



Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais  
Instituto Federal da Bahia

**INSTITUTO FEDERAL DA BAHIA  
CAMPUS SALVADOR  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**RAISSA COSTA FARIAS**

**ESTUDO PARA DETERMINAÇÃO DA PERIODICIDADE DE LIMPEZA DOS  
FILTROS DE MANGAS NA ETAPA DE PROCESSAMENTO DO CARBONETO DE  
SILÍCIO**

SALVADOR

2024

**RAISSA COSTA FARIAS**

**ESTUDO PARA DETERMINAÇÃO DA PERIODICIDADE DE LIMPEZA DOS  
FILTROS DE MANGAS NA ETAPA DE PROCESSAMENTO DO CARBONETO DE  
SILÍCIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais, ofertado pelo campus Salvador do Instituto Federal da Bahia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Estevam Coelho

Salvador

2024

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELO SISTEMA DE BIBLIOTECAS DO IFBA, COM OS  
DADOS FORNECIDOS PELO(A) AUTOR(A)

F224 Farias, Raissa Costa

Estudo para determinação da periodicidade de limpeza dos filtros de mangas na etapa de processamento do carboneto de silício / raissa costa farias; orientador prof. Dr. Rodrigo Estevam Coelho -- Salvador : IFBA, 2024.

83 p.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) -  
- Instituto Federal da Bahia, 2024.

1. Material particulado. 2. Resíduo de filtro. 3. Carboneto de silício. 4. Filtro de manga. 5. Distribuição granulométrica. 6. Microscópio eletrônico de varredura. I. Coelho, Prof. Dr. Rodrigo Estevam, orient. II. TÍTULO.

CDU 620

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA DE MATERIAIS**

---

**RAISSA COSTA FARIAS**

**ESTUDO PARA DETERMINAÇÃO DA PERIODICIDADE DE LIMPEZA DOS  
FILTROS DE MANGAS NA ETAPA DE PROCESSAMENTO DO CARBONETO DE  
SILÍCIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais, ofertado pelo Instituto Federal da Bahia, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Aprovado \_\_\_\_\_

**COMISSÃO EXAMINADORA**

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Rodrigo Estevam Coelho  
Instituto Federal da Bahia  
Orientador

\_\_\_\_\_  
Prof<sup>a</sup>. Dra. Tharsia Cristiany de Carvalho Costa  
Instituto Federal da Bahia

\_\_\_\_\_  
Dra. Thatiana Cristina Pereira de Macedo  
SENAI CIMATEC

Dedico aos meus pais, meu marido e meu filho

Ninguém ignora tudo. Ninguém sabe tudo. Todos nós sabemos alguma coisa.

Todos nós ignoramos alguma coisa...Por isso, aprendemos sempre

(Paulo Freire, 1989)

## **AGRADECIMENTOS**

- A Deus por sempre iluminar e abençoar a minha vida;
- Aos meus pais, Cláudio João e Silvia Costa, pela dedicação e abdicção de tantas coisas em prol dos meus estudos. Se não fosse os esforços de ambos em proporcionar uma base sólida na minha educação desde a infância com certeza não teria chegado até essa etapa da minha formação;
- Ao meu marido Lucimero Farias, meu alicerce;
- Ao meu filho Luigi Farias a minha fonte de força e inspiração;
- Aos meus familiares pelos conselhos e pelo apoio;
- Ao professor Dr. Rodrigo Coelho, pela orientação, paciência, aprendizado e por ter acreditado nesse trabalho;
- As professoras membros da banca examinadora, Dra.Tharsia Costa e Dra.Thatiana Macedo por terem aceitado o convite de participar da banca e pela disponibilidade;
- Aos professores Dr. Luiz Pimentel e Dra. Luciene Carvalho pelos esclarecimentos durante a elaboração do trabalho;
- A todos os professores do PPGEM pelos ensinamentos;
- Aos técnicos Carina Soares e Helder Cerqueira pelo auxílio no desenvolvimento dos experimentos em laboratório;
- Aos meus colegas da SiCBRAS pelo auxílio no desenvolvimento dos experimentos em laboratório;
- Ao Gerente da SiCBRAS ,Walace Ribeiro, pelo apoio;
- Aos meus colegas do PPGEM pela troca de conhecimento;
- Ao IFBA pelo oferecimento do curso e a todos os seus colaboradores que ajudam a manter um ensino de qualidade;
- A todos que de alguma forma contribuíram para a realização desse trabalho.

## RESUMO

Este trabalho teve como objetivo determinar a periodicidade de limpeza dos filtros de mangas utilizados na etapa de processamento do carboneto de silício (SiC). Os procedimentos foram delineados por meio das seguintes análises: granulométrica, densidade solta, química (titulações, perda por tratamento com ácido e combustão seca para determinar o teor de SiC e impurezas como  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{C}_{\text{livre}}$ , Si e  $\text{SiO}_2$ ) e utilizando microscópio eletrônico de varredura. Os resultados mostraram que existe uma relação direta entre o tamanho das partículas e a densidade solta do pó de SiC coletado na moega do filtro com o acúmulo de material retido nele, sendo possível então estabelecer uma sistemática para realização da limpeza dos filtros. Ou seja, o indicativo para a realização da limpeza é a presença de material capturado na moega mais fino e menos denso. Em relação aos outros ensaios realizados, observou-se: a predominância de partículas menores que 20  $\mu\text{m}$  nas imagens obtidas no MEV; o percentual de SiC,  $\text{Si}_{\text{livre}}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  não apresentaram uma relação entre o tamanho das partículas e as diferentes etapas da sopragem e o  $\text{SiO}_2$  e o  $\text{C}_{\text{livre}}$  diminuíram no momento da sopragem. Indústrias que emitem material particulado em seu processo de fabricação precisam respeitar o limite máximo de emissão sob a pena de perder a licença ambiental, logo a boa funcionalidade dos filtros de mangas através de uma programação de manutenção e limpeza é umas das medidas essenciais para o cumprimento das exigências estabelecidas pelo órgão ambiental.

**Palavras-Chave:** Material particulado; resíduo de filtro; Carboneto de silício; Filtro de manga; Distribuição granulométrica; microscópio eletrônico de varredura.



## ABSTRACT

The objective of this study is to determine the cleaning frequency of bag filters used in the silicon carbide (SiC) processing stage. The procedures were outlined through the following analyses: particle size, loose density, chemistry (titrations, loss by acid treatment and dry combustion to determine the SiC content and impurities such as  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{C}_{\text{free}}$ , Si and  $\text{SiO}_2$ ) and scanning electron microscopy (SEM). The results demonstrated that there is a direct relationship between the particle size and the loose density of the SiC powder collected in the filter hopper and the accumulation of material retained therein, thus making it possible to establish a system for cleaning the filters. In other words, the indication for cleaning is the presence of material captured in the finer and less dense hopper. Regarding the other tests performed, the following were observed: the predominance of particles smaller than 20  $\mu\text{m}$  in the images obtained in the SEM; the percentage of SiC,  $\text{Si}_{\text{free}}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  did not reach a relationship between the particle size and the different stages of blowing, and  $\text{SiO}_2$  and  $\text{C}_{\text{free}}$  decreased at the time of blowing. Industries that emit particulate matter in their manufacturing process must comply with the maximum emission limit under penalty of losing their environmental license, therefore the good functionality of bag filters through a maintenance and cleaning schedule is one of the essential measures to comply with the requirements of the environmental agency.

Keywords: Particulate matter; filter residue; Silicon carbide; Bag filter; Particle size distribution; Scanning electron microscope.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Poluentes atmosféricos e suas fontes conforme dados do ano de 2015 .....	18
Figura 2- Classificação por tamanho e composição do material particulado atmosférico em relação à sua fonte .....	19
Figura 3- Emissões de PM <sub>2,5</sub> por região e setor, 2015.....	20
Figura 4- Evolução temporal da síntese de exposição (SEV) por material particulado fino (MP <sub>2,5</sub> ) no Brasil e grandes regiões, 1990-2016.....	21
Figura 5- Estações de monitoramento de poluentes por unidade de federação .....	23
Figura 6- Taxa de mortalidade atribuível à poluição do ar ambiente (por 100.000 habitantes).....	24
Figura 7- Desenho esquemático do filtro de manga .....	25
Figura 8- Representação da classificação dos equipamentos de controle de material particulado .....	26
Figura 9- Localização dos filtros A e B.....	34
Figura 10- Equipamentos/materiais utilizados neste trabalho: a-Embutidora; b-peça obtida após embutimento; c- Lixadeira metalográfica manual; d- Lixadeira e politriz.....	37
Figura 11- Dispositivo utilizado no ensaio de densidade solta .....	39
Figura 12- Aparelho para determinação de silício.....	41
Figura 13- Microscópio eletrônico de varredura.....	44
Figura 14- Classificação granulométrica: percentual de retido acumulado no filtro A .....	46
Figura 15- Classificação granulométrica: percentual de retido acumulado no filtro B .....	47
Figura 16- Distribuição de frequência do tamanho das partículas do filtro A ..	48
Figura 17- Distribuição de frequência do tamanho das partículas do filtro B ..	49
Figura 18- Relação da densidade do pó de filtro com o tamanho da partícula d <sub>90</sub> nos filtros A e B.....	50
Figura 19- Distribuição do tamanho de partículas no filtro A. a- antes do	

processo de sopragem; b- no momento do processo de amostragem. c- após 60 dias do processo de sopragem .....	51
Figura 20- Distribuição do tamanho de partículas no filtro B. a- antes do processo de sopragem; b- no momento do processo de amostragem. c- após 60 dias do processo de sopragem .....	53
Figura 21- Composição química das partículas coletadas do filtro A.....	54
Figura 22- Composição química do filtro B .....	55
Figura 23- Imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura (elétrons retroespalhados ) do pó de filtro A antes do processo de sopragem .....	57
Figura 24- Imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura ( elétrons retroespalhados ) do pó de filtro A durante o processo de sopragem .....	57
Figura 25- Imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura (elétrons retroespalhados ) do pó de filtro A após o processo de sopragem .....	58
Figura 26- Imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura (elétrons retroespalhados ) do pó de filtro B antes do processo de sopragem .....	58
Figura 27- Imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura (elétrons retroespalhados ) do pó de filtro B durante o processo de sopragem .....	59
Figura 28- Imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura (elétrons retroespalhados ) do pó de filtro B após o processo de sopragem .....	59
Figura 29- Determinação de tamanho de partícula através do microscópio eletrônico de varredura do pó de filtro A antes da sopragem com magnitude 2.000 .	61
Figura 30- Determinação de tamanho de partícula através do microscópio eletrônico de varredura do pó de filtro A antes da sopragem com magnitude 1.000 .	62
Figura 31- Determinação de tamanho de partícula através do microscópio eletrônico de varredura do pó de filtro A durante a sopragem com magnitude 2.000	63
Figura 32- Determinação de tamanho de partícula através do microscópio eletrônico de varredura do pó de filtro A durante a sopragem com magnitude 100...	64
Figura 33- Determinação de tamanho de partícula através do microscópio eletrônico de varredura do pó de filtro A após a sopragem com magnitude 2.000 ....	65
Figura 34- Determinação de tamanho de partícula através do microscópio eletrônico de varredura do pó de filtro A após a sopragem com magnitude 1.000 ....	66
Figura 35- Determinação de tamanho de partícula através do microscópio eletrônico de varredura do pó de filtro B antes do processo de sopragem com	

magnitude 1.000.....	67
Figura 36- Determinação de tamanho de partícula através do microscópio eletrônico de varredura do pó de filtro B antes do processo de sopragem com magnitude 150.....	68
Figura 37- Determinação de tamanho de partícula através do microscópio eletrônico de varredura do pó de filtro B durante o processo de sopragem com magnitude 200.....	69
Figura 38- Determinação de tamanho de partícula através do microscópio eletrônico de varredura do pó de filtro B durante o processo de sopragem com magnitude 1.000.....	70
Figura 39-Determinação de tamanho de partícula através do microscópio eletrônico de varredura do pó de filtro B após o processo de sopragem com magnitude 200 .....	71
Figura 40- Determinação de tamanho de partícula através do microscópio eletrônico de varredura do pó de filtro B após o processo de sopragem com magnitude 2.000 .....	72

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1- Principais componentes de um filtro de manga .....	27
Quadro 2 - Aplicações de carboneto de silício.....	30
Quadro 3- Diferenças entre o método de determinação granulométrica por via seca e o método por via mista.....	32
Quadro 4- Relação dos materiais utilizados neste trabalho.....	35
Quadro 5– Descrição dos componentes do ensaio de densidade solta .....	40

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

CETESB: Companhia Ambiental de São Paulo

CONAMA: Conselho Nacional do Meio Ambiente

CO: monóxido de carbono

COV: compostos orgânicos voláteis

DALY: perda equivalente a um ano de saúde total

DNT: doenças não transmissíveis

EDTA: ácido etilendiamino tetra-acético

H<sub>2</sub>O: água

HF: ácido fluorídrico

IFBA: Instituto Federal da Bahia

KF: fluoreto de potássio

K<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub>: flúor silicato de potássio

MEV: microscópio eletrônico de varredura

MP: material particulado

MP<sub>2,5</sub>: material particulado que possui diâmetro aerodinâmico de 2,5µm

NaOH: hidróxido de sódio

NaF: fluoreto de sódio

NH<sub>3</sub>: amônia

Nox: óxidos de nitrogênio

OMS: Organização Mundial da Saúde

O<sub>3</sub>: ozônio troposférico

PPGEM: Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais

PTS: partículas totais em suspensão

SEV: síntese de exposição por material particulado fino

SiC: carboneto de silício

SiO<sub>2</sub>: dióxido de silício

SOx: óxidos de enxofre

# Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	15
2.OBJETIVOS.....	17
2.1 Objetivo geral .....	17
2.2 Objetivos específicos .....	17
3. REFERENCIAL TEÓRICO.....	18
3.1 Poluição atmosférica .....	18
3.2 Filtro de manga .....	24
3.3 Carboneto de silício.....	29
3.4 ABNT NBR ISO 9286:2014 .....	31
3.5 ABNT 6946.....	32
4. METODOLOGIA .....	33
4.1 Preparação de amostra metalográfica .....	36
4.2 Análise granulométrica .....	38
4.3 Análise de densidade solta.....	39
4.4 Análise química do carboneto de silício .....	41
4.5 Microscopia eletrônica de varredura .....	43
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	45
6. CONCLUSÕES.....	73
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	75
REFERÊNCIAS .....	76

## 1. INTRODUÇÃO

Na produção de carboneto de silício, uma mistura de material de carbono (geralmente coque de petróleo) e sílica ou areia de quartzo é quimicamente reagida em altas temperaturas em um forno eletricamente resistivo para formar SiC. O material bruto resultante é posteriormente processado por britagem e moagem para obter o formato e o tamanho corretos dos grãos de SiC (FIVEN, 2024).

O uso de equipamentos de britagem em plantas de processamento de minerais pode potencialmente gerar grandes quantidades de poeira. Soluções para esse problema incluem a modernização de coberturas, invólucros, sistemas de ventilação de exaustão local e sistemas de supressão de água. A aplicação única ou combinada desses sistemas deve ser otimizada para garantir que operem de forma eficiente. (SILVESTER et. al, 2007).

O controle da poluição do ar requer intervenção da ciência, lei e política. A intervenção do conhecimento da ciência é necessária para controlar a poluição do ar na fonte de poluição, como indústria, automóvel, mineração e agricultura. As intervenções políticas precisam ser impostas por lei para disciplinar alguns poluidores para o benefício de muitos que estão expostos à poluição (CHANDRAPPA; DAS, 2021).

Interesses recentes nos riscos para a saúde do MP<sub>2.5</sub> (material particulado) levaram a vários estudos relevantes sobre gestão da qualidade do ar e controle em muitos países. O meio de coleta mais utilizado para remover partículas finas no campo industrial é um filtro de manga composto por muitos sacos de filtro cilíndricos (PARK, et. al., 2012).

Os filtros de mangas têm atraído considerável atenção dos setores industrial e acadêmico, devido à sua fácil instalação, manutenção, capacidade de remover partículas finas (<2,5 µm) e processar grandes fluxos de gás. Durante a etapa de despoejamento, o carregamento de partículas nos filtros envolve três estágios, ou seja, os estágios de filtração de profundidade, transição e superfície. Durante a filtração de profundidade e transição, a captura de partículas ocorre dentro do material do filtro. Com a progressão da filtração, um bolo de poeira se forma na superfície do filtro e atua como um meio filtrante em si, daí o terceiro estágio, “filtração de superfície”. A queda de pressão através do filtro, um indicador importante do desempenho dos materiais, continua aumentando à medida que as partículas são



capturadas na profundidade dos tecidos durante a filtração de profundidade e transição. Portanto, a limpeza reversa periódica é necessária para regenerar o material do filtro (ZHANG BING, et. al 2023).

O funcionamento do filtro de manga consiste na entrada de ar contaminado através dos compartimentos das mangas onde o particulado fica retido nas mangas e depois é removido para um recipiente ou embalagem de coleta e o ar limpo é liberado para o ambiente. O material particulado que fica retido no meio filtrante, com o tempo forma um depósito de partículas denominado torta de poeira. Essa torta deve ser desalojada frequentemente por meio de limpeza da bolsa de filtro para uma operação estável e eficiente do filtro (LACERDA, 2022). Além disso essa torta de poeira é responsável por aumentar a queda de pressão no filtro (SALEEM et. al, 2011).

Em virtude da importância de garantir a eficácia do bom funcionamento de um filtro de manga e dos métodos existentes que exigem um considerável investimento para identificação da saturação desse tipo de filtro de manga, este trabalho teve como objetivo geral estudar a implantação de um método simples e de baixo custo para determinar a periodicidade de limpeza dos filtros de mangas na etapa de processamento do carboneto de silício através de algumas técnicas de caracterização do pó de filtro. A caracterização do pó de filtro de carboneto de silício antes e após a limpeza das mangas por meio da análise em microscópio eletrônico de varredura, determinação granulométrica (ABNT 6.946) , ensaio de densidade solta (ABNT 9.136) e análise química do carboneto de silício e suas impurezas (ABNT 9.286).

## **2.OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Estudar a implantação de um método para determinar a periodicidade de limpeza dos filtros de mangas na etapa de processamento do carboneto de silício avaliando por meio de caracterizações físicas e químicas, os particulados coletados ao longo do tempo nos referidos filtros.

### **2.2 Objetivos específicos**

Os objetivos específicos deste trabalho foram:

- Realizar a caracterização do pó de filtro de carboneto de silício antes e após a limpeza das mangas do filtro por meio da análise em microscópio eletrônico de varredura, determinação granulométrica, ensaio de densidade solta e análise química;
- Medir o tamanho de algumas partículas do pó de filtro por meio de microscópio eletrônico de varredura;
- Analisar a presença de regiões mais claras referentes a presença de contaminantes do carboneto de silício pela difração de elétrons retroespalhados;
- Realizar a determinação granulométrica do pó de filtro de carboneto de silício coletado de um filtro de manga conforme ABNT 6946;
- Fazer a análise química do carboneto de silício conforme ABNT NBR ISO 9286:2014;
- Determinar a densidade solta do pó de filtro conforme ABNT NBR ISO 9136.

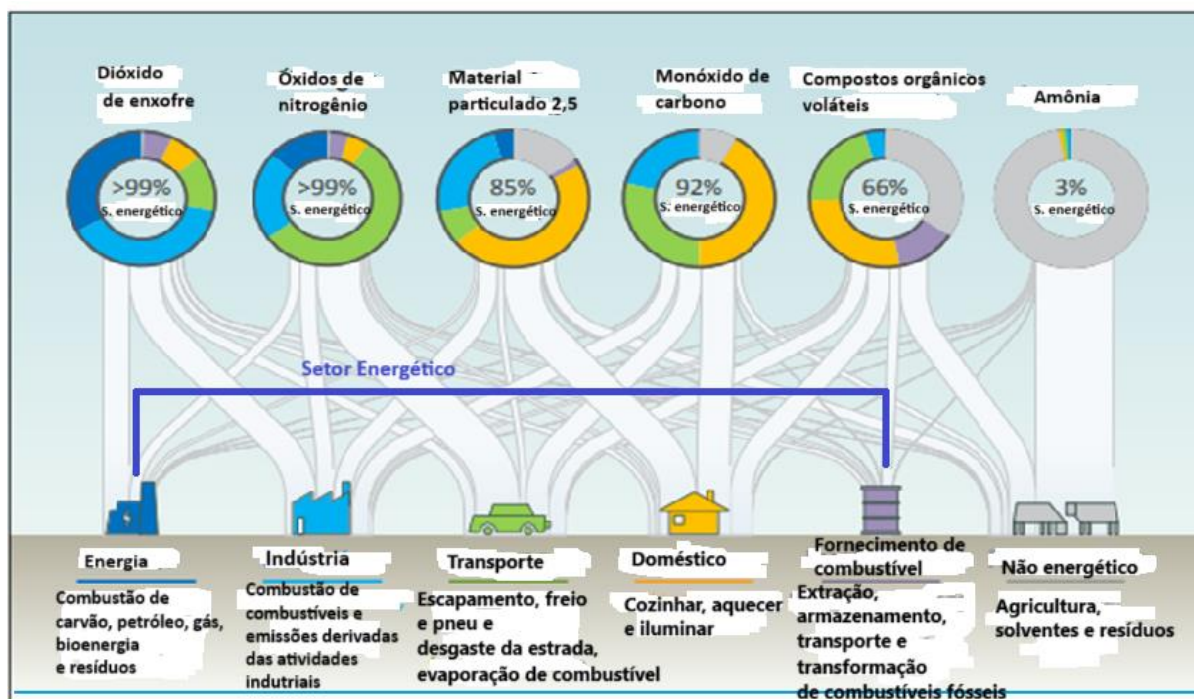
### 3. REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 Poluição atmosférica

A poluição do ar é o efeito causado por concentrações de sólidos, líquidos ou gases no ar que têm um impacto negativo no meio ambiente e na saúde e bem-estar das pessoas. Muitos desses poluentes que podem ocorrer naturalmente (de poeira, incêndios florestais e vulcões) ou resultar da atividade humana, ser visíveis ou invisíveis, emitir odor ou ser inodoros. Os poluentes da atividade humana incluem: óxidos de enxofre (SO<sub>x</sub>), óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), material particulado (MP), monóxido de carbono (CO), compostos orgânicos voláteis (COVs), amônia (NH<sub>3</sub>) e ozônio troposférico (O<sub>3</sub>) (International Energy Agency, 2016).

Na Figura 1 observa-se que o setor energético é um dos principais responsáveis pela maior parte da poluição de poluentes como dióxido de enxofre, óxidos nitrogenados, material particulado e monóxido de carbono. A indústria também apresenta uma contribuição significativa na emissões dos poluentes citados anteriormente.

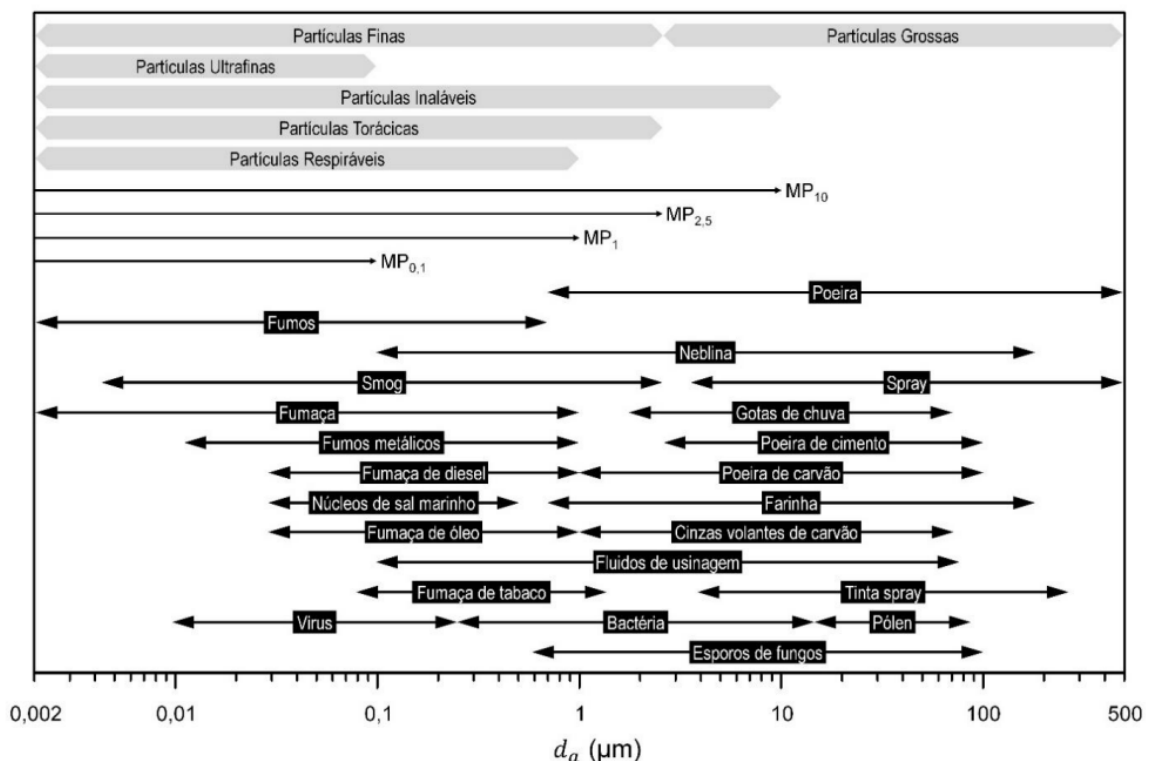
Figura 1- Poluentes atmosféricos e suas fontes conforme dados do ano de 2015



Fonte: Adaptado de International Energy Agency, 2016

Material Particulado (MP), segundo a CETESB (2023), é um conjunto de poluentes constituídos de poeiras, fumaças e todo tipo de material sólido e líquido que se mantém suspenso na atmosfera por causa de seu pequeno tamanho, sendo suas principais fontes de emissão para a atmosfera os veículos automotores, processos industriais, queima de biomassa, ressuspensão de poeira do solo, entre outros. O material particulado está dividido em três classificações de acordo com o diâmetro aerodinâmico médio das partículas. Conforme mostra a Figura 2, tem-se as seguintes classificações: partículas inaláveis grossas ( $MP_{2,5-10}$ ) que possuem o diâmetro aerodinâmico médio no intervalo de 2,5 a 10  $\mu\text{m}$ , as partículas finas ou respiráveis ( $MP_{2,5}$ ) que tem os diâmetros compreendidos no intervalo de 0,25 a 2,5  $\mu\text{m}$  e as partículas ultrafinas ( $MP_{0,25}$ ) que possuem diâmetro médio menor que 0,25  $\mu\text{m}$  (KRUDYSZ *et al.*, 2009).

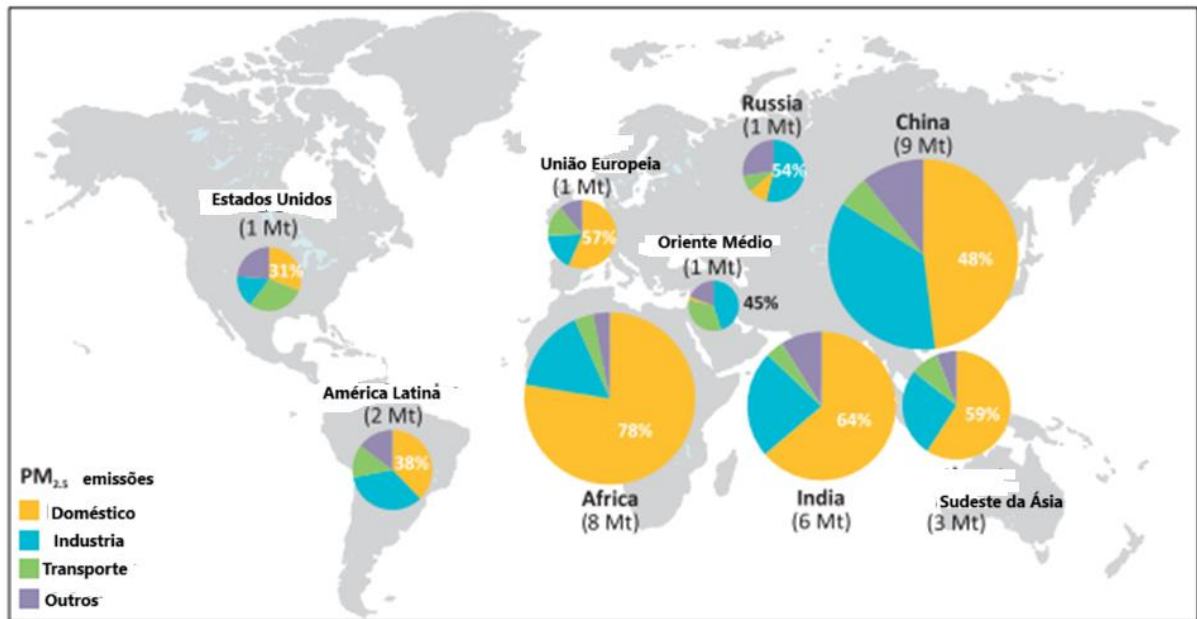
Figura 2- Classificação por tamanho e composição do material particulado atmosférico em relação à sua fonte



A emissão de material particulado  $MP_{2,5}$  proveniente do setor residencial predomina na maioria dos países em relação a outros setores como indústria e transporte, além de estar concentrada nos países em desenvolvimento conforme

mostra a Figura 3.

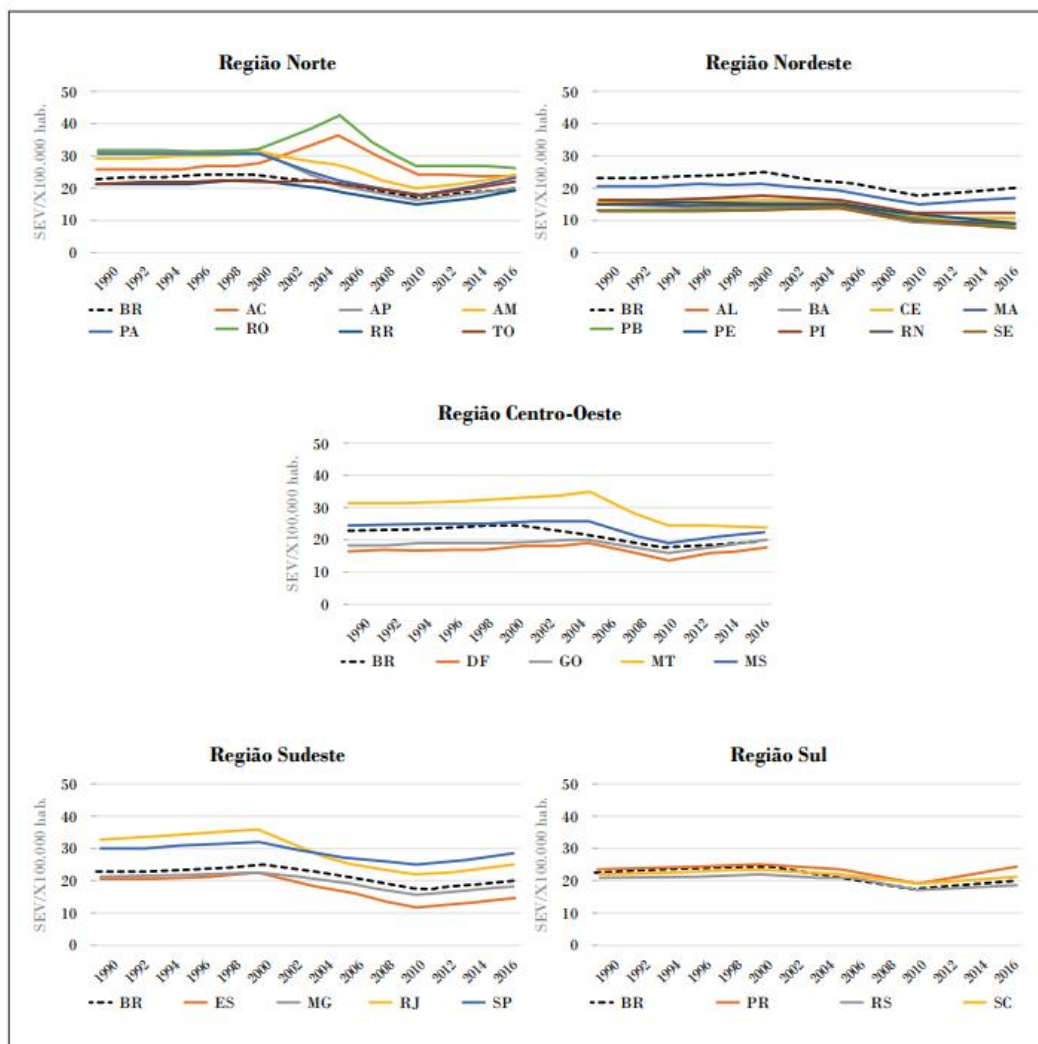
Figura 3- Emissões de  $PM_{2,5}$  por região e setor, 2015



Fonte: Adaptado de International Energy Agency, 2016

Segundo o ESTUDO SAÚDE BRASIL (2018), elaborado pelo ministério da Saúde, as mortes devido à poluição atmosférica aumentaram de 38.782 em 2006 para 44.228 em 2016 no Brasil. Esse estudo mostrou que a exposição da população ao material particulado fino ( $MP_{2,5}$ ) no período de 1990 a 2006 no Brasil, foi representada por um fator denominado síntese de exposição por material particulado fino (SEV) e observa-se na Figura 4 que o nordeste foi a única região onde todos os estados apresentaram valores SEV inferiores ao valor médio do Brasil.

Figura 4- Evolução temporal da síntese de exposição (SEV) por material particulado fino (MP2,5) no Brasil e grandes regiões, 1990-2016



Fonte: Saúde Brasil, 2018

Um estudo que analisou dados entre 1990 e 2015 determinou que a exposição de longo prazo ao  $MP_{2,5}$  causou cerca de 4,2 milhões de mortes e 103,1 milhões de anos de vida ajustados por incapacidade (DALYs, 2015). O material particulado ambiental (MP) ficou em quinto lugar entre os principais riscos de mortalidade naquele ano. A Organização Mundial da Saúde define um DALY como a perda do equivalente a um ano de saúde total. Quanto menores as partículas, mais tóxicas elas podem ser para a saúde humana, porque a relação superfície-volume é inversamente proporcional ao seu tamanho. Conseqüentemente, para uma determinada dose, a superfície de partículas menores representa potencialmente uma

interface muito mais extensa para transmitir produtos químicos tóxicos do que no caso de partículas maiores. Independentemente do tamanho das partículas, a exposição ao MP pode produzir diversas doenças, incluindo morbidade e morte cardiovascular e respiratória (MARVAL, TRONVILLE, 2022).

Os aspectos legais e institucionais são ferramentas imprescindíveis à implantação e ao bom andamento dos programas de controle da poluição do ar. No âmbito federal temos como exemplo de dispositivos legais que abordam sobre poluição atmosférica: Portaria Minter nº 235, de 27/4/1976, que estabelece os Padrões de Qualidade do Ar; Resolução Conama nº 18, de 6/5/1986, que instituiu o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (Proconve); Resolução Conama nº 03, de 28/6/1990, que ampliou os poluentes atmosféricos indicadores da qualidade do ar, passíveis de monitoramento e controle; a Resolução nº 08, de 6/12/1990, que fixou limites máximos de emissão de poluentes do ar para Processos de Combustão Externa em novas fontes fixas (caldeiras, geradores de vapor, fornos, fornalhas, incineradores etc.); Portaria Ibama nº 85, de 17/10/1996, que estabeleceu a criação e adoção de um Programa Interno de Autofiscalização da Correta Manutenção da Frota quanto à Emissão de Fumaça Preta; Resolução Conama nº 297/2002, que instituiu o Programa de Controle da Poluição do Ar por Motociclos e Veículos Similares (Promot) e a Resolução Conama nº 382, de 26/12/2006, que estabeleceu limites máximos de emissões para a atmosfera para as novas fontes fixas por tipo de poluente e por tipologia da fonte geradora (DERISIO, 2017).

A resolução CONAMA nº 491 de 2018 define os padrões de qualidade do ar. Apesar dessa resolução determinar os limites máximos permitidos de concentração de PTS na atmosfera ( $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$  em 24 horas e  $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$  em um ano), a Organização Mundial da Saúde (OMS) recomenda que faixas menores de tamanho de MP<sub>2,5</sub> sejam monitoradas, pois estão mais bem relacionadas com problemas de saúde (BRITO *et al.*, 2018).

Apesar do que foi estabelecido pelas resoluções do CONAMA, os sistemas de monitoramento estaduais inexistem, são escassos ou muitas vezes ineficientes. No primeiro relatório nacional sobre a situação do monitoramento da qualidade do ar no país, publicado em 2014, somente dez estados e o Distrito Federal estavam com suas redes de monitoramento ativas (COUTO, *et al.*, 2020). A partir da análise da Figura 5 observa-se que a falta de cobertura das redes de monitoramento representa um

grande desafio na avaliação da exposição humana ao material particulado, inclusive o de fontes industriais (IEMA: INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE, 2023).

Figura 5- Estações de monitoramento de poluentes por unidade de federação



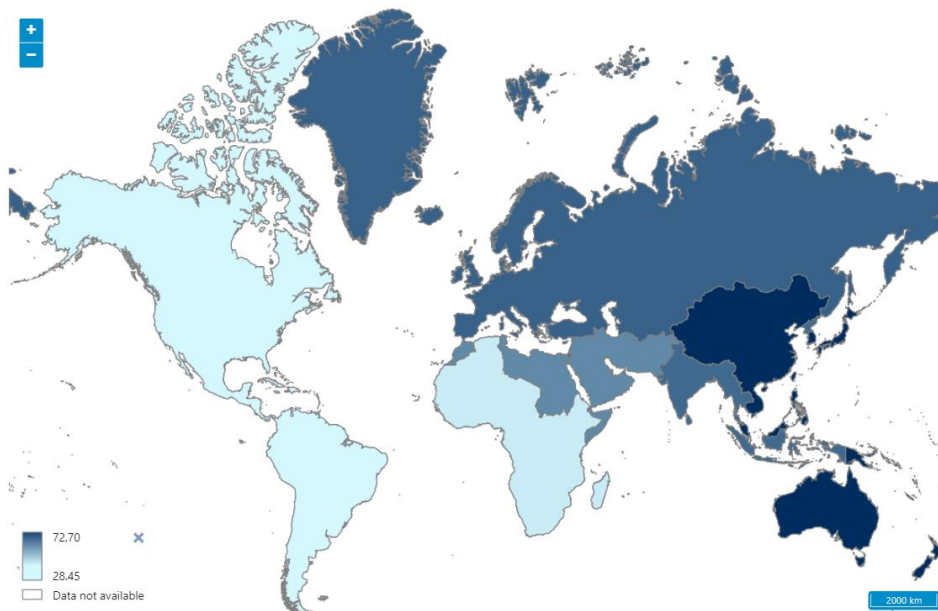
Fonte: IEMA: Instituto De Energia E Meio Ambiente, 2023

O material particulado e seus efeitos prejudiciais à saúde humana têm atraído a atenção da saúde pública global. Nesse contexto, a poluição atmosférica, têm sido priorizada no programa de prevenção e controle de doenças não transmissíveis (DNT) das Nações Unidas desde 2018. Como a poluição tem sido o quinto fator de risco para mortes por DNT a nível mundial, a meta 3.9 dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável visa reduzir o número de mortalidade causada pela poluição até 2030. Doenças como acidente vascular cerebral, doença cardíaca isquêmica, doença pulmonar obstrutiva crônica e o cancro da traqueia, dos brônquios e do pulmão são as principais causas de morte afetados por exposição a poluição atmosférica de material particulado (SOMBOONSIN, *et al.*, 2023). Segundo os dados da OMS, quase toda a população mundial (99%) respira ar que excede os limites das diretrizes da OMS e contém níveis elevados de poluentes. Conforme mostra a Figura 6, a região



das Américas é a que apresenta a menor taxa de mortalidade com um valor de 28,45 por 100.000 habitantes enquanto a região do pacífico ocidental apresentou a maior taxa com 72,70 (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2023).

Figura 6- Taxa de mortalidade atribuível à poluição do ar ambiente (por 100.000 habitantes)

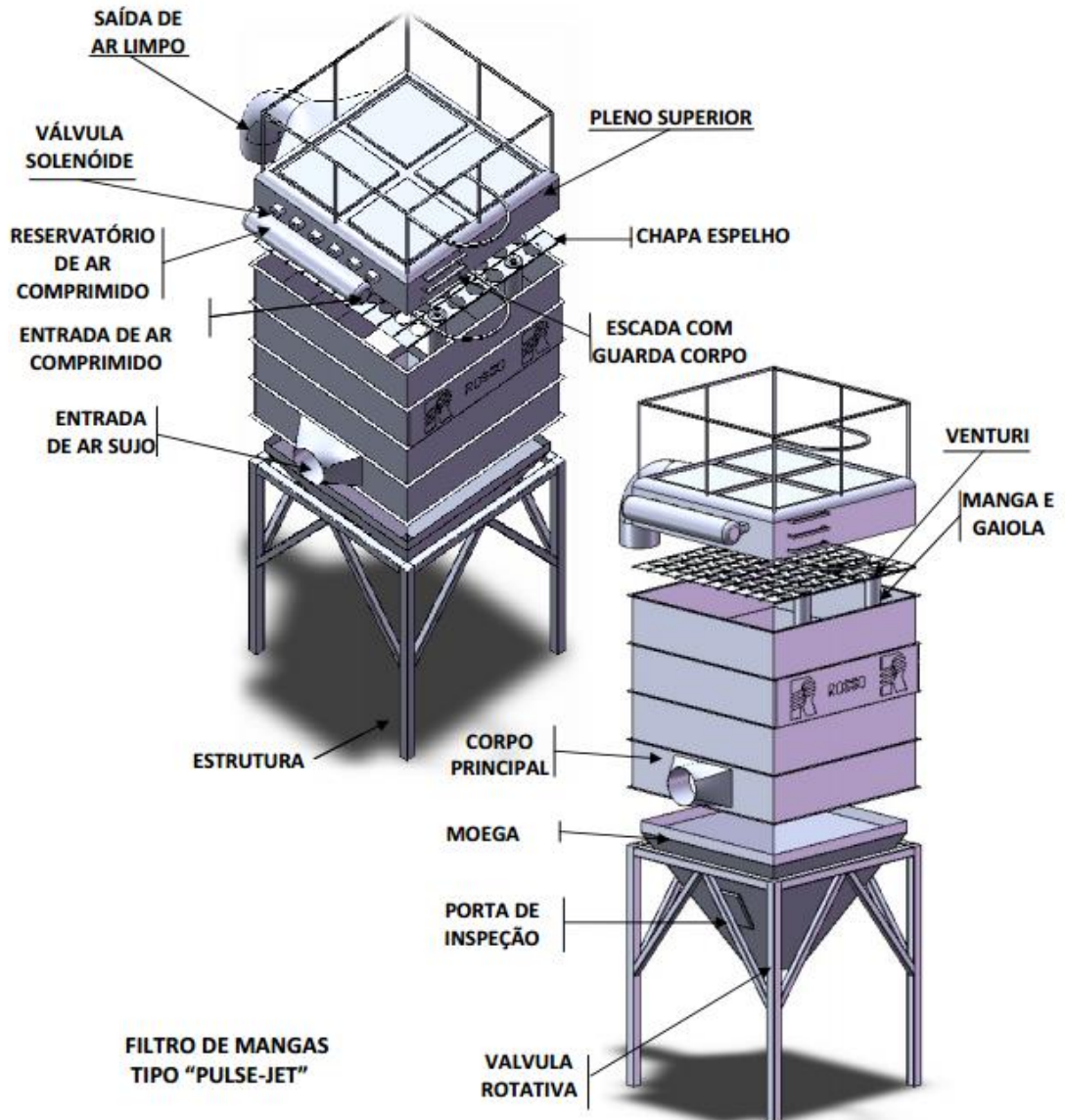


Fonte: World Health Organization, 2023

### 3.2 Filtro de manga

Conforme o Decreto-Lei Nº 1.413, de 31 de julho de 1975 no Art.1º “As indústrias instaladas ou a se instalarem em território nacional são obrigadas a promover as medidas necessárias a prevenir ou corrigir os inconvenientes e prejuízos da poluição e da contaminação do meio ambiente”. Normalmente, as partículas finas nas indústrias são removidas usando um filtro de mangas composto por numerosos sacos de filtro cilíndricos, conhecido como coletor de pó de filtro de mangas. O coletor de pó com filtro de mangas (Figura 7) atraiu ampla atenção por capturar partículas de poeira de fluxos de gás podendo alcançar uma alta eficiência de coleta e filtração contínua e ininterrupta por meio de uma regeneração do filtro em tempo real (SHIM, EOM, KIM, 2022).

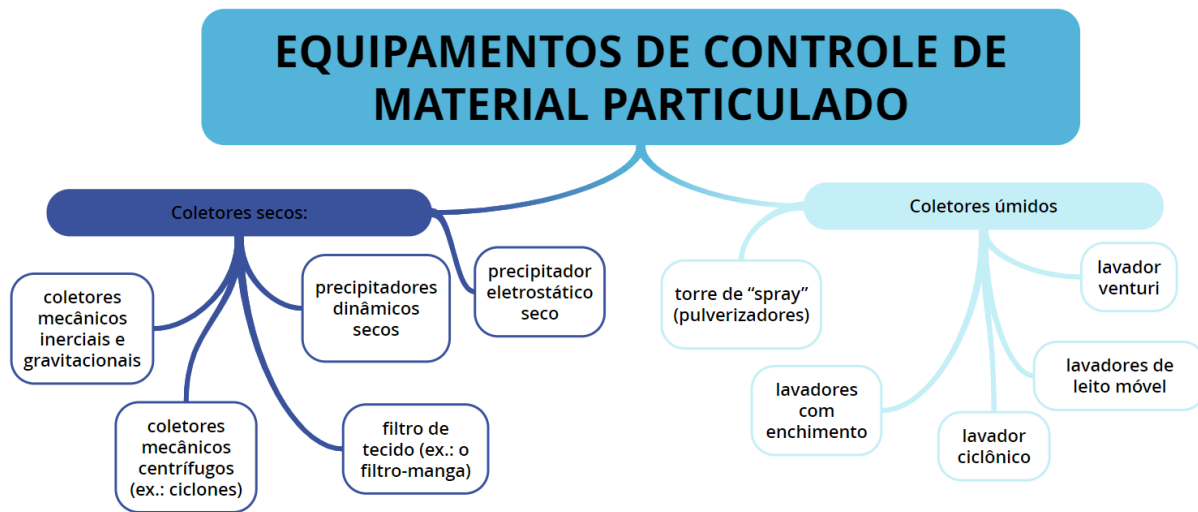
Figura 7- Desenho esquemático do filtro de manga



Fonte: (ROSSO INDUSTRIAL, [20--?])

Os métodos científicos e técnicos utilizados para reduzir os riscos da poluição são: o planejamento territorial e zoneamento; eliminação e minimização de poluentes; a concentração dos poluentes na fonte para tratamento antes do lançamento; diluição e mascaramento dos poluentes e o uso de equipamentos de controle de poluentes (DERISIO, 2017). Os equipamentos de controle são dispositivos que visam remover os poluentes antes que estes sejam lançados na atmosfera e podem ser classificados conforme mostra a Figura 8.

Figura 8- Representação da classificação dos equipamentos de controle de material particulado



Fonte: Lisboa, 2014

A partir da figura 8, também se observa que entre os equipamentos de controle de material particulado, podem ser observados coletores secos incluindo os filtros de tecido como por exemplo o filtro de manga. Os principais componentes de um filtro de manga são descritos no Quadro 1.

Os filtros podem apresentar altas eficiências para uma ampla faixa de tamanhos de partículas. O fluxo de gás carreador de partículas é forçado através de um meio poroso, onde as partículas são coletadas. O meio poroso pode ser composto de material granulado ou fibroso, podendo ser disposto na forma de leitos, compactado na forma de painéis ou na forma de tecido. Em função do tipo de material filtrante, os filtros podem ser classificados em filtros de tecido, leitos filtrantes, painéis compactados, ultrafiltro e sólido poroso. No campo de controle da poluição, os filtros de tecidos são os mais utilizados até então. Eles têm sido mais aplicados em indústrias de minerais não metálicos, fornos elétricos de aço, fornos de recuperação de chumbo, dióxido de titânio, cereais, madeira etc. dentre as vantagens desse tipo de equipamento, destacam-se alta eficiência, a perda de carga não excessiva e a resistência à corrosão. Uma das desvantagens é o seu alto custo (DERISIO, 2017).

Quadro 1- Principais componentes de um filtro de manga

Componente	Descrição
<b>Mangas filtrantes</b>	São elementos filtrantes de feltro agulhado, através das quais ocorre a separação do ar e do pó, já que o ar atravessa o elemento filtrante e as partículas sólidas ficam retidas em sua parede externa
<b>Gaiolas</b>	São armações metálicas que servem de sustentação para as mangas filtrantes, formando um conjunto cilíndrico e rígido. A parte inferior é fechada e a superior é aberta, contendo um ejetor Venturi
<b>Venturis</b>	São tubos metálicos aceleradores que transformam a energia de velocidade do ar comprimido injetado em energia de pressão, induzindo ar através da manga filtrante e, devido à sua magnitude para o fluxo normal de ar, transmitindo uma onda de choque à manga, promovendo sua limpeza e desalojando o material impregnado
<b>Chapa Espelho</b>	Chapa onde são distribuídos e fixados os conjuntos mangas filtrantes/gaiolas.
<b>Solenoides</b>	Elementos destinados a transformar os impulsos elétricos gerados no programador sequenciador temporizado eletrônico, em impulsos pneumáticos que vão atuar sobre as válvulas de diafragma
<b>Válvulas de Diafragma</b>	Também conhecidas como escape rápido, são válvulas que permitem a passagem de um fluxo de ar comprimido para a limpeza das mangas. Estas válvulas são abertas através dos impulsos pneumáticos produzidos pelos solenoides.
<b>Programador Sequencial Eletrônico ou Sistema de Limpeza Economizador</b>	O Sistema de limpeza Economizador, controlador da limpeza de filtros de mangas, através da medição de pressão diferencial. O controlador de pulso monitora a pressão diferencial dos coletores de jato pulsante, com a finalidade de acionar a limpeza quando alcança o ponto pré-programado.
<b>Reservatório de Ar Comprimido</b>	Reservatório para acumular ar comprimido utilizado na limpeza das mangas.
<b>Tubos de Sopragem</b>	São tubos conectados ao reservatório de ar comprimido, através das válvulas de diafragma, cuja finalidade é distribuir e direcionar o jato de ar comprimido para o interior das mangas situadas em uma mesma fileira.
<b>Moega</b>	Recipiente de descarga do pó despreendido das mangas e das partículas que entram com baixa velocidade e são retidas na própria moega.

Fonte: (ROSSO INDUSTRIAL, [20--?])

O processo de filtração pode ser dividido em três etapas. A primeira, chamada de filtração em profundidade, ocorre no início do processo, quando é realizada a captura das partículas no interior do tecido, ficando o material particulado retido entre as fibras. Durante o segundo estágio de transição, as partículas capturadas passam a formar dendritos que atuam como novos elementos coletores e a queda de pressão começa a aumentar progressivamente. Por fim, uma vez formada uma camada de

partículas no interior do filtro, ocorre a etapa de filtração superficial, na qual a torta de filtro assume o papel principal de capturar o material particulado. A formação de tortas de filtração espessas pode prejudicar a ação do filtro. Conseqüentemente, o filtro deve ser limpo e a torta de filtro removida para manter a queda de pressão em um nível adequado para o processo de filtração. As técnicas de limpeza mais utilizadas são vibração mecânica, fluxo de ar reverso e jato pulsado (ZHENG, KANAOKA, 2018).

A limpeza do filtro é muito importante para a operação estável do coletor de pó do filtro de manga. Entretanto, a limpeza frequente pode causar danos mecânicos à estrutura do filtro e reduzir significativamente a sua vida útil (ZHANG, BING *et al.*, 2023). O método de jato pulsante, que utiliza um jato de ar de alta pressão, é comumente usado para limpeza de mangas de filtro. Nesta abordagem, um jato de ar comprimido é injetado na abertura superior da bolsa filtrante, causando o desprendimento da torta de pó formada na superfície da bolsa filtrante; assim, o filtro é limpo. Neste cenário, o jato de ar deve gerar um pulso induzido por ar suficientemente poderoso para desintegrar a torta de poeira (SHIM; JOE; PARK, 2017).

A torta é responsável por aumentar a queda de pressão. Portanto, deve ser destacada em um limite superior de queda de pressão predefinido ou em intervalos de tempo predefinidos. Assim, o processo é intrinsecamente semicontínuo. A formação da torta e o desprendimento da torta são interdependentes e podem influenciar o desempenho do filtro (SALEEM, *et al.*, 2011).

Para determinar a morfologia de acumulação das partículas na superfície da fibra, o mecanismo de captura é primeiramente classificado de acordo com o tamanho das partículas. Para meios filtrantes comumente usados sem forças eletrostáticas, as partículas são capturadas principalmente por meio de três mecanismos: difusão, inércia e interceptação. Partículas pequenas, como partículas ultrafinas, são afetadas principalmente pelo movimento browniano. Partículas grandes se desprendem da linha aerodinâmica devido à inércia e entram em contato com a superfície da fibra. Partículas de tamanho médio, com tamanhos de aproximadamente 0,2 µm, apresentam boa capacidade de seguimento de fluidos e são capturadas pelas fibras devido à interceptação física (ZHANG, LIU, 2022).

De acordo com a literatura, pode-se citar alguns métodos que determinam a periodicidade de limpeza dos filtros de acordo com a sua saturação que são: controlar a queda de pressão em filtros (ZHANG, *et al.*, 2023), monitoramento de parâmetros

ao longo do filtro de manga como: queda de pressão, aceleração do meio filtrante, velocidade do ar frontal e velocidade axial do jato de ar comprimido, medição da espessura da torta de filtro medida por um sensor de deslocamento a laser(ZHOU *et al.*, 2023), utilização de modelo numérico e análise de dinâmica de fluidos computacional para obtenção de distribuição de pressão na superfície do filtro durante a limpeza por jato pulsante (LO, *et al.*, 2010) e monitoramento de velocidade de filtração (PARK *et al.*, 2019).

### 3.3 Carboneto de silício

Os materiais cerâmicos são amplamente utilizados na ciência e na indústria devido ao elevado ponto de fusão, resistência à abrasão, estabilidade química e propriedades elétricas, mecânicas, térmicas e ópticas. Os materiais cerâmicos são classificados em dois grupos principais, nomeadamente cerâmicas tradicionais e avançadas. A cerâmica tradicional consiste em tijolo, telhas de cimento e vidro que possuem elevados pontos de fusão, alta resistência mecânica e resistência à oxidação. As cerâmicas avançadas por sua vez, incluem alumina, carboneto de silício(SiC) e carboneto de boro(B<sub>4</sub>C). Em comparação com os equivalentes tradicionais, eles são muito mais finos, mais homogêneos e menos porosos, sendo utilizados em aplicações de alta tecnologia, por exemplo no desenvolvimento de dispositivos elétricos, eletrônicos, óticos e magnéticos (UGRASKAN, *et al.*, 2021).

O carboneto de silício (SiC) é um material cerâmico bastante conhecido por suas propriedades como inércia química, elevada estabilidade térmica e excelentes propriedades mecânicas, baixa densidade, boa resistência à fluência, alta dureza, resistência ao desgaste e alta condutividade térmica (MATIZAMHUKA, 2019; ARNOLDUSSEN, *et al.*, 2018).

Os materiais de carboneto de silício (SiC) são comumente usados em rolamentos de esferas cerâmicos, válvulas, materiais semicondutores, giroscópios, instrumentos de medição, aeroespacial e outros campos devido ao seu alto módulo de elasticidade, densidade moderada, baixo coeficiente de expansão térmica, alta condutividade térmica, temperatura resistência ao choque, alta rigidez específica, alta estabilidade dimensional e propriedades térmicas e mecânicas isotrópicas, bem como várias outras propriedades físicas excelentes (GAO, *et al.*, 2021). Outros exemplos de aplicações do carboneto de silício podem ser vistos no Quadro 2.

Quadro 2 - Aplicações de carboneto de silício

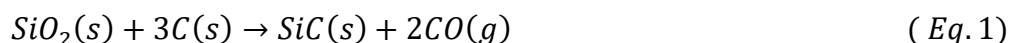
Autor, ano	Aplicação
(Zhang W., 2022)	Componentes estruturais tribológicos
(Zhai <i>et al.</i> , 2024)	Aplicação de sic em sensores MEMS (Sistemas Micro-Eletromecânicos)
(Marin-Montin <i>et al.</i> , 2023)	Compósito de carboneto de silício para uso em usinas solares
( Zhang Z. <i>et al.</i> , 2021)	Compósito C/sic para fabricação de materiais resistentes a altas temperaturas para aplicações de blindagem eletromagnética.
(Koyanagi <i>et al.</i> , 2021)	Fabricação aditiva de carboneto de silício para aplicações nucleares
(Wang <i>et al.</i> , 2021)	Compósito de sic utilizado na fabricação de discos de freio, rolamentos de turbinas, pás de turbinas, bicos, escudos térmicos, tampas de nariz e bordas dianteiras de asas (peças de aeronaves)
(Hotza <i>et al.</i> , 2020)	Filtros e membranas de sic
(Nobuyuki HORIKAWA <i>et al.</i> , 2019)	Dispositivo semicondutor de carboneto de silício

Fonte: Autoria própria

O carboneto de silício possui aplicações em diversos mercados como por exemplo: semicondutores, blindagem, resistência ao desgaste, refratários, indústria nuclear, aeroespaciais, automotivas, abrasivos. O SiC pode ser produzido por várias rotas. Uma das técnicas conservadoras de preparação de SiC envolve o aquecimento de sílica coloidal ou sílica junto com carbono em temperaturas elevadas. Outras rotas incluem métodos sol-gel, síntese de alta temperatura (SHS), redução carbotérmica, auto propagação, método de reação em fase gasosa, etc. (OGUNTUYI *et. al.*, 2023).

A rota de redução carbotérmica é o método de fabricação industrial de SiC mais utilizado, que também é conhecido como processo Acheson. A reação geral da formação de carboneto de silício pela rota de redução carbotérmica é representada

pela Equação 1 (RAJ, *et al.*, 2020).

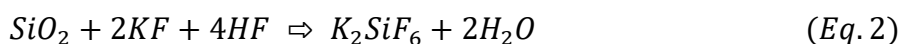


Acheson misturou coque e sílica na fundição elétrica em forno e desenvolveu um produto chamado Carborundum nome pelo qual o SiC ficou conhecido popularmente no século XVIII (E. PAPANASAM *et. al.*, 2022). O processo envolve a redução do quartzo em alta temperatura (acima de 2.000 °C) com uma fonte de carbono (coque de petróleo, carvão, antracite, carvão vegetal) em um forno de resistência aquecido eletricamente. A construção do forno consiste em um eletrodo central na forma de um núcleo de grafite cercado por uma mistura de matérias-primas constituídas principalmente por uma fonte de carbono, areia de sílica e, em alguns casos, estão incluídos aditivos como serragem e cloreto de sódio (MATIZAMHUKA, 2019).

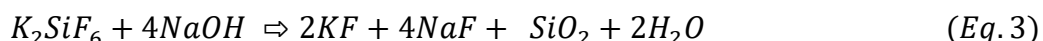
### 3.4 ABNT NBR ISO 9286:2014

A norma ABNT NBR ISO 9286:2014 abrange a análise química do carboneto de silício contido em grãos abrasivos e material bruto. É aplicável para a determinação das impurezas da superfície dos grãos abrasivos e o teor de SiC no material bruto quando o conteúdo de carboneto de silício é maior do que 95% (m/m). As análises da impureza da superfície compreendem os ensaios de determinação de: silício na superfície, dióxido de silício superficial, carbono livre, dióxido de ferro III e dióxido de alumínio III. A determinação de silício na superfície consiste em um método volumétrico com base na liberação de hidrogênio resultante do ataque no silício por uma solução de hidróxido de sódio em ebulição. O ensaio de determinação de carbono livre consiste na determinação gravimétrica do carbono livre por calcinação da amostra a 850 °C.

O método para a determinação do teor em SiO<sub>2</sub> na superfície SiC, consiste na reação de HF+KF com SiO<sub>2</sub> transformando em K<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub> que é separado e titulado com NaOH, conforme mostram as Equação 2 e Equação 3







A perda por tratamento com ácido é entendida como sendo a perda de substância, após o tratamento da amostra a ser analisada, com uma mistura de ácidos sulfúrico, fluorídrico e nítrico. A solução obtida nesse ensaio foi utilizada para determinar  $Fe_2O_3$  e  $Al_2O_3$  por meio de uma titulação com titulante EDTA. O resíduo dessa etapa é calcinado e com isso é determinado o teor de SiC da amostra.

### 3.5 ABNT 6946

A distribuição granulométrica define a determinação do tamanho das partículas e suas porcentagens (MORAIS *et al.*, 2021). A ABNT 6946 especifica um método para a execução de análise granulométrica por peneiramento de matérias-primas refratárias e refratários não conformados. Segundo essa norma a análise granulométrica de materiais refratários pode ser feita por meio dos métodos por via seca e via mista. O Quadro 3 descreve algumas diferenças entre os métodos.

Quadro 3- Diferenças entre o método de determinação granulométrica por via seca e o método por via mista

Recomendação para o método por via seca	Recomendação para o método por via mista
Quando a ação desagregadora da água for indesejável, como no caso das argilas;	Materiais contendo uma grande quantidade de grãos finos misturados com grãos mais grossos;
Quando o material for constituído de grãos maiores que 250 $\mu m$ ;	Materiais contendo aglomerados
Quando o uso previsto do material for tal que o tamanho das partículas mais finas seja de importância secundária;	Materiais que não fluem livremente, devido à presença de umidade ou de outro aditivo ligante
Quando os materiais contiverem componentes solúveis em água	Materiais finamente moídos (geralmente abaixo de 250 $\mu m$ )

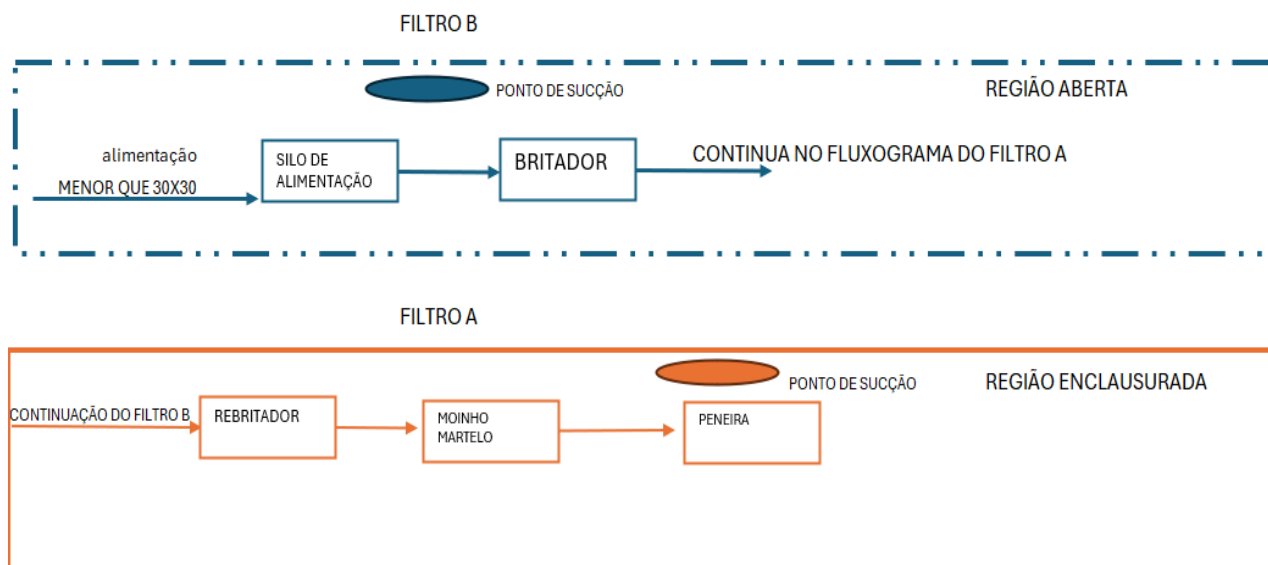
Fonte: ABNT 6946

#### 4. METODOLOGIA

A coleta das amostras foi realizada nas moegas de dois coletores de pó do tipo filtro de manga na fábrica SiCBRAS localizada em Simões Filho- Bahia, denominados “Filtro A” e “Filtro B”, conforme figura 9. Os filtros de mangas A e B estão localizados na etapa de processamento de britagem do carboneto de silício cristal e metalúrgico. O Filtro B captura o ar contaminado na primeira etapa do processo de britagem onde o material é fragmentado para posteriormente passar por outro estágio de fragmentação onde está localizado o Filtro A. Foram coletadas 6 amostras de pó de filtro de carboneto de silício nas seguintes condições:

1. Pó de filtro de carboneto de silício obtido de filtro de manga “A” antes do processo de sopragem (Teste 1)
2. Pó de filtro de carboneto de silício obtido de filtro de manga “B” antes do processo de sopragem (Teste 2)
3. Pó de filtro de carboneto de silício obtido de filtro de manga “A” após o processo de sopragem (Teste 3)
4. Pó de filtro de carboneto de silício obtido de filtro de manga “B” após o processo de sopragem (Teste 4)
5. Pó de filtro de carboneto de silício obtido de filtro de manga “A” após 1 mês de realizado o processo de sopragem (Teste 5)
6. Pó de filtro de carboneto de silício obtido de filtro de manga “B” após 1 mês de realizado o processo de sopragem (Teste 6)

Figura 9- Localização dos filtros A e B



Fonte: Autoria própria

Em seguida foi realizada a preparação e caracterização das amostras para observar as mudanças sofridas pelo material antes e depois do processo de sopragem em cada filtro. O procedimento experimental foi dividido em 5 etapas: Preparação de amostra metalográfica, caracterização pela microscopia eletrônica de varredura, análise de distribuição granulométrica, análise química e análise de densidade. As etapas de preparação de amostra metalográfica e caracterização pelo microscópio eletrônico foram realizadas nos laboratórios de metalografia e de caracterização de materiais do Instituto Federal da Bahia, respectivamente. Enquanto as etapas de análise de distribuição granulométrica, análise química e análise de densidade foram realizadas nos laboratórios químico e físico da empresa SiCBRAS. O Quadro 4 mostra os materiais e equipamentos utilizados neste trabalho.

Quadro 4- Relação dos materiais utilizados neste trabalho

Solução de hidróxido de sódio 25% m/m	Balança analítica Bel M214-AIH
Água destilada	Bureta de gás
Manta aquecedora 250 mL com regulador Fisatom 220V mod.22E	Reservatório adicional da bureta
Barômetro	Garrafa de nivelamento
Termômetro	Ácido clorídrico 18% m/m
Frasco cônico	Solução de lavagem
Condensador tipo bola	Soda caustica 0,1 mol/l
Tubo capilar em ângulo	Indicador de fenolftaleína
Papel de tornassol azul	Cubos de gelo
Cadinho de platina	Banho de areia MYLABOR M302
Funil de buchner	Frasco de sucção PE
Flocos de papel de filtro sem cinzas	Papel de filtro tipo sem cinzas
Espátula	Balão cônico 300 ml
Medidor de pH MYLABOR MY140-BIVOLT	Solução de ácido sulfúrico, 96% (m/m).
Solução de ácido fluorídrico, 40% (m/m).	Solução de ácido nítrico, 65% (m/m).
Solução de ácido clorídrico, 37% (mim)	Cadinho de porcelana
Balão volumétrico, 250 ml	Tela de ensaio 38 $\mu$ m
Tela de ensaio 150 $\mu$ m	Tela de ensaio 32 $\mu$ m
Tela de ensaio 75 $\mu$ m	Tela de ensaio 20 $\mu$ m
Tela de ensaio 45 $\mu$ m	Tela de fundo
Agitador de peneiras Tyler Ro-Tap RX 30 CE	Lixa de tecido grão 60
Lixa d'água grão: 120, 150, 180,320, 600 e 1000	Embutidora metalográfica TECLAGO EM30D
Lixadeira metalográfica manual	Secador
Lixadeira e politriz FORTEL modelo PLF	Baquelite
Microscópio eletrônico de varredura Tescan LMU- Vega 3	Álcool etílico
Alumina	Forno Mufla Microprocessado (220V) - QUIMIS Q318M24

Fonte: Autoria própria

#### **4.1 Preparação de amostra metalográfica**

Na etapa de preparação de amostra metalográfica, primeiramente foi embutido carboneto de silício no estado bruto com o auxílio de uma embutidora metalográfica TECLAGO EM30D conforme Figura 10a. Para isso, foi aberto a entrada de água e a embutidora foi ligada. Colocou-se um pequeno pedaço de carboneto de silício centralizado na matriz da embutidora, com o auxílio de um funil, foi adicionado baquelite até a marcação de uma linha presente na matriz. A alavanca de pressão foi acionada até a pressão de aproximadamente 110 bar e o botão de temperatura foi acionado uma única vez para iniciar o processo de embutimento. Durante o processo de aquecimento a pressão foi monitorada de forma que ficasse entre os valores de 110 a 120 bar. Ao finalizar a etapa de resfriamento, o botão de alívio de pressão foi acionado e a amostra foi retirada da matriz, conforme Figura 10b.

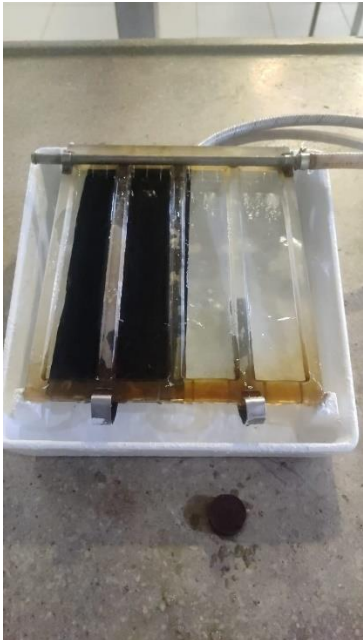
Figura 10- Equipamentos/materiais utilizados neste trabalho: a-Embutidora; b- peça obtida após embutimento; c- Lixadeira metalográfica manual; d- Lixadeira e poltriz



(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Autoria própria

Após a etapa de embutimento, a peça obtida foi submetida a fase de lixamento. Primeiramente a borda da peça foi lixada com o auxílio da lixa de tecido grão 60 para evitar danos as lixas que foram usadas posteriormente. O lixamento foi realizado pelo uso sucessivo de lixas com granulação de 120 até 1000 dividido em 6 etapas. Este procedimento foi efetuado utilizando lixa d'água com lubrificação de água corrente por meio de uma lixadeira metalográfica manual conforme mostra Figura 9c. A direção do lixamento foi alternada entre cada lixa, girando a peça em 90°, para garantir que todas as marcas da etapa anterior tenham sido eliminadas. Foi utilizado a Lixadeira e politriz modelo PLF, conforme mostra Figura 9d, para realizar o polimento da peça após a etapa de lixamento. Durante o processo de polimento foi adicionado alumina e água. Após finalizar esta etapa, a peça foi lavada com água e álcool etílico, e logo em seguida, foi secada com o auxílio de um secador.

Após as etapas de preparação da amostra metalográfica, a peça com a amostra de carboneto de silício foi analisada no microscópio óptico com magnitude de 200 vezes e 400 vezes. Nas etapas seguintes foram analisadas as 6 amostras de pó de filtro de carboneto de silício coletadas na moega conforme foi citado anteriormente.

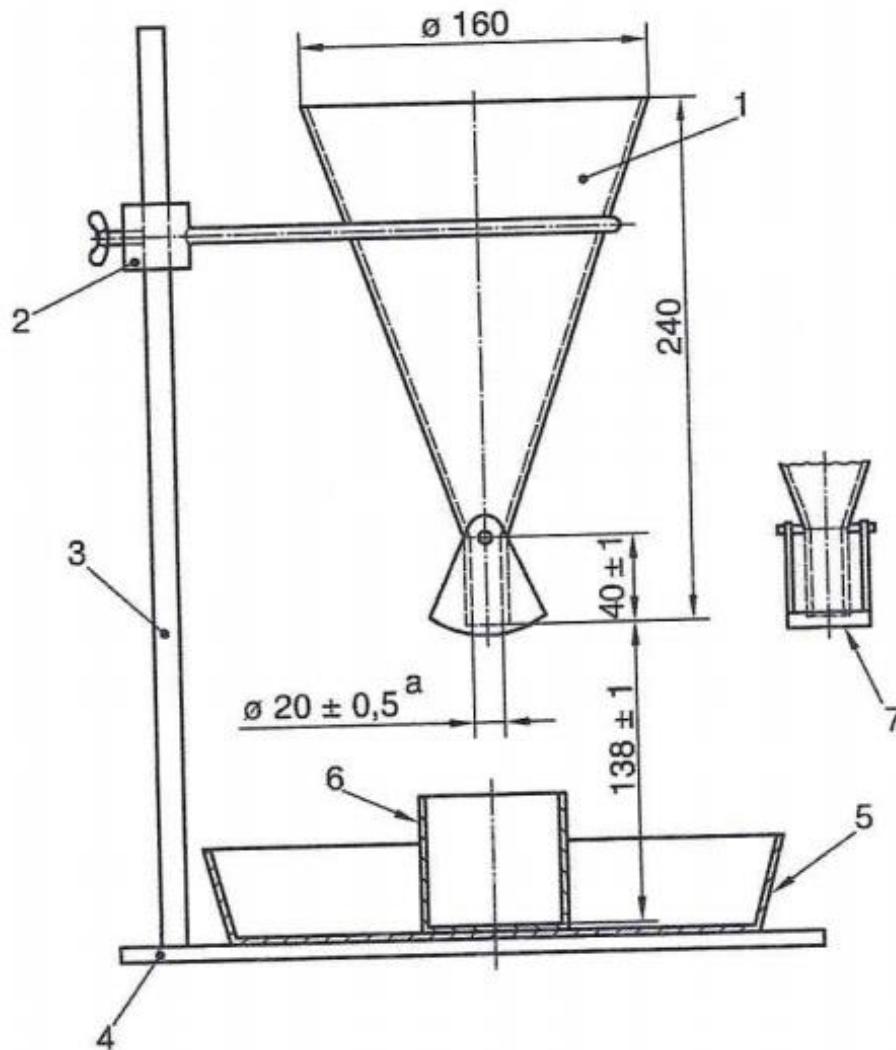
## **4.2 Análise granulométrica**

A determinação granulométrica foi feita conforme NBR 6946 pelo método via seca. Foi montado o conjunto de peneiras iniciando-se com a peneira mais fina da série que foi montada sobre o fundo. Sobre a peneira mais fina foi montado outras peneiras em ordem crescente de abertura de suas malhas, ficando a peneira mais grossa no topo do conjunto. Em seguida, a amostra foi pesada, designada como  $m_1$  e colocada na peneira do topo, fechando o conjunto com uma tampa. O conjunto das peneiras foi colocado no peneirador mecânico, ajustando o temporizador para 5 minutos. Em seguida foi pesado a fração retida em cada peneira, incluindo a do fundo. Foi designado cada massa por fração retida em cada peneira por  $m$ . As peneiras utilizadas para o ensaio do carboneto de silício foram: 150  $\mu\text{m}$ , 75  $\mu\text{m}$ , 45  $\mu\text{m}$ , 38  $\mu\text{m}$ , 32  $\mu\text{m}$  e 20  $\mu\text{m}$ .

### 4.3 Análise de densidade solta

A ABNT NBR ISO 9136 especifica um método para determinação de densidade dos macrogrãos abrasivos revestidos e aglomerados. O dispositivo utilizado nesse ensaio é ilustrado na Figura 11 e é constituído pelos elementos descritos no Quadro 5.

Figura 11- Dispositivo utilizado no ensaio de densidade solta



Legenda:

- 1- Funil
- 2- Suporte de ajuste de altura do funil
- 3- Suporte
- 4- Placa de fundo
- 5- Bandeja de transbordamento
- 6- Cilindro de medição
- 7- Válvula de liberação (fechada)

Fonte: ABNT NBR ISO 9136



Quadro 5– Descrição dos componentes do ensaio de densidade solta

Componentes	Descrição
<b>Funil</b>	A inclinação do funil deve ser tal que os grãos finos não consigam aderir às suas paredes. Preferencialmente, o funil deve ser fabricado em aço inoxidável, com emendas internas lisas.
<b>Suporte</b>	O único requisito é que ele seja capaz de segurar o funil na posição vertical, de modo que a dimensão entre a saída do funil e o fundo do cilindro de medição seja de 138 + 1 mm.
<b>Válvula de liberação</b>	O único requisito é assegurar a abertura rápida da válvula.
<b>Cilindro de medição</b>	O cilindro de medição possui uma superfície interna polida e um volume de V (200 + 0,5) cm <sup>3</sup> ; este volume é determinado por um diâmetro interno de 64 mm e uma altura interna de 62,2 mm. O cilindro de medição é colocado centralmente, sob o fluxo emanado do canal de vibração. A altura de queda dos macrogrãos a serem ensaiados (a partir da borda superior da parte inferior do canal para o fundo do cilindro medidor) deve ser de (138 + 1) mm.
<b>Bandeja de transbordamento</b>	A bandeja de transbordamento com um fundo plano serve como um coletor para os macrogrãos transbordados. O copo de medição é centralizado abaixo da saída do funil.

Fonte: ABNT NBR ISO 9136

A determinação da densidade aparente, em base seca, consiste na medida do volume de uma determinada amostra do minério e pesagem dela. A medida do volume da amostra foi determinada por meio de um recipiente com valor de volume conhecido. Com o valor da massa divide-se pelo valor do volume (g/cm<sup>3</sup>), obtendo-se a densidade conforme mostra Equação 4

Este ensaio iniciou-se pelo enchimento de um copo de 250 mL até o topo com os grãos abrasivos a serem ensaiados. Com a saída do funil fechada e o cilindro de medição centralizado sob a saída do funil, colocou-se os grãos. Foi aberto a saída e permitiu-se que os grãos caíssem livremente até o esvaziamento do funil. O material de ensaio empilhado em cima do aro do cilindro de medição foi removido usando uma lâmina reta com a ponta a um ângulo de aproximadamente 45° com a borda do copo de medição.

$$d = \frac{m}{v} \quad (\text{Eq. 4})$$

d= densidade, g/cm<sup>3</sup>

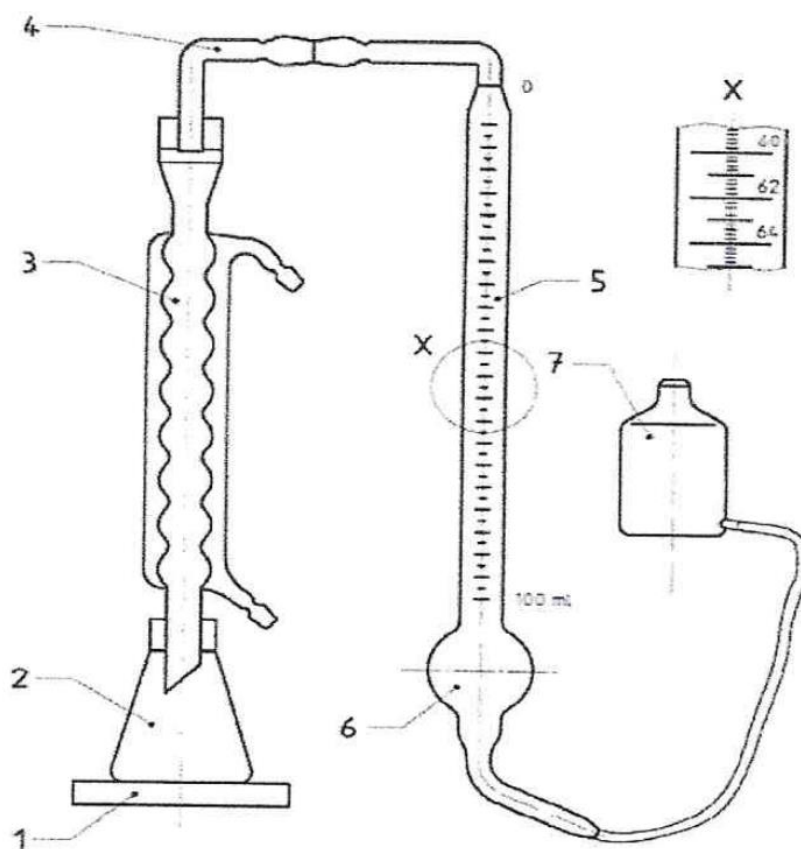
m= massa dos grãos contidos no cilindro de medição, g

v= volume do cilindro, cm<sup>3</sup>

#### 4.4 Análise química do carboneto de silício

As análises de impurezas da superfície do grão abrasivo e determinação de carboneto de silício foram realizados conforme ABNT NBR ISO 9286. No ensaio de determinação de silício foi adicionado 1 g do pó de carboneto de silício e 40 mL de NaOH no aparelho para determinação de silício conforme mostra Figura 12, mantendo o aparelho sob aquecimento durante 1 hora e meia.

Figura 12- Aparelho para determinação de silício



Fonte: ABNT NBR ISO 9286

Em seguida, o sistema ficou sob resfriamento ( colocou-se um recipiente de água abaixo da vidraria identificada como 2 na figura 12), até ficar com temperatura igual do ambiente. Para determinar o teor de silício na amostra, utilizou-se a Equação 5.

$$w_{Si\ sup} = \left( \frac{0,000627 \times V_{xf}}{m} \times 100 \right) \quad (\text{Eq. 5})$$

Onde:

V é o volume de hidrogênio coletado na bureta de gás, em mililitros

m é o peso da amostra, em gramas

f é o fator de correção para a redução do volume do gás hidrogênio as condições normais de temperatura e pressão

Para determinação do dióxido de silício superficial, utilizou-se um banho de areia onde foi aquecido 1 g do pó de carboneto de silício, 15 ml KF/ HF, 5 mL de HCl 18% por 2,5 h. Após o aquecimento, foram realizadas as etapas de resfriamento e filtragem a vácuo. A filtragem foi realizada com o auxílio de uma solução de lavagem fria até o indicador tornassol azul não mostrar coloração vermelha. O resíduo da filtragem foi utilizado na titulação com NaOH 0,1 mol/L e indicador de solução fenolftaleína até coloração rosa persistente.

O teor de  $\text{SiO}_2_{\text{sup}}$  é expresso conforme dado pela Equação 6:

$$w_{\text{SiO}_2\text{sup}} = \frac{(V-V_0) \times 1,502}{m_0 \times 1000} \times 100 \quad (\text{Eq.6})$$

Onde:

$m_0$  é a massa inicial, em gramas

V é o volume de NaOH consumido em mililitros (amostra)

$V_0$  é o volume de NaOH consumido em mililitros (ensaio em branco)

No ensaio para determinação de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e SiC inicia-se adicionando 5 g de amostra de pó de filtro de carboneto de silício, 20 gotas de ácido sulfúrico 96% (m/m), 30 ml de ácido fluorídrico 40% (m/m) e 10 ml de ácido nítrico 65% (m/m) em um cadinho de platina. O cadinho foi colocado em uma chapa aquecedora a uma temperatura de 60 °C até evaporar todo o líquido. O resíduo do cadinho foi misturado com 10 mL de ácido clorídrico 37% (m/m) e foi aquecido a uma temperatura de 60 °C durante 30 minutos. Filtrou-se através de um cadinho de porcelana pesado e logo em seguida foi lavado o resíduo de filtração três vezes com ácido clorídrico diluído 4% (m/m) e duas vezes com água destilada quente, sendo posteriormente o resíduo levado ao forno Mufla Microprocessado QUIMIS Q318M24 a uma temperatura de

850 °C por uma hora. Após resfriar, o cadinho foi pesado e determinou-se a massa do resíduo calcinado. O teor de SiC na amostra foi determinado de acordo com a Equação 7.

$$\%SiC = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100 \quad (\text{Eq.7})$$

$m_1$  é o peso da amostra após a calcinação (gramas)

$m_0$  é o peso inicial da amostra (gramas)

O filtrado da etapa anterior foi transferido para um balão volumétrico de 250 ml e completado com água destilada até a marca. Essa solução foi utilizada para determinar  $Fe_2O_3$  e  $Al_2O_3$  por meio de uma titulação utilizando o EDTA (ácido etilenodiamino tetra-acético) como titulante.

No ensaio de determinação de carbono livre foi adicionado 1 g de pó de filtro de carboneto de silício, em um cadinho previamente calcinado. Aqueceu-se na mufla durante 60 min a 750 °C e após esse tempo o cadinho foi colocado em um dessecador para esfriar, sendo realizada a pesagem logo em seguida. O cadinho foi reaquecido por mais 30 minutos e sua massa foi pesada assim que o cadinho resfriou. Como houve perda de massa, a operação foi repetida até obter uma massa constante ou crescente. Em seguida, foi determinado o teor de carbono do resíduo calcinado de acordo com a Equação 8.

$$m_v = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \quad (\text{Eq.8})$$

Onde:

$m_1$  é o peso da amostra após a calcinação (gramas)

$m_0$  é o peso inicial da amostra (gramas)

#### 4.5 Microscopia eletrônica de varredura

As seis amostras foram analisadas no microscópio eletrônico de varredura, cujo equipamento pode ser visto na Figura 13. Nessa análise, foram obtidas imagens por elétrons secundários (SE) e elétrons retroespalhados (BSE). As imagens das Figuras 20-23 são com magnitude 200x. No microscópio eletrônico de varredura foi analisado por meio de contraste relacionado ao número atômico dos elementos químicos

dispostos na amostra analisada, a presença de regiões mais claras que representam a presença de elementos mais pesados e foi medido o tamanho de algumas partículas do material.

*Figura 13- Microscópio eletrônico de varredura*



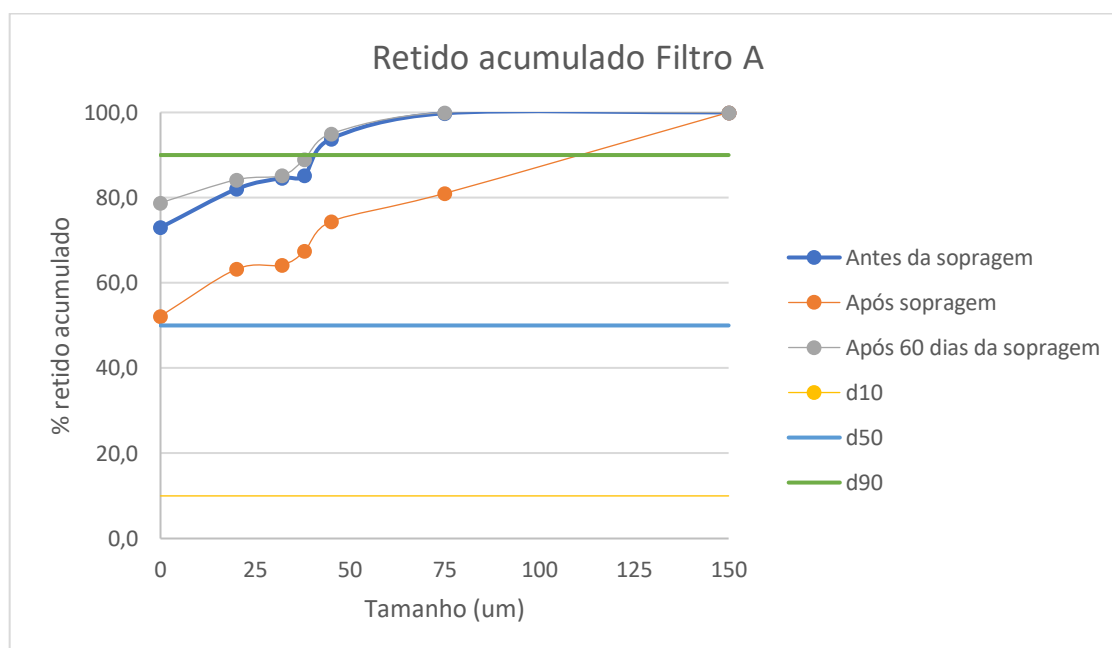
*Fonte: Autoria própria*

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Observa-se dois gráficos nas Figuras 14 e 15 onde tem-se a relação de retido acumulado versus tamanho da partícula. As três linhas na horizontal correspondem aos diâmetros das partículas  $d_{10}$ ,  $d_{50}$  e  $d_{90}$ . Os parâmetros  $D_{10}$  e  $D_{90}$ , estão relacionados aos diâmetros de corte da curva de distribuição acumulada em 10% e 90%. o parâmetro  $D_{50}$  está relacionado à mediana da distribuição e corresponde ao diâmetro médio de partícula.

A Figura 14 mostra os resultados de granulometria dos pós de carboneto de silício obtidos antes e após a limpeza por sopragem e após 60 dias da limpeza. Conforme resultados, o pó de filtro de carboneto de silício captado na moega do filtro de manga "A" apresentou o diâmetro da partícula  $d_{90}$  antes do processo de sopragem igual a 41,82  $\mu\text{m}$ . Após o processo de sopragem do filtro de manga o pó de filtro apresentou o  $d_{90}$  igual a 110,53  $\mu\text{m}$ . Como o diâmetro  $d_{90}$  após o processo de sopragem apresentou um valor maior que o diâmetro da partícula antes do processo de sopragem, entende-se que o material mais fino tende a ficar mais retido no filtro e o material mais grosso tende a ser captado na moega, quando o filtro de manga não apresenta saturação significativa. Isso pode ser reforçado, pois após 60 dias do processo de sopragem o  $d_{90}$  apresentou um valor igual a 39,17  $\mu\text{m}$ , um valor próximo ao  $d_{90}$  inicial antes do processo de sopragem. Os diâmetros  $d_{10}$  e  $d_{50}$  não foram possíveis de serem determinados devido à falta de telas de análises menor que 20  $\mu\text{m}$ . O recomendado seria a utilização do analisador de tamanho de partículas Malvern que abrange uma medição de partículas com tamanho a partir de 0,3  $\mu\text{m}$  (MALVERN PANALYTICAL, 2024).

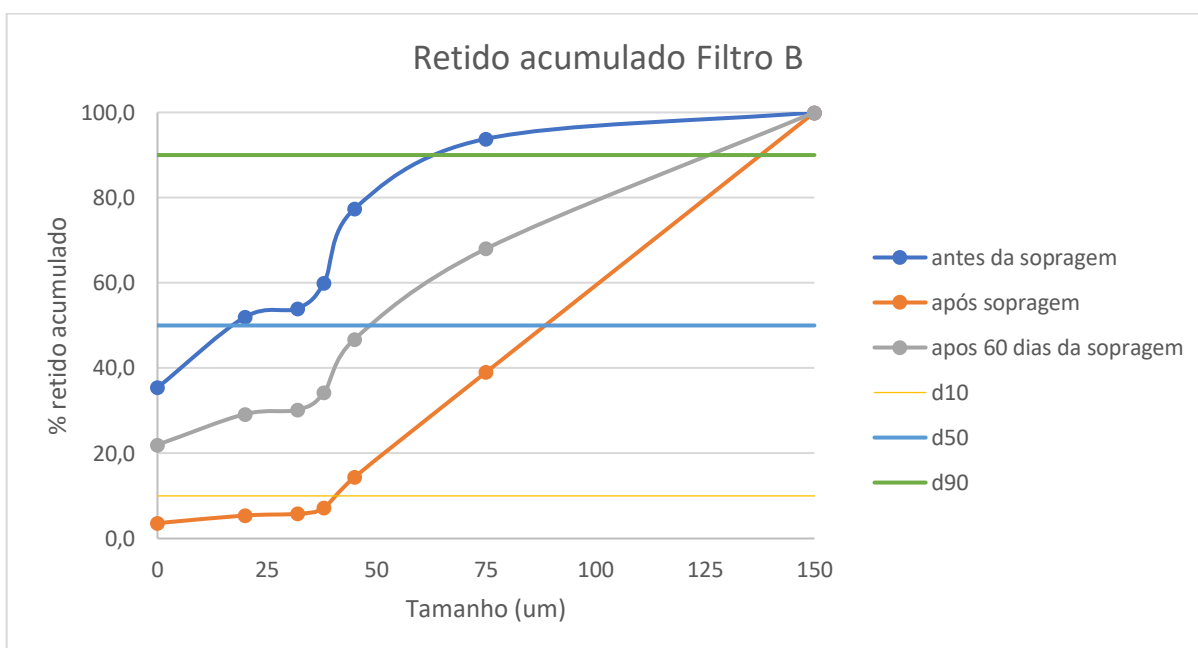
Figura 14- Classificação granulométrica: percentual de retido acumulado no filtro A



Fonte: Autoria própria

O filtro B apresentou um comportamento similar ao filtro A, conforme mostra Figura 15, porém o percentual de redução entre o  $d_{90}$  após a sopragem e o  $d_{90}$  após 60 dias do processo de sopragem foi bem menor que o valor apresentado pelo filtro A. O filtro A apresentou uma redução de 65% e o filtro B de 8%. Essa discrepância de redução pode ser explicada pela diferença de localização de sucção de material entre os filtros e uma possível diferença do tempo de intervalo de limpeza dos filtros na primeira amostra coletada que foi desconhecido. Os valores de  $d_{90}$  do filtro B antes do processo de sopragem, após processo de sopragem e 60 dias após o processo de sopragem foram respectivamente:  $d_{90}=68,05 \mu\text{m}$ ,  $d_{90}=137,70 \mu\text{m}$  e  $d_{90}=126,56 \mu\text{m}$ . No filtro B também não foi possível determinar o diâmetro da partícula  $d_{10}$ . Já o diâmetro médio da partícula foi possível determinar sendo que apresentou os seguintes valores para os momentos antes do processo de sopragem, depois o processo de sopragem e após 60 dias do processo de sopragem respectivamente:  $d_{50}=19,40 \mu\text{m}$   $d_{50}=80,52 \mu\text{m}$   $d_{50}=49,53 \mu\text{m}$ . Esses valores corroboram a tese que o material particulado capturado na moega do filtro tende a ser mais fino quando há acúmulo de material retido no filtro de manga (formação de uma “torta”) e por isso o diâmetro médio ficou mais fino após um certo tempo sem a sopragem do filtro.

Figura 15- Classificação granulométrica: percentual de retido acumulado no filtro B

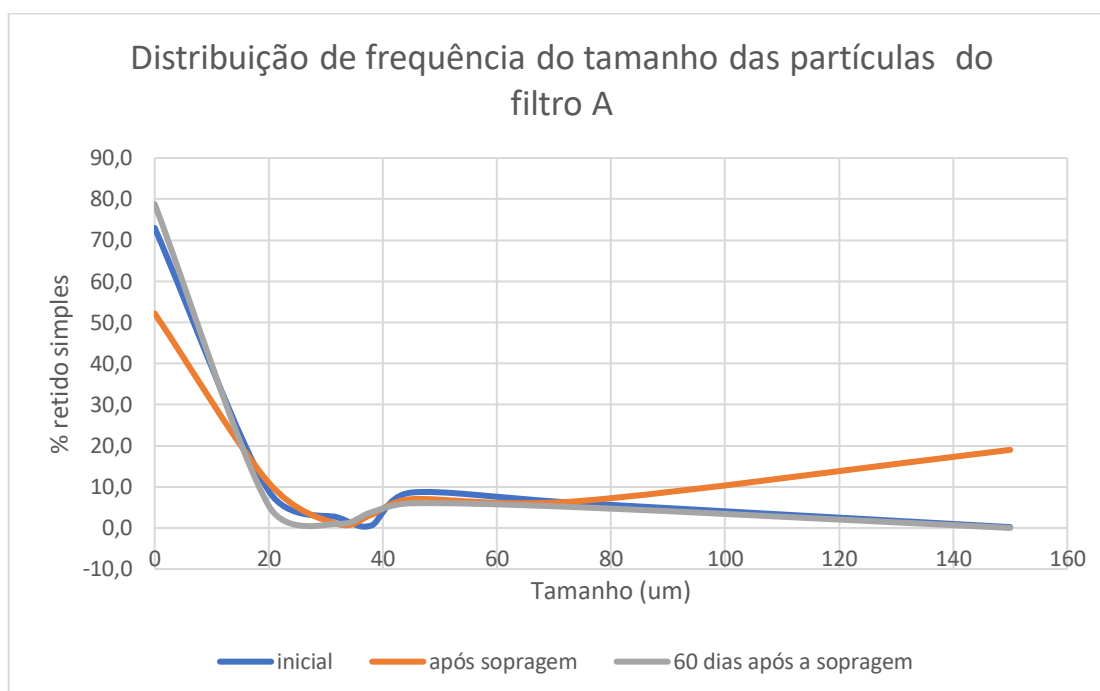


Fonte: Autoria própria

As partículas da amostra de pó de carboneto de silício oriundas do filtro de manga não apresentaram todas o mesmo tamanho de partícula e na Figura 16 observa-se a proporção da amostra relacionada uma faixa de tamanho específico. A maior proporção da amostra, cerca de 70 a 80%, está concentrada no tamanho de partícula abaixo de 20  $\mu\text{m}$ , sendo que para os experimentos antes da sopragem e após a sopragem 60 dias apresentaram comportamento semelhante. Nesse contexto percebe-se o material recolhido antes da sopragem e após 60 dias de sopragem são material mais finos que o pó coletado imediatamente ao processo de sopragem que apresentou uma distribuição de 50% de partículas abaixo de 20  $\mu\text{m}$ .



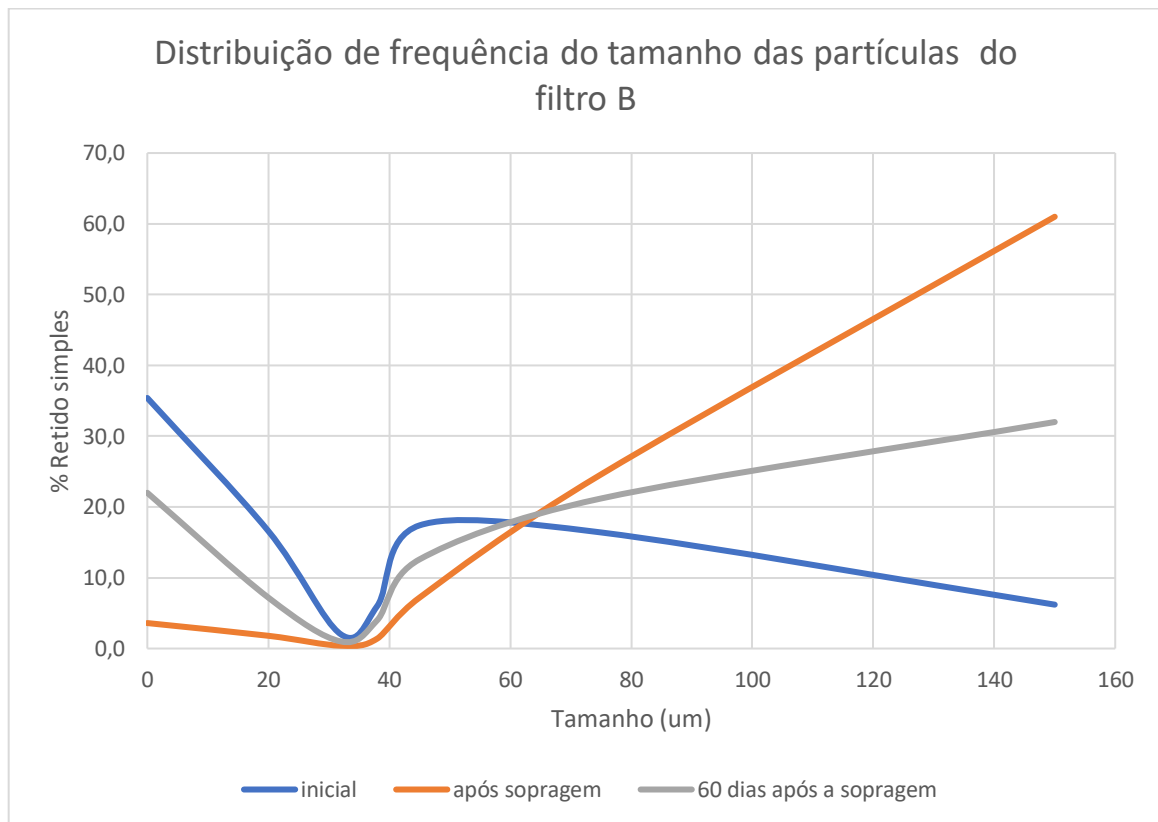
Figura 16- Distribuição de frequência do tamanho das partículas do filtro A



Fonte: Autoria própria

O filtro B apresentou a mesma tendência de distribuição de tamanho de partículas que o filtro A, conforme observa-se na Figura 17. Apesar das amostras antes da sopragem e após 60 dias de sopragem não apresentarem a distribuição tão idêntica como o filtro A, percebe-se que ambas amostras são mais finas que a amostra que sofreu o processo de sopragem com distribuição concentrada entre 20% a 40% para um diâmetro abaixo de 20  $\mu\text{m}$  enquanto o material coletado após o processo de amostragem apresentou menos que 5% da amostra concentrada na faixa abaixo de 20  $\mu\text{m}$ . Ao comparar o tamanho das partículas dos filtros A e B nos gráficos 16 e 17, observa-se que o material coletado no filtro B é mais grosso que o filtro A. Isso se justifica pela localização dos pontos de sucção de ambos os filtros. O filtro B captura o material na primeira etapa do processo de britagem de carboneto de silício, onde temos apenas um britador e por isso o material processado é bem mais grosso que o material localizado na segunda etapa. Na segunda etapa tem-se outro britador e um moinho a martelo, etapa onde fica localizado o filtro A e por isso o material é mais fino que na etapa anterior.

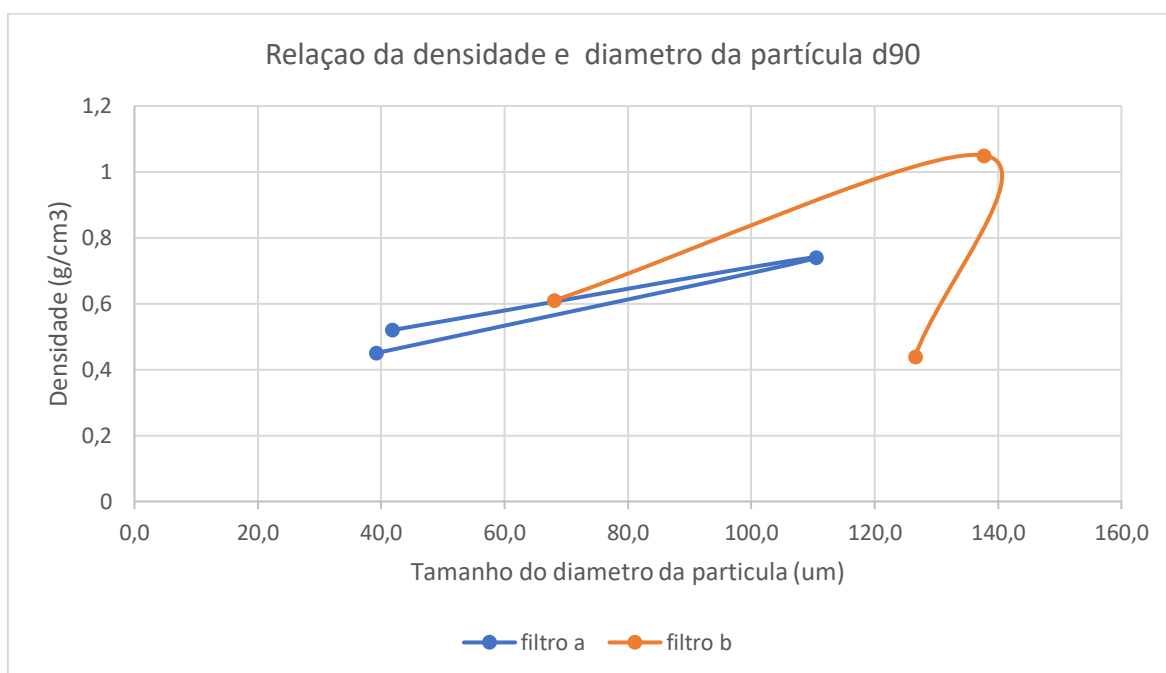
Figura 17- Distribuição de frequência do tamanho das partículas do filtro B



Fonte: Autoria própria

No ensaio de análise de densidade solta, observa-se na Figura 18 que em ambos os filtros a densidade do pó de filtro aumentou após o processo de sopragem. Além disso a densidade do material obtido no filtro B é maior que a densidade do filtro A.

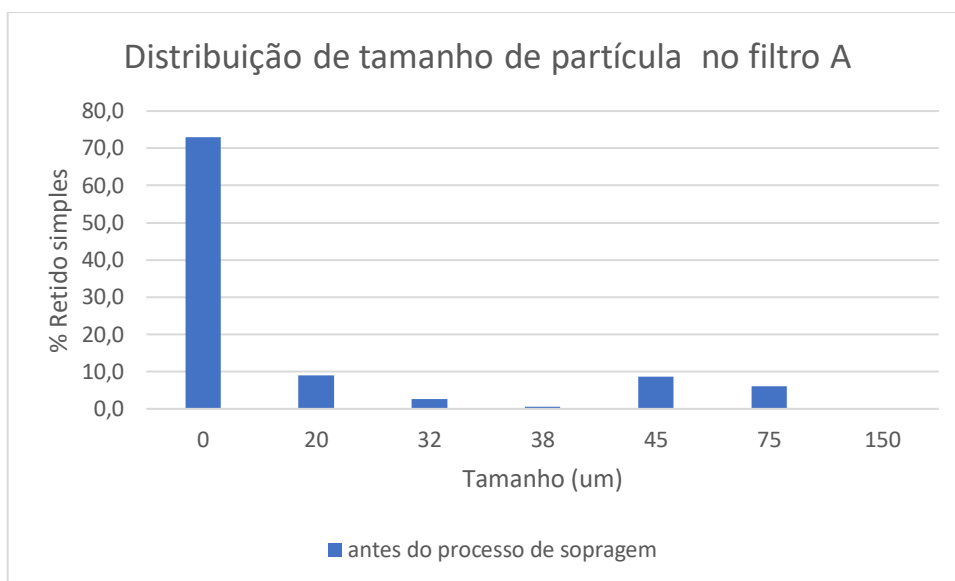
Figura 18- Relação da densidade do pó de filtro com o tamanho da partícula  $d_{90}$  nos filtros A e B



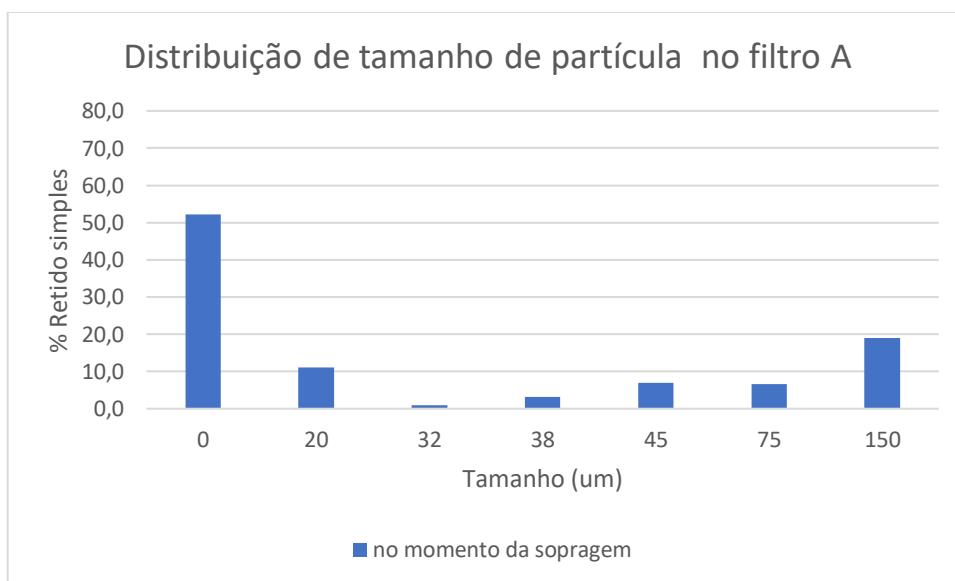
Fonte: Autoria própria

A densidade solta estabelece uma dependência com a distribuição do tamanho de partícula, sendo que quanto maior a diferença entre os tamanhos das partículas maior será a densidade desse material. No filtro A observa-se na Figura 19 que os picos de distribuição dos tamanhos de partículas no momento da sopragem são divergentes em relação ao tamanho quando comparados com os picos antes e após 60 dias da sopragem. Isso significa que a amostra de pó de carboneto de silício no momento da sopragem apresenta uma maior heterogeneidade de tamanho de partículas em relação as situações mostradas nas Figuras 19a e 19c.

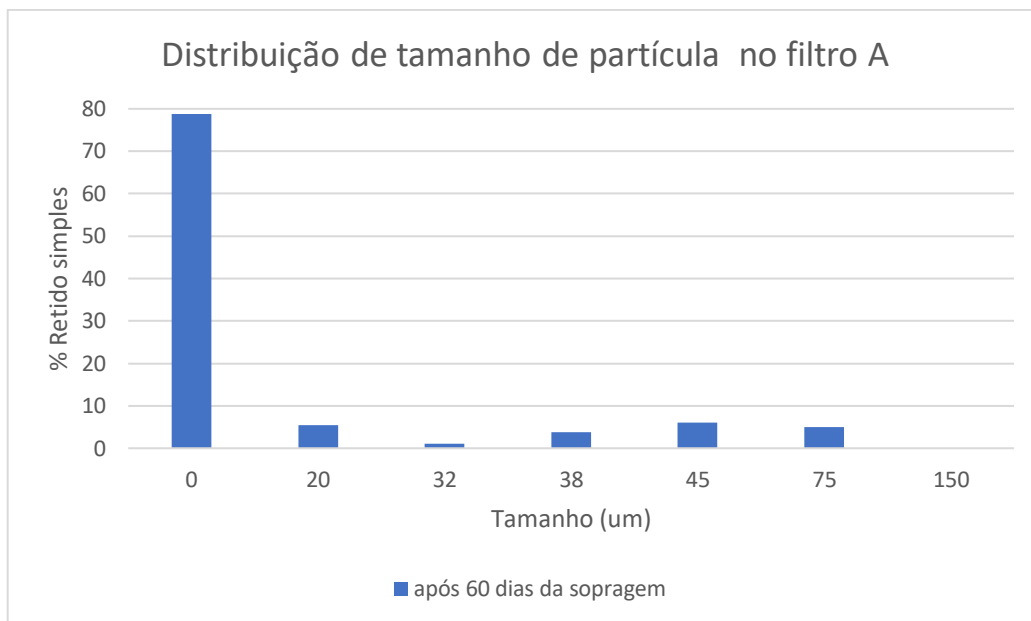
Figura 19- Distribuição do tamanho de partículas no filtro A. a- antes do processo de sopragem; b- no momento do processo de amostragem. c- após 60 dias do processo de sopragem



(a)



(b)

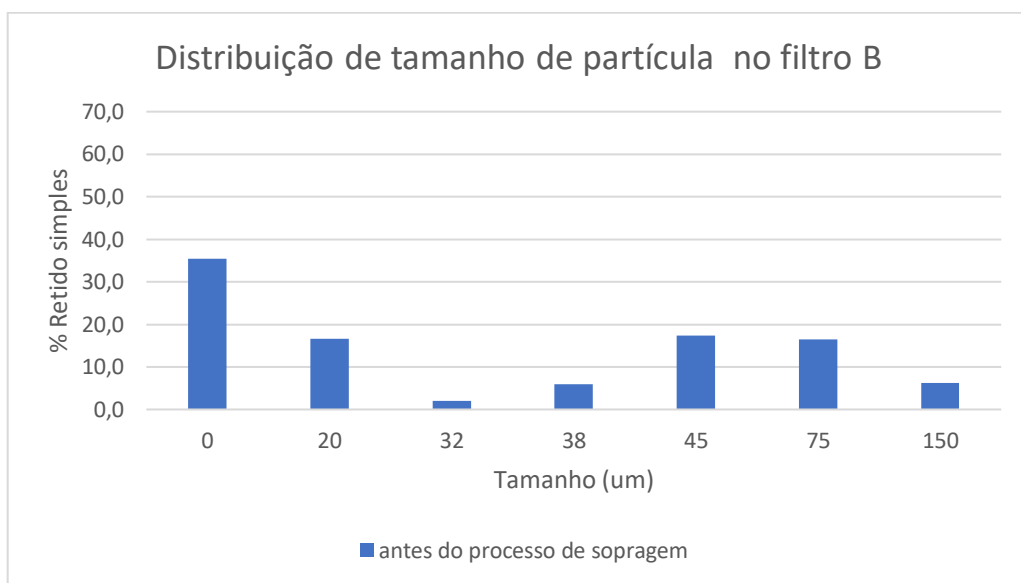


(c)

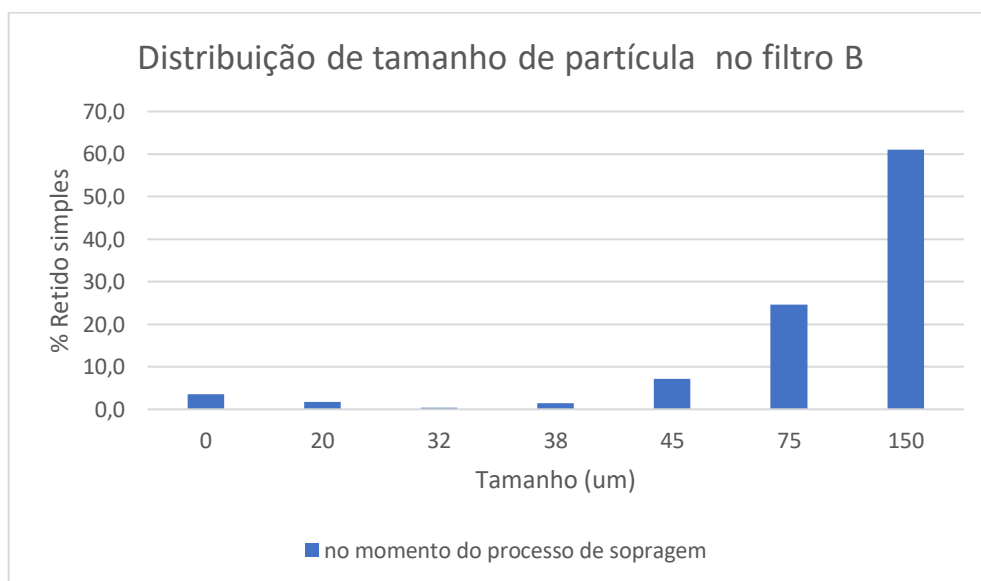
Fonte: Autoria própria

No filtro B, observa-se na Figura 20 que a distribuição de tamanho das partículas no momento do processo de sopragem apresentou uma maior heterogeneidade em relação ao tamanho das partículas no momento de saturação do filtro de manga (antes e após 60 dias de sopragem). Observa-se que os picos do gráfico da Figura 20b apresentam diferenças de tamanhos entre si quando comparado com os gráficos das Figuras 20a e 20c.

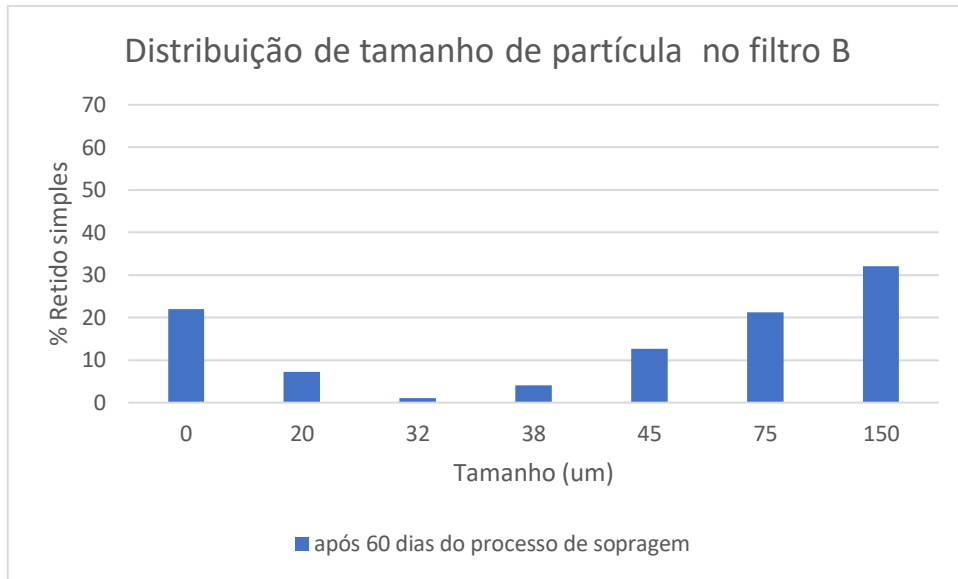
Figura 20- Distribuição do tamanho de partículas no filtro B. a- antes do processo de sopragem; b- no momento do processo de amostragem. c- após 60 dias do processo de sopragem



(a)



(b)

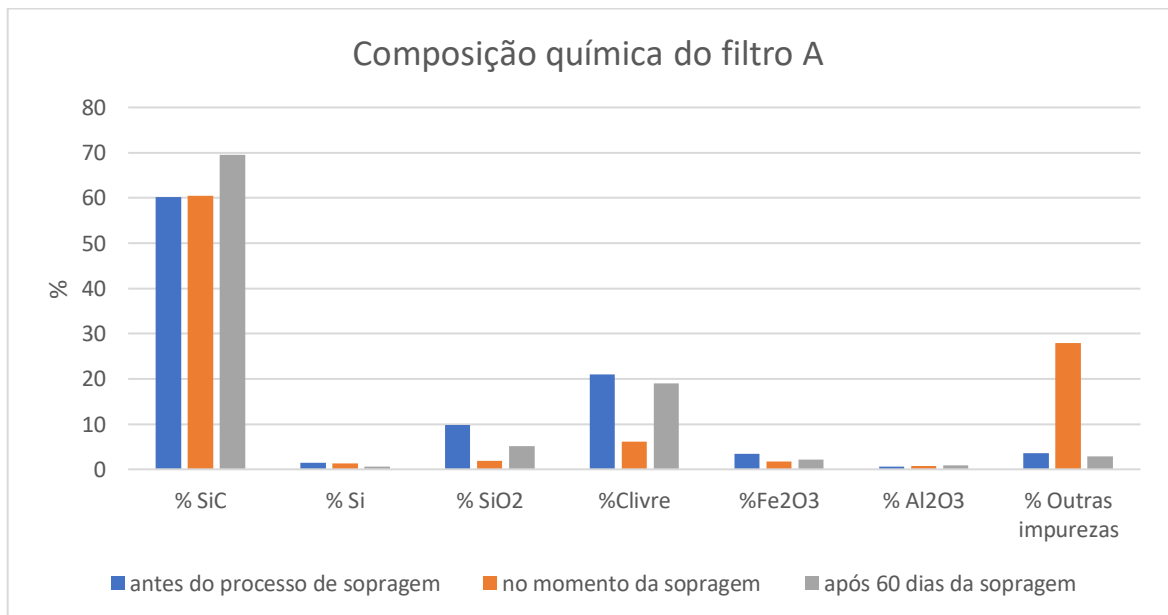


( c )

Fonte: Autoria própria

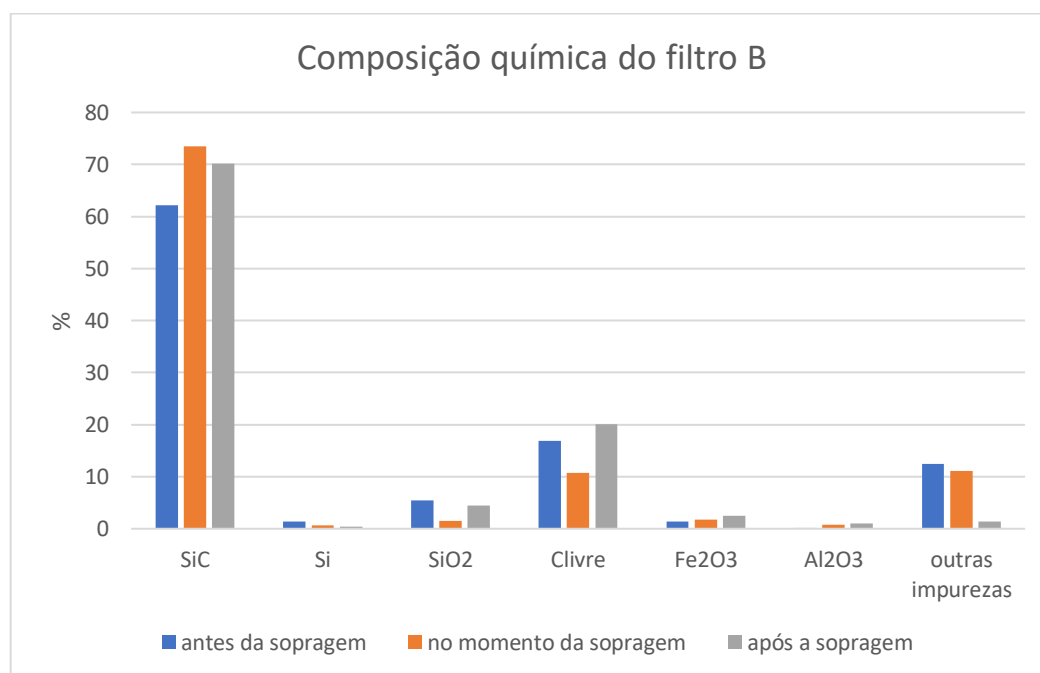
Não foi possível obter uma correlação entre a composição química do pó de filtro com o tamanho da partícula, conforme observa-se nas Figuras 21 e 22. Nelas, o percentual de SiC, Si<sub>livre</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e outras impurezas não apresentaram uma relação entre o tamanho das partículas e as diferentes etapas da sinteragem. Entretanto o SiO<sub>2</sub> e o C<sub>livre</sub> diminuíram no momento da sinteragem. Além disso percebe-se que o material do filtro B é mais rico em SiC do que o filtro A.

Figura 21- Composição química das partículas coletadas do filtro A



Fonte: Autoria própria

Figura 22- Composição química do filtro B



Fonte: Autoria própria

As tabelas 1 e 2 mostram a composição química e a densidade das amostras coletadas nos filtros A e B. O material coletado no filtro A apresenta um teor de impurezas superior que o material coletado no filtro B. Isso pode ser justificado pela distribuição granulométrica do material do filtro A ser mais fino que no filtro B, pois toda a impureza tende a ir para o material fino captado pelos filtros de mangas já que as etapas de processamento que os filtros estão localizados produzem carboneto de silício com um teor de SiC superior a 90%.

Tabela 1: Resultados químicos e da densidade das amostras do filtro A conforme as técnicas descritas nas ABNT 9286 e ABNT 9136.

	FILTRO A							
	% Densidade	% SiC	% Si	% SiO <sub>2</sub>	%C <sub>livre</sub>	%Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% Outras impurezas
Antes da sopragem	0,52	60,12	1,38	9,8	20,99	3,43	0,66	3,62
Sopragem	0,74	60,43	1,35	1,8	6,15	1,69	0,68	27,9
Após 60 dias da sopragem	0,45	69,49	0,58	5,06	19	2,16	0,82	2,89

Fonte: Autoria própria



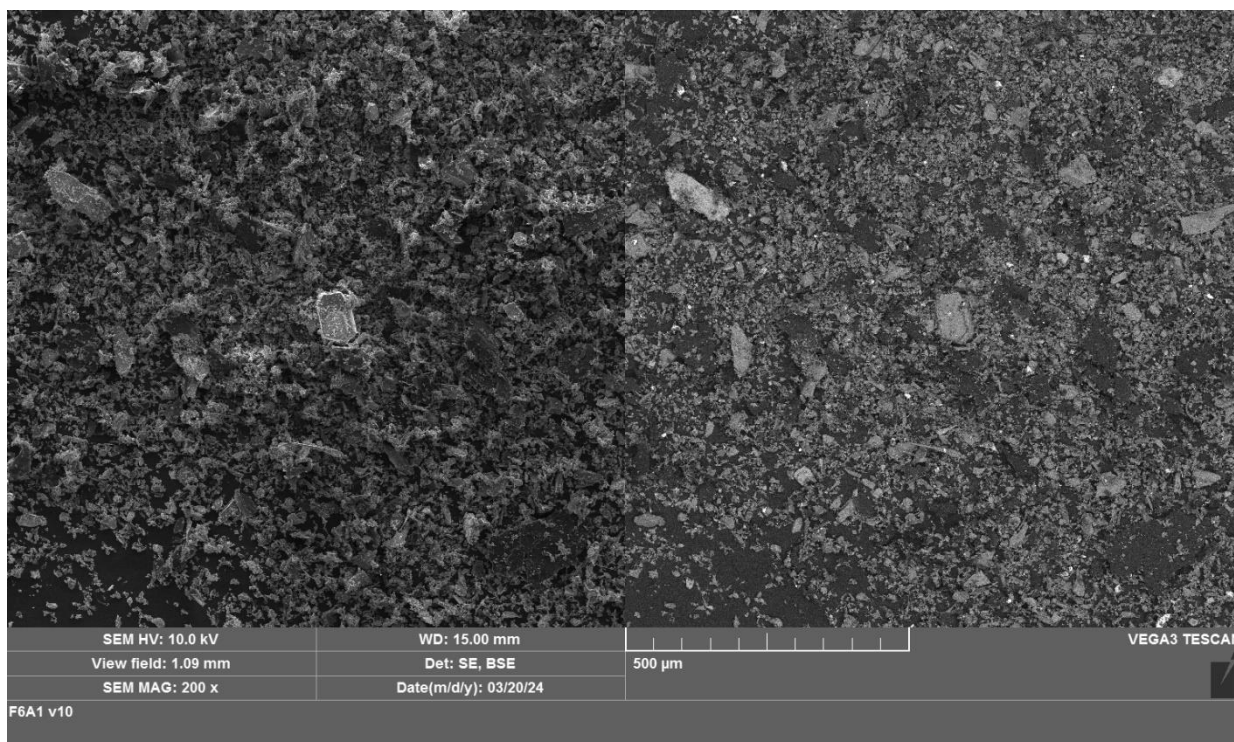
Tabela 2: Resultados químicos e da densidade das amostras do filtro B conforme as técnicas descritas nas ABNT 9286 e ABNT 9136.

	FILTRO B							
	% Densidade	% SiC	% Si	% SiO <sub>2</sub>	% C <sub>livre</sub>	% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% Outras impurezas
Antes da sopragem	0,61	62,17	1,35	5,47	16,92	1,44	0,15	12,5
Sopragem	1,05	73,54	0,6	1,53	10,72	1,79	0,76	11,06
Após 60 dias da sopragem	0,44	70,13	0,46	4,42	20,12	2,51	1	1,36

Fonte: Autoria própria

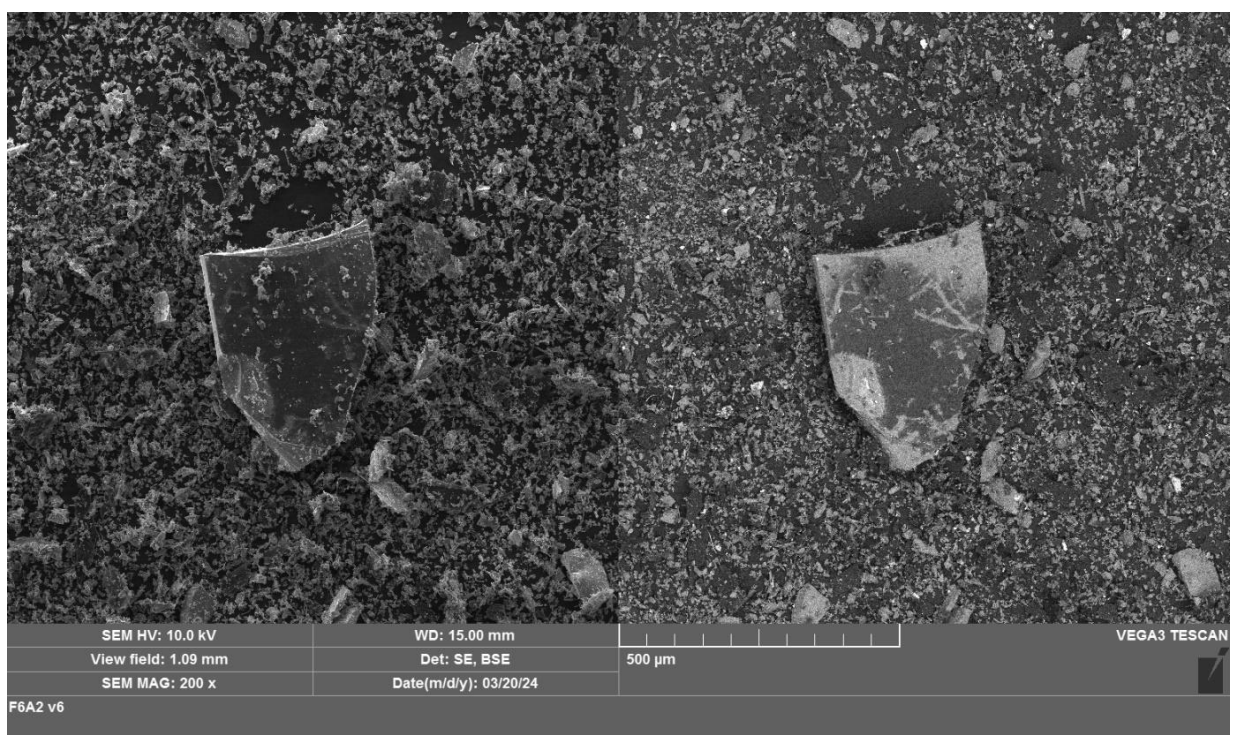
As Figura 23, Figura 24, Figura 25, Figura 26, Figura 27 e Figura 28 mostram as imagens observadas no MEV geradas pelos elétrons retroespalhados nos filtros A e B. Sabe-se que o coeficiente de emissão  $\eta$  dos elétrons retroespalhados está diretamente relacionado com o número atômico  $Z$  que permite um mecanismo de contraste da imagem, sendo possível observar na imagem regiões com diferentes composições. Quanto maior o número atômico do material, mais clara é a região. Neste contexto é possível observar poucos pontos claros nas figuras citadas anteriormente, provavelmente essa região corresponde aos contaminantes como Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ou SiO<sub>2</sub> que são contaminantes presentes no carboneto de silício.

Figura 23- Imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura (elétrons retroespalhados) do pó de filtro A antes do processo de sopragem



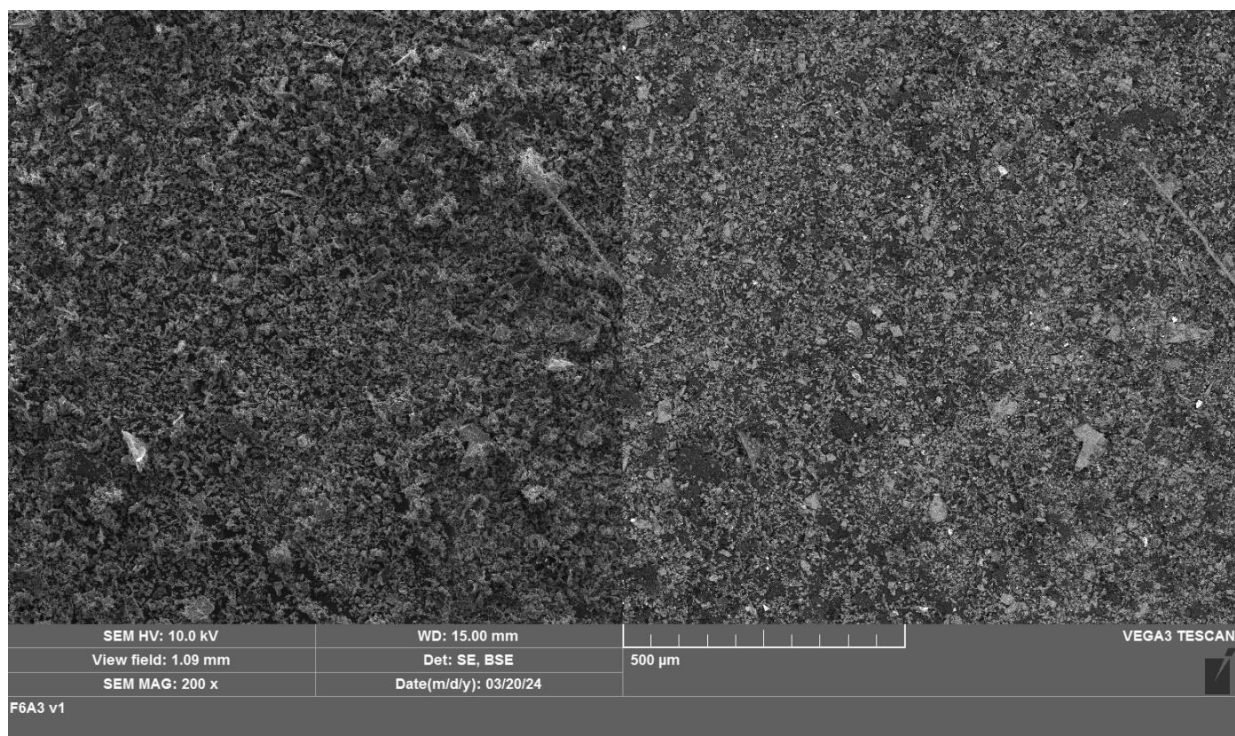
Fonte: Autoria própria

Figura 24- Imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura (elétrons retroespalhados) do pó de filtro A durante o processo de sopragem



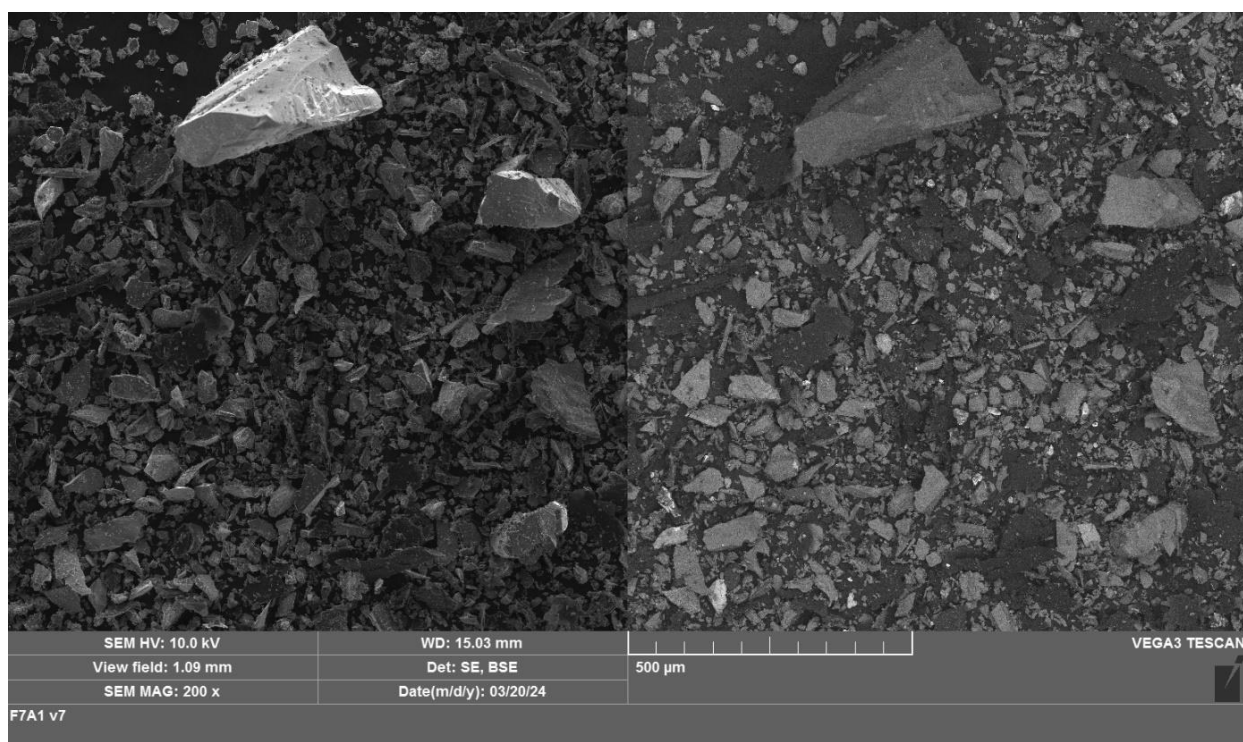
Fonte: Autoria própria

Figura 25- Imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura (elétrons retroespalhados ) do pó de filtro A após o processo de sopragem



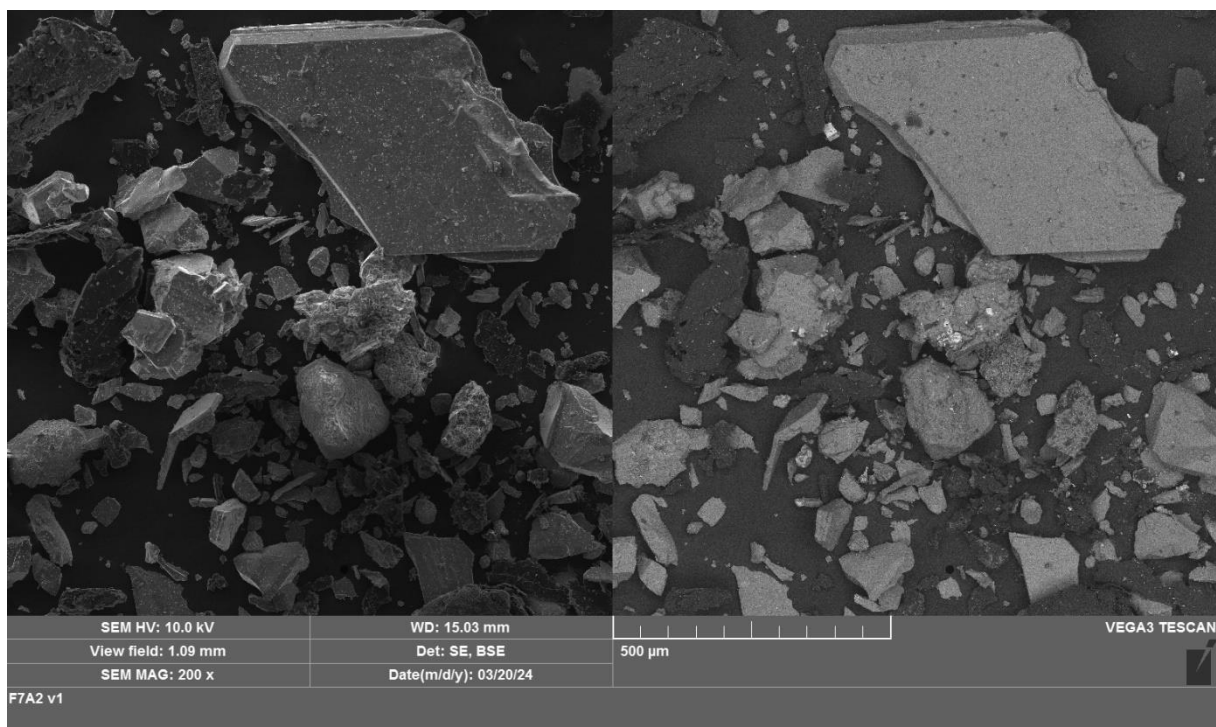
Fonte: Autoria própria

Figura 26- Imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura (elétrons retroespalhados ) do pó de filtro B antes do processo de sopragem



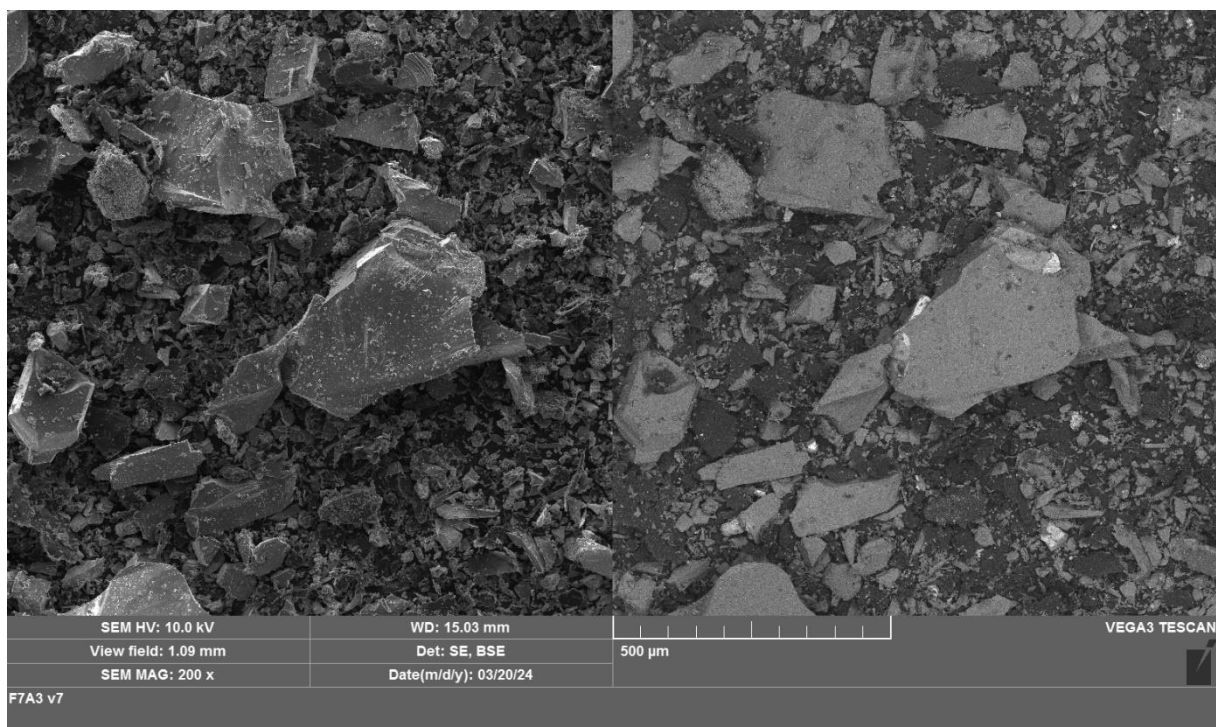
Fonte: Autoria própria

Figura 27- Imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura (elétrons retroespalhados ) do pó de filtro B durante o processo de sopragem



Fonte: Autoria própria

Figura 28- Imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura (elétrons retroespalhados ) do pó de filtro B após o processo de sopragem

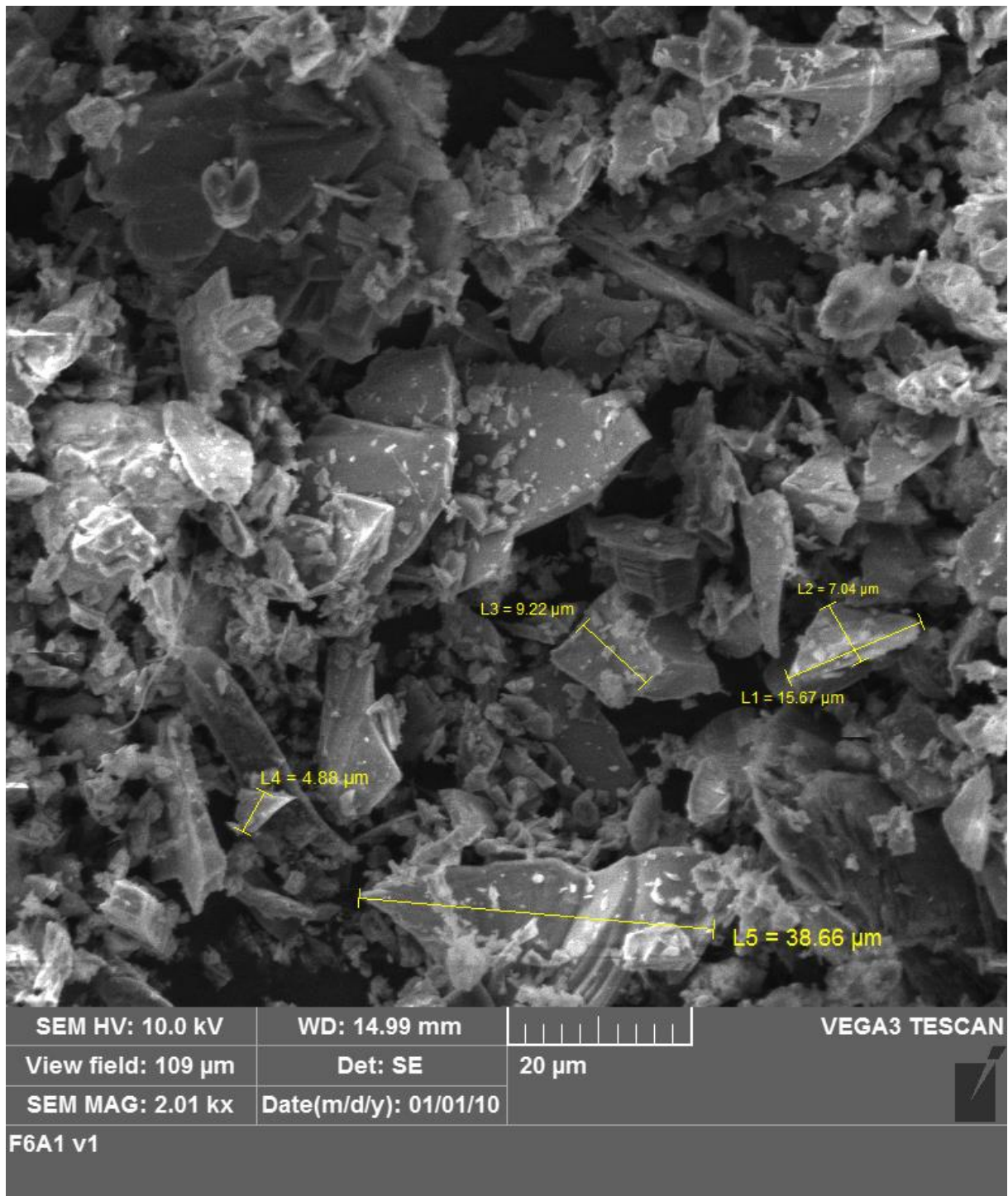


Fonte: Autoria própria

As Figuras 29, 30,31,32,33, 34, 35,36,37,38,39 e 40 mostram a determinação de tamanho das partículas do material obtido nos filtros A e B através da utilização do microscópio eletrônico de varredura. As partículas apresentaram formato irregular e aglomeração de partículas finas. As regiões escolhidas para determinar o tamanho das partículas através do microscópio eletrônico de varredura mostraram que as partículas estão concentradas na faixa de tamanho abaixo de 20  $\mu\text{m}$  em todas as etapas da sopragem (antes, durante, após 60 dias), conforme observa-se nas Figuras 29 ,30,31,32, 33 e 34. Isso já era esperado, pois nos ensaios granulométricos a concentração das partículas na faixa abaixo de 20  $\mu\text{m}$  no filtro antes da sopragem, durante a sopragem e após 60 dias da sopragem foram respectivamente, 73%, 52% e 79% no filtro A. Isso representa uma maior proporção dessa faixa de tamanho na amostra, dificultando encontrar na amostra outras faixas de tamanho.

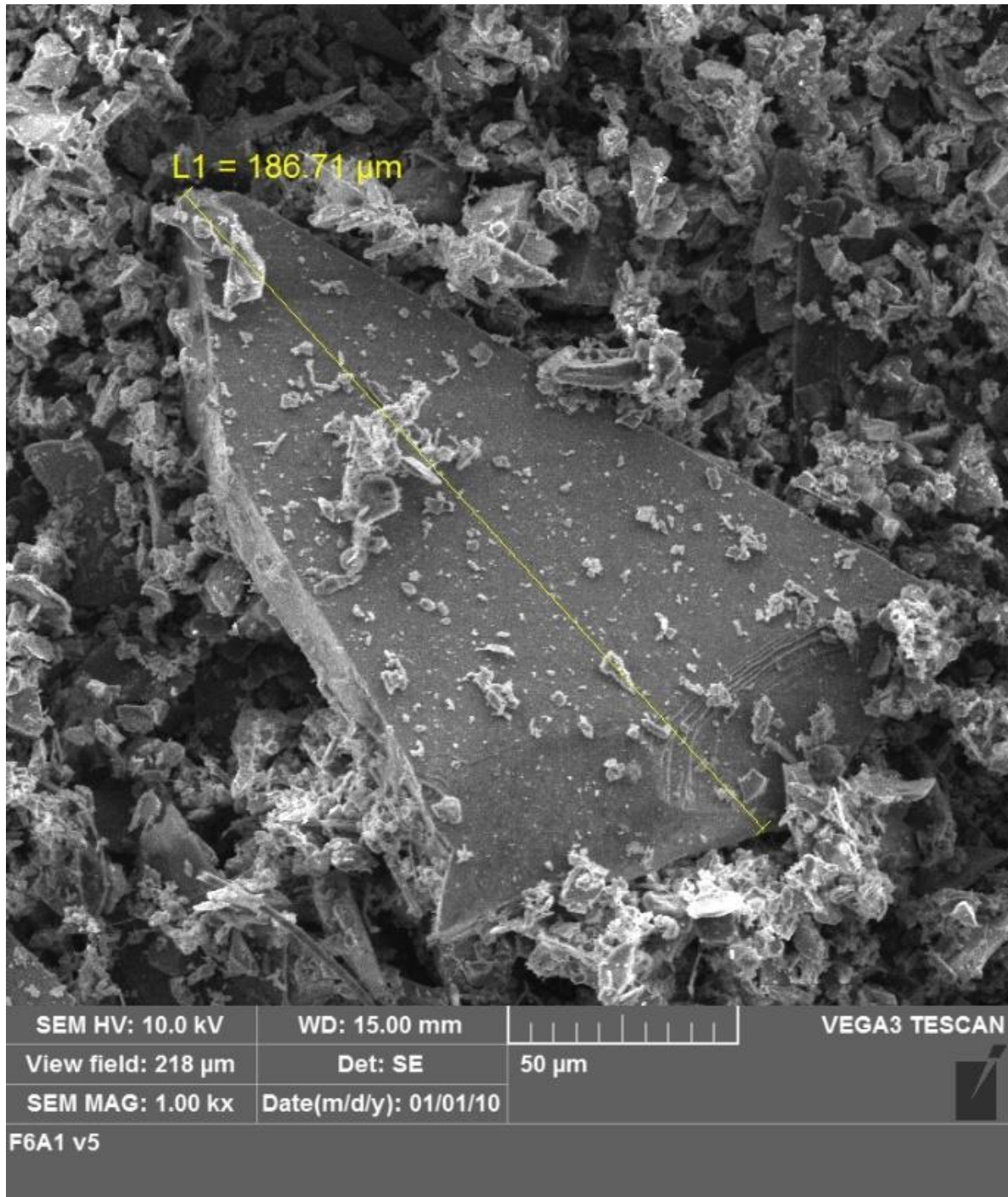


Figura 29- Determinação de tamanho de partícula através do microscópio eletrônico de varredura do pó de filtro A antes da sopragem com magnitude 2.000



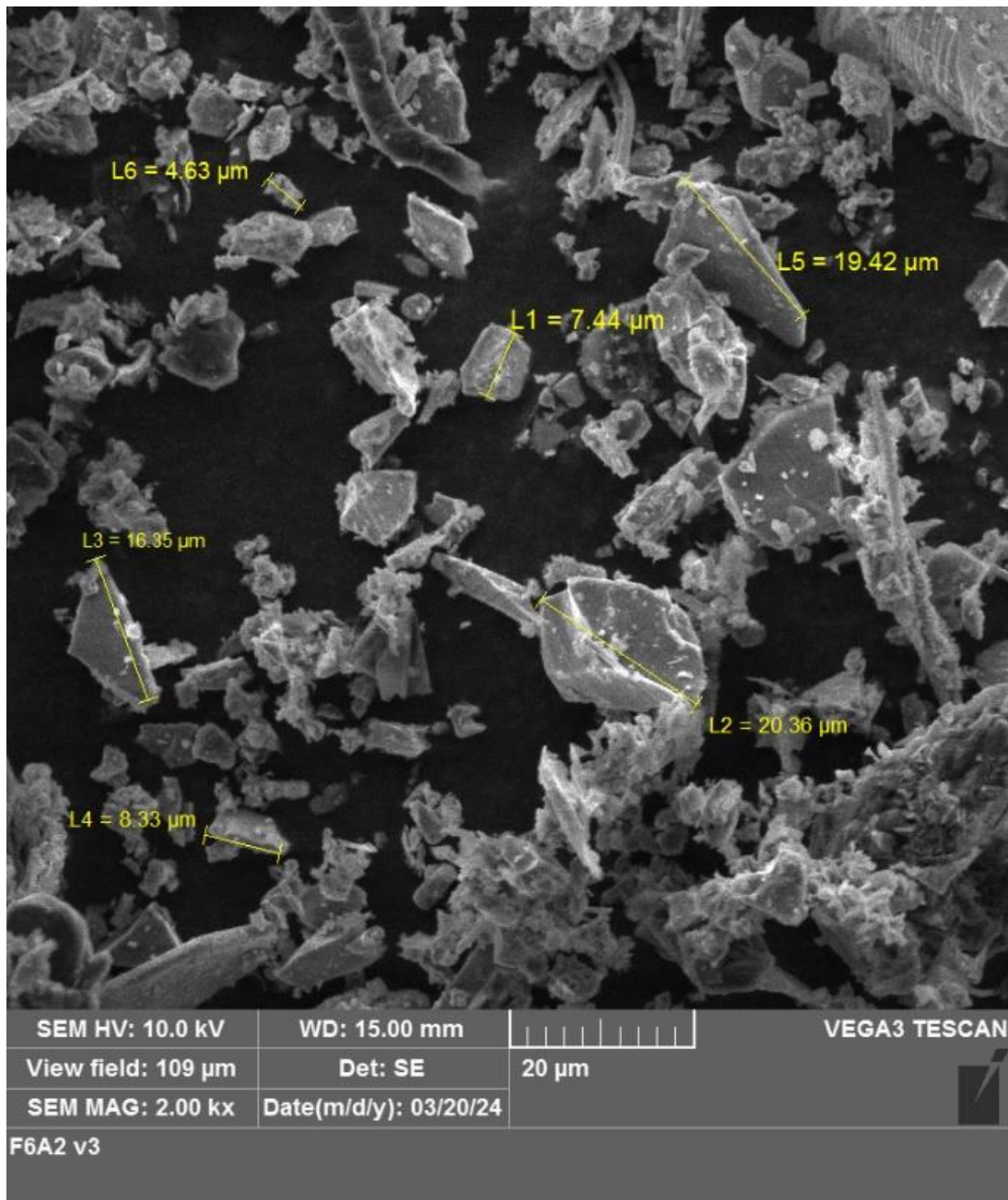
Fonte: Autoria própria

Figura 30- Determinação de tamanho de partícula através do microscópio eletrônico de varredura do pó de filtro  
A antes da sopragem com magnitude 1.000



Fonte: Autoria própria

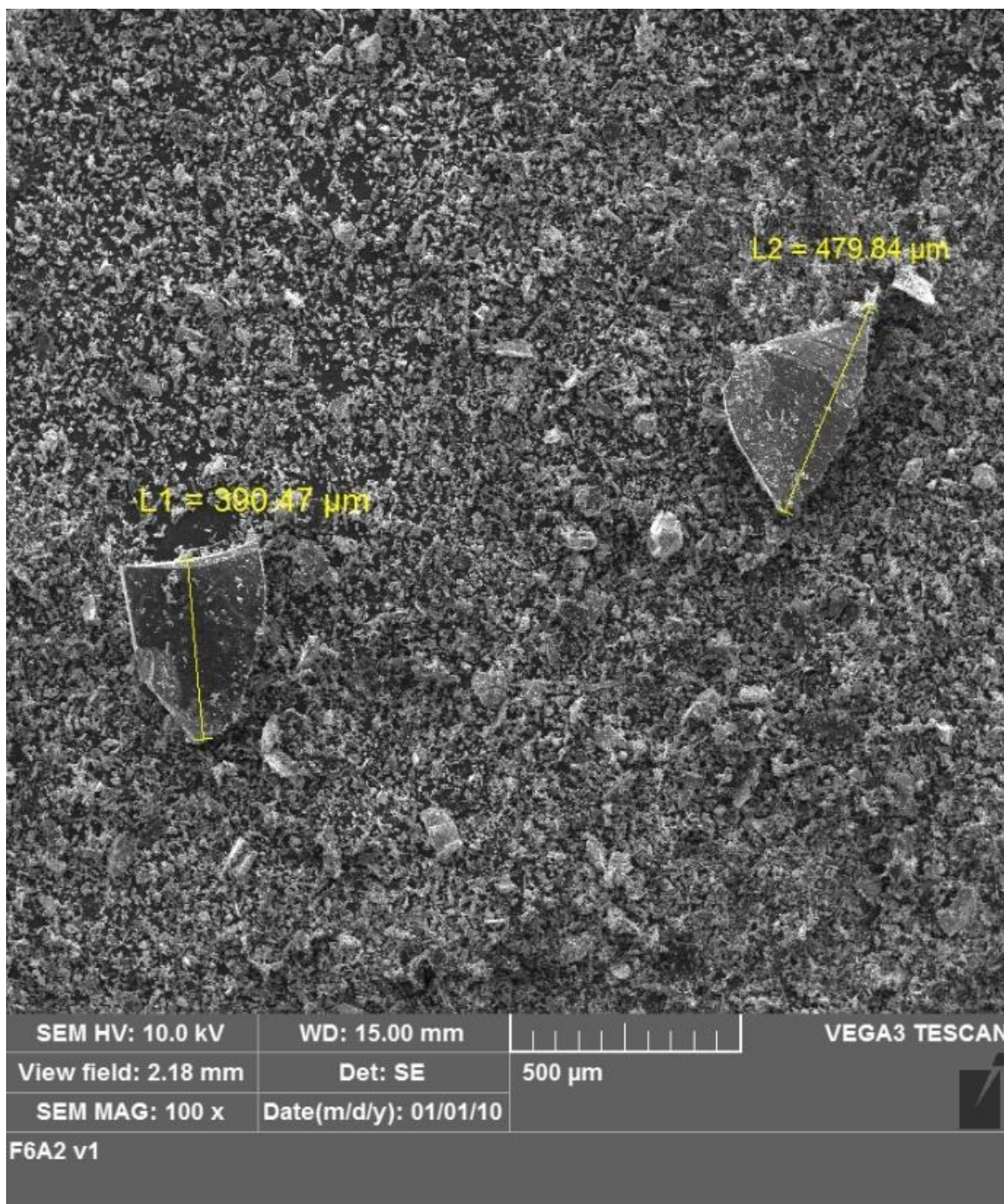
Figura 31- Determinação de tamanho de partícula através do microscópio eletrônico de varredura do pó de filtro A durante a sopragem com magnitude 2.000



Fonte: Autoria própria

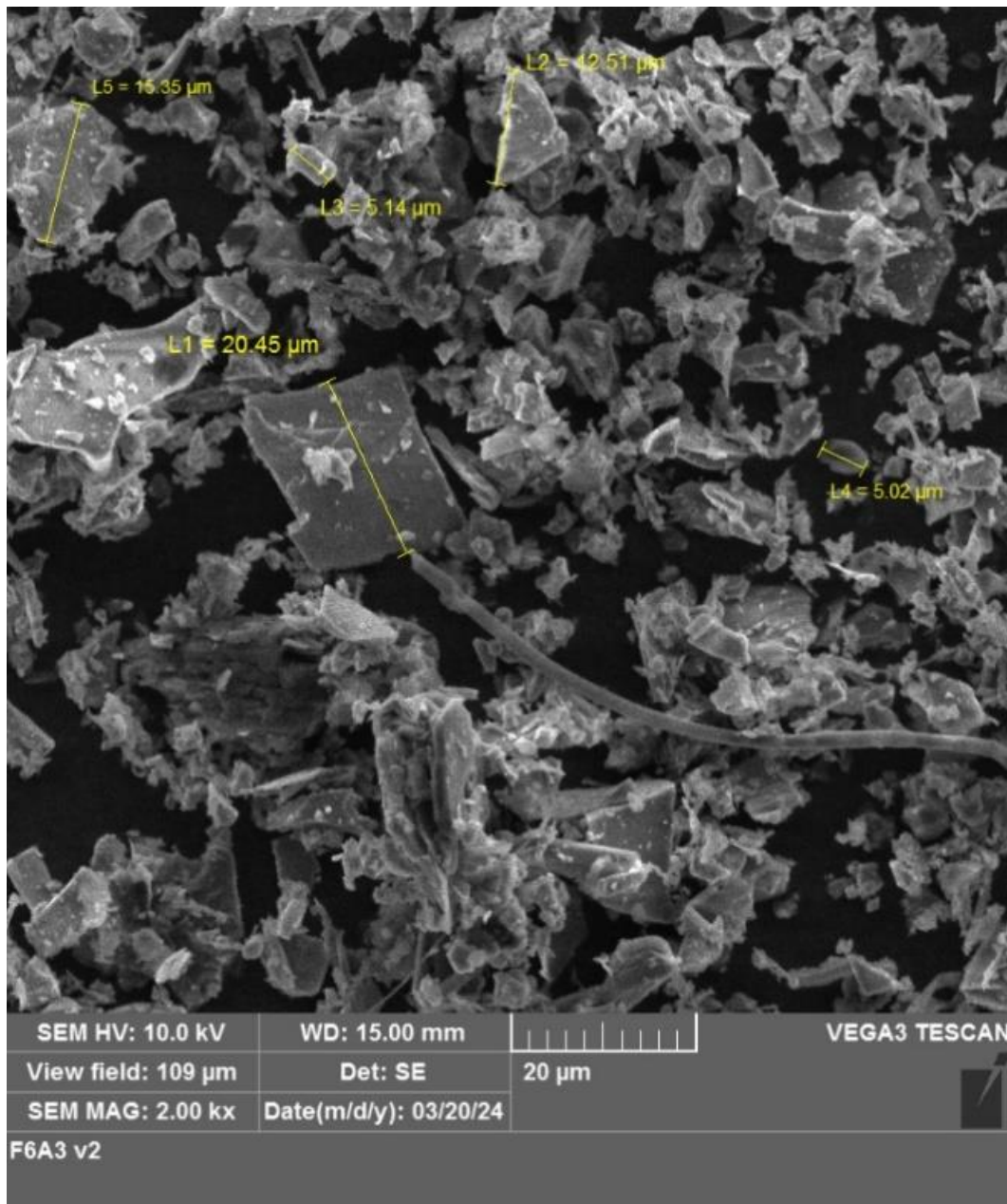


Figura 32- Determinação de tamanho de partícula através do microscópio eletrônico de varredura do pó de filtro  
A durante a sopragem com magnitude 100



Fonte: Autoria própria

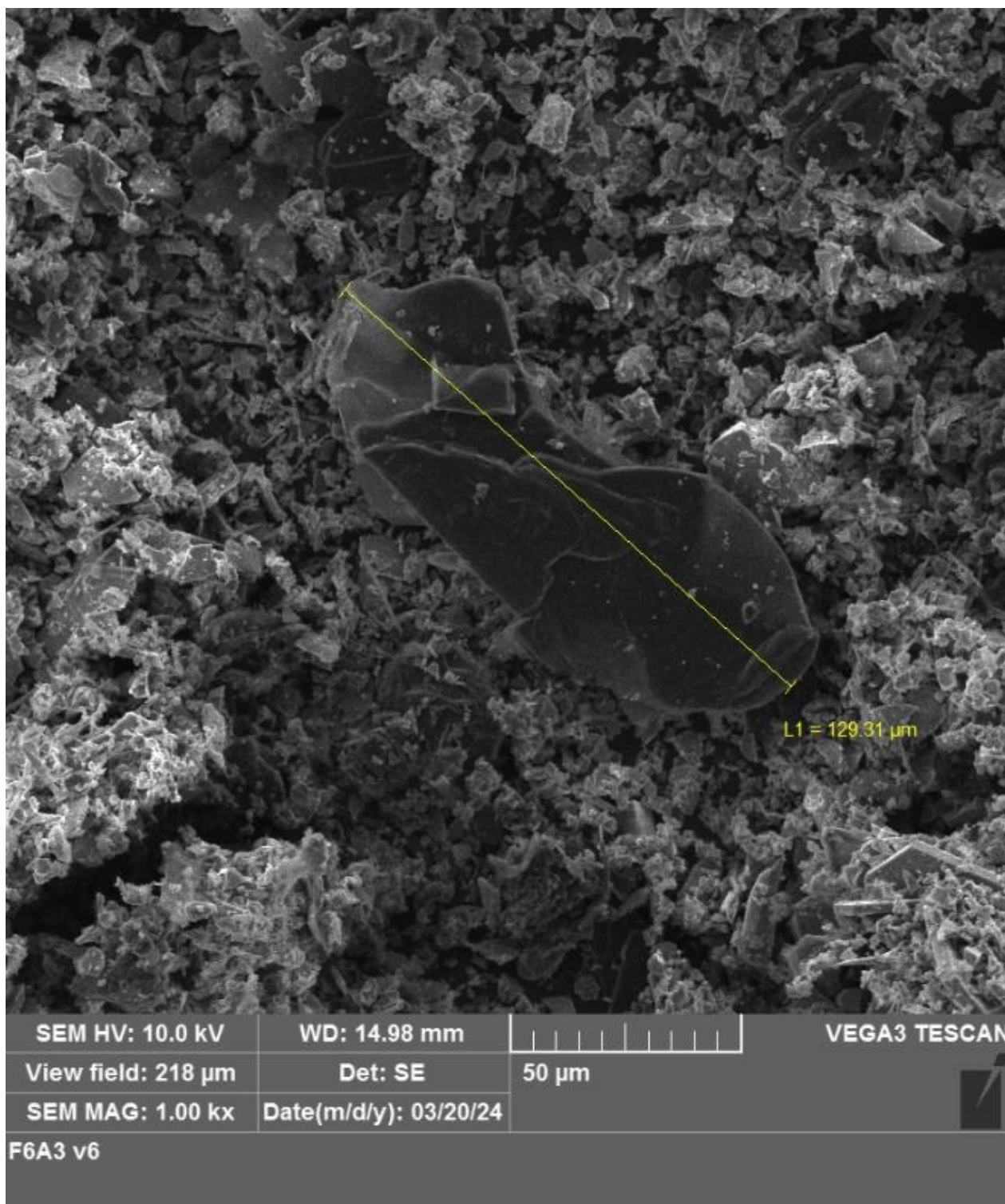
Figura 33- Determinação de tamanho de partícula através do microscópio eletrônico de varredura do pó de filtro A após a sopragem com magnitude 2.000



Fonte: Aatoria própria



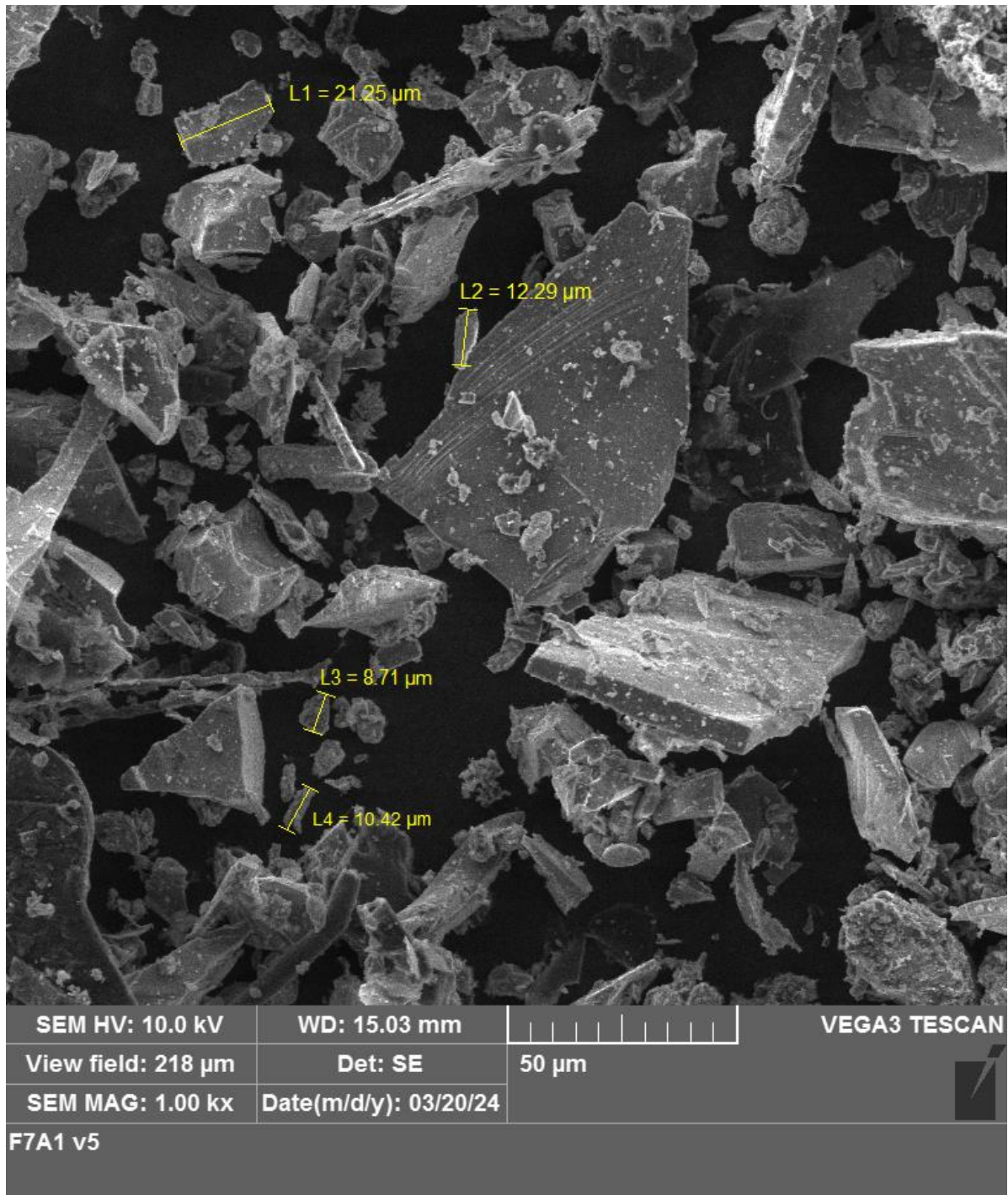
Figura 34- Determinação de tamanho de partícula através do microscópio eletrônico de varredura do pó de filtro  
A após a sopragem com magnitude 1.000



Fonte: Autoria própria

No filtro B observa-se a predominância de partículas de tamanho maiores, como por exemplo acima de 20  $\mu\text{m}$  em relação ao filtro A conforme observa-se nas Figuras 35,36 ,37 ,38, 39 e 40.

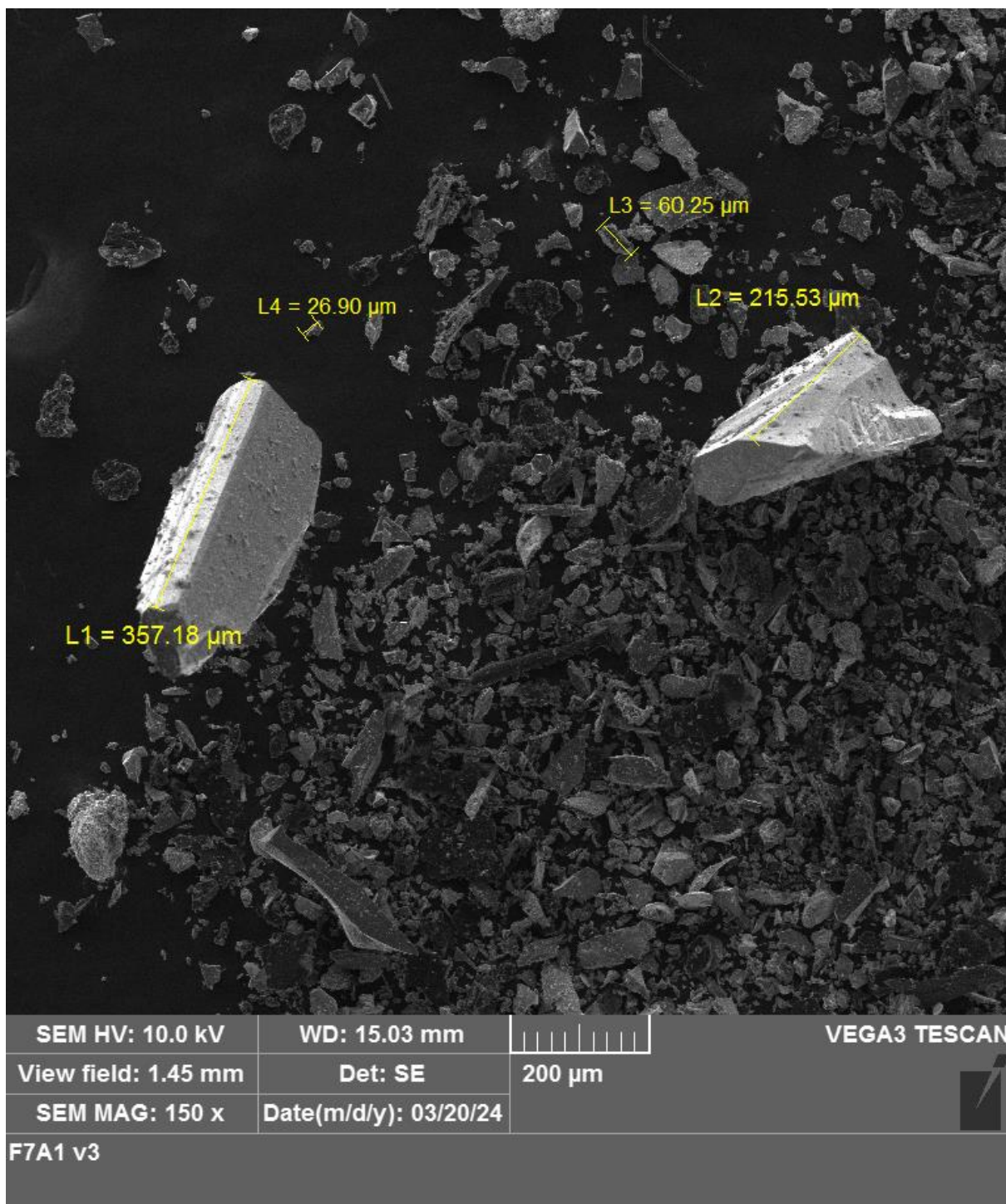
Figura 35- Determinação de tamanho de partícula através do microscópio eletrônico de varredura do pó de filtro B antes do processo de sopragem com magnitude 1.000



Fonte: Autoria própria

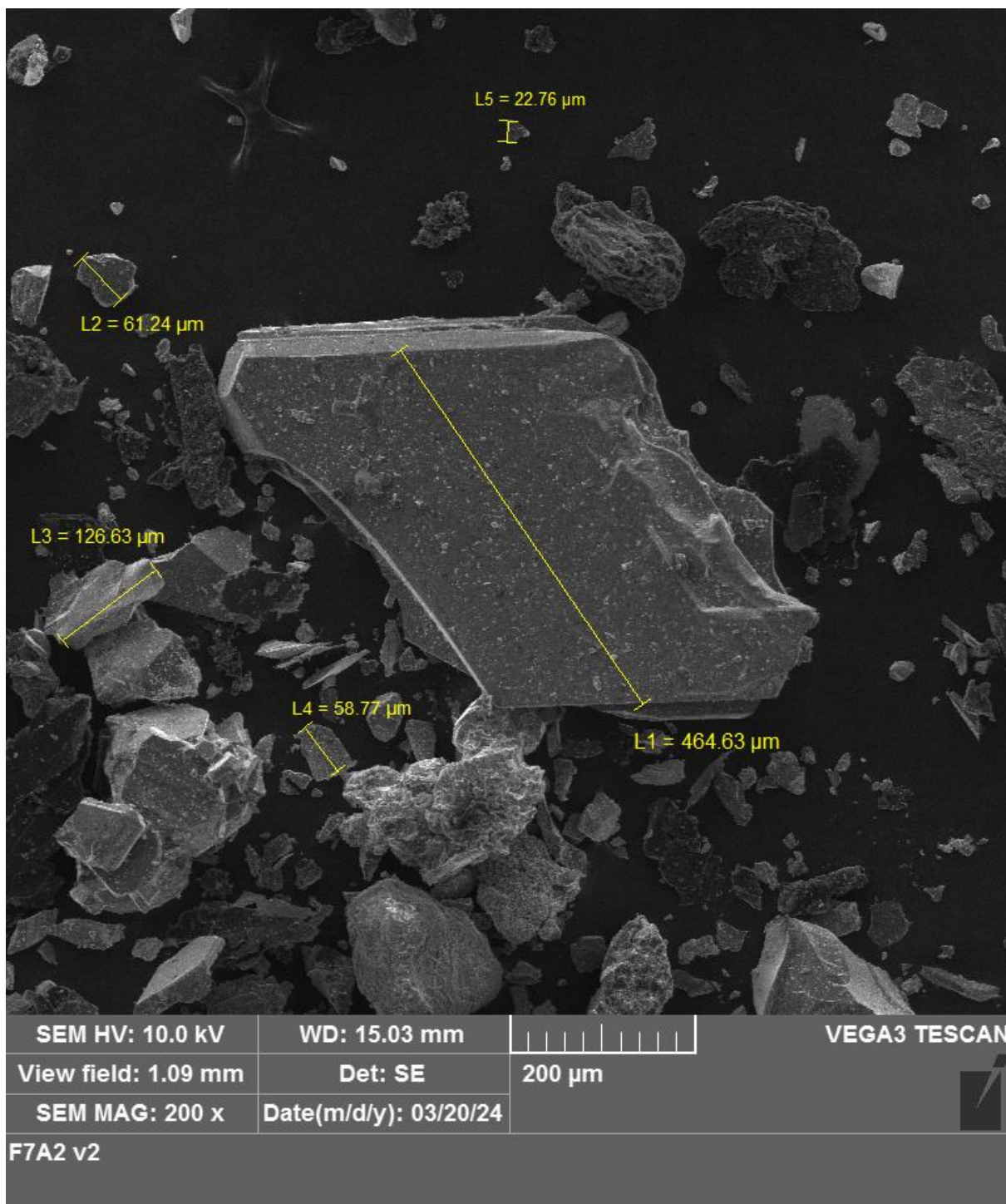


Figura 36- Determinação de tamanho de partícula através do microscópio eletrônico de varredura do pó de filtro B antes do processo de sopragem com magnitude 150



Fonte: Autoria própria

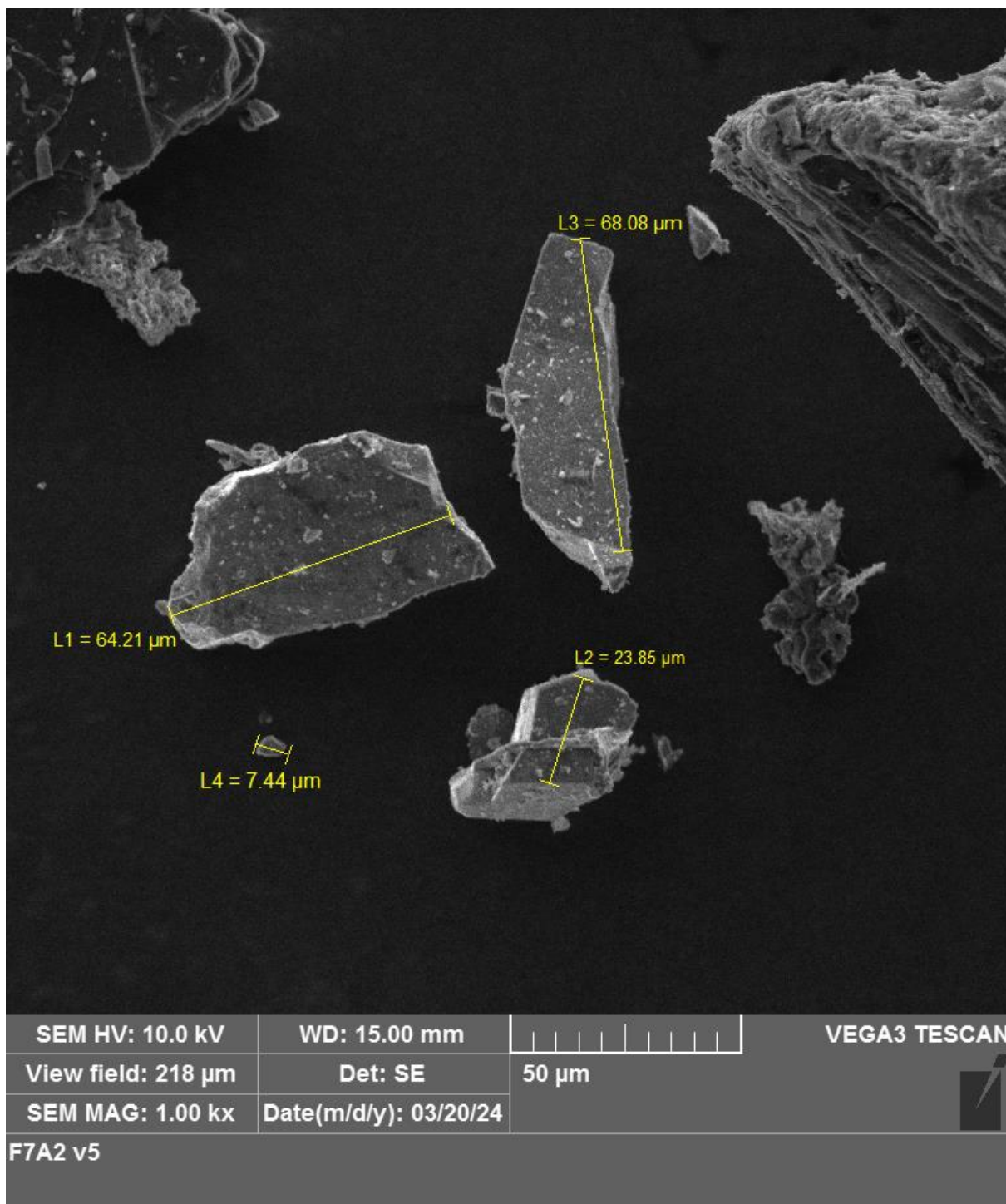
Figura 37- Determinação de tamanho de partícula através do microscópio eletrônico de varredura do pó de filtro B durante o processo de sopragem com magnitude 200



Fonte: Autoria própria

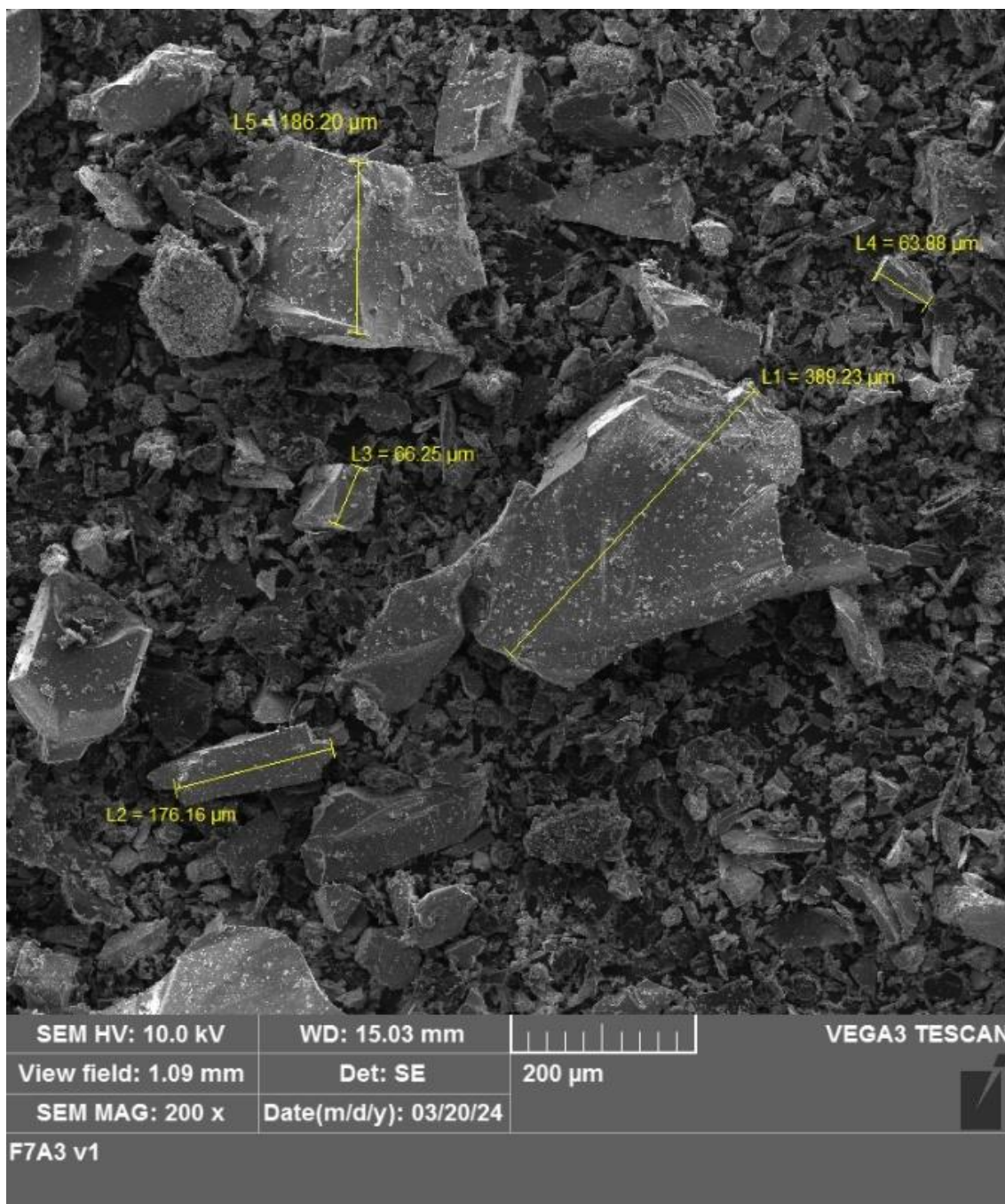


Figura 38- Determinação de tamanho de partícula através do microscópio eletrônico de varredura do pó de filtro B durante o processo de sopragem com magnitude 1.000



Fonte: Autoria própria

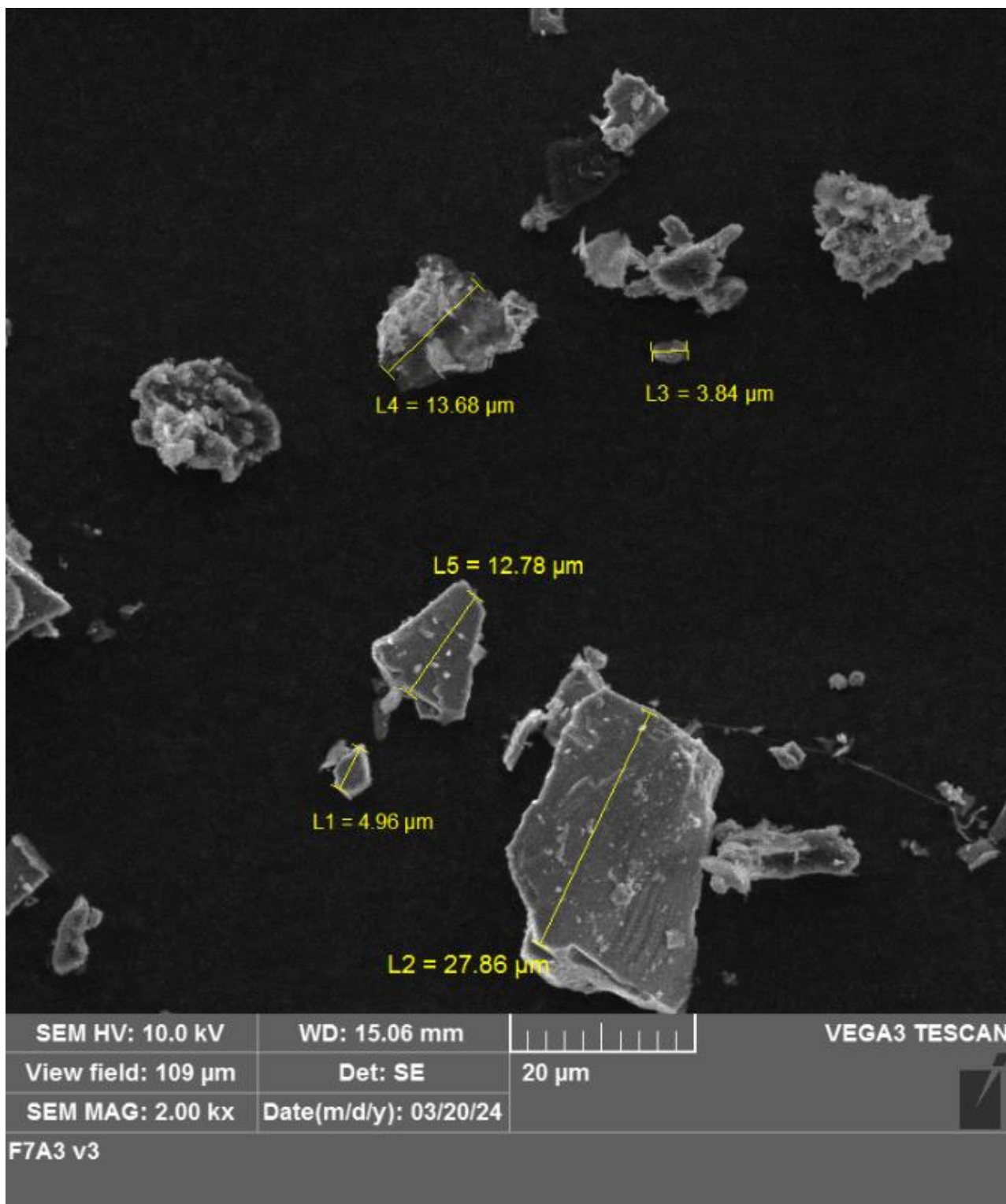
Figura 39-Determinação de tamanho de partícula através do microscópio eletrônico de varredura do pó de filtro B após o processo de sopragem com magnitude 200



Fonte: Autoria própria



Figura 40- Determinação de tamanho de partícula através do microscópio eletrônico de varredura do pó de filtro B após o processo de sopragem com magnitude 2.000



Fonte: Autoria própria

## 6. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos, existe uma relação direta entre o tamanho das partículas, a densidade solta do pó de carboneto de silício coletado na moega do filtro de manga com o acúmulo de material retido no filtro, ou seja, a partir dessas relações é possível estabelecer uma periodicidade de limpeza dos filtros. A periodicidade será determinada quando as análises de distribuição granulométrica e densidade solta do material capturado na moega apresentarem o  $d_{90}$  reduzido em 50% em relação a amostra coletada assim que for realizado a limpeza do filtro de manga ou uma redução de 40% na densidade solta nas mesmas condições. Entretanto esse resultado pode ser limitado devido ao baixo número de amostras coletadas de pó de filtro.

Conforme os resultados da análise granulométrica, o material mais fino tende a ficar retido no filtro e o material mais grosso é captado na moega, ou seja, quanto mais tempo o filtro fica sem a realização da limpeza por sopragem mais fino é o material captado na moega do filtro, conforme mostrou os resultados  $d_{90}$  do filtro A e filtro B antes da sopragem, no momento da sopragem e após a sopragem, respectivamente,  $D_{90}$  do filtro A = 41,82  $\mu\text{m}$ ,  $D_{90}$  do filtro A = 110,53  $\mu\text{m}$ ,  $D_{90}$  do filtro A = 39,17  $\mu\text{m}$ ,  $D_{90}$  do filtro B = 68,05  $\mu\text{m}$ ,  $D_{90}$  do filtro B = 137,70  $\mu\text{m}$  e  $D_{90}$  do filtro B = 126,56  $\mu\text{m}$ .

Ao determinar o tamanho de algumas partículas por meio do microscópio eletrônico, observou-se a predominância de partículas abaixo de 20  $\mu\text{m}$  em todas as etapas da sopragem (antes, durante, após 60 dias) e esse dado foi confirmado no ensaio granulométrico, onde a concentração de partículas abaixo de 20  $\mu\text{m}$  representou cerca de 50% a 80% da amostra.

No ensaio de análise de densidade solta, a densidade do pó de filtro aumentou após o processo de sopragem. A densidade solta estabelece uma dependência com a distribuição do tamanho de partícula, sendo que quanto maior a diferença entre os tamanhos das partículas, maior será a densidade desse material. No filtro B essa relação não foi possível observar na etapa durante a sopragem devido à falta de telas de ensaio compreendidas no intervalo de 75  $\mu\text{m}$  a 150  $\mu\text{m}$ , já que aproximadamente 85% do material está concentrado nessas telas.

Não foi possível obter uma correlação entre a composição química do pó de filtro com o tamanho da partícula. Nelas, o percentual de SiC, Si<sub>livre</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e

outras impurezas não apresentaram uma relação entre o tamanho das partículas e as diferentes etapas da sopragem. Entretanto o  $\text{SiO}_2$  e o  $\text{C}_{\text{livre}}$  diminuíram no momento da sopragem. Além disso percebe-se que o material do filtro B é mais rico em SiC do que o filtro A.

A partir das imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura com detectores de elétrons retroespalhados, observou-se poucos pontos claros onde provavelmente essa região corresponde aos contaminantes como  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ou  $\text{SiO}_2$  que são contaminantes presentes no carboneto de silício.

Para os próximos estudos espera-se a análise de um maior número de amostra para estabelecer um novo método para identificação de saturação de filtro manga.

## 7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados e discussões apresentados neste trabalho, é possível realizar as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- Realizar um número maior de coleta de amostras na moega dos filtros. Para cada intervalo de sopragem (antes, durante e após) pode ser coletados um total de 15 amostras, sendo 5 amostras coletadas em dias diferentes para cada intervalo;
- Realizar a análise da granulometria em um analisador de tamanho de partículas Malvern, pois o método utilizado neste trabalho foi limitado a partículas de até 20  $\mu\text{m}$ ;
- Realizar a medição de vazão de sucção do ar dos filtros em cada intervalo da sopragem.
- Realizar as análises por Difração de Raio X, Fluorescência de Raio X e Microscópio Eletrônico de Varredura com Espectroscopia de Energia Dispersiva para fortalecer os resultados obtidos conforme ABNT

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 9286**: Grãos abrasivos e material bruto - Análise química do carbeto de silício. Rio de Janeiro: ABNT, 2014. 25 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6946**: Materiais refratários - Determinação granulométrica por peneiramento de matérias-primas refratárias e materiais refratários não conformados. Rio de Janeiro: ABNT, 2015. 7p.

ARNOLDUSSEN *et al.* (2018). Cellular responses of human astrocytoma cells to dust from the Acheson process: An in vitro study. **NeuroToxicology**, 65, 241–247. <https://doi.org/10.1016/j.neuro.2017.11.001>

BRITO, Gabriel Ferreira da Silva; SODRÉ, Fernando Fabríz; ALMEIDA, Fernanda Vasconcelos de. Impact of Particulate Matter on Air Quality. **Revista Virtual de Química**, [S.L.], v. 10, n. 5, p. 1335-1354, 2018. Sociedade Brasileira de Química (SBQ). <http://dx.doi.org/10.21577/1984-6835.20180092>.

CETESB (org.). **Poluentes**. 2024. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/poluentes/>. Acesso em: 05 dez. 2023

CHANDRAPPA, Ramesha; DAS, Diganta Bhusan. Air Pollution Control. *Environmental Health - Theory and Practice*, [S.L.], p. 127-140, 2021. **Springer International Publishing**. [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-64484-0\\_6](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-64484-0_6).

COUTO *et al.* (2020). **Estimativa da concentração média diária de material particulado fino na região do Complexo Industrial e Portuário do Pecém, Ceará, Brasil**. *Cadernos de Saúde Pública*, 36(7). <https://doi.org/10.1590/0102-311x00177719>

DERISIO, José Carlos. (2017). **Introdução ao controle de poluição ambiental** (5th ed.). Oficina de textos.

E, Papanasam *et al.* A Comprehensive Review of Recent Progress, Prospect and Challenges of Silicon Carbide and its Applications. *Silicon*, [S.L.], v. 14, n. 18, p. 12887-12900, 30 jun. 2022. **Springer Science and Business Media** LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s12633-022-01998-9>.

FERREIRA da Silva Brito *et al.* (2018b). Impact of Particulate Matter on Air Quality. **Revista Virtual de Química**, 10(5), 1335–1354. <https://doi.org/10.21577/1984-6835.20180092>

FIVEN (org.). **Production of silicon carbide**. 2024. Disponível em: <https://www.fiven.com/world-of-silicon-carbide/overview/>. Acesso em: 24 jun. 2024.

FREIRE, Paulo. (1989). **A importância do ato de ler** (23rd ed.). Cortez Editora.

GAO, *et al.* (2021). Efficient production of nanoporous silicon carbide from rice husk at relatively low temperature. **Mendeleev Communications**, 31(5), 715–717. <https://doi.org/10.1016/j.mencom.2021.09.041>

HOTZA, D. *et al.* (2020). Silicon carbide filters and porous membranes: A review of processing, properties, performance and application. **Journal of Membrane Science**, 610, 118193. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2020.118193>

IEMA: Instituto de Energia e Meio Ambiente. (n.d.). **Plataforma da qualidade do ar**. Disponível em: < [Https://Energiaeambiente.Org.Br/Qualidadedoar/](https://Energiaeambiente.Org.Br/Qualidadedoar/)>. Acesso em 26 Jul de 2024

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. (2016). **Energy and Air Pollution**.

KOYANAGI *et al.* (2021). Additive manufacturing of silicon carbide for nuclear applications. **Journal of Nuclear Materials**, 543, 152577. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2020.152577>

KRUDYSZ, *et al.* (2009). Intra-community spatial variation of size-fractionated organic compounds in Long Beach, California. **Air Quality, Atmosphere & Health**, 2(2), 69–88. <https://doi.org/10.1007/s11869-009-0035-1>

LACERDA, Camila Raquel de. **INFLUÊNCIA DA COSTURA NA PERFORMANCE DE MEIOS FILTRANTES APLICADOS EM FILTRO DE MANGAS**. 2022. 103 f. Tese (Doutorado) - Curso de Doutorado em Engenharia Química, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2022.

LISBOA, Henrique de Melo. **CONTROLE DA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2014

LO, Li-Ming; HU, Shih-Cheng; CHEN, Da-Ren; PUI, David Y.H. Numerical study of pleated fabric cartridges during pulse-jet cleaning. **Powder Technology**, [S.L.], v. 198, n. 1, p. 75-81, fev. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2009.10.017>.

MARIN-MONTIN, J. *et al.* (2023). Multiscale thermomechanical assessment of silicon carbide-based nanocomposites in solar energy harvesting applications. **Applied Thermal Engineering**, 235, 121400. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121400>

MARVAL, J., & Tronville, P. (2022). Ultrafine particles: A review about their health effects, presence, generation, and measurement in indoor environments. **Building and Environment**, 216, 108992. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.108992>

MALVERN PANALYTICAL (org.). **Analisador de partículas**. Disponível em: <https://www.malvernpanalytical.com/br/products/category/particle-size-analyzers/particle-size-analyzer>  
price#:~:text=A%20Malvern%20Panalytical%20produz%20analísadores,confiabilidad e%20e%20facilidade%20de%20uso.. Acesso em: 24 jul. 2024.

MATIZAMHUKA, W. R. (2019). **Gas transport mechanisms and the behaviour of impurities in the Acheson furnace for the production of silicon carbide**. *Heliyon*, 5(4), e01535. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e0153>

MINISTÉRIO DA SAÚDE. Secretaria de Ciência, Tecnologia e Insumos Estratégicos. Departamento de Ciência e Tecnologia. **Síntese de Evidências para Políticas de Saúde: reduzindo a emissão do poluente atmosférico, material particulado em benefício da saúde no ambiente urbano** / Ministério da Saúde, Secretaria de Ciência, Tecnologia e Insumos Estratégicos, Departamento de Ciência e Tecnologia. – Brasília : Ministério da Saúde, 2016. 52 p. : il.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. Secretaria de Vigilância em Saúde. Departamento de Vigilância de Doenças e Agravos não Transmissíveis e Promoção da Saúde. **Saúde Brasil 2018 uma análise de situação de saúde e das doenças e agravos crônicos: desafios e perspectivas** / Ministério da Saúde, Secretaria de Vigilância em Saúde, Departamento de Vigilância de Doenças e Agravos Não Transmissíveis e Promoção da Saúde – Brasília: Ministério da Saúde, 2019. 424 p. : il.

MORAIS, Amanda *et al.* (2021). ANÁLISE GRANULOMÉTRICA: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA. **Journal of Exact Sciences**, 28, 5–10.

NOBUYUKI Horikawa *et al.* (2019). **Silicon carbide semiconductor device**. USRE49195E1.

OGUNTUYI, S.D. *et al.*. Improvement on the fabrication of SiC materials: processing, reinforcing phase, fabricating route.: a review. **International Journal Of Lightweight Materials And Manufacture**, [S.L.], v. 6, n. 2, p. 225-237, jun. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijlmm.2022.10.005>.

PARK, Sangcheol; JOE, Yun Haeng; SHIM, Joonmok; PARK, Hyunseol; SHIN, Weon Gyu. Non-uniform filtration velocity of process gas passing through a long bag filter. **Journal Of Hazardous Materials**, [S.L.], v. 365, p. 440-447, mar. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.10.098>.

PARK, Byung Hyun; KIM, Sang Bum; JO, Young Min; LEE, Myong-Hwa. Filtration Characteristics of Fine Particulate Matters in a PTFE/Glass Composite Bag Filter. **Aerosol And Air Quality Research**, [S.L.], v. 12, n. 5, p. 1030-1036, 2012. Taiwan Association for Aerosol Research. <http://dx.doi.org/10.4209/aaqr.2012.03.0071>.



RAJ, P., Gupta, G. S., & Rudolph, V. (2020). **Silicon carbide formation by carbothermal reduction in the Acheson process: A hot model study.** *Thermochimica Acta*, 687, 178577. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2020.178577>

ROSSO INDUSTRIAL (Rio Grande Sul) (org.). **Manual Técnico de Operação e Manutenção: filtro de mangas rosso.** São João do Polesine-: Rosso Industrial, [20-?].

SALEEM, M., Khan, R. U., Tahir, M. S., & Krammer, G. (2011). Experimental study of cake formation on heat treated and membrane coated needle felts in a pilot scale pulse jet bag filter using optical in-situ cake height measurement. **Powder Technology**, 214(3), 388–399. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2011.08.037>

SILVESTER, S.A.; LOWNDES, I.s.; KINGMAN, S.W.; ARROUSSI, A.. Improved dust capture methods for crushing plant. **Applied Mathematical Modelling**, [S.L.], v. 31, n. 2, p. 311-331, fev. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apm.2005.11.005>

SHIM, E., EOM, H., & KIM, Y. (2022). Fabrication of a carbon/polytetrafluoroethylene nanoparticle-coated antistatic bag filter using air-assisted electro spraying. **Advanced Powder Technology**, 33(8), 103706. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2022.103706>

SHIM, J., Joe, Y.-H., & Park, H.-S. (2017). Influence of air injection nozzles on filter cleaning performance of pulse-jet bag filter. **Powder Technology**, 322, 250–257. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.09.016>

SOMBOONSIN, P., VARDOULAKIS, S., & CANUDAS-ROMO, V. (2023). A comparative study of life-years lost attributable to air particulate matter in Asia-Pacific and European countries. **Chemosphere**, 338, 139420. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139420>

UGRASKAN, V., ISIK, B., YAZICI, O., & Cakar, F. (2021). Surface characterization and synthesis of boron carbide and silicon carbide. **Solid State Sciences**, 118, 106636. <https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2021.106636>

WANG, X. *et al.* (2021). Advances in modifications and high-temperature applications of silicon carbide ceramic matrix composites in aerospace: A focused review. **Journal of the European Ceramic Society**, 41(9), 4671–4688. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2021.03.051>

WORLD HEALTH ORGANIZATION. (2023). THE GLOBAL HEALTH OBSERVATORY. World Health Organization. [https://www.who.int/data/gho/data/indicators/indicator-details/GHO/ambient-air-pollution-attributable-death-rate-\(per-100-000-population\)](https://www.who.int/data/gho/data/indicators/indicator-details/GHO/ambient-air-pollution-attributable-death-rate-(per-100-000-population))

ZHAI *et al.* (2024). Application of bulk silicon carbide technology in high temperature MEMS sensors. **Materials Science in Semiconductor Processing**, 173, 108137. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2024.108137>

ZHANG, Bing *et al.* Development of an asymmetric composite PPS-based bag-filter material through membrane laminating and superfine fiber blending: lab test, field application and development of numerical models. **Journal Of Hazardous Materials**, [S.L.], v. 459, p. 132078, out. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016zha/j.jhazmat.2023.132078>.

ZHANG, W. (2022). A novel ceramic with low friction and wear toward tribological applications: Boron carbide-silicon carbide. **Advances in Colloid and Interface Science**, 301, 102604. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2022.102604>

ZHANG, X., & LIU, J. (2022). Simplified model for the calculation of the particle capture process in air filter media. **Chemical Engineering Science**, 249, 117358. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.117358>

ZHANG, Z., CHENG, L., TAN, J., & Yang, W. (2021). Efficient fabrication of carbon/silicon carbide composite for electromagnetic interference shielding applications. **Ceramics International**, 47(17), 23942–23949. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.05.103>

ZHOU, Guangyu; LOW, Ze-Xian; FENG, Shasha; ZHANG, Feng; ZHONG, Zhaoxiang; XING, Weihong. Effect of relative humidity and dust moisture content on filtration performance of bag filter. **Separation And Purification Technology**, [S.L.], v. 308, p. 122952, mar. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122952>.

ZHENG, Cheng-Hang; KANAOKA, Chikao. Recent advances in dust collection technology and ISO standardization in bag filtration. **Journal Of Zhejiang University-Science A**, [S.L.], v. 19, n. 1, p. 21-33, jan. 2018. Zhejiang University Press. <http://dx.doi.org/10.1631/jzus.a1700072>.