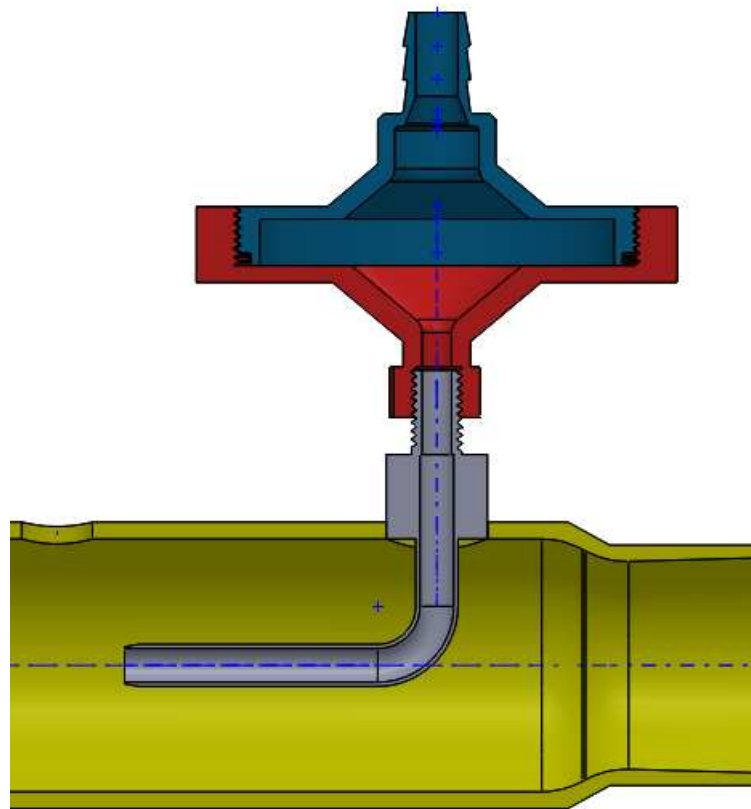
O desenvolvimento do sistema de amostragem tem como objetivo recolher amostra de aerossol em escoamento no duto de saída de forma representativa e que mantenha as características da amostra. O conjunto, também baseado na norma ISO (2017) consiste em quatro partes: duto de amostragem, porta filtro, dutos flexíveis e bomba de amostragem.

O duto de amostragem possui limitações geométricas descritas pela norma já citada, o diâmetro utilizado é de 4 milímetros, representando 1,78% da área transversal

do duto de saída (30 mm de diâmetro). O porta filtro é composto por duas partes que, quando montadas por rosca, mantêm o filtro de partículas fixo e selado.

Por fim, para garantir o correto fluxo de ar pelo sistema foi utilizada uma bomba de amostragem VentusPro, da fabricante Inlite, que garante vazão controlada na faixa de 1 a 5 litros por minuto, sendo capaz que fornecer até 10 kPa de pressão de sucção. Na Figura 19 é apresentada o sistema de amostragem montado em corte lateral, facilitando a visualização.

Figura 19 – Montagem em corte do sistema de amostragem



Fonte: Autor (2023).

3.2 PARÂMETROS DE OPERAÇÃO

Para o correto funcionamento da bancada uma série de parâmetros devem ser analisados e estabelecidos. Como referência para determinar esses parâmetros foram utilizadas primariamente as normas ISO 9096:2017, NBR 6143 (1995) e o trabalho publicado por Hagen e Ferdinand (2019).

3.2.1 Fluxo de ar

O fluxo de ar foi calculado utilizando três requisitos, sendo que os dois primeiros são baseados ao trabalho de Hagen e Ferdinand (2019). A velocidade no duto de saída deve estar na faixa de 4 a 6 m/s e o fluxo de gás por hora na câmara, \dot{V} deve ser pelo menos 1250 vezes o volume da mesma, V . Este fluxo é uma estimativa baseada em simulações da ventilação natural do sistema de freios em um veículo a 40 km/h .

Um grande problema relacionado a vazão é o possível vazamento de gás entre as superfícies visto que a montagem não garante estanqueidade entre a geometria complexa da motocicleta e a câmara. Para reduzir este efeito foi utilizada fita adesiva plástica entre peças estáticas e fitas de borracha entre peças rotativas. Para garantir que possíveis vazamentos não contaminasse a amostra, o interior da câmara foi mantido à pressão manométrica positiva durante todo o teste, esta é a causa principal em utilizar ventiladores insufladores e não aspiradores.

O volume de ar no interior da câmara de amostragem foi calculado em 0,01 metros cúbicos, portanto o fluxo deve ser próximo de 12,5 m^3/h . Durante os testes a velocidade no duto de saída varia próximo de 4,6 m/s em função das variáveis da medição. Nesta configuração a razão \dot{V}/V é calculada em 1170, considerada satisfatória.

O terceiro requisito indica que o escoamento no duto de saída deve ser turbulento para garantir a mistura homogênea de particulado no fluxo. Para isto, utilizando a equação 2, calcula-se Re igual à 9286, 4,04 maior que a referência de transição, 2300, portanto completamente turbulento. (FOX; MCDONALD; PRITCHARD, 2014).

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu_{fluido}} \quad (2)$$

Sendo Re número de Reynolds para escoamento interno, ρ a massa específica do fluido, v a velocidade do escoamento, D o diâmetro do duto e μ_{fluido} a viscosidade dinâmica do fluido.

3.2.2 Ciclo de teste

O ciclo de teste foi baseado na norma NBR 6143 de 1995 (ABNT, 1995). Neste método, a velocidade de rotação do disco é constante durante todo o teste, conseqüentemente não é necessário o uso de volantes de inércia, assim, é possível utilizar o motor da motocicleta para fornecer energia ao sistema.

A norma prevê controle preciso de rotação e pressão hidráulica durante o teste, porém o controle de ambos, na presente bancada, é feito manualmente para simplificar

o projeto. A velocidade especificada para o teste foi de 36 km/h , que corresponde a aproximadamente 300 RPM. O controle é feito utilizando a indicação de velocidade no painel do veículo.

O acionamento do freio traseiro foi realizado diretamente pelo pedal, a pressão aplicada foi determinada como sendo a necessária a fim de que, para manter a velocidade constante, o operador também necessite aumentar 10% em TPS (Posição da borboleta do acelerador). Este método não garante pressão constante entre os ciclos pois com a variação da temperatura do disco, e conseqüentemente do coeficiente de atrito μ , a pressão aplicada também irá se modificar. No entanto, este método garante alguma repetibilidade em prol da simplicidade. O ciclo de ensaio consiste em 10 frenagens de 5 segundos com intervalo de 10 segundos entre elas. Os três primeiros ciclos são de assentamento da pastilha, portanto não são retiradas amostras de particulado. Após o assentamento, deve-se iniciar o recolhimento do material.

Para início de um novo ciclo a temperatura do disco deve ser inferior a 100 C° . De acordo com a norma ABNT (1995) esta medição deve ser realizada utilizando termopares alojados no interior do disco, contudo como se trata de um projeto preliminar, um sensor infravermelho foi selecionado apesar de sua baixo desempenho com materiais metálicos polidos como o disco de freio.

3.3 MODELO NUMÉRICO

Para melhor compreensão do fenômeno foi realizada uma simulação CFD (mecânica dos fluidos computacional) utilizando o programa Ansys Fluent Student. A simulação tem como objetivo avaliar o escoamento e a turbulência no interior da câmara e no duto de saída.

3.3.1 Parâmetros da simulação

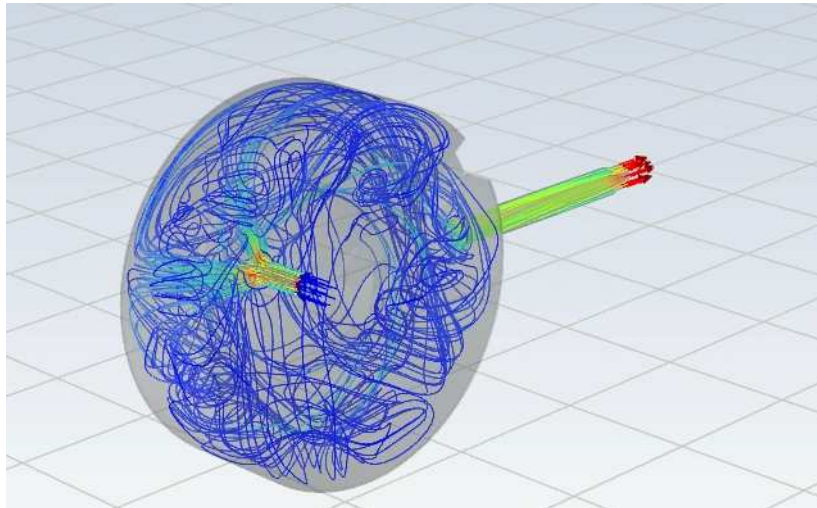
A malha computacional é composta por 505.000 elementos em função da limitação da licença Student do programa. A condição de contorno de entrada foi fixada em 6 m/s e pressão manométrica nula no fim do duto de saída. Além disso, o giro do disco e da roda no interior da câmara foi implementado. O modelo de turbulência $K - \omega$ foi escolhido em função do melhor desempenho em regiões de gradientes negativos de pressão e separação de escoamento (TU et al., 2008). Gradientes de temperatura não foram analisados e considerados a fim de simplificar o modelo .

3.3.2 Análise do modelo

Nas Figuras 20 e 21 nota-se que o escoamento no interior da câmara é caótico e completamente regido por fenômenos turbulentos, com a maior parte se distribuindo de forma homogênea. Apenas uma pequena porção do escoamento gera um trajeto

direto entre a entrada e saída e este é adjacente à pinça de freio, onde o particulado é emitido, desta forma a dispersão das partículas no meio é considerada satisfatória.

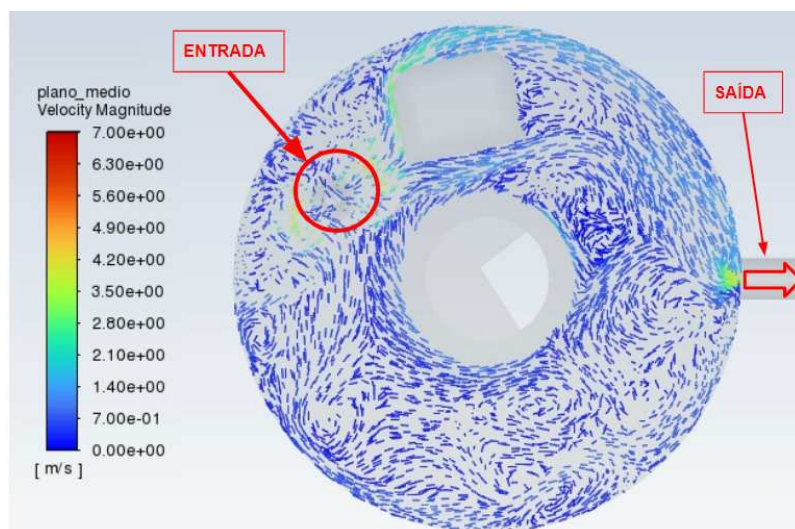
Figura 20 – CFD: linhas de corrente



Fonte: Autor (2023).

A simulação computacional é ferramenta adequada para analisar o escoamento no duto de saída no plano de coleta de particulado, onde há requisitos descritos pela ISO (2017). O primeiro deles determina que o ângulo entre o vetor velocidade e o eixo transversal ao duto, no ponto de coleta, não deve ser maior de 15° , ângulo este calculado em $2,7^\circ$ com o modelo numérico.

Figura 21 – CFD: vetores velocidade no plano médio

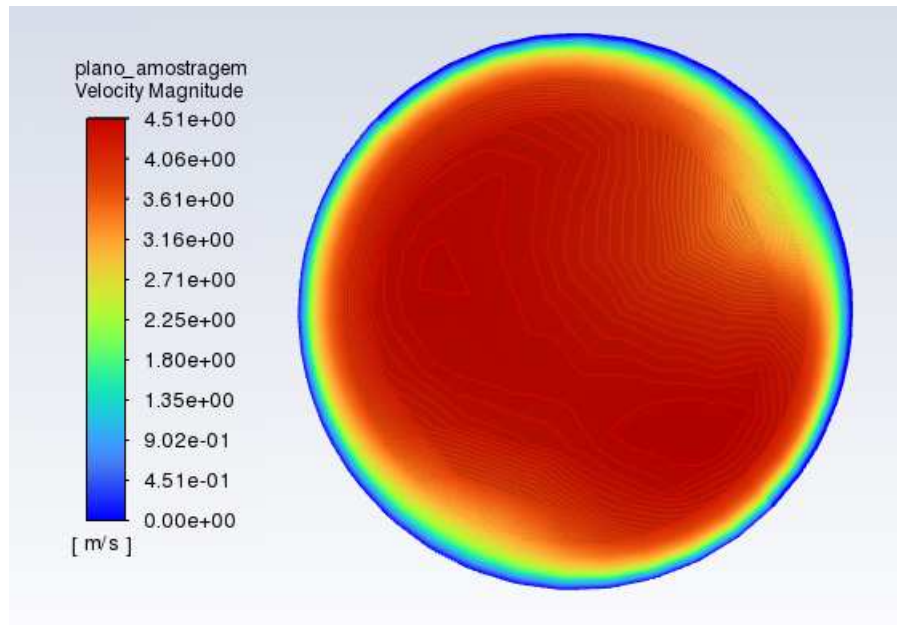


Fonte: Autor (2023).

Outro requisito limita à 3:1 a razão entre a maior e menor velocidade no plano

de amostra, desconsiderando a camada limite do escoamento. Esta razão foi estimada em 1,47 utilizando o modelo. Além disso, não foi detectado contrafluxo local. O contorno de velocidade no plano de amostragem está representado na Figura 22

Figura 22 – CFD: velocidade no plano de amostragem



Fonte: Autor (2023).

A simulação numérica, apesar da falta de validação experimental, se apresenta como grande aliada no desenvolvimento da bancada de ensaios e demonstra, de forma principalmente qualitativa, o bom funcionamento do projeto do sistema e a adequação às normas citadas.

3.4 EXTRAÇÃO E ANÁLISE DE PARTICULADO

Após a retenção do particulado pelo filtro, o mesmo deve ser extraído para posterior análise. O processo deve garantir mínima contaminação da amostra por elementos do filtro (fibras), deve extrair quantidade suficiente de particulado e não deve selecionar bandas específicas de diâmetro de partícula para extração.

O processo de extração é extremamente complexo e garante toda uma linhagem de estudos, porém, este trabalho não é focado nesta linha de pesquisa. Uma alternativa para o projeto, na íntegra, seria contratar o serviço de laboratório especializado mas, a fim de simplicidade e redução de custos como premissas do trabalho, esta análise foi realizada pelo próprio autor da pesquisa.

3.4.1 Extração

O processo de extração de particulado foi baseado nos trabalhos de Bein e Wexler (2014) e Bein e Wexler (2015), entretanto com metodologia simplificada. O método consiste em posicionar o filtro sobre uma lamina de vidro com a superfície carregada de particulado virada para baixo, os componentes são então submersos em álcool isopropílico e agitados por vibrações senoidais produzidas por um conjunto gerador de sinais e um driver de 3 Watts. A excitação varia entre 500 Hz a 15 kHz por aproximadamente 5 minutos. Após a secagem do liquido o filtro e retirado e a lâmina é selada e armazenada.

Este processo se mostrou suficiente para a retirada preliminar de amostras, mas contou com a desvantagem de gerar nucleação de algumas partículas durante o processo. Para a análise das imagens estas regiões foram evitadas.

3.4.2 Análise de amostras

A análise das amostras extraídas do filtro foram feitas por imagem, utilizando o microscópio Zeiss modelo Axio Observer 5 cedido à uso pelo Laboratório de Microfluídica da UFSC Joinville. O processo consiste em realizar capturas de imagens de duas regiões diferentes da amostra, cada uma com ampliações de 200, 400 e 630 vezes.

As imagens são então processadas utilizando o programa ImageJ, empregando a função Analyze Parcicles. Esta função faz a contagem do número e área de partículas presentes na imagem. Vale ressaltar que partículas de fibra de vidro presentes na imagem são desconsideradas na contagem, pois é possível realizar a distinção pela circularidade da partícula.

Os dados são transferidos para um algoritmo que calcula o diâmetro aproximado das partículas considerando partículas como esferas. A distribuição e desvio padrão da amostra são então calculados e apresentados em forma de gráficos.

3.5 MONTAGEM FINAL DA BANCADA

Na Figura 23 observa-se a montagem final da bancada com os equipamentos de medição, juntamente com o sensor de temperatura, estruturas de entrada e saída de ar.

Figura 23 – Montagem final



Fonte: Autor (2023).

Por fim, a Figura 24 apresenta a montagem do duto de saída, juntamente com o sistema de amostragem, porta filtro e bomba de amostragem, que, no momento do teste, deve ser configurada para a vazão calculada a partir da velocidade medida no duto para garantir amostragem isocinética.

Figura 24 – Montagem final do duto de saída e amostragem



Fonte: Autor (2023).

4 RESULTADOS

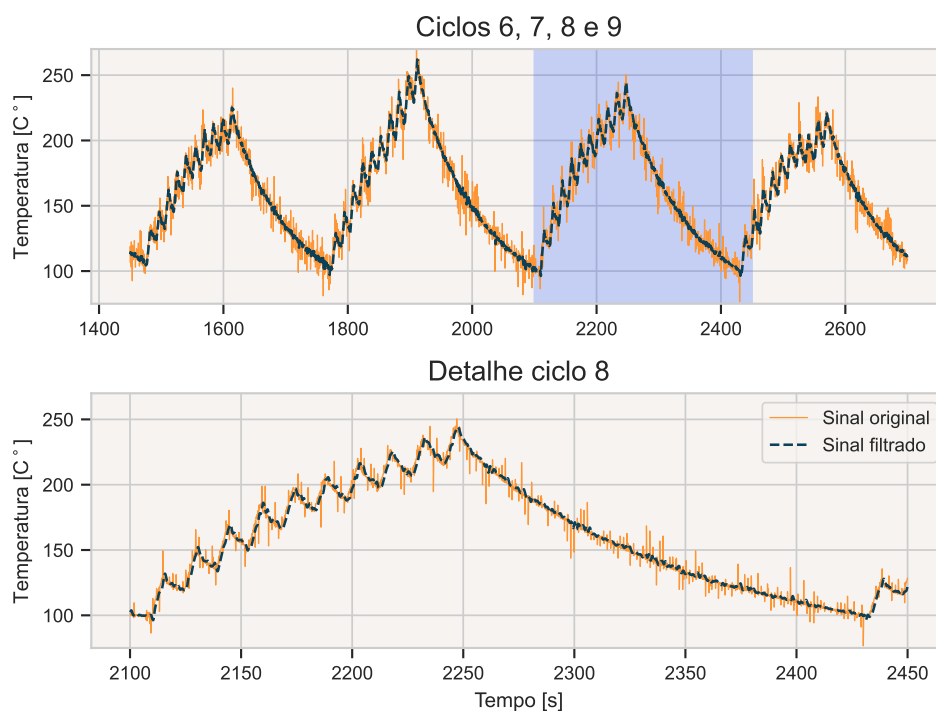
Para validação da bancada de testes foram realizados dois ensaios utilizando o mesmo conjunto de pastilhas, os modelos originais da motocicleta fabricados pela Brembo. Com os resultados dos testes é possível analisar a repetibilidade da metodologia empregada.

Os testes foram iniciados com o sistema frio, em dias distintos. Antes do primeiro ciclo de coleta da pastilha três ciclos de assentamento foram realizados, como descrito na metodologia.

4.1 DADOS DOS ENSAIOS

Durante os testes, a temperatura no disco foi medida e armazenada. Na Figura 25 este dado é apresentado graficamente, de forma original e com aplicação de um filtro passa-baixa digital durante o tratamento do sinal.

Figura 25 – Temperatura do disco durante o teste 1



Fonte: Autor (2023).

Na figura 25 é facilmente perceptível o ciclo de testes, separado em período de frenagem e resfriamento. Nota-se que a faixa de temperatura de operação do teste está entre 100 C°, limitado pelo método, e 250 C°. Estes valores são cruciais, pois, como foi analisado na Figura 10 e fortalecido por Hagen e Ferdinand (2019), a temperatura é

fundamental para a presença, quantidade e dimensão do particulado emitido.

Ambos os testes duraram aproximadamente 55 minutos, provocando volume de 192 litros de ar pela bomba de amostragem e, conseqüentemente, pelo filtro de particulado. O filtro utilizado durante a amostragem do teste 1 está exposto na Figura 26

Figura 26 – Filtro de amostragem do teste 1

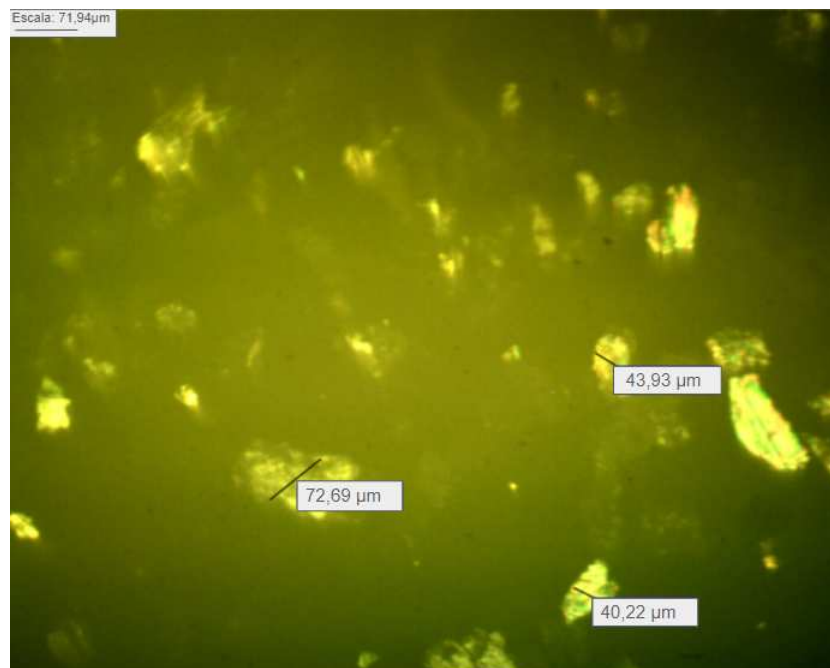


Fonte: Autor (2023).

A massa do filtro antes e depois do teste não foi alterada de forma a ser possível medir em uma balança com precisão de $1 \mu\text{g}$. Já o conjunto de pastilhas, após 29 ciclos de frenagens, perdeu 3,29 gramas, ou 2,21% da massa original. Além disso, a massa do material recolhido no interior da câmara após 29 ciclos é de 1,17 grama. Portanto, 65% da massa original da pastilha foi liberada na forma aerotransportada, valores próximos aos encontrados na literatura, porém, vale ressaltar que o material recolhido no interior da câmara não representa a totalidade dos detritos não aerotransportados devido à dificuldade na extração no interior do duto de saída e em componentes da motocicleta. Além disso, como analisado por Sanders et al. (2003), uma porção significativa, de 10 a 30%, dos detritos de grandes dimensões são gerados pelo desgaste do disco.

Na Figura 27 é apresentada a amostra de particulado retirado do interior da câmara após 29 ciclos. É possível notar que as partículas são de grandes dimensões quando comparadas com as partículas usualmente encontradas no meio aéreo. Esta constatação é válida, pois quanto maior a partículas maior a influencia gravitacional e inercial na sua trajetória, facilitando o assentamento desta no solo ou outra superfície.

Figura 27 – Amostra de particulado retirada da câmara

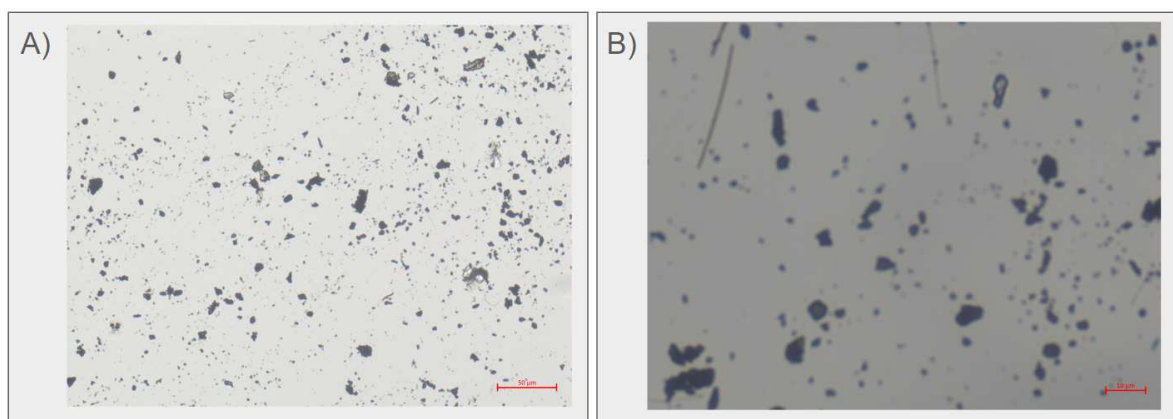


Fonte: Autor (2023).

4.2 MATERIAL PARTICULADO

Após a extração do particulado, as amostras foram observadas no microscópio e foram gerada imagens com ampliações distintas. Estas imagens, da amostra 1, estão na Figura 28 com ampliação de 200 vezes (esquerda "A") e 630 vezes (direita "B").

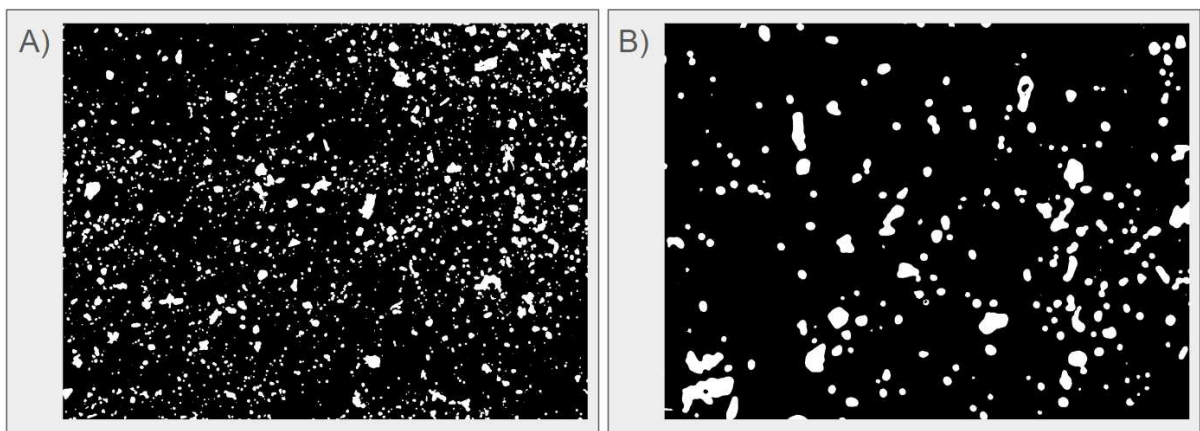
Figura 28 – Imagens geradas por microscópio com ampliação de 200 (A) e 630 (B) vezes da amostra 1



Fonte: Autor (2023).

Nota-se, na Figura 28, o formato relativamente uniforme e com alta circularidade das partículas encontradas, desta forma é possível modelá-las como esferas para posterior cálculo de seus diâmetros utilizando a área projetada da partícula na imagem. Também é possível constatar a presença de fibras, provenientes do filtro, na amostra. Estas fibras, como já citado no capítulo de metodologia, são retiradas no tratamento das imagens e, portanto, desconsideradas na contagem de material particulado, assim como a referência da escada. As imagens processadas, referentes às mesmas imagens da Figura 28 e prontas para contagem de partículas estão expostas na Figura 29.

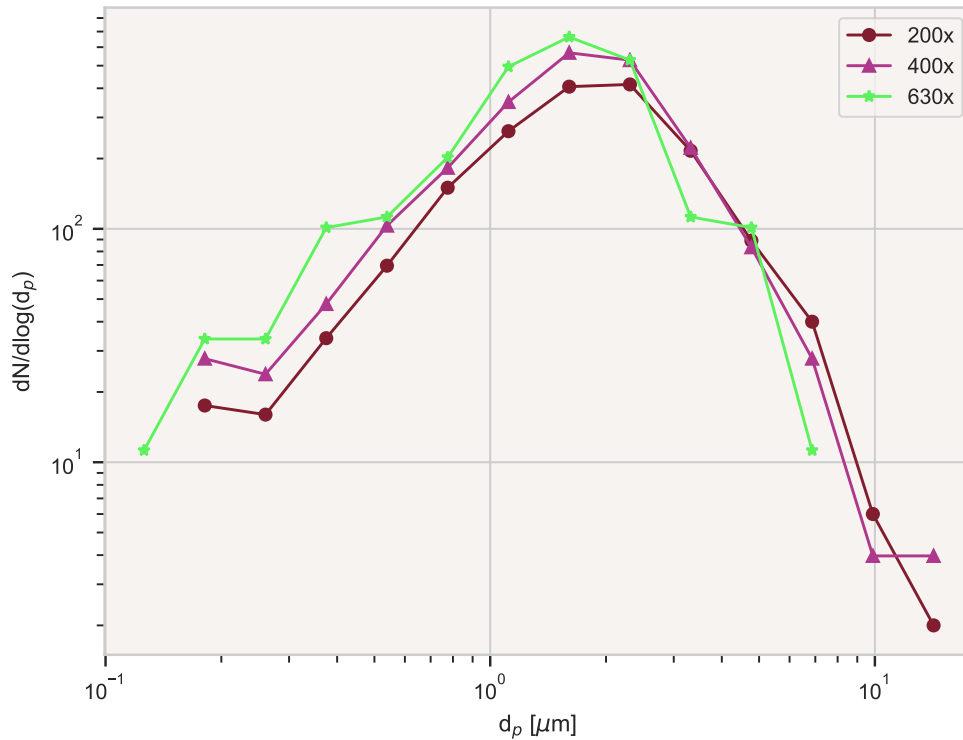
Figura 29 – Imagens tratadas para contagem de particulado da amostra 1



Fonte: Autor (2023).

Após a contagem de partículas, os dados foram separados em distribuição por escala logarítmica partindo de $0,1 \mu m$ até $10 \mu m$. Na Figura 30 apresenta-se a distribuição da amostra 1, distintas de acordo com a ampliação da imagem de origem. Sendo N o número de partículas observadas.

Figura 30 – Distribuição por ampliação da amostra 1



Fonte: Autor (2023).

Nota-se que as curvas são bastante semelhantes em perfil, portanto fica claro que a ampliação utilizada não é um parâmetro altamente variável para a análise da amostra, alterando apenas suavemente a faixa de particulado capaz de ser resolvida, pois, com ampliação de 630 vezes foi possível observar partículas com diâmetro de, aproximadamente, metade do diâmetro das partículas observadas com ampliações menores. Entretanto, em 630 vezes apenas foi possível medir partículas menores que $8 \mu m$, enquanto que com ampliações menores foram detectadas partículas maiores que $10 \mu m$ de diâmetro.

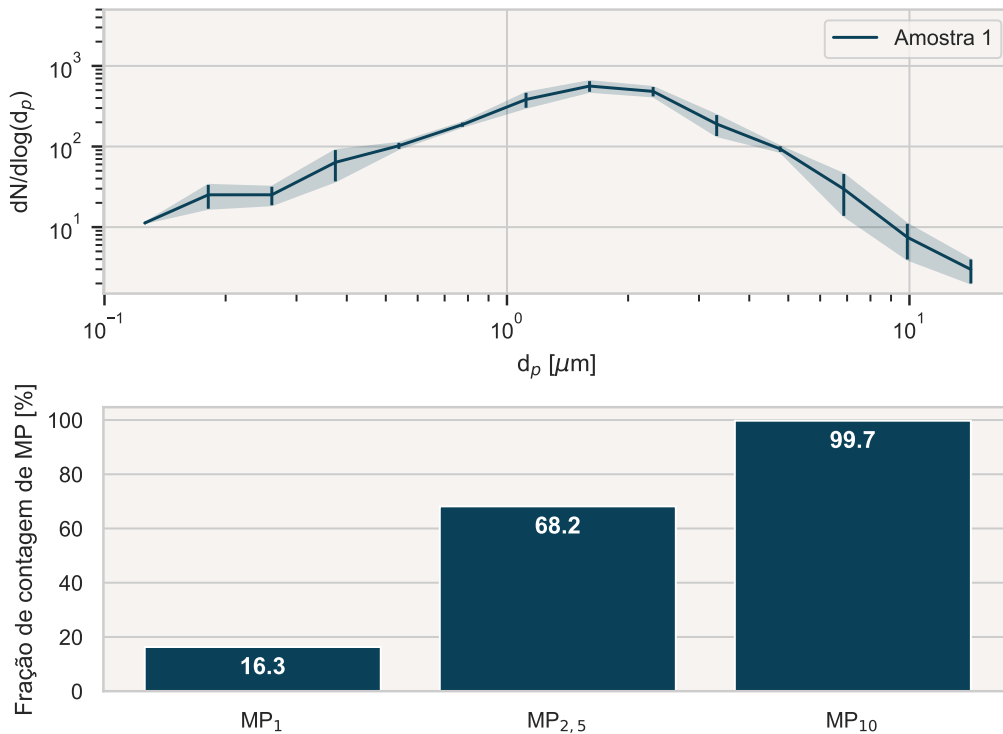
É importante esclarecer que, durante a análise dos dados, a contagem das partículas foi corrigida pela área das imagens multiplicando a distribuição de cada imagem de ampliação 400 e 630 vezes pela razão de áreas de 200 vezes e 400 vezes, e 200 vezes e 630 vezes, respectivamente, em μm^2 . Esta técnica é útil para aproximar o número de contagens de cada ampliação, porém um processo de normalização teria resultado semelhante.

Utilizando ampliações maiores na análise do particulado, gera-se outra dificuldade sendo esta a escassez de partículas nas imagens e, portanto escassez estatística. Nota-se este efeito na instabilidade na curva referentes à esta ampliação

quando comparada com as demais curva, visível na Figura 30.

Utilizando os dados já expostos foi gerada a distribuição média das partículas, mostrada no gráfico superior da Figura 31. Além disso, o desvio padrão das medições foram calculados para cada ponto no eixo das abscissas. O desvio padrão foi representado como a barra de erro.

Figura 31 – Distribuição e porcentagem de MP da amostra 1

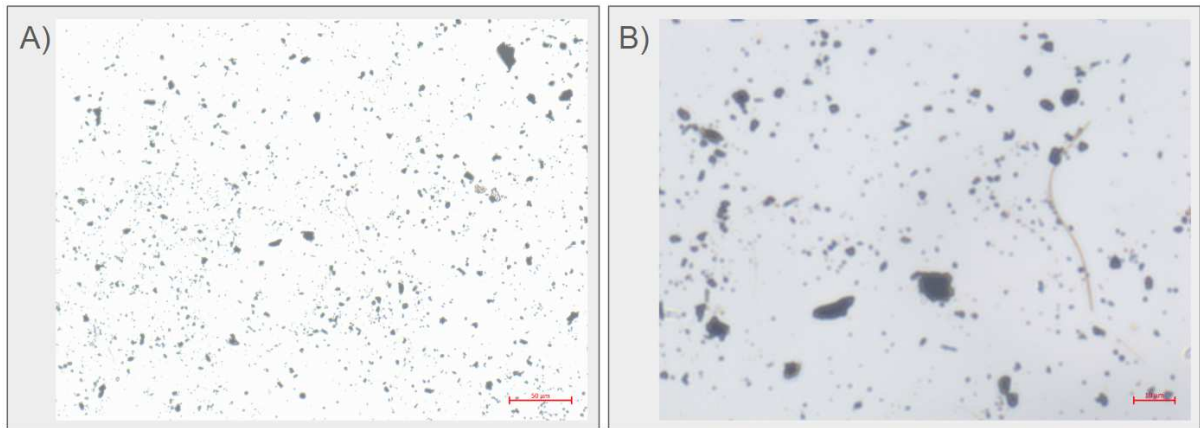


Fonte: Autor (2023).

No gráfico inferior da Figura 31 é exposta a distribuição de particulado em relação às três categorias: MP_{10} , $MP_{2,5}$ e MP_1 . Esta análise é válida para analisar a importância e o peso de cada categoria na emissão da pastilha. Nota-se que 68,2% das partículas medidas são classificadas como $MP_{2,5}$, porção altamente tóxica do espectro de partículas.

A Figura 32 apresenta as imagens da amostra 2 feitas no microscópio, semelhante à Figura 28. Observa-se que as características são correspondentes à amostra 1.

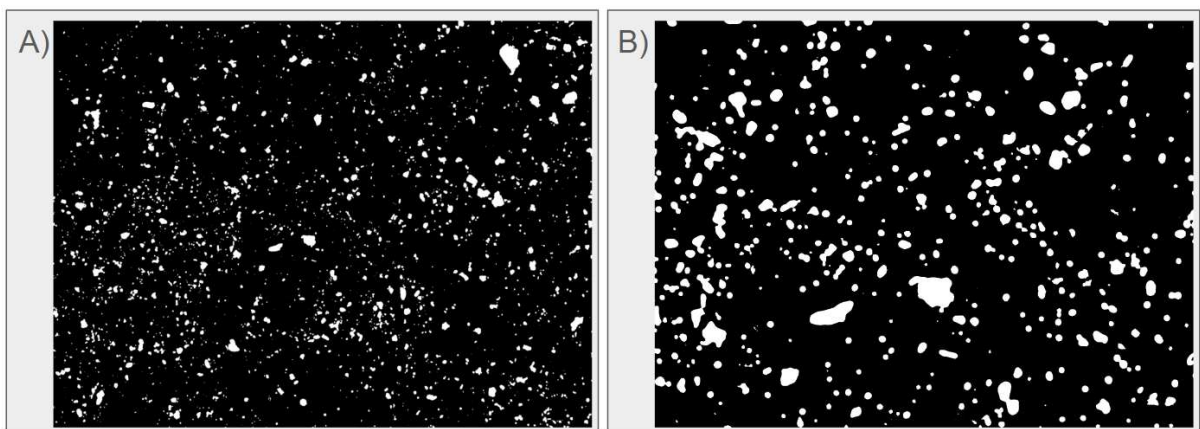
Figura 32 – Imagens geradas por microscópio com ampliação de 200 (A) e 630 (B) vezes da amostra 2



Fonte: Autor (2023).

Na Figura 33 são apresentadas as imagens da amostra 2 tratadas para contagem de partículas, semelhante à Figura 29.

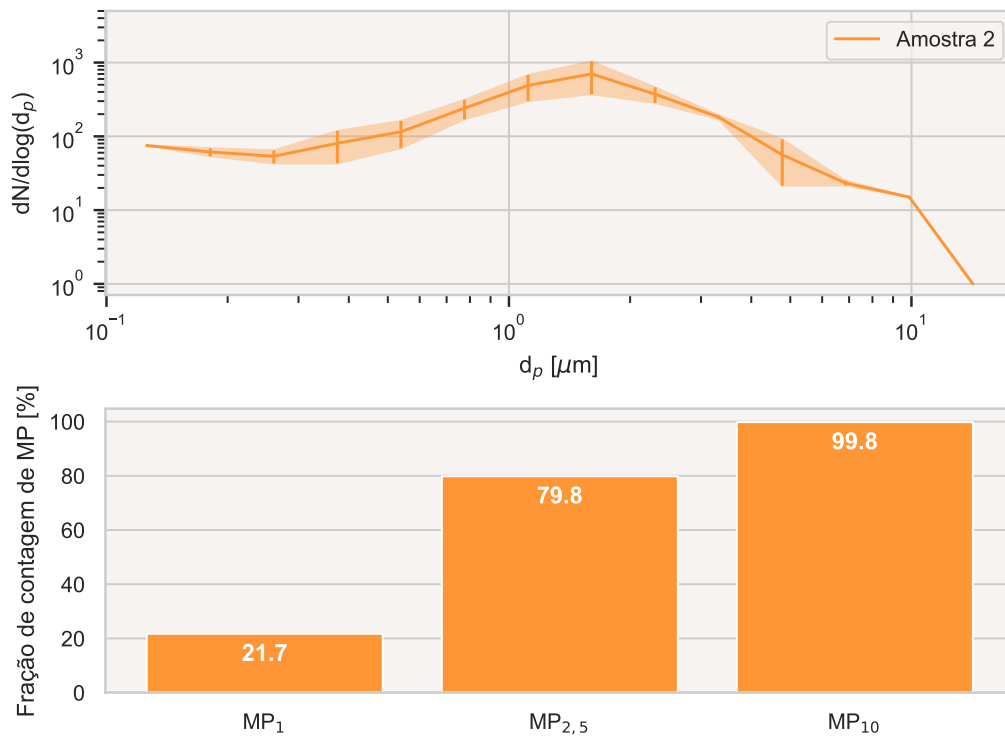
Figura 33 – Imagens tratadas para contagem de particulado da amostra 2



Fonte: Autor (2023).

Após a análise, calcula-se a distribuição média e desvio padrão do particulado da amostra 2. Além disso, é calculada a distribuição entre as categorias de particulado. Estes gráficos estão expostos na Figura 34.

Figura 34 – Distribuição e porcentagem de MP da amostra 2

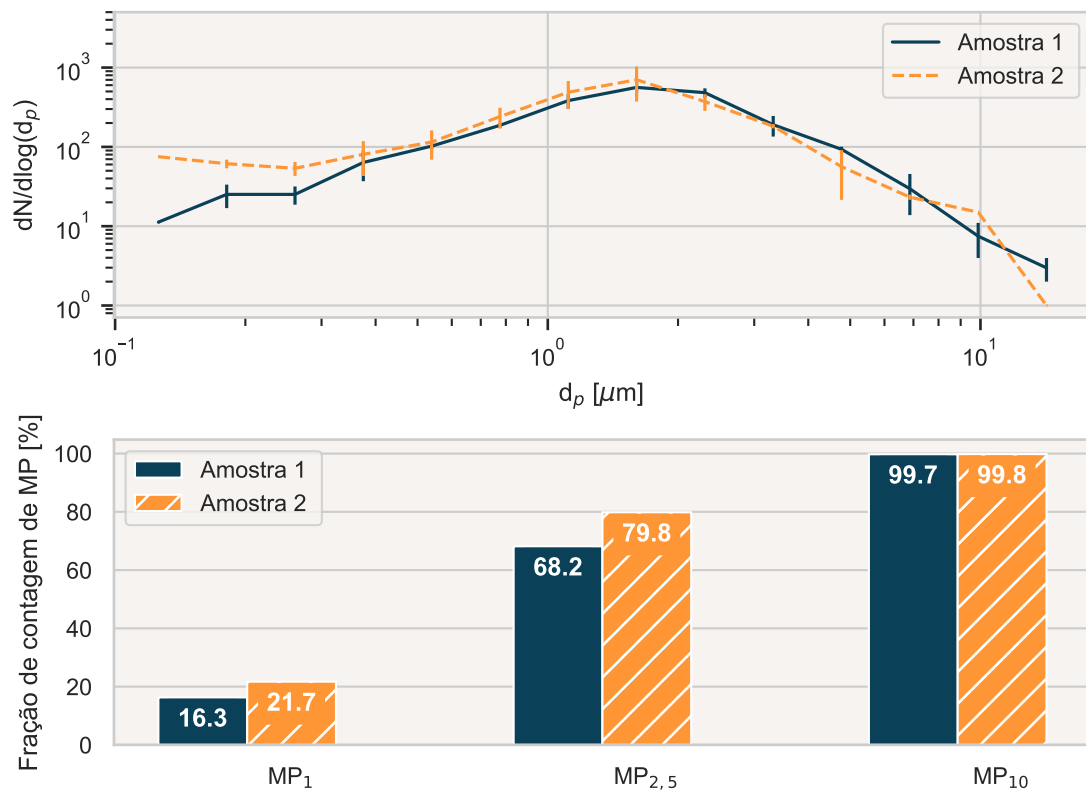


Fonte: Autor (2023).

Fica clara a relação bastante próxima do perfil das curvas em relação à amostra 1, inclusive em magnitude de número de partículas já que, pelo processo em que as amostras foram submetidas e analisadas, não há a necessidade de correlação. Desta forma, a normalização dos dados não é sequer necessária.

Para fazer a correta correlação entre os resultados, sobrepõe-se os dados presentes na Figura 31 e 34 na seguinte Figura 35.

Figura 35 – Distribuição e porcentagem de MP das amostras 1 e 2



Fonte: Autor (2023).

Primeiramente, observa-se a grande correlação entre as amostras, principalmente na faixa central do espectro, onde há mais dados correspondentes. Percebe-se que em ambas as amostras o pico de emissão está entre partículas de 1 a $2 \mu m$. É importante analisar também, que os desvios-padrões se sobrepõem desde $0,4 \mu m$ até próximo de $10 \mu m$. Referente à classificação do material particulado calcula-se uma diferença relativa de 15,5 % para partículas $MP_{2,5}$ e 28,8% para MP_1 .

Já comparando os resultados com dados presentes na bibliografia encontra-se consonância. Utilizando a Figura 11, adaptada de Sanders et al. (2003) nota-se a similaridade de perfil e picos das curvas geradas. É possível constatar ainda, que a pastilha utilizada no presente teste deve possuir formulação próxima da orgânica e de baixo teor metálico, e não de formulação semi-metálica. Analisando também a Figura 12, adaptada de Hagen e Ferdinand (2019), observa-se a correspondência entre os dados (ELPI+), com picos de emissão entre $0,7$ e $2 \mu m$ e quedas nas extremidades, na faixa comparável.

As maiores diferenças observadas em partículas menores que $0,4 \mu m$ de diâmetro podem estar relacionadas à diferenças de pressão de aplicação ou temperatura no diferentes testes. De acordo com Hagen e Ferdinand (2019) e Garg

et al. (2000) a temperatura de operação pode gerar maior impacto na formação de material particulado de menores diâmetros quando comparado com MP_{10} e $MP_{2,5}$.

Vale ressaltar que, considerando o pioneirismo do projeto, a volatilidade também presente nos dados da literatura e a simplicidade e premissa preliminar da bancada, os dados foram considerados coerentes e passíveis de posterior uso para comparação com outros modelos de pastilha.

5 CONCLUSÃO

Analisando a metodologia empregada e os resultados obtidos é possível fazer conclusões a respeito do trabalho e do cumprimento dos seus objetivos, além de idealizar trabalhos futuros referentes.

O objetivo geral foi atendido visto que foi possível desenvolver toda a bancada de ensaios para a obtenção e análise de material particulado emitido por um sistema de freios automotivo. Entre os objetivos complementares o item 1 pode ser sintetizado em dois trabalhos base para o tema (Garg et al. (2000) e Sanders et al. (2003)) e dois trabalhos importantes atuais (Hagen e Ferdinand (2019) e Kendrick (2019)).

O item 2 refere-se ao uso de normas para servir de base para o trabalho. Como ainda não há normas claras e amplamente utilizadas para este padrão de ensaios foram aplicadas normas complementares como a ISO (2017) e a ABNT (1995). A bancada ainda foi capaz de gerar particulado suficiente para a análise, portanto, de acordo com o item 3.

Como descrito na seção 3.1.3 do texto, foi desenvolvido um sistema de coleta de particulado de forma que apenas uma amostra de todo o material produzido é retirado, assim o sistema se torna adaptável a outras bancadas de ensaios com objetivos semelhantes. No item 3.4.1 e 3.4.2 são expostos os métodos utilizados para a extração e análise das amostras. Estes métodos são ainda bastante preliminares e requerem mais estudos, como descrito adiante.

Os objetivos classificados pelos itens 6 e 7 são extremamente importantes para a utilidade posterior da bancada. Como visto na seção de resultados os dados retirados de todo o processo têm grande correspondência entre eles e com dados da bibliografia. Desta forma, esses itens concluído garante a utilização da bancada para futuros trabalhos.

Como descrito anteriormente, este trabalho faz parte de um projeto com participação de diversos integrantes, desta forma, a bancada aqui desenvolvida será de grande utilidade para posteriores trabalhos, tanto fazendo uso da bancada em si quanto aplicando conceitos nela desenvolvidos.

Como importantes avanços, três podem ser considerados críticos para melhorar a relevância e repetibilidade dos resultados: controle de aceleração e frenagem automatizados na motocicleta, melhor desenvolvimento do método de extração e análise do material particulado e capacidade de medir com precisão as massas de material aerotransportado e não aerotransportado.

Concluindo, o método de amostragem aqui desenvolvido pode ser aplicado em outros trabalhos, especialmente na bancada de ensaios dinamométrica de emissão de particulado também referente ao mesmo projeto.

Por fim, este trabalho representa o início singelo da pesquisa e desenvolvimento neste grande projeto para redução da poluição do ar devido à material particulado em suspensão por sistema de freios automotivo.

REFERÊNCIAS

- ANDERSON, J. O.; THUNDIYIL, J. G.; STOLBACH, A. Clearing the air: a review of the effects of particulate matter air pollution on human health. **Journal of medical toxicology**, Springer, Orlando, EUA, v. 8, p. 166–175, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6143**: Pastilha do freio a disco - determinação do atrito e desgaste através da bancada de ensaio krauss. Rio de Janeiro, 1995.
- BEIN, K.; WEXLER, A. A high-efficiency, low-bias method for extracting particulate matter from filter and impactor substrates. **Atmospheric Environment**, Elsevier, Davis, EUA, v. 90, p. 87–95, 2014.
- BEIN, K.; WEXLER, A. Compositional variance in extracted particulate matter using different filter extraction techniques. **Atmospheric Environment**, Elsevier, Davis, EUA, v. 107, p. 24–34, 2015.
- BELYAEV, S.; LEVIN, L. Techniques for collection of representative aerosol samples. **Journal of Aerosol Science**, Elsevier, Oxford, Reino Unido, v. 5, n. 4, p. 325–338, 1974.
- BREMBO. **BREMBO Builds a new plant in Chennai**. 2018. <https://www.brembo.com/en/company/news/brembo-builds-a-new-plant-in-chennai>. Acesso em: 28 out. 2023.
- BREUER, B.; BILL, K. **Brake technology handbook**. Wiesbaden - Alemanha: SAE International, 2008.
- BRITO, G. d. S.; SODRÉ, F.; ALMEIDA, F. O impacto do material particulado na qualidade do ar. **Revista Virtual de Química**, Brasília-DF, v. 10, n. 05, p. 1335–1354, 2018.
- BRUNEKREEF, B.; HOLGATE, S. T. Air pollution and health. **The lancet**, Londres, v. 360, n. 9341, p. 1233–1242, 2002.
- ERIKSSON, M.; BERGMAN, F.; JACOBSON, S. Surface characterisation of brake pads after running under silent and squealing conditions. **Wear**, Amsterdam, v. 232, n. 2, p. 163–167, 1999.
- ERIKSSON, M.; JACOBSON, S. Tribological surfaces of organic brake pads. **Tribology International**, Elsevier, Uppsala, Suécia, v. 33, n. 12, p. 817–827, 2000.
- EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. **Air quality in Europe - 2015 Report**. Luxemburgo: Publications Office of the European Union, 2015.
- FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. **Introdução à mecânica dos fluidos**. São Paulo: Editora LTC, 2014.
- GARG, B. D. et al. Brake wear particulate matter emissions. **Environmental Science & Technology**, ACS Publications, v. 34, n. 21, p. 4463–4469, 2000.
- GRIGORATOS, T.; MARTINI, G. **Non-exhaust traffic related emissions - Brake and tyre wear PM - literature review**. Luxemburgo: Publications Office, 2014.

GRIGORATOS, T.; MARTINI, G. Brake wear particle emissions - a review. **Environmental Science and Pollution Research**, Luxemburgo, v. 22, p. 2491–2504, 2015.

HAGEN, F. zum; FERDINAND, H. **Investigation of Brake Wear Particle Emissions on the Dynamometer and the Vehicle under Real-Driving Simulation**. Tese (Doutorado) — Bergische Universität, Wuppertal, Alemanha, 2019.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 9096:2017**: Stationary source emissions - manual determination of mass concentration of particulate matter. Genebra, Suíça, 2017.

KENDRICK, E. M. **Quantifying the environmental impacts of braking emissions**. Dissertação (Mestrado) — Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2019.

KULKARNI, P.; BARON, P. A.; WILLEKE, K. **Aerosol measurement: principles, techniques, and applications**. Nova jersey, EUA: John Wiley & Sons, 2011.

RODRIGUES, C. G. et al. Projeção da mortalidade e internações hospitalares na rede pública de saúde atribuíveis à poluição atmosférica no estado de são paulo entre 2012 e 2030. **Revista brasileira de estudos de população**, SciELO Brasil, Rio de Janeiro-RJ, v. 32, p. 489–509, 2015.

SANDERS, P. G. et al. Airborne brake wear debris: size distributions, composition, and a comparison of dynamometer and vehicle tests. **Environmental science & technology**, ACS Publications, v. 37, n. 18, p. 4060–4069, 2003.

TU, J. et al. **Computational fluid dynamics: a practical approach**. Oxford, Inglaterra: Elsevier, 2008.

UMWELT BUNDESAMT. **Feinstaub-Belastung**. Dessau-Roßlau - Alemanha, 2019. Disponível em: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/luft/feinstaub-belastung#textpart-1>. Acesso em: 18 jun. 2023.

YAMANO, N.; BROCKMANN, J. E. **Aerosol Sampling and Transport Efficiency Calculation (ASTEC) and Application to Surtsey/DCH Aerosol Sampling System**. Washington, EUA, 1989.