UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE – UNESC
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO, INOVAÇÃO E EXTENSÃO - PROPIEX
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSU
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS – PPGCEM

BRUNA RECH DAGOSTIM

AVALIAÇÃO TOXICOLÓGICA DO MATERIAL PARTICULADO DISPERSO NO AR EM AMBIENTES INTERNOS DE UMA INDÚSTRIA DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS POR VIA ÚMIDA

CRICIÚMA, 2023

BRUNA RECH DAGOSTIM

AVALIAÇÃO TOXICOLÓGICA DO MATERIAL PARTICULADO DISPERSO NO AR EM AMBIENTES INTERNOS DE UMA INDÚSTRIA DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS POR VIA ÚMIDA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais – PPGCEM da Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC, como requisito à obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Oscar Rubem Klegues Montedo

Coorientador: Prof. Dr. Murilo Daniel de Mello Innocentini

CRICIÚMA, 2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

D127a Dagostim, Bruna Rech.
Avaliação toxicológica do material particulado disperso no ar em ambientes internos de uma indústria de revestimentos cerâmicos por via úmida / Bruna Rech Dagostim. - 2023.
65 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Criciúma, 2023.
Orientação: Oscar Rubem Klegues Montedo.
Coorientação: Murilo Daniel de Mello Innocentini.

1. Material particulado. 2. Poeira - Efeitos adversos. 3. Doenças profissionais. 4. Sílica livre cristalina. 5. Toxicidade. 6. Cerâmica - Indústria. I. Título.

CDD 23. ed. 615.902

Bibliotecária Eliziane de Lucca Alosilla – CRB 14/1101
Biblioteca Central Prof. Eurico Back - UNESC

Bruna Rech Dagostim

Avaliação toxicológica do material particulado disperso no ar em ambientes internos de uma indústria de revestimentos cerâmicos por via úmida.

Esta Dissertação foi julgada adequada à obtenção do grau de Mestre(a) em Ciência e Engenharia de Materiais pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (Área de concentração: Tecnologia de Materiais) da Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC.

Criciúma, SC, 23 de fevereiro de 2023.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Emílio Luiz Streck
Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC

Prof. Dr. Dachamir Hotza
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

gov.br
Documento assinado digitalmente
LISANDRO SIMAO
Data: 28/02/2023 15:11:26-0300
Verifique em https://verificador.iti.br

Prof. Dr. Lisandro Simão
Universidade de Ribeirão Preto - UNAERP

Às minhas filhas, Luiza e Lara.

Em memória de meu querido pai.

AGRADECIMENTOS

Agradeço fundamentalmente a Deus.

A meu marido Silvio Florentino Pacheco, pelo apoio, companheirismo e amor.

Agradeço à minha mãe Rita de Cácia Rech Dagostim pelo apoio e compreensão em todos os momentos e por acreditar neste sonho junto comigo, estendo meu agradecimento às minhas irmãs e sobrinhos.

Ao meu pai, que nos deixou em meio à realização deste trabalho, que me ensinou a trabalhar duro e não desistir perante as adversidades.

Ao meu orientador Dr. Oscar Rubem Klegues Montedo pelo apoio e colaboração para o desenvolvimento deste, assim como aos coorientadores Dra. Sabrina Arcaro e Dr. Murilo Innocentini, fundamentais em minha formação.

Aos membros da banca avaliadora.

À indústria cerâmica que abriu espaço para essa pesquisa ser desenvolvida.

À CAPES, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pelo apoio financeiro para realização desse trabalho.

E, finalmente, à UNESC, que permitiu que eu pudesse concluir mais esta etapa.

“Não é o mais forte que sobrevive, nem o mais inteligente, mas o que melhor se adapta às mudanças.”

(Leon C. Megginson)

RESUMO

Entre os riscos ocupacionais encontrados nos ambientes de trabalho de uma indústria cerâmica, um dos principais é a exposição a poeiras minerais, favorecendo o aumento de doenças do sistema respiratório, como a silicose e o câncer de pulmão. Devido ao número elevado de trabalhadores expostos e à gravidade destas doenças, este trabalho se propôs a estudar o impacto toxicológico *in vitro* e *in vivo* do material particulado disperso no ar em ambientes internos de uma indústria cerâmica. A caracterização da exposição ocupacional levou em consideração as relações entre as concentrações de poeira nos ambientes de trabalho, a distribuição dos tamanhos das partículas suspensas no ar, a morfologia das amostras e os testes *in vitro*, para determinação da toxicidade e citotoxicidade. As amostras foram analisadas utilizando-se as técnicas de gravimetria, difratometria de raios X, microscopia eletrônica de varredura e análise de tamanho por detecção de partículas, além da determinação da toxicidade por *Daphnia magna* e citotoxicidade com células de fígado por ensaio de MTT. Os resultados mostraram que os ambientes de trabalho da indústria cerâmica se caracterizaram por concentrações de poeira na fração respirável, apresentando quantidades consideráveis de sílica livre cristalina. As concentrações máximas foram de 0,980 $\pm$0,425 mg/m³, contra um limite de tolerância calculado de 1,171 mg/m³, ficando acima do que prevê o anexo 12 da norma regulamentadora nº 15 e quase 20 vezes maior do que determina a ACGIH - Conferência Americana de Higienistas Industriais Governamentais. Os testes *in vitro* e *in vivo* confirmaram a maior toxicidade e citotoxicidade dos ambientes com maior teor de sílica livre cristalina e que a redução ao nível de ação aumenta a viabilidade celular em 77%.

Palavras-chave: Material particulado, toxicidade, citotoxicidade, sílica livre cristalina.

ABSTRACT

Among the occupational hazards found in the work environments of a ceramics industry, one of the main ones is exposure to mineral dust, favoring the increase of diseases of the respiratory system, such as silicosis and lung cancer. Due to the high number of exposed workers and the severity of these diseases, this work aimed to study the *in vitro* toxicological impact of particulate matter dispersed in the air in indoor environments of a ceramics industry. The characterization of occupational exposure took into account the relationships between dust concentrations in work environments, the distribution of particle sizes suspended in the air, sample morphology and in vitro tests to determine toxicity and cytotoxicity. The samples were analyzed using the techniques of gravimetry, X-ray diffraction, scanning electron microscopy and size analysis by particle detection. In addition to the determination of toxicity by *Daphnia magna* and cytotoxicity with liver cells by MTT assay. The results showed that the work environments of the ceramics industry are characterized by dust concentrations in the respirable fraction, with considerable amounts of free crystalline silica. The maximum concentrations were 0.980 +0.425 mg/m³, against a calculated tolerance limit of 1.171 mg/m³, above what is provided for in Annex 12 of Regulatory Standard No. 15 end almost 20 times higher than what is determined by ACGIH - American Conference of Governmental Industrial Hygienists. The *in vitro* and *in vivo* tests confirmed the higher toxicity and cytotoxicity of the environments with the highest percentage of free crystalline silica end that the reduction in action level increases cell viability by 77%.

Keywords: Particulate matter, toxicity, cytotoxicity, free crystalline silica.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Volume de produção de revestimentos cerâmicos no Brasil em milhões de m² por ano. 9
Figura 2 - Fluxograma do processo de fabricação. 11
Figura 3 - Comparativo do diâmetro do cabelo humano e de um grão de areia com as partículas de MP10 e MP2,5. 16
Figura 4 – Arranjo tetraédrico da sílica. 19
Figura 5 - Mecanismos fisiopatológicos de interação do macrófago com a partícula de sílica. 23
Figura 6 - Radiografias de tórax de pacientes com silicose: (A) paciente com uma silicose nodular simples e (B) paciente com uma fibrose maciça progressiva. 25
Figura 7 - Cortes axiais de tomografia computadorizada de pacientes com silicose: (A) silicose inicial com nódulos espaçados e pequenos e (B) nódulos com tamanhos variados. 25
Figura 8 - Etapas experimentais 28
Figura 9 - Pontos de coleta de poeira respirável por área. 32
Figura 10 - Imagens reais dos pontos de coleta 33
Figura 11 - Bomba de amostragem e dispositivos de coleta. 34
Figura 12 - Exemplo de ponto de coleta de detecção de tamanho de partículas 34
Figura 13 - Detector de material particulado. 35
Figura 14 - Método de extração do material particulado por ultrassom. 36
Figura 15 - Reação de redução do MTT a formazan. 38
Figura 15 - *Daphnia magna Straus.* 38
Figura 16 - Filtro de PVC após a coleta do ambiente de retífica a seco. 40
Figura 17 - Variação da concentração de partículas no ambiente no intervalo de 1 h no setor de Prensa. 43
Figura 18 - Variação da concentração de partículas no ambiente no intervalo de 1 h no setor de Atomização. 43
Figura 19 - Variação da concentração de partículas no ambiente no intervalo de 1 h no setor de Retífica a Seco. 44
Figura 20 - Imagens de MEV e de EDS da amostra do setor do Atomizador sobre o filtro de PVC. 46

Figura 21 - Imagens de MEV e de EDS da amostra do setor de Prensa sobre o filtro de PVC. 47
Figura 22 - Imagens de MEV e de EDS da amostra do setor de Retífica a Seco sobre o filtro de PVC. 48
Figura 23 - Avaliação da citotoxicidade das amostras pelo ensaio de MTT usando células de HepG2 expostas por 24 h. Controle Negativo (NC; meio de cultura) e Controle Positivo (PC; DMSO 20%). 51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Quantificação de Material particulado na fração respirável e teor de sílica livre cristalina, em uma amostragem de 8 h. 41
Tabela 2 – Resultados de toxicidade com *Daphnia magna* 49
Tabela 3 – Resultados de citotoxicidade com MTT em células.....50

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIAÇÕES

ACGIH® - American Conference of Governmental Industrial Hygienists

CEN - Comité Européen de Normalisation

CMPT - Concentração Média Ponderada pelo Tempo

GES - Grupo de Exposição Similar

ISO - International Organization for Standardization

L/min - Litros por minuto

m^3 - metro cúbico

µm - micrometro

mm - milímetro

NHO - Norma de Higiene Ocupacional

NHT - Norma de Higiene do Trabalho

NIOSH - National Institute for Occupational Safety and Health

NR - Norma Regulamentadora

MP - Material particulado

OSHA - Occupational Safety & Health Administration

PNOS - Particles (insoluble or poorly soluble) Not Otherwise Specified

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 6
2 OBJETIVOS 8
2.1 OBJETIVO GERAL 8
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 8
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 9
3.1 INDÚSTRIA CERÂMICA 9
3.1.1 Matérias-primas 10
3.1.2 Processo produtivo 11
3.1.3 Fontes de geração de material particulado 12
3.2 POEIRAS: ASPECTOS DE SAÚDE OCUPACIONAL 12
3.2.1 Tamanho das partículas 14
3.2.2 Vias de penetração no organismo 17
3.2.3 Mecanismos de defesa 17
3.2.4 Sílica 18
3.2.5 Poeira contendo sílica livre cristalina 19
3.2.6 Silicose 20
3.2.7 Limites de Exposição Ocupacional 26
4 METODOLOGIA 28
4.1 SELEÇÃO DOS SETORES 29
4.1.1 Descrição dos ambientes de trabalho 29
4.2 COLETA DAS AMOSTRAS DE MATERIAL PARTICULADO 31
4.2.1 Coletas para determinação das concentrações de poeira 31
4.2.2 Detecção dos tamanhos de partícula 34
4.3. MÉTODOS DE ANÁLISE 35
4.3.1 Difração de Raios X 35

4.3.2. Microscopia eletrônica de varredura (MEV) 35
4.4. ENSAIOS TOXICOLÓGICOS.....36
4.4.1. Extração do material retido nos filtros 36
4.4.2. Citotoxicidade e o MTT.....37
4.4.3. Toxicidade e a *Daphnia magna*.....38
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....40
5.1 QUANTIFICAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO 40
5.2 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA.....45
5.5.1. Toxicidade.....49
5.5.2. Citotoxicidade.....50
5.5.3. Influência do filtro branco 52
6. CONSIDERAÇÕES SOBRE AS MEDIDAS DE CONTROLE.....54
7. CONCLUSÃO.....56
8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....58
REFERÊNCIAS.....59

1 INTRODUÇÃO

O uso da cerâmica para a fabricação de utensílios domésticos é tão antigo quanto a própria história da humanidade. Com o passar do tempo e o advento dos processos industriais, a tecnologia foi aplicada à cerâmica e fins mais nobres vem sendo empregados, como a indústria de revestimento, louças, cerâmica celular, ortodontia e outros biomateriais. Essas atividades são praticadas em todos os continentes, sendo em alguns deles em maior escala. No Brasil, apenas a fabricação de revestimentos cerâmicos representa 6% do PIB da indústria de materiais de construção nacional e emprega mais de 200 mil pessoas, direta ou indiretamente (ANFACER, 2020).

Com tantas pessoas envolvidas, cresce a preocupação com os riscos ocupacionais típicos desse ramo de atividade. Dentre os principais riscos encontrados nos ambientes de trabalho na indústria cerâmica, está a exposição a poeiras, favorecendo o aumento de doenças do sistema respiratório (LIPPMANN, 1995). Dentre elas, a mais importante é a silicose, que é causada pela inalação de poeiras contendo sílica livre cristalina. A silicose é uma doença pulmonar crônica e incurável, de evolução progressiva e irreversível, que pode levar à incapacidade para o trabalho, invalidez, aumento da suscetibilidade à tuberculose e ao câncer do pulmão (JASS, 2016).

Devido à importância e à gravidade dessa doença e ao número elevado de trabalhadores expostos a materiais particulados, inclusive na indústria cerâmica, várias iniciativas têm sido registradas, dentre elas a Norma Regulamentadora nº 15, do Ministério do Trabalho e Previdência do Brasil, que classifica a exposição à poeira respirável contendo sílica livre cristalina acima do limite de tolerância como insalubre em grau máximo (BRASIL, 1978).

Dados quantitativos sobre as condições dos ambientes de trabalho, como as concentrações de poeira e a distribuição dos tamanhos das partículas geradas durante as atividades desenvolvidas na indústria cerâmica, são de fundamental importância para quantificar o risco da exposição.

Tendo em vista que o foco é a saúde ocupacional, testes *in vitro* são primordiais para se avaliar a toxicidade e citotoxicidade destas partículas, e para isso diferentes organismos podem ser utilizados.

Este trabalho está inserido na linha de pesquisa “Desenvolvimento e Processamento de Materiais” do Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais - PPGCEM, dentro do objetivo específico “Avaliação de possíveis efeitos ecotoxicológicos e genotóxicos de materiais produzidos a partir de resíduos”.

Diversos estudos vêm comprovando que o comportamento e a nocividade das poeiras dependem diretamente do tamanho das partículas que as compõem; dessa forma, o estudo dos ambientes internos de uma indústria cerâmica, que submetem tantos trabalhadores à exposição de materiais particulados, justifica e motiva a realização desta pesquisa.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Estudar o impacto toxicológico *in vitro* e *in vivo* do material particulado disperso no ar em ambientes internos de uma indústria de revestimentos cerâmicos por via úmida, com foco na saúde ocupacional.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atingir o objetivo geral da proposta, são estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar a qualidade do ar em ambiente interno da indústria cerâmica;
- Estudar o impacto toxicológico *in vitro* e *in vivo* da exposição celular a estes materiais particulados;
- Comparar os resultados obtidos com padrões internacionais de qualidade do ar em ambientes internos;
- Avaliar a exposição do trabalhador e a eficiência das medidas de controle já adotadas para a redução da concentração de poeira nos ambientes de trabalho.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

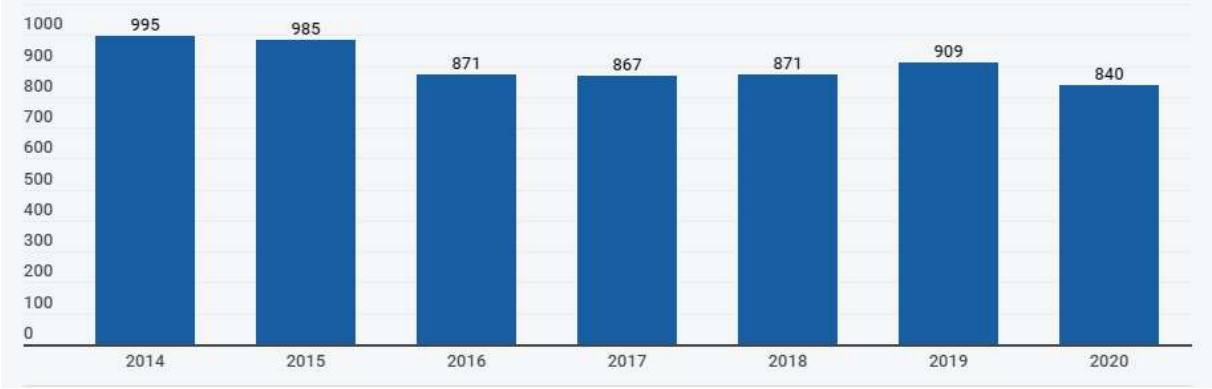
3.1 INDUSTRIA CERÂMICA

O termo “cerâmica” vem do grego *keramos*, que se referia originalmente a vasilhames de argila queimada. Em um sentido mais amplo, podemos definir a cerâmica tanto como um produto quanto por um processamento e até mesmo como um segmento da indústria de transformação (HOTZA, 2007).

De acordo com a norma ABNT NBR13006:2020 (ABNT, 2020), os revestimentos cerâmicos são materiais compostos por argilas e outras matérias-primas inorgânicas, geralmente utilizados para o recobrimento de pisos e paredes.

Essa indústria de transformação gera grande impacto na economia nacional. Segundo a Associação Nacional de Fabricantes de Cerâmica para Revestimento, Anfacer (2020), o Brasil é o 3º maior produtor de cerâmica do mundo, ficando atrás apenas da China e Índia; em consumo, o Brasil ocupa a segunda colocação. Este alto volume, conforme Figura 1, superior a 840 milhões de m² por ano, propicia a geração de muitos empregos, com cerca de 28 mil postos de trabalho diretos e em torno de 200 mil indiretos.

Figura 1 - Volume de produção de revestimentos cerâmicos no Brasil em milhões de m² por ano.



Fonte: Anfacer, 2020.

Este segmento representa 6% do PIB nacional da indústria de materiais de construção e conta atualmente com 60 empresas, 71 unidades fabris e 137 marcas (ANFACER, 2020).

3.1.1 Matérias-primas

Os materiais cerâmicos cobrem uma enorme variedade de aplicações, sendo utilizados em diversos ramos da ciência e tecnologia. São as matérias-primas que irão diferenciar o produto final; quanto às características técnicas e estéticas, de um modo geral, as cerâmicas se comportam como isolantes elétricos e térmicos e são mais resistentes a altas temperaturas e ambientes abrasivos quando comparados aos metais e aos polímeros. Com relação ao comportamento mecânico, os cerâmicos são duros, porém frágeis (CALLISTER, 2020).

As matérias-primas que compõem a massa cerâmica podem ser agrupadas em plásticas e não-plásticas. As matérias-primas plásticas conferem importantes características na fase de conformação das peças cerâmicas, tais como trabalhabilidade e resistência mecânica a cru, e no processamento térmico, como estrutura e cor (MOTTA *et al*., 2002). As matérias-primas não-plásticas também atuam nas fases de conformação e secagem, diminuindo a retração das peças e favorecendo a secagem, e na fase do processamento térmico, quando desempenham o papel mais relevante, controlando as transformações, deformações e a sinterização. Devido principalmente ao seu papel na fase de queima, os materiais não-plásticos são ainda classificados em inertes, vitrificantes e fundentes (MOTTA *et al*., 2002).

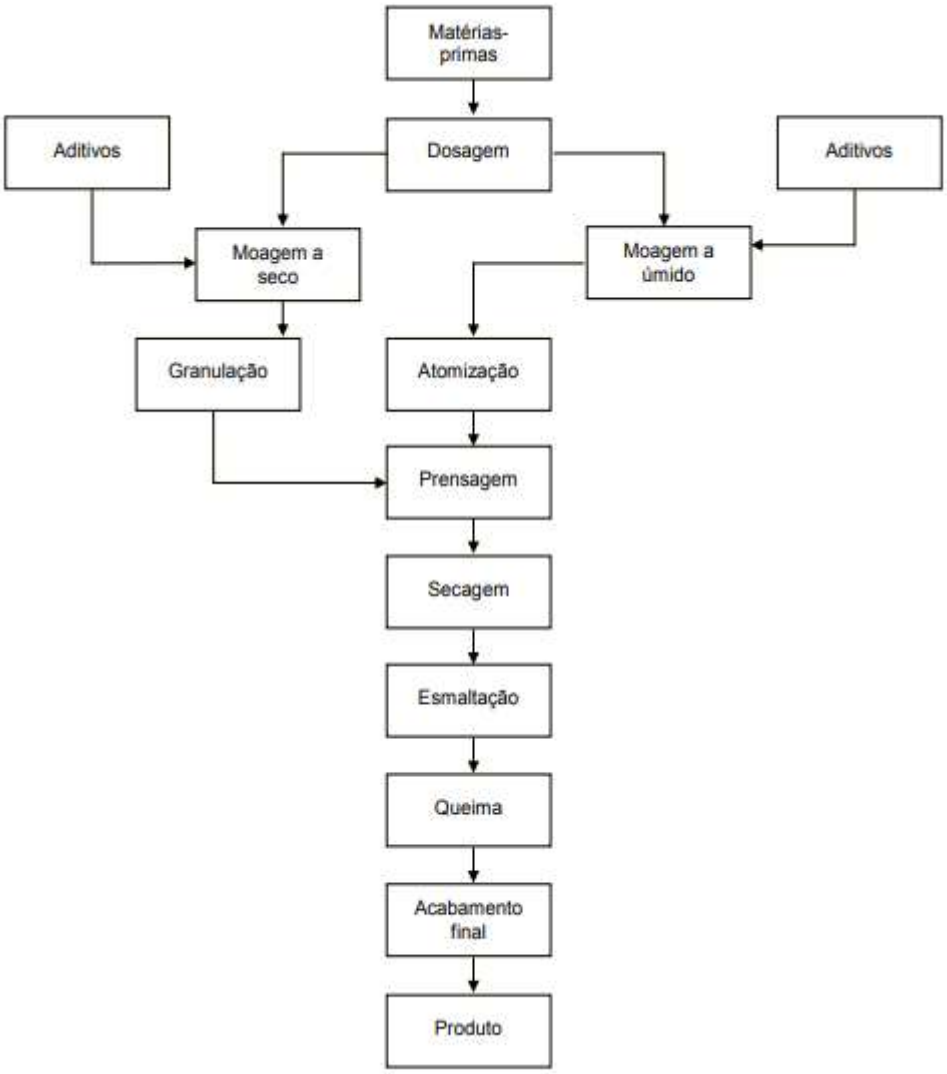
Tanto as matérias-primas plásticas como as não-plásticas possuem teor de sílica (SiO_2); os demais constituintes são: Al_2O_3, Fe_2O_3 e, em menor proporção, podem apresentar ainda os seguintes óxidos: CaO, Na_2O, K_2O, MnO, TiO_2, MgO, P_2O_5 (BARBA *et al*., 1997).

As ligações presentes entre os átomos de materiais cerâmicos são iônicas e covalentes (de fato, uma combinação dessas), o que depende basicamente da diferença de eletronegatividade de seus átomos constituintes. As propriedades dos materiais cerâmicos são em função de sua natureza química, seu caráter cristalino ou amorfo, e das inúmeras transformações a que são submetidos durante as várias etapas de seu processamento (REED, 1995).

3.1.2 Processo produtivo

O processamento utilizado para a fabricação de revestimentos cerâmicos corresponde a um conjunto de operações sequenciais capazes de conferir as características desejadas ao produto obtido ao final do processo de fabricação. A Figura 2 representa o fluxograma do processo produtivo.

Figura 2 - Fluxograma do processo de fabricação.



Fonte: ABCERAM, 2021 (Adaptado).

O processo inicia com a seleção das matérias-primas e posterior dosagem, onde a formulação dependerá das características finais que se deseja obter; em seguida, há duas rotas distintas, que dependerá do tipo de moagem que será

empregado, via seca ou via úmida. Esta escolha também impactará na etapa subsequente, se haverá granulação ou atomização.

O decorrer da linha de produção volta a ser unificado, com a etapa de prensagem, secagem, esmaltação (que pode não existir na fabricação de porcelanato técnico), queima e acabamento final (polimento e retífica) para então se obter o produto final.

3.1.3 Fontes de geração de material particulado

Segundo a Norma de Higiene Ocupacional – NHO 08, material particulado são partículas sólidas produzidas por ruptura de um material originalmente sólido, suspensas ou capazes de se manterem suspensas no ar.

Na indústria cerâmica, esse fenômeno de ruptura acontece em muitos setores, mesmo em um processo que utiliza a via úmida para a moagem, na dosagem nas matérias-primas, onde há a manipulação de grande volume de material de origem mineral, até a deposição nos moinhos.

Volta a acontecer na etapa de atomização, onde grande parte da água presente na barbotina é removida, originando o pó atomizado.

Na prensagem, local onde dará a forma ao produto final, há a compactação do pó atomizado e, por consequência, a produção de material particulado.

Mesmo depois do produto queimado, as peças podem passar por um processo de retífica, onde há o corte das laterais para que todas as peças apresentem o mesmo tamanho; este processo, quando feito a seco, também gera grande concentração de material particulado.

3.2 POEIRAS: ASPECTOS DE SAÚDE OCUPACIONAL

A Fundação Jorge Duprat e Figueiredo - FUNDACENTRO define poeira como sendo: aerossol gerado mecanicamente, constituído por partículas sólidas formadas por ruptura mecânica de um sólido. Esta mesma publicação informa que, no Brasil, as atividades que mais estão expostas a poeiras minerais são:

a) fundição de ferro, aço ou outros metais onde se utilizam moldes de areia;

b) indústria extrativa (mineração, atividades de extração e beneficiamento de pedras que contenham o mineral);

c) cerâmicas: fábricas de pisos, azulejos, louças sanitárias, louças domésticas e outros, produção e uso de tijolos refratários;

d) fabricação de vidros (preparação e também no uso de jateamento de areia para opacificação);

e) perfuração de rochas na indústria da construção (túneis, barragens e estradas), moagem de quartzo e pedras;

f) construção de fornos refratários, jateamento de areia (utilizado na indústria naval, na fundição e polimento de peças na indústria metalúrgica);

g) execução de trabalho em mármore, ardósia, granito e outras pedras, fabricação de material abrasivo;

h) mineração subterrânea;

i) escavação de poços;

j) atividades de protético.

Estudos epidemiológicos da população em geral apontam as associações entre a exposição às partículas (poluição atmosférica e poeiras minerais) e ao aumento da morbilidade e mortalidade por doenças respiratórias e cardiovasculares (DOCKERY *et al*., 1993; POPE, 2000; POPE, 2004).

Outros estudos demonstram efeitos adversos para a saúde associados à exposição às partículas ultrafinas (PETERS *et al*., 1997; PENTTINEN *et al*., 2001; IBALD-MULLI *et al*., 2002; RUCKERT, 2006).

Em estudos com animais, verificou-se que as nanopartículas podem entrar na circulação (NEMMAR *et al*., 2002) e serem transportadas para outros órgãos (STRATMEYER *et al*., 2008; ELDER *et al*., 2006), sendo essas situações que motivam a realização de pesquisas como essas.

3.2.1 Tamanho das partículas

O comportamento das poeiras depende diretamente do tamanho das partículas que as compõem.

No que se refere ao tamanho das partículas de poeira suspensa no ar, o termo “diâmetro da partícula” é uma simplificação. O tamanho geométrico de uma partícula não explica completamente seu comportamento em estado de suspensão (WILLEKE, BARON, 1993). A medida do tamanho da partícula mais adequada para a maioria das situações de higiene ocupacional é o diâmetro aerodinâmico. Ele é definido como “o diâmetro de uma esfera hipotética de densidade 1 g/cm^3, tendo a mesma velocidade terminal de deposição em ar calmo que a partícula em questão, desconsiderando seu tamanho geométrico, forma e densidade verdadeiras” (HINDS, 1982).

Em 2000, as diretrizes de qualidade do ar da Organização Mundial de Saúde (OMS, 2000) relacionaram os dois indicadores de matéria particulada (MP10 e MP2,5), sendo que a matéria particulada no intervalo entre 10 e 2,5 µm corresponde à fração grossa e é considerada inalável, podendo assim atingir a região torácica (traqueia e brônquios).

Já a matéria particulada entre 2,5 e 0,1 µm é designada como a fração fina e é considerada respirável, porque pode alcançar a região alveolar (bronquíolos e alvéolos) (GOMES *et al*., 2017).

A matéria particulada de diâmetro inferior a 0,1 µm (<100 nm) é denominada de fração ultrafina (ou nanopartículas), podendo atingir até mesmo a corrente sanguínea (WHO, 2005; CAMNER & BAKKE, 1980).

Assim, quanto menor for a partícula, maior será a probabilidade de penetração nas partes mais profundas do aparelho respiratório e migração para outros órgãos, ficando o indivíduo exposto a níveis mais elevados de toxinas.

3.2.1.1 MP10

Entende-se o MP10 como sendo as partículas cujo diâmetro aerodinâmico equivalente é menor do que 10 µm; são conhecidas como fração respirável, de acordo com a definição da NHO 08 (2009) e, quando entram no organismo, nem sempre os mecanismos de defesa existentes no corpo humano são capazes de expulsá-las, podendo dar origem a doenças respiratórias (LEE *et al*., 1999).

Segundo Brickus e Neto (1999), o material particulado (MP10) é pequeno o bastante para passar pelas vias aéreas superiores e alcançar os pulmões, com diâmetro aerodinâmico menor que 10 μm. Ainda na perspectiva dos autores, existe muita controvérsia relacionada ao tamanho de partícula que é depositada no aparelho respiratório. Enquanto se discute a faixa de tamanhos de partículas que conseguem atingir as diferentes partes do aparelho respiratório, a medida de MP10, por sua vez, é muito importante, pois parte do que é inalado pode ser irreversivelmente depositado nas vias respiratórias.

O padrão brasileiro para exposição às partículas (MP10) é definido pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), estabelecendo o valor máximo recomendável de 80 μg/m³ (ANVISA, 2003). A Organização Mundial da Saúde (OMS, 2005) recomenda valores de até 50 μg/m³ de partículas inaláveis em 24 h.

3.2.1.2 MP2,5

Entende-se o MP2,5 como sendo as partículas cujo diâmetro aerodinâmico equivalente é menor do que 2,5 μm.

A composição do MP2,5 pode variar significativamente de acordo com a sua origem e é provável que partículas de diferentes origens possam ter diferentes toxicidades (THURSTON *et al*., 2011). As fontes de emissão compreendem os processos industriais, fuligem de carros, queima de biomassa e compostos biogênicos (ROCHA *et al*., 2009).

De acordo com Silva (2010), as partículas mais finas (MP2,5) podem servir como transportadoras de substâncias tóxicas para as vias respiratórias e, devido à sua dimensão reduzida, podem penetrar profundamente no sistema respiratório, atingindo os alvéolos pulmonares e conduzindo a dificuldades respiratórias e, por vezes, danos permanentes na saúde.

As partículas finas podem ultrapassar as defesas respiratórias, causando respostas inflamatórias, chegar aos alvéolos pulmonares, atingir a corrente sanguínea, causar doenças do coração e do pulmão, diabetes, nascimentos prematuros, baixo peso ao nascer, câncer, morte súbita e alterações cognitivas (BRAUER *et al*., 2008; OLMO *et al*., 2011; RAASCHOU-NIELSEN *et al*., 2001; WILHELM; RITZ, 2003).

A legislação brasileira não define valores limites de exposição para essas partículas. Na falta de padrões nacionais, utiliza-se a referência da OMS de 25 μg/m³ (24 h de exposição).

3.2.1.3 MP1,0

Entende-se o MP1,0 como sendo as partículas cujo diâmetro aerodinâmico equivalente é menor do que 1,0 μm.

Essa matéria particulada é denominada de fração ultrafina e, tal como a fração fina, considera-se respirável, podendo atingir os mesmos órgãos (WHO, 2005; CAMNER & BAKKE, 1980).

Quanto menor for a partícula, maior será a probabilidade de penetração nas partes mais profundas do aparelho respiratório, ficando assim o indivíduo exposto a níveis mais elevados de toxinas.

Pode-se comparar na demonstração abaixo, Figura 3, o tamanho do MP10 e o MP2,5, com relação ao fio de cabelo humano, segundo EPA (2016).

Figura 3 - Comparativo do diâmetro do cabelo humano e de um grão de areia com as partículas de MP10 e MP2,5.

Fonte: EPA, 2016 (Adaptado)

O MP1,0 é inferior a metade do MP2,5, ou seja, 90 vezes menor que o grão de areia.

Não há na legislação Brasileira, tão pouco nas normas internacionais, parâmetros para o controle do MP1,0.

3.2.2 Vias de penetração no organismo

As vias da exposição humana a materiais particulados de diâmetro aerodinâmico tão pequeno poderão incluir a inalação, por meio do trato respiratório; a absorção, através da pele; a ingestão pela boca; ou combinações destas vias (AITKEN *et al*., 2004).

A via mais importante de exposição humana é, sem dúvida, a inalação (DOWLING *et al*., 2004). Por esta via, e devido ao seu tamanho e demais características, o material particulado poderá atingir a região alveolar e ter comportamento semelhante ao das partículas finas, dando origem a processos inflamatórios nos pulmões e comprometimento cardiovascular.

A partir de resultados de pesquisas farmacêuticas e de estudos toxicológicos, pode-se concluir que, dependendo das características de tamanho e área superficial, estes materiais ultrafinos podem entrar no corpo humano pelos pulmões e são capazes de atravessar a barreira protetora da epiderme (HOET *et al*., 2004).

3.2.3 Mecanismos de defesa

Uma partícula relativamente grande (maior que MP10) é percebida pelas células do pulmão como um corpo estranho indesejável. Assim, estimula uma série de processos de defesa, que se relacionam tanto com a composição mineralógica quanto com o tamanho da partícula, sua morfologia e propriedades de superfície. Partículas minerais insolúveis, como a sílica cristalina, têm se mostrado tóxicas para as células, ainda que os mecanismos exatos de sua atuação sejam incertos. As respostas biológicas à presença de partículas de quartzo são severas, a ponto de induzir mudanças biológicas permanentes no pulmão. Essas alterações são conhecidas como fibroses pulmonares (VINCENT, 1995).

Segundo Vicent (1995), partículas solúveis, depositadas em qualquer lugar, podem se dissolver liberando material potencialmente perigoso para o corpo. Para as partículas insolúveis, o destino subsequente, depois da deposição, depende da atuação dos mecanismos de defesa:

a) Limpeza mucociliar: a traqueia, os brônquios e os bronquíolos são revestidos com células ciliadas (epitélio ciliado) e cobertos por uma lâmina de muco. Os cílios estão em movimento contínuo e sincronizado, atingindo na traqueia uma velocidade de 5 a 10 mm/min. Partículas insolúveis, depositadas no epitélio ciliado, movem-se em direção à epiglote e, daí, são engolidas ou expelidas com a saliva em um espaço de tempo relativamente curto;

b) Movimento dos bronquíolos: movimentos peristálticos intermitentes dos bronquíolos, tosse e espirros podem impelir as partículas no muco que reveste em direção à laringe e além dela;

c) Fagocitose: o epitélio da região alveolar não é ciliado. Entretanto, partículas insolúveis depositadas nessa área são engolfadas por macrófagos. Desse modo, elas podem viajar para o epitélio ciliado e depois serem transportadas para cima e para fora do sistema respiratório, podem permanecer no espaço pulmonar ou entrar no sistema linfático.

O acúmulo de grande quantidade de partículas insolúveis nos pulmões prejudica a limpeza. Essa condição, chamada de “sobrecarga de poeira”, pode ocorrer como resultado de uma exposição ocupacional prolongada, mesmo a níveis relativamente baixos. Alguns pesquisadores, como Morrow (1992), têm sugerido que a sobrecarga pode ser um precursor da formação de tumores, mesmo para substâncias que anteriormente tenham sido relacionadas como relativamente inofensivas.

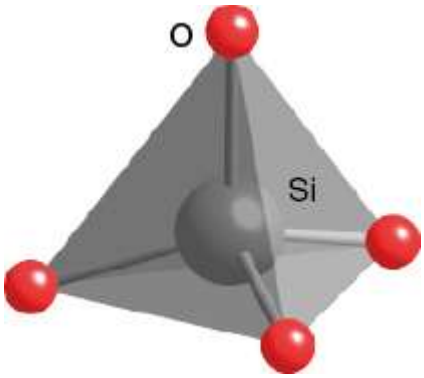
Considerando essa possibilidade, a American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) estabeleceu um novo limite de exposição ocupacional para “partículas (insolúveis ou de baixa solubilidade) não especificadas de outra maneira”, anteriormente referidas como “poeira incômoda”.

3.2.4 Sílica

O oxigênio e o silício são os dois elementos mais abundantes da crosta terrestre. Sua presença favorece a formação de grande quantidade de silicatos minerais e de sílica em suas várias formas cristalinas, especialmente o quartzo, sendo representadas por um composto unitário de SiO_2 (LANGER, 1986).

A unidade estrutural da maioria das formas de sílica e dos silicatos é um arranjo tetraédrico de quatro átomos de oxigênio, ao redor de um átomo de silício, formando o SiO_4, Figura 4.

Figura 4 – Arranjo tetraédrico da sílica.



Fonte: Chemtube 3D, 2023.

As variações de orientações produzem os polimórficos: quartzo, tridimita, cristobalita, tripoli, sílica gel e sílica fundida (LANGER, 1986).

3.2.5 Poeira contendo sílica livre cristalina

Devido ao amplo uso de materiais contendo quartzo, trabalhadores são expostos à sílica livre cristalizada em uma grande variedade de indústrias e ocupações, entre as quais está a fabricação de revestimentos cerâmicos. O risco de desenvolvimento da silicose varia com diversos fatores, como a concentração de sílica cristalina na fração respirável, o tempo de exposição e a suscetibilidade do indivíduo (LIPPMANN, 1995).

A silicose está claramente relacionada com a poeira respirável. Entretanto, partículas que se depositam nas vias aéreas condutivas podem causar bronquite e/ou fibrose nessas vias e, depois de serem removidas pelo mecanismo mucociliar e engolidas, podem contribuir para uma possível incidência de câncer de estômago (NIOSH, 2002).

Nas situações mais comuns, os trabalhadores não estão expostos à sílica pura. Outros componentes além da sílica estão presentes na poeira, principalmente os silicatos. Os riscos associados com a inalação de sílica cristalina em misturas de poeira também dependem das propriedades dos outros constituintes da mistura da

poeira. Esses outros componentes podem ser importantes se diluírem ou modificarem o efeito da sílica ou se eles próprios exercerem efeitos no sistema respiratório (GANBLE, 1986).

3.2.6 Silicose

A exposição a materiais particulados presentes no ar (poeira respirável), gerados por material sólido cuja formação de poeira é elevada, pode gerar comprometimento funcional progressivo nos trabalhadores. Essa poeira é liberada no momento da fabricação de materiais cerâmicos, especialmente quando há a presença da sílica nas formas cristalinas em sua composição, substância prejudicial à saúde do trabalhador, que causa doenças no sistema respiratório.

Entre essas doenças, a mais importante é a silicose. Trata-se de uma doença progressiva crônica provocada pela inalação e pelo acúmulo de pó de sílica nos pulmões. A dispneia de esforço é o sintoma mais comum da silicose, que evolui de forma lenta e progressiva. Sua evolução pode incapacitar totalmente os pacientes para o trabalho (JASS, 2016).

A silicose é uma doença profissional, ou seja, é uma doença cuja causa reside no ambiente de trabalho. Quando há inalação e deposição de partículas de sílica cristalina respirável, isto é, partículas com diâmetro igual ou inferior a 10 μm, nos pulmões, este agente provoca impacto na saúde do indivíduo.

O seu desenvolvimento depende da intensidade e da duração da exposição; logo, quanto maior a concentração e o tempo de exposição, mais danos provoca no pulmão do trabalhador. Esta exposição pode causar fibrose do pulmão, o que significa que a capacidade respiratória diminui drasticamente, podendo levar à insuficiência da sua função.

Existem três tipos de silicose, dependendo da concentração de sílica cristalina respirável inalada:

a) Silicose crônica, que ocorre após 10 ou mais anos de exposição a concentrações relativamente baixas e corresponde à forma de apresentação mais comum;
b) Silicose acelerada, que se desenvolve de 5 a 10 anos após a primeira exposição a concentrações elevadas de sílica;

c) Silicose aguda, que se desenvolve depois da exposição a elevadas concentrações de sílica cristalina respirável e resulta em sintomas dentro de um período de tempo entre poucas semanas a 5 anos após a exposição inicial.

Neste último caso, a evolução é habitualmente fulminante, com indícios como tosse, dispneia rapidamente progressiva, perda ponderal, insuficiência respiratória e morte precoce (MACIEJEWSKA, 2014; MATOS, BAPTISTA, & DIOGO, 2012).

Por vezes, o diagnóstico desta doença é difícil de se determinar, pois os doentes podem em uma fase inicial não apresentar alterações funcionais do sistema respiratório. O diagnóstico para o caso de silicose é baseado na história de exposição à sílica e nas alterações radiográficas, sendo que raramente é necessário recorrer a biópsias pulmonares (SANTOS *et al*., 2010). A silicose pode também evoluir para o câncer.

Outras doenças também estão associadas à exposição à poeira respirável contendo sílica livre cristalina; entre elas estão as doenças ocupacionais pulmonares, intoxicações sistêmicas, câncer, asma, alveolite alérgica e irritações diversas (WEILL, 1995).

Até o momento, os estudos epidemiológicos realizados têm demonstrado associações entre o aumento das taxas de morbilidade e mortalidade por doenças respiratórias e cardiovasculares e o aumento dos níveis de matéria particulada no ar ambiente (TURNER *et al*., 2011).

Devido à evidência avassaladora, a Agência Internacional da Pesquisa sobre o Câncer (IARC) classificou a matéria particulada do ar ambiente como cancerígena para os seres humanos, ou seja, grupo 1 (IARC 2013).

3.2.6.1 Epidemiologia

A silicose pulmonar é, provavelmente, a doença ocupacional mais antiga dentro do grupo das pneumoconioses, sendo inicialmente descrita por Hipócrates, que observou dificuldade respiratória em mineradores (ABU-SHAMS *et al*., 2005).

Segundo a Administração de Segurança e Saúde Ocupacional dos Estados Unidos (OSHA), em 2004, o número de trabalhadores expostos nos Estados Unidos

de forma contínua à sílica superava dois milhões, sendo que aproximadamente cem mil estavam empregados em ambientes de alto risco em atividades como jateamento de areia, perfuração de rochas e indústria de fundição (OSHA, 2004).

A higiene industrial e a adoção de medidas de controle para a redução da concentração de partículas de poeira carregadas pelo ar obtiveram sucesso na redução da prevalência e da gravidade da silicose em muitas indústrias; entretanto, a silicose ainda é uma realidade e um problema de saúde em todo o mundo, principalmente em países subdesenvolvidos como África do Sul e Índia (ABU-SHAMS *et al*., 2005; RAYMOND *et al*., 2006). Mesmo em países desenvolvidos, a exposição a partículas de sílica permanece elevada (SANDERSON *et al*., 2000).

No Brasil, esta realidade não é diferente, a silicose está em primeiro lugar na prevalência das pneumoconioses, devido a inúmeros seguimentos da indústria que expõem os trabalhadores a um contato direto com a sílica (DE CAPITANI, 2006; RIBEIRO *et al*., 2010), como por exemplo: extração e beneficiamento de rochas como o granito e pedras em geral, mineração de ouro, arsênico, estanho e pedras preciosas, perfuração de poços, indústrias cerâmicas, de materiais de construção, de borracha, fabricação de vidro e de fertilizantes (rocha fosfática), em fundições e na produção de talco, operação e jateamento de areia, polimento de metais e minerais com abrasivos contendo sílica, e em atividades de manutenção de limpeza de fornos, moinhos e filtros. Nos últimos anos, tem-se descritos novos casos de silicose em técnicos de laboratórios dentários, devido à utilização de certos materiais que podem gerar poeira de sílica cristalina (ABU-SHAMS *et al*., 2005; TERRA FILHO *et al*., 2006).

3.2.6.2 Causas

A doença intersticial pulmonar causada pela exposição à sílica é consequência da lesão às células do pulmão e a decorrente cicatrização com ativação do processo fibrótico (DAVIS, 1986).

De forma geral, podemos descrever cinco mecanismos essenciais para o ciclo de lesão e cicatrização provocados pela sílica (CASTRANOVA *et al*., 2000; FUBINI *et al*., 2003; CASTRANOVA, 2004; DOSREIS *et al*., 2004):

1) citotoxicidade direta;

2) ativação de geração de oxidantes (espécies reativas de oxigênio - ROS e espécies reativas de nitrogênio – RNS);

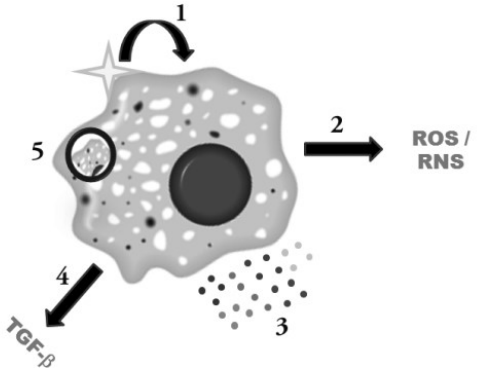
3) estimulação da secreção de citocinas e quimiocinas;

4) estimulação da secreção de fatores fibrogênicos;

5) morte celular por apoptose.

Na Figura 5 pode-se observar a ação destes cinco mecanismos fisiopatológicos de interação do macrófago com a partícula de sílica.

Figura 5 - Mecanismos fisiopatológicos de interação do macrófago com a partícula de sílica.



Fonte: CASTRANOVA, 2004 (Adaptado)

A citotoxicidade direta das partículas de sílica no pulmão ocorre devido às suas propriedades químicas específicas, que lhes conferem a capacidade de reagir diretamente com as células residentes, por meio da interface água-ar e da peroxidação de lipídios da membrana de células broncoalveolares, causando ruptura à membrana celular. As células lesadas, por sua vez, liberam enzimas intracelulares, as quais causam lesão tecidual com cicatrização ou destruição dos septos alveolares (CASTRANOVA, 2004).

No segundo mecanismo, a sílica provoca, nos macrófagos, a ativação da produção de espécies reativas de oxigênio (ROS), como superóxidos e peróxido de hidrogênio (H_2O_2), e espécies reativas de nitrogênio (RNS), como o óxido nítrico (NO). A explicação para isso se dá pela capacidade das partículas de sílica provocarem um aumento na atividade da cadeia respiratória, com aumento do consumo de oxigênio (BLACKFORD *et al*., 1994; FUBINI *et al*., 2003; MOSSMAN *et al*., 1998).

O terceiro mecanismo envolvido na patogênese da silicose é levado pelo estresse oxidativo, que causa a estimulação da secreção de citocinas e quimiocinas

por células residentes e, posteriormente, células recrutadas (CHEN *et al*., 2002; DING, 1999).

Já o quarto mecanismo envolvido no ciclo de lesão e cicatrização ocorre com a secreção de fatores fibrogênicos pelos macrófagos alveolares e/ou células recrutadas no processo inflamatório (VAN DEN BRÛLE *et al*., 2005).

O quinto mecanismo envolvido é a morte celular por apoptose. Esta é resultado do aumento da produção de ROS, o que leva a uma disfunção mitocondrial, aumento da expressão gênica de receptores de morte e/ou de seus ligantes. A morte celular por apoptose tem sido descrita com um tipo de morte celular importante para a eliminação de células lesadas e como mecanismo homeostático para manter as populações celulares nos tecidos (FREIRE DE LIMA *et al*., 2000).

3.2.6.3 Diagnóstico

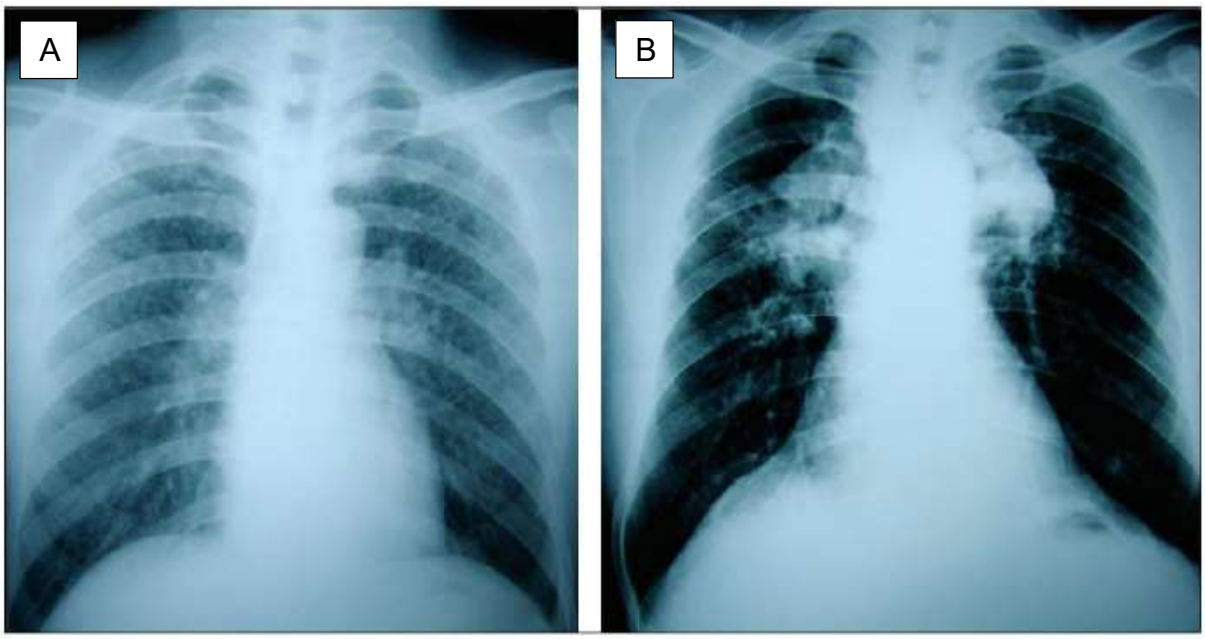
A radiografia de tórax é o principal método de diagnóstico. Na silicose simples, a radiografia de tórax geralmente mostra pequenas opacidades arredondadas, muitas vezes distribuídas simetricamente com predominância da zona superior. Alguns pacientes apresentam um padrão intersticial de fibrose diferente, sem as opacidades nodulares típicas. Na fibrose maciça progressiva, desenvolvem-se opacidades maiores que 1 cm. Com o tempo, aumentam de tamanho e juntam-se e as pequenas opacidades podem desaparecer, representado na Figura 6 (HANSELL, 2010).

Na imagem A, o paciente apresenta uma silicose nodular simples, com a percepção da opacidade arredondada na zona superior. Na imagem B, o paciente apresenta uma fibrose maciça progressiva e, por sua vez, apresentam congruência.

A sensibilidade da radiografia de tórax melhora com o aumento do grau de silicose, mas uma proporção substancial de pacientes com silicose moderada ou grave classificada pela histologia pode não ser diagnosticada radiologicamente (HNIZDO *et al*., 1993).

Estudos sugerem que a Tomografia computadorizada (TC) de alta resolução é mais sensível que a radiografia convencional na detecção de características específicas: alterações nodulares; fibrose maciça progressiva; bolhas; enfisema; e alterações pleurais, conforme Figura 7 (MOSIEWICZ *et al*., 2004).

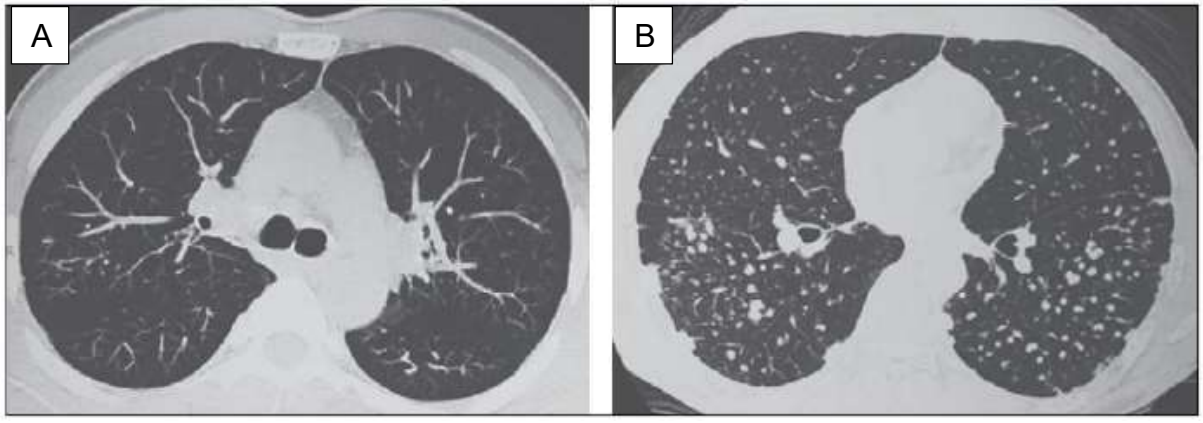
Figura 6 - Radiografias de tórax de pacientes com silicose: (A) paciente com uma silicose nodular simples e (B) paciente com uma fibrose maciça progressiva.



Fonte: LEUNG e CHEN, 2012.

Na imagem A, o paciente apresenta uma silicose inicial com nódulos espaçados e pequenos; já na imagem B, é possível observar muitos nódulos com tamanhos variados.

Figura 7 - Cortes axiais de tomografia computadorizada de pacientes com silicose: (A) silicose inicial com nódulos espaçados e pequenos e (B) nódulos com tamanhos variados.



Fonte: LEUNG e CHEN, 2012.

A espirometria, exame comumente indicado para acompanhamento de trabalhadores expostos à sílica, pode apresentar resultado normal nos estágios iniciais da silicose. A diminuição da capacidade pulmonar total e da complacência pulmonar são possíveis, especialmente em casos graves e de doença progressiva (LOPES *et al*., 2008).

Investigações invasivas, como biópsia pulmonar, raramente são necessárias para o diagnóstico de silicose, mas podem ser feitas para excluir outras condições potencialmente tratáveis ou na avaliação de doença avançada (DONROE *et al*., 2008).

3.2.7 Limites De Exposição Ocupacional

Diversos estudos epidemiológicos recentes, citados pelo NIOSH e IARC (NIOSH, 2002), indicam que os limites de exposição ocupacional (LEO) recomendados até 1999 não eram suficientes para prevenir a ocorrência da silicose crônica.

O NIOSH estima que pelo menos 1 em cada 100 trabalhadores desenvolverão alterações radiológicas durante uma vida laboral de 40 a 45 anos, com a exposição a concentrações de sílica cristalina respirável nos limites recomendados. Ou seja, REL = 0,05 mg/m^3 para quartzo e cristobalita (recomendado pela NIOSH para jornadas semanais de trabalho de 40 h) e PEL[2] = [10 ÷ (%SiO_2 + 2)] mg/m^3 para quartzo (recomendado pela OSHA e semelhante ao recomendado pela legislação Brasileira com correção para jornada de 48 h semanais), sendo o PEL para cristobalita a metade do valor calculado a partir da fórmula para o quartzo.

No Brasil, os LEOs para sílica livre cristalizada são fixados por meio da Norma Regulamentadora n° 15 - Anexo 12: “Limites de Tolerância para Poeiras Minerais”, estabelecida pela Portaria n° 3214 de 08 de junho de 1978. A lista de limites de tolerância Brasileiros foi baseada nas recomendações da ACGIH publicadas em 1974, corrigidos para a jornada de trabalho de 48 h, vigente no Brasil em 1978. A maioria dos limites dessa lista permanece sem revisão até hoje, sem considerar que diversas substâncias passaram a ter indicação de potencial carcinogênico, como é o caso da sílica.

O limite Brasileiro é calculado por meio da seguinte expressão:

$$LT = \frac{8}{\%\ SiO_2 + 2}$$

sendo LT = limite de tolerância (denominação antiga correspondente ao atual LEO) e % SiO_2 = teor de quartzo na amostra de poeira.

O LT calculado pela expressão corresponde a aproximadamente duas vezes o LEO da ACGIH até 2004.

Para interpretação dos resultados da avaliação ambiental, serão adotados como valores de referência os limites de exposição ocupacional (LEO) recomendados pela ACGIH em 2020, observando-se os critérios descritos a seguir, em ordem crescente de prioridade:

1. uma vez que o maior valor estabelecido para o LEO para poeiras na **fração inalável** é de 10 mg/m^3, considera-se que, independentemente da composição da poeira, a concentração não deve ultrapassar esse valor nessa fração em nenhum ambiente de trabalho;

2. uma vez que o maior valor estabelecido para o LEO para poeiras na **fração respirável** é de 3 mg/m^3, considera-se que, independentemente da composição da poeira, a concentração não deve ultrapassar esse valor nessa fração em nenhum ambiente detrabalho;

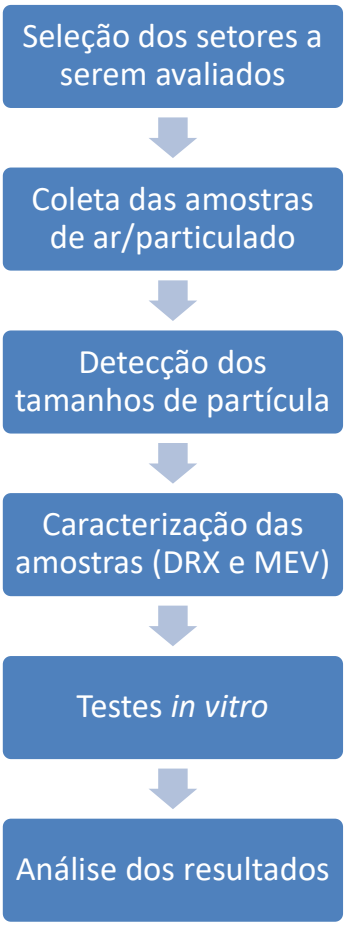
3. considerando os agravos à saúde, provocados pela presença da **sílica livre cristalizada** na poeira suspensa no ar **na fração respirável** e seu potencial carcinogênico reconhecido pela IARC, aplicou-se o LEO de 0,05 mg/m^3, por ser mais restritivo que aquele fixado pela legislação Brasileira por meio da NR-15: anexo 12.

De acordo com a NR-9, devem ser iniciadas ações preventivas para controle sistemático da exposição aos agentes químicos, quando as concentrações do referido agente ultrapassarem 50% do valor de referência ou LEO (Nível de Ação - NA).

4 METODOLOGIA

Para atender aos objetivos propostos, o trabalho foi dividido em algumas etapas que estão descritas no fluxograma expresso na Figura 8 e que serão melhor explicados no decorrer deste capítulo.

Figura 8 - Etapas experimentais



Fonte: Autora, 2022.

Os métodos e procedimentos utilizados consideraram os cuidados necessários para que a avaliação dos ambientes de trabalho seja representativa das condições de exposição dos trabalhadores, refletindo também a penetração e deposição das partículas nas várias regiões do sistema respiratório humano.

Os instrumentos utilizados possibilitaram a coleta e medição da poeira em frações de tamanho de partícula que possuem relação direta com efeitos à saúde, em especial ao sistema respiratório humano. As amostras coletadas foram

analisadas utilizando-se métodos convencionais aplicáveis a material particulado.

Por fim, as amostras de pó coletadas serão submetidas a teste *in vitro* para estudar os efeitos biológicos (toxicológicos e citotóxicos) provocados pela exposição a partículas na fração respirável.

4.1 SELEÇÃO DOS SETORES

O critério para a seleção dos setores da indústria cerâmica levou em consideração a execução de atividades com fonte de geração de poeira mineral e/ou arraste dessas partículas para setores adjacentes. Observou-se também as soluções de controle adotadas para a mitigação do problema.

Dentre todos os setores do processo produtivo, elegeram-se 3 setores para a execução dos trabalhos experimentais de campo.

Os locais foram visitados para observação e obtenção de informações complementares sobre métodos, organização do trabalho e processos utilizados durante as atividades típicas. A partir das observações preliminares, foram planejadas as estratégias de amostragem adequadas para as coletas destinadas às determinações da concentração de poeira e a detecção dos tamanhos das partículas suspensas no ar.

4.1.1 Descrição dos ambientes de trabalho

4.1.1.1 Aspectos gerais

Os setores selecionados para avaliação ambiental apresentavam construções de alvenaria e telhado metálico ou de fibrocimento, geralmente sustentado por vigas de estrutura metálica com pé direito alto. Os equipamentos se distinguem em cada setor, dependendo da finalidade e etapa do processo. O piso era de concreto alisado, varrido diariamente por varredeira elétrica e, em muitos locais, molhado para reduzir a poeira.

Os trabalhadores recebiam máscaras descartáveis como proteção contra a poeira; essas máscaras eram de boa qualidade e possuíam Certificado de Aprovação (CA) expedido por órgão do Ministério do Trabalho e Previdência. Os trabalhadores recebiam orientação sobre a colocação, o uso correto e a conservação das máscaras.

A empresa possuía documentos que comprovavam o cumprimento da legislação quanto à realização do PGR (Programa de Gerenciamento de Riscos) e o PCMSO (Programa de Controle Médico de Saúde Ocupacional); os trabalhadores eram submetidos aos exames exigidos por lei.

A jornada de trabalho era de 40 h semanais e os setores funcionam 24 h por dia, com 3 grupos de funcionários.

A unidade fabril, a partir da qual as amostras para a pesquisa foram coletadas, fabrica revestimento cerâmico do tipo porcelanato, com produção aproximada de 300.000 m²/mês.

4.1.1.2 Fontes geradoras de poeira

As principais fontes geradoras de poeira são atomização, prensagem e retífica a seco. São locais onde a ruptura de um material originalmente sólido e a movimentação deste material propiciavam o espalhamento da poeira em direção às vias respiratórias dos trabalhadores, que executavam suas atividades nas proximidades. Cada setor possui particularidades que foram consideradas para a escolha:

a) Atomização: nesta etapa, o fluido chamado de barbotina é pulverizado com a entrada de ar quente em contracorrente, com o objetivo de remover a água presente e formar o pó atomizado, que cai por gravidade em esteiras transportadoras, gerando pó;
b) Prensagem: é o local onde é dada a forma ao produto final; o pó atomizado produzido na atomização é depositado em cavidades e recebe uma pressão de compactação em torno de 400 bar. O pó perde sua forma esférica e a movimentação do material nas cavidades, geram pó ao ambiente;
c) Retífica a seco: as peças, após a etapa de queima, são cortadas para que a variação de tamanho entre elas seja a mínima possível. Este processo acontece por via seca, com o desbaste lateral do material; o contato da ferramenta diamantada com a peça cerâmica produz alta concentração de poeira, que é lançada ao ar.

4.2 COLETA DAS AMOSTRAS DE MATERIAL PARTICULADO

Foram coletadas amostras de todos os setores produtivos previstos, de maneira a se determinar o nível de exposição dos trabalhadores e se verificar o tamanho característico das partículas presentes.

A amostragem da poeira suspensa no ar dos ambientes foi realizada com base no procedimento técnico descrito na Norma de Higiene Ocupacional NHO-08: Coleta de Aerodispersóides Sólidos em Filtros de Membrana. Essa norma estabelece um procedimento padronizado para coleta de aerodispersóides sólidos em filtros de membrana e tem a finalidade de fornecer subsídios para a coleta de amostras representativas da exposição dos trabalhadores às poeiras presentes no ambiente de trabalho.

Durante esse período, foram coletadas amostras de material particulado para duas finalidades:

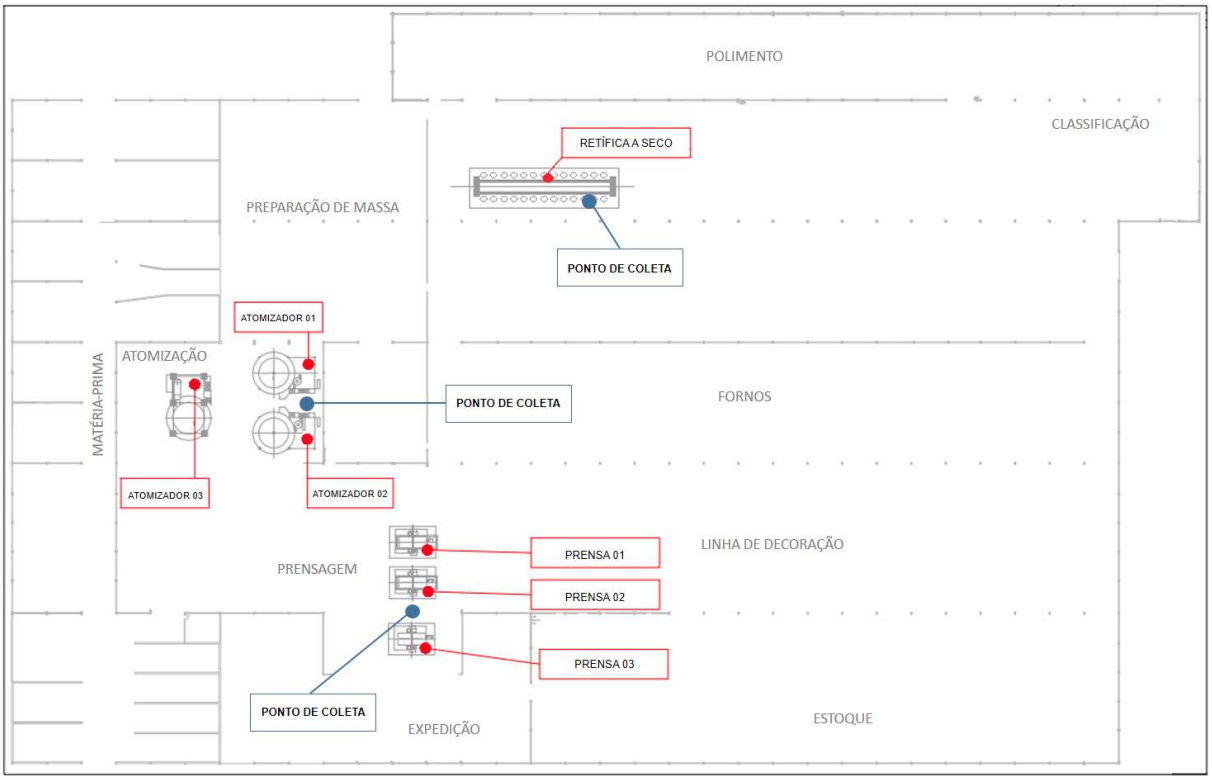
1. Determinar as concentrações de poeira na fração respirável para se avaliar o nível de exposição dos trabalhadores;
2. Detectar os tamanhos das partículas presentes no ar dos ambientes de trabalho para se verificar o tamanho característico das partículas.

4.2.1 Coletas para determinação das concentrações de poeira

Para se avaliar a exposição dos trabalhadores por meio das concentrações de poeira nas frações respirável, foi realizada a amostragem por área, com o amostrador colocado em ponto fixo no ambiente de trabalho à altura média das narinas de um trabalhador típico, em local de circulação comum aos trabalhadores, próximo às principais fontes geradoras de poeira. Esse tipo de amostragem avalia a concentração ambiental, podendo indicar também a exposição indireta do trabalhador e/ou a eficiência das medidas de controle existentes.

Na Figura 9 é possível observar a disposição dos setores e equipamentos na planta industrial, assim como os pontos de coleta, estrategicamente posicionados nos pontos de maior produção de material particulado.

Figura 9 - Pontos de coleta de poeira respirável por área.



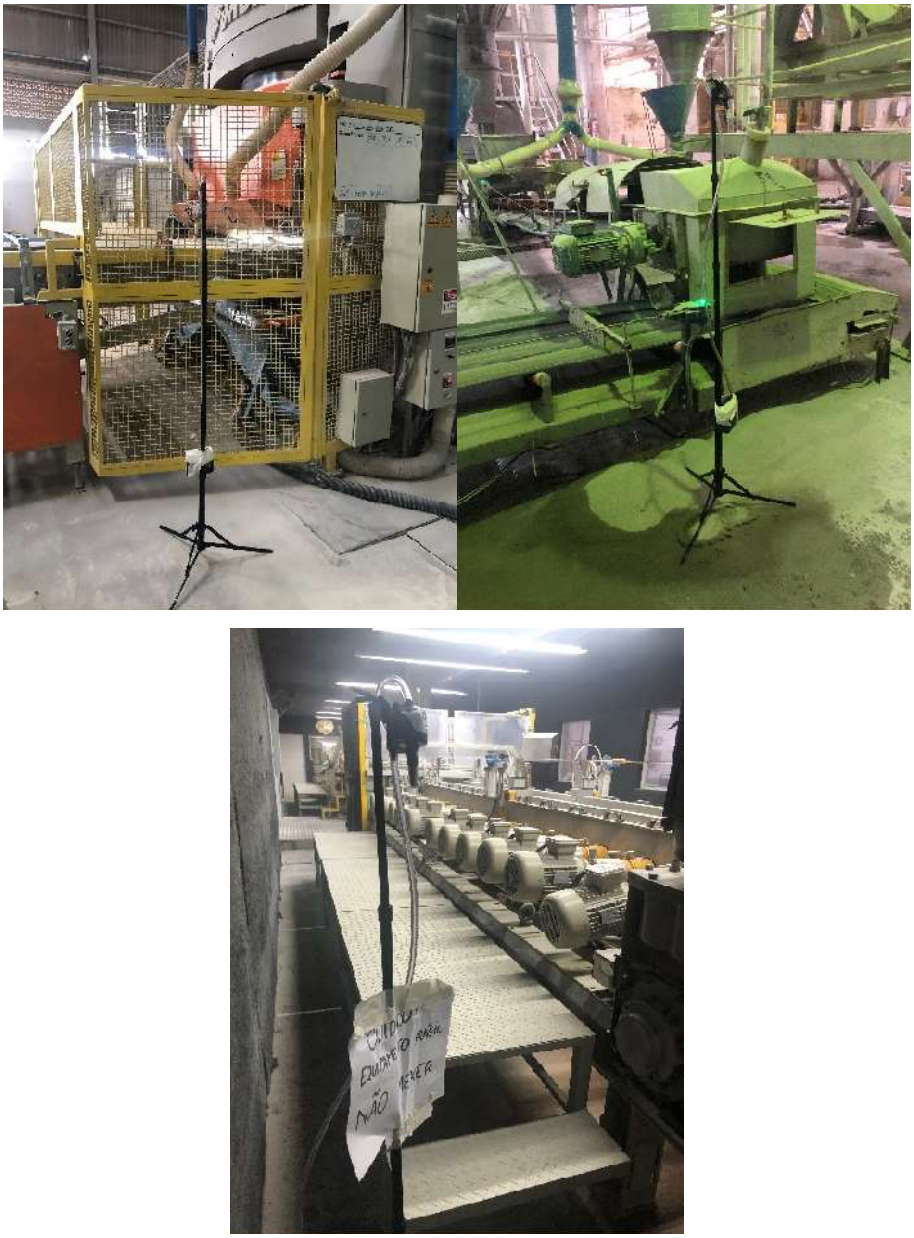
As amostras foram coletadas durante as atividades normais de trabalho, procurando não interferir na rotina dos trabalhadores. A Figura 10 mostra os locais onde foram instalados os aparatos de medida.

Os dispositivos de coleta e equipamento estão representados na Figura 11, onde tem-se uma bomba de amostragem Accura 3, marca Criffer, com uma vazão de 1,70 L/min.

A poeira entra no amostrador passando através de um bocal central de aceleração, que se dirige para o tubo coletor. Dentro do amostrador, há a presença de um filtro, com massa conhecida, onde é depositado as partículas da fração respirável.

As amostras de área para as determinações das concentrações das frações de poeira serão coletadas sobre filtros de membrana de PVC de 5,0 µm de poro e 37 mm de diâmetro. E para garantir a coleta apenas nas partículas da fração respirável, colocou-se um ciclone, de mesma marca e fabricante, na extremidade do coletor, projetado para selecionar partículas menores que 10 µm.

Figura 10 – Imagens reais dos pontos de coleta.



Fonte: Autora, 2022.

Figura 11 - Bomba de amostragem e dispositivos de coleta.

Fonte: Criffer, 2021.

4.2.2 Detecção dos tamanhos de partícula

Para a detecção das concentrações de poeira presentes no ar dos ambientes de trabalho, realizaram-se coletas a cada 1 s, com o resultado plotado em gráfico dinâmico com os seguintes parâmetros: concentração (10, 2,5 e 1,0 µg/m³), número de partículas (>0,3, >0,5, >1,0, >2,5, >5,0 e >10 µm), temperatura, umidade relativa e AQI – *Air Quality Index* (Índice de qualidade do ar).

O equipamento foi posicionado em um tripé, a 1,5 m do chão, conectado a um computador portátil, como mostrado nas Figura 12 e 13. O tempo de coleta foi de 1 h por local.

Figura 12 - Exemplo de ponto de coleta de detecção de tamanho de partículas

Fonte: Autora, 2022.

Figura 13 - Detector de material particulado.

Fonte: Geekcreit, 2021.

O equipamento é dotado de laser multi-ângulo, que irradia no material particulado suspenso no ar. A luz dispersa é coletada em um ângulo especificado ao mesmo tempo. De acordo com a intensidade de dispersão, curvas que variam com o tempo podem ser obtidas por meio do sensor. Podem ser obtidos diâmetros de partículas equivalentes e o número de partículas suspensas com diferentes tamanhos em unidades de volume.

4.3. MÉTODOS DE ANÁLISE

No processo de caracterização das amostras do material particulado, foram realizados diversos procedimentos que serão destacados nos próximos tópicos.

4.3.1 Difração de Raios X

As amostras foram caracterizadas por difração de raios X (DRX) em um equipamento Rigaku, modelo MiniFlex. Essa caracterização foi realizada com o objetivo de se avaliar a composição e a presença de sílica livre cristalina.

4.3.2. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Para se avaliar a morfologia do material particulado, foi utilizada a microscopia eletrônica de varredura utilizando-se um equipamento Zeiss EVO MA10, assim como a análise química nas amostras em um espectrômetro de raios X de energia dispersiva Bruker Quantax 200 acoplado ao MEV.

4.4. ENSAIOS TOXICOLÓGICOS

4.4.1. Extração do material retido nos filtros

Os filtros de PVC (Zefon Internacional, 05 µm, 37 mm, Plain White, USA) utilizados na coleta do material particulado foram submetidos ao processo de extração dos componentes retidos (Figura 14).

Estes filtros, quando submetidos a vibração em ultrassom, liberam a totalidade das partículas nele retidas, permitindo a obtenção de suspensões de material particulado em meio líquido com concentrações conhecidas, uma vez que conhecia-se a massa do filtro e a quantidade de material retido.

Para a realização dos ensaios *in vitro*, foram extraídas as amostras do filtro com 80% de potência do equipamento por 10 min, em 100 mL de água deionizada.

Os filtros brancos (não expostos) foram submetidos ao mesmo processo de extração dos demais filtros.

Figura 14 - Método de extração do material particulado por ultrassom.

Fonte: Autora, 2022.

4.4.2. Citotoxicidade e o MTT

Células de hepatoma, derivadas de fígado humano (HepG2), foram adquiridas do banco de células do Rio de Janeiro (Brasil). Eles foram cultivados sob condições padrão em meio DMEM (Dulbecco's Modified Eagle Medium) suplementado com 10% de soro fetal bovino inativado (FBS), 1% de antibióticos penicilina/estreptomicina e 0,1% de gentamicina. Eles foram mantidos em incubadora em atmosfera umidificada e temperatura constante de 37 °C com 5% de dióxido de carbono (CO_2).

Para o experimento, as células (que estavam entre a terceira e a sétima passagem) foram semeadas em meio completo em placas de 96 poços na densidade de 1 x 105 e incubadas por 24 h. A análise de citotoxicidade foi avaliada com brometo de 3-(4,5-dimetil tiazol-2 il)-2,5-difenil tetrazólio (MTT).

O ensaio MTT foi realizado de acordo com a International Organization for Standardization - ISO 10993–52009 (ISO, 2009). As células foram expostas à amostra-teste bruta e diluídas no próprio meio de cultura na concentração de 50% (v/v) e nos respectivos controles por 24 h.

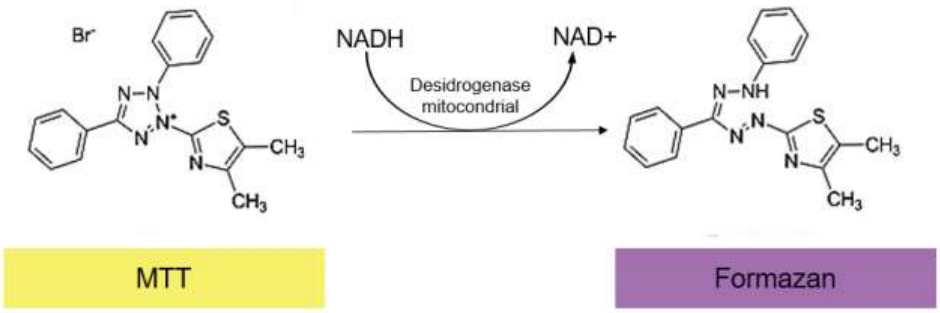
Dimetilsulfóxido (DMSO, 20%) e meio de cultura DMEM foram usados como controles positivo e negativo, respectivamente. As amostras foram previamente filtradas em papel filtro Millipore 0,22 µm. DMSO foi usado como controle positivo porque inibe a respiração mitocondrial e a liberação de citocromo c da mitocôndria para o citoplasma e induz a morte celular (GALVÃO *et al.*, 2014).

Após o tratamento, as células foram lavadas com solução de DPBS e adicionados 100 µL de meio de cultura (sem FBS e vermelho de fenol) com solução de MTT (1,0 mg/mL) por poço. A placa foi incubada por 3 h e, em seguida, os cristais de formazan resultantes foram dissolvidos em 100 µL de DMSO. A absorbância a 540 nm foi medida usando um leitor de microplacas (Multiskan, UNISCIENCE). Os valores foram calculados em % de viabilidade celular.

O teste do MTT quantifica o dano induzido por um agente no metabolismo celular de glicídios, pela avaliação da atividade de desidrogenases mitocondriais. A viabilidade mitocondrial e, consequentemente, a viabilidade celular, é então quantificada pela redução do MTT a formazan (são cristais artificiais da cor púrpura), pela atividade das enzimas desidrogenases. Dessa forma, a redução do MTT a

formazan é diretamente proporcional à atividade mitocondrial e à viabilidade celular (MOSMANN, 1983).

Figura 15 - Reação de redução do MTT a formazan.



Fonte: Magalhães, 2018.

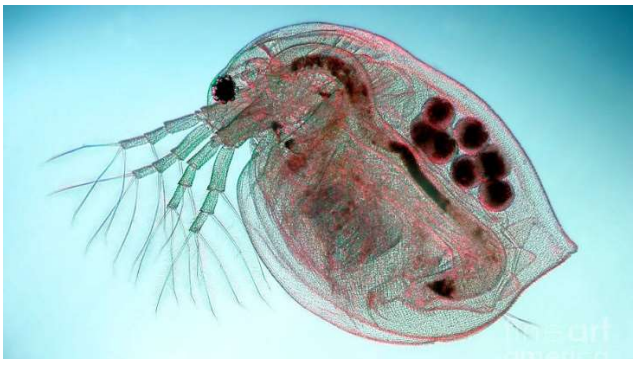
O MTT, que é um sal de coloração amarela e solúvel em água, sofre reação de redução em formazan, um sal de coloração arroxeada e insolúvel em água.

Foram utilizadas duas amostras independentes do mesmo setor e em duplicidade, tendo 4 resultados do mesmo local para avaliar o efeito celular.

4.4.3. Toxicidade e a *Daphnia magna*

Daphnia magna Straus, 1820 (Cladocera, Crustacea) é um microcrustáceo planctônico, de 5 a 6 mm de comprimento, que atua como consumidor primário na cadeia alimentar aquática, alimentando-se por filtração de material orgânico particulado em suspensão.

Figura 16 - *Daphnia magna Straus.*



Fonte: Enbiolab, 2023.

Os organismos deste gênero são vulgarmente conhecidos como pulga d'água e têm larga distribuição no hemisfério norte (NBR 12.713, 2003a). O organismo foi selecionado para esta pesquisa por ser amplamente conhecido, facilmente cultivado e mantido em laboratório e ter reprodução frequente.

A metodologia de cultivo do organismo-teste *Daphnia magna* Straus, 1820 (Cladocera, Crustacea) seguiu o descrito na NBR 12.713 (ABNT, 2003a). O método de cultivo objetivou a manutenção do organismo-teste em laboratório, sob condições que permitam a avaliação da toxicidade de amostras. Os organismos-teste foram cultivados em água reconstituída (meio M4), com pH variando de 7,0 a 8,0 e dureza variando de 175 a 225 mg/L $CaCO_3$ (NBR 12.713, 2003a).

Após o tempo de prova (48 h), observou-se o número de indivíduos imóveis por concentração e, sendo que inicialmente colocou-se 10 indivíduos por concentração, a partir destes dados, relacionou-se com os demais setores e o filtro branco (não exposto).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 QUANTIFICAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO

A Tabela 1 mostra os resultados de concentração de material particulado na fração respirável nos três (3) setores definidos; por apresentar maior potencial de geração de poeira, as amostragens foram feitas em dias diferentes, durante uma jornada de trabalho diária completa, em triplicidade.

As amostras coletadas com bomba de amostragem e depositadas no filtro de PVC, como mostra a Figura 17, foram submetidas ao ensaio de difração de raios X, para detecção da quantidade de sílica livre cristalina presente em cada amostra.

Figura 17 - Filtro de PVC após a coleta do ambiente de retífica a seco.

Fonte: Autora, 2022.

A simples constatação de material particulado depositado no filtro, ou até mesmo a visualização do ambiente, não significa que seja um ambiente danoso; entretanto, a presença de sílica livre cristalina torna a poeira um carcinogênico conhecido.

Os limites de tolerância foram calculados com base na Norma Regulamentadora n° 15 - Anexo 12: “Limites de Tolerância para Poeiras Minerais”, estabelecida pela Portaria n° 3214 de 08 de junho de 1978.

$$LT = \frac{8}{\%\ SiO_2 + 2}$$

Sendo:

LT = limite de tolerância;

% SiO_2 = teor de quartzo na amostra de poeira.

Tabela 1 – Quantificação de Material particulado na fração respirável e teor de sílica livre cristalina, em uma amostragem de 8 h.

Setor	Concentração (mg/m³)	Concentração média (mg/m³)	Teor de sílica (%)	Massa (µg)	Limite de tolerância (mg/m³)
Prensa	0,735	0,683 ±0,267	ND*	ND	4,000
	0,980				
	0,333				
Atomizador	0,980	0,758 ±0,160	2,40	12,000	1,818
	0,613				
	0,680				
Retífica a Seco	1,471	0,980 ±0,347	4,83	58,000	1,171
	0,735				
	0,735				

*ND – Não detectado.

Fonte: Autora, 2022.

No setor de Prensa, apesar de apresentar material particulado na fração respirável, ou seja, com tamanho inferior a 10 µm, não foi detectado sílica livre cristalina; assim a concentração de poeira do ambiente ficou abaixo do limite de tolerância calculado e, desta forma, com base na legislação brasileira, este setor encontra-se salubre.

Entende-se por "Limite de Tolerância", a concentração ou intensidade máxima ou mínima, relacionada com a natureza e o tempo de exposição ao agente, que não causará danos à saúde do trabalhador durante a sua vida laboral.

Nas amostras coletadas no setor de Atomização, as amostras apresentaram 2,40% de sílica livre cristalina, assim obtendo-se um limite de tolerância calculado de 1,818 mg/m³. A concentração de poeira respirável deste setor também ficou abaixo do limite e o setor foi classificado como salubre, de acordo com a Norma

Regulamentadora nº 15, anexo 12; no entanto, considerando-se o desvio padrão e a definição de nível de ação, que considera uma concentração de 50% do limite de tolerância, este setor requer ações e cuidados com os trabalhadores, para que a exposição seja minimizada.

O setor de Retífica a Seco apresentou a maior concentração de poeira; o teor de sílica livre cristalina da amostra ficou em 4,83% e o limite de tolerância de 1,171 mg/m³. A concentração média ficou abaixo, porém considerando-se o desvio padrão, o valor excede o recomendado pela legislação aplicada e o setor é considerado insalubre. Medidas de controle se tornam fundamentais para se reduzir a exposição dos trabalhadores.

Como já mencionado, é definido pela Norma regulamentadora nº 9, que devem ser iniciadas ações preventivas para controle sistemático da exposição aos agentes químicos, quando as concentrações do referido agente ultrapassarem 50% do valor de referência, o chamado Nível de Ação – NA. No setor de retífica, o nível de ação é de 0,586 mg/m³, em que a concentração média e todas as amostragens individuais ultrapassam este valor.

A norma Americana ACGIH, que possui revisões anuais dos limites de tolerância, chamados de limites de exposição (TLV), recomenda uma concentração de poeira de sílica cristalina (quartzo) na fração respirável máxima abaixo de 0,05 mg/m³; ou seja, a norma brasileira encontra-se em desacordo com os padrões internacionais e permite a exposição a concentrações muito superiores de sílica livre cristalina, mesmo este agente sendo classificado como um carcinogênico conhecido.

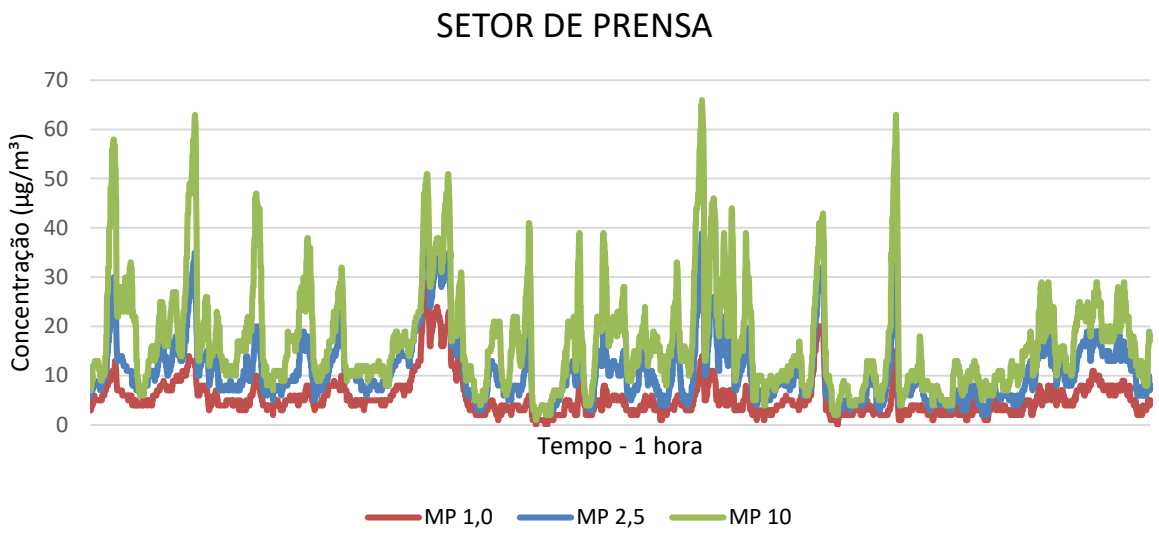
5.2 DETECTOR DE TAMANHO DE PARTÍCULA

Para a detecção das concentrações de poeira presentes no ar dos ambientes de trabalho, realizou-se coletas a cada 1 s, durante 1 h, em uma situação habitual de trabalho. Os resultados encontram-se plotados em gráficos das Figuras 18, 19 e 20. O eixo horizontal representa as faixas de tamanho (>1,0, >2,5 e >10 μm) e no eixo vertical a concentração de material particulado em μg/m³.

Observa-se que as partículas de tamanho maior (10 μm) estão em maior abundância; as frações com tamanho menores também são observadas. Esta informação é importante, pois sabe-se que o tamanho, forma, densidade e higroscopicidade determinam como as partículas comportam-se no ar e a eficiência

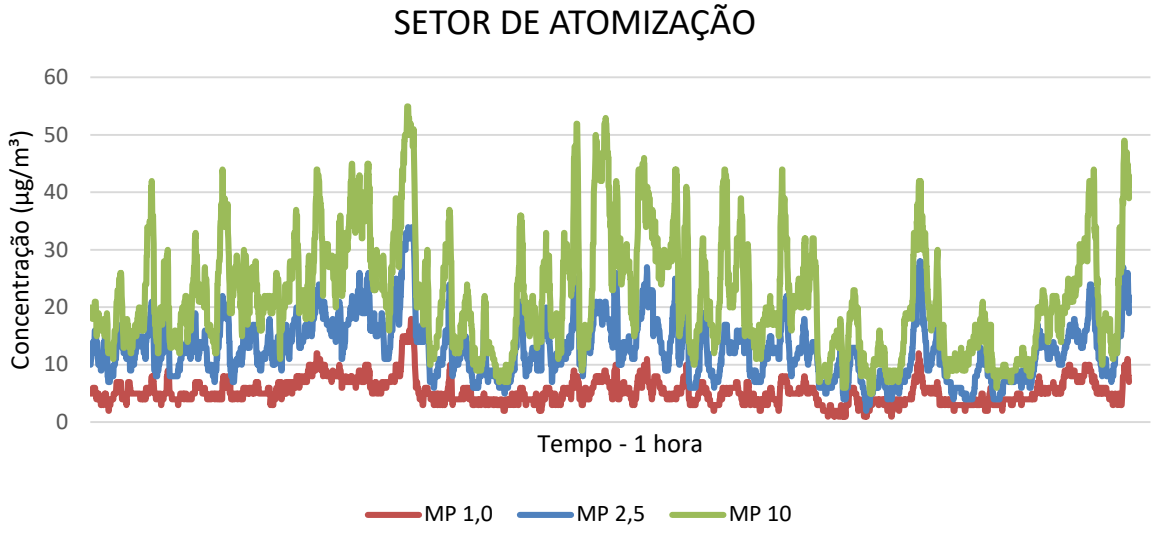
com que elas são inaladas e depositadas no trato respiratório. Podem influenciar, também, na interação com os tecidos do corpo e nos mecanismos de defesa (LIPPMANN, 1986).

Figura 18 - Variação da concentração de partículas no ambiente no intervalo de 1 h no setor de Prensa.



Fonte: Autora, 2022.

Figura 19 - Variação da concentração de partículas no ambiente no intervalo de 1 h no setor de Atomização.

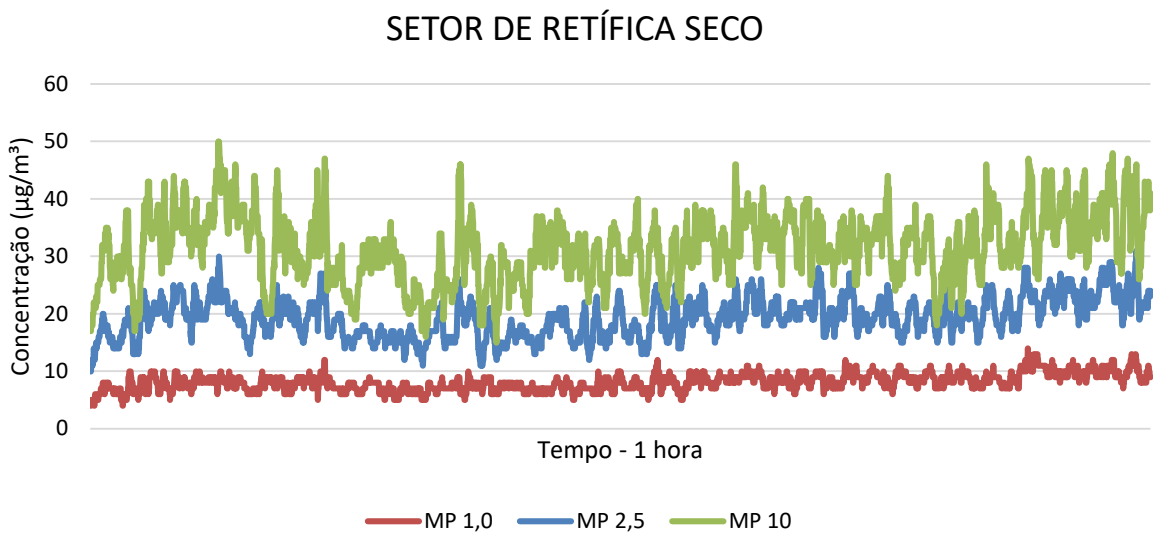


Fonte: Autor, 2022.

Os picos observados neste setor estão associados aos ciclos de compactação do material cerâmico, com a descida do estampo para a formação do corpo cerâmico e os acionamentos de ar comprimido do equipamento, para expulsar as partículas indesejadas da superfície do material. Outro fator observado é o aumento do material particulado pela movimentação da empilhadeira, que transitava no setor ao lado; sem ter barreira física de delimitação, acabava por aumentar a poeira total no setor de prensa.

No setor de atomização os picos são muito mais frequentes e a quantidade de poeira observada também é maior; tamanhos de partículas menores (>1,0 e >2,5 µm) também são observados durante toda a operação, estando presentes dispersos no ar.

Figura 20 - Variação da concentração de partículas no ambiente no intervalo de 1 h no setor de Retífica a Seco.



Fonte: Autora, 2022.

No setor de Retífica Seco, a emissão de poeira é constante, visto que o corte a seco do material aconteceu de forma ininterrupta durante a coleta. É o local onde mais se encontram partículas pequenas e potencialmente mais danosas, visto a possibilidade de entrar pelo sistema respiratório e se depositar nos pulmões e em outros órgãos.

Outro fator importante desta análise é que, independentemente da concentração de poeira, a Fundacentro (2016) determina que para diâmetro

aerodinâmico médio mássico maior ou igual a 2 μm podem-se usar filtros classe P1, P2 ou P3. Para diâmetro menor que 2 μm, deve-se usar o de classe P3. Os filtros são classificados em P1, P2 ou P3, conforme a norma ABNT NBR13697, que determina a classe de acordo com o nível de penetração de aerossol e de resistência à respiração medidas nas condições de ensaio, sendo o P3 o filtro com maior capacidade de retenção e, por consequência, o que causa maior desconforto ao usuário.

Em todos os setores analisados encontrou-se material particulado de tamanho inferior a 2 μm.

O padrão brasileiro para exposição às partículas (MP10) é definido pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), estabelecendo o valor máximo recomendável de 80 μg/m³ (ANVISA, 2003). Em todos os locais este parâmetro foi respeitado, atendendo à legislação vigente sobre qualidade do ar em ambientes internos.

A Organização Mundial da Saúde (OMS, 2005) recomenda valores de até 50 μg/m³ de partículas inaláveis (10 μm) em 24 h. Verificou-se picos que excedem este parâmetro, porém em média os setores atenderam esta legislação internacional. A legislação brasileira não define valores limites de exposição para tamanho menores que 10 μm.

Para partículas inferiores a 2,5 μm, a OMS utiliza o limite de 25 μg/m³ (24 h de exposição). Em média todos os setores atenderam essa especificação.

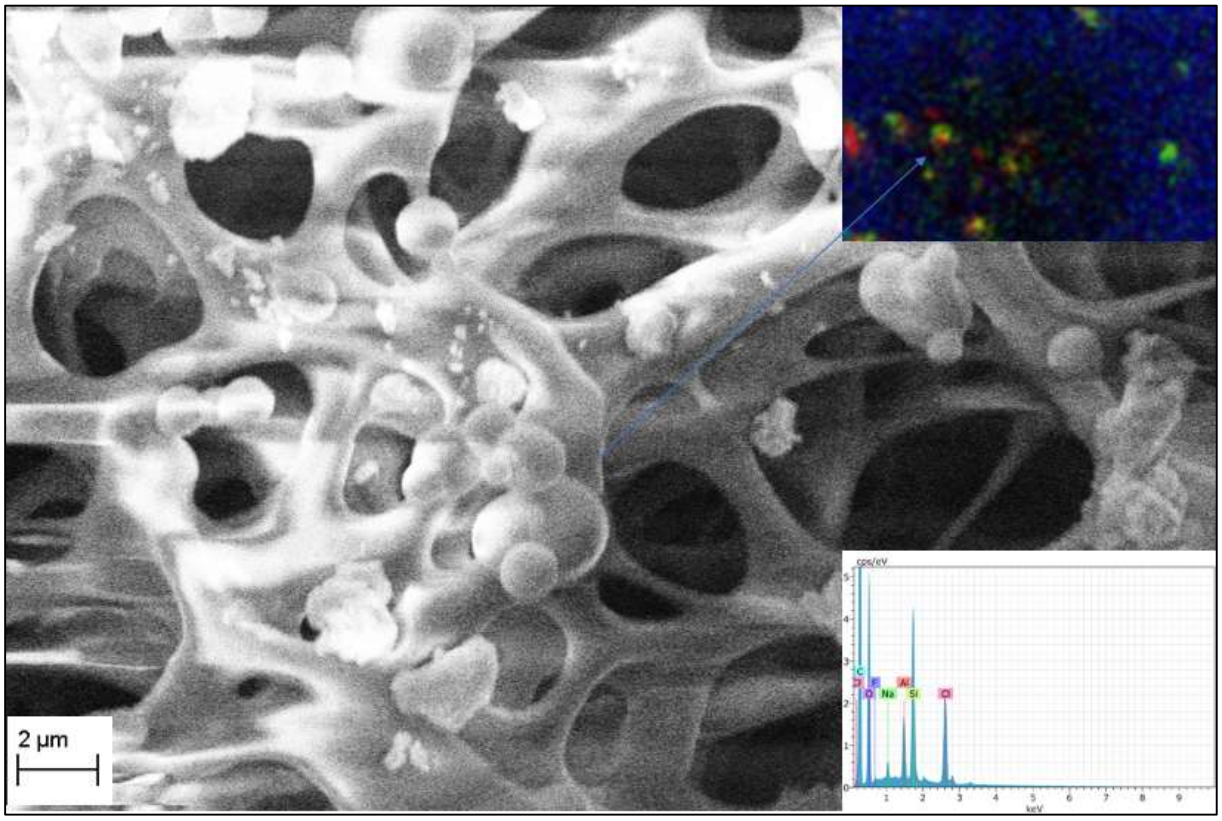
Para partículas ultrafinas, inferiores a 2,5 μm, não há qualquer regulamentação nacional ou internacional vigente.

5.3 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

Para se avaliar a morfologia do material particulado, submeteram-se os filtros com o material coletado em cada ambiente ao ensaio de microscopia eletrônica de varredura, Figuras 21, 22 e 23.

Pela análise de EDS da amostra do Atomizador, verificou-se a presença de partículas ricas em Al e Si, possivelmente formadas por aluminossilicatos, como era o esperado para uma indústria cerâmica. De acordo com a ampliação obtida, observa-se partículas esféricas com tamanho inferior a 2 μm retidos no filtro de PVC utilizado para a coleta.

Figura 21 - Imagens de MEV e de EDS da amostra do setor do Atomizador sobre o filtro de PVC.



Fonte: Autora.

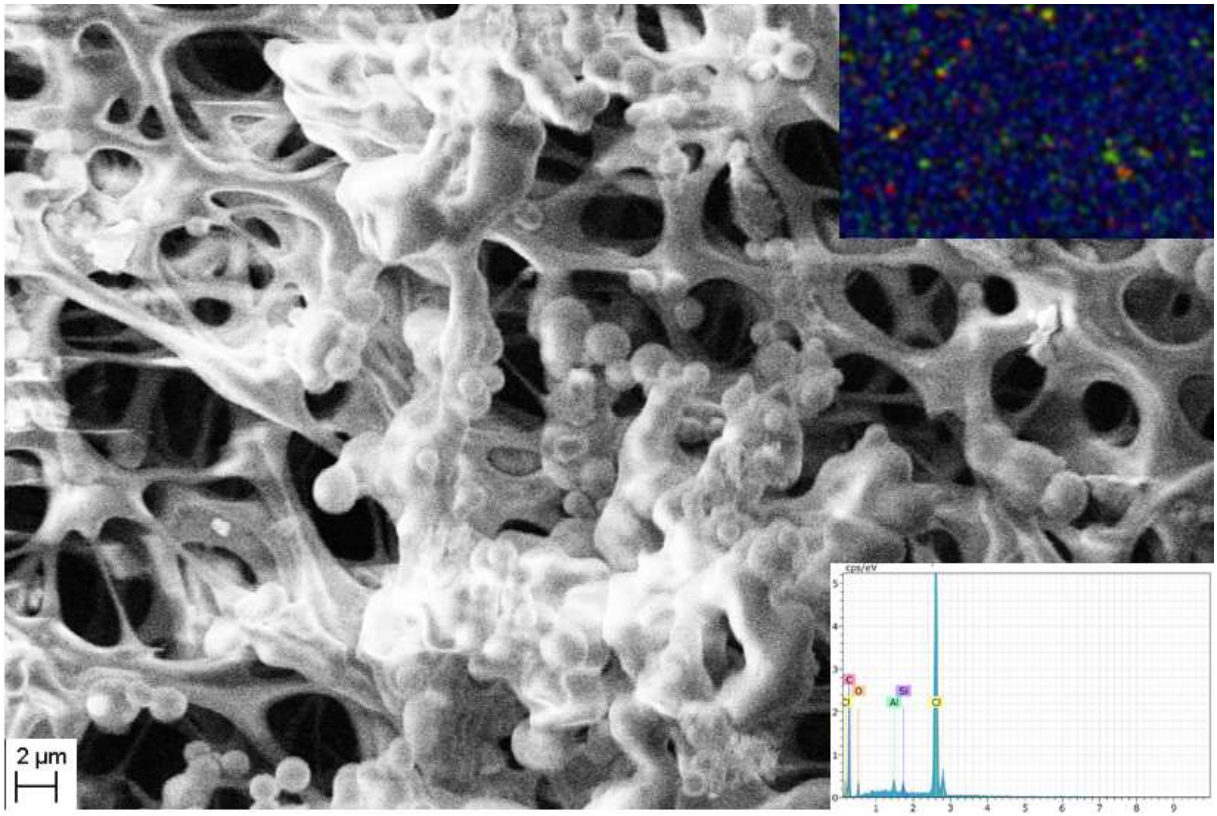
Esta constatação é importante, pois características como tamanho, forma, densidade e higroscopicidade determinam como as partículas comportam-se no ar e a eficiência com que elas são inaladas e depositadas no trato respiratório. Podem influenciar, também, na interação com os tecidos do corpo e nos mecanismos de defesa (LIPPMANN, 1986).

A maneira como as partículas prosseguem através do trato respiratório para diferentes regiões dos pulmões e o local aonde elas provavelmente vão se depositar dependem do diâmetro aerodinâmico da partícula, das dimensões das vias aéreas e do padrão de respiração (SANTOS, 2005).

Como as partículas detectadas na Figura 21, possuem formato arredondado, o que também será observado nas Figuras 22 e 23, espera-se que o potencial danoso seja menor, com maior viabilidade celular no ensaio citotóxico e menor número de imobilidade no ensaio de toxicidade, quando comparado com partículas de formato irregular e pontiagudas.

Na análise da microestrutura das amostras coletadas no setor de Prensa, observa-se também a presença de Si e Al; o pico de Cl pronunciado presente na amostra refere-se ao filtro utilizado na coleta, visto que é fabricado em PVC.

Figura 22 – Imagens de MEV e de EDS da amostra do setor de Prensa sobre o filtro de PVC.

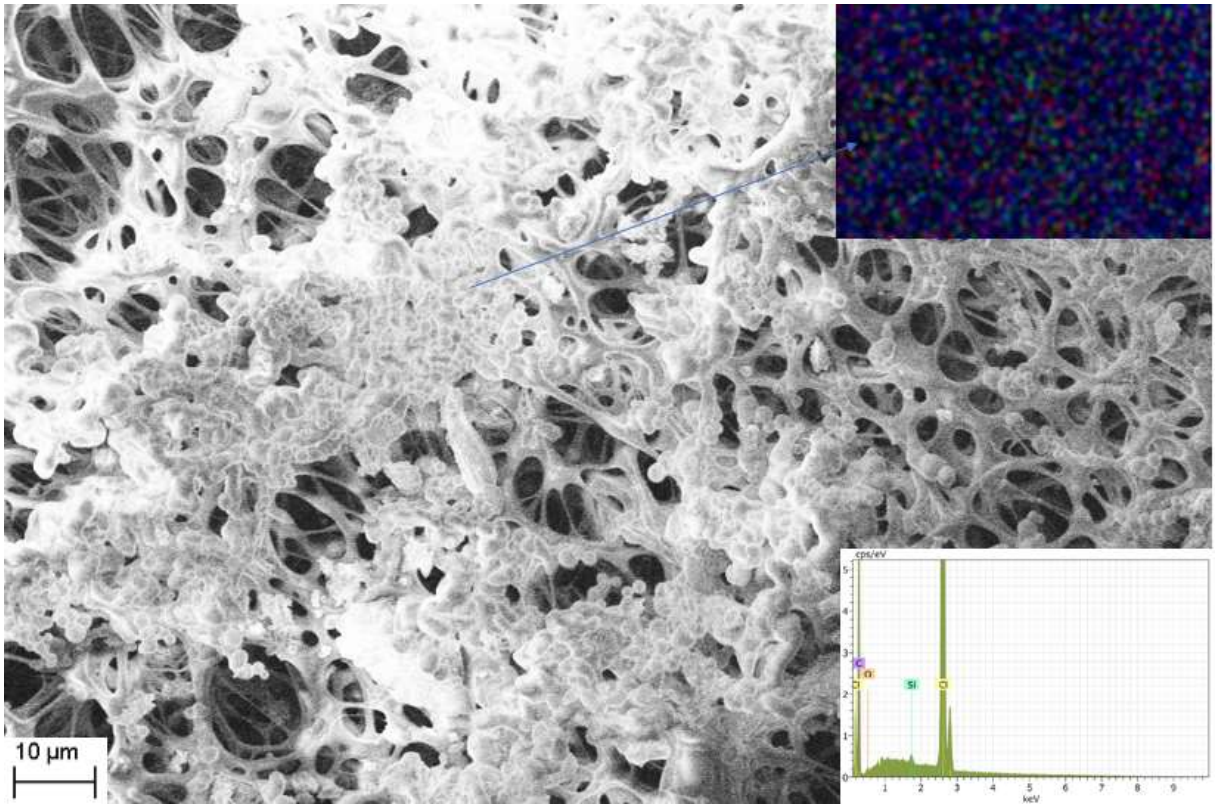


Fonte: Autora, 2022.

No setor de Retífica, não foi detectada a presença de Al, apenas Si, porém por este ensaio não é possível identificar se trata-se de sílica cristalina ou amorfa, apenas a presença desse elemento.

Para Santos (2005), em ambientes de trabalho geralmente ocorrem misturas complexas de componentes e tipos de minerais, de tal modo que é difícil se avaliar a exposição a tais poeiras de uma maneira significativamente verdadeira, mesmo conhecendo-se a concentração em massa, a distribuição dos tamanhos e a morfologia das partículas presentes na poeira como um todo.

Figura 23 - Imagens de MEV e de EDS da amostra do setor de Retífica a Seco sobre o filtro de PVC.



Fonte: Autora, 2022.

5.4 VIABILIDADE CELULAR

Os resultados apresentados até o momento mostram que as amostras coletadas em cada setor apresentam quantidades de sílica, na maioria das amostras na forma cristalina, e, em alguns casos, amorfa. Sabe-se também que os limites de tolerância da norma brasileira se diferem dos valores das normas internacionais. Entretanto, na Linach (Lista dos Carcinogênicos conhecidos), a sílica está presente independentemente da concentração e tamanho de partícula no ambiente; sua simples detecção já garante aos trabalhadores potencialmente expostos uma aposentadoria especial, com base nos 25 anos de exposição (Decreto nº 3.048, de 6 de maio de 1999).

Entretanto, qual norma é mais representativa? Há realmente riscos nesta exposição prolongada, qual o potencial dano celular?

Para responder estes questionamentos, realizou-se o estudo de toxicidade e citotoxicidade.

5.4.1. Toxicidade

A toxicidade foi avaliada com o uso de *Daphnia magna*; este organismo foi selecionado como organismo-teste para esta pesquisa por ser amplamente conhecido, facilmente cultivado e mantido em laboratório e por ter reprodução frequente, o que garante o suprimento para testes constantes. Ainda, precisa-se de pequena infraestrutura, os custos para manutenção são baixos e as respostas são rápidas devido ao seu baixo ciclo de vida. Além de atender a grande parte dos critérios de seleção para um organismo-teste, pesa o fato de o Iparque/Unesc já possuir a expertise de trabalhar com este organismo.

Tabela 2 – Resultados de toxicidade com *Daphnia magna*.

Locais	**Nº de indivíduos imóveis**		**Média**
	Amostra A	**Amostra B**	
Atomizador 1	2	3	1,8 ±0,8
Atomizador 2	1	1	
Prensa 1	5	7	6,3 ±0,8
Prensa 2	6	7	
Retífica 1	10	10	6,5 ±3,8
Retífica 2	2	4	
Filtro Branco 1	10	10	8,5 ±1,7
Filtro Branco 2	6	8	

Fonte: Autora. 2022.

Como pode ser visto na Tabela 2, as amostras do setor de Atomização apresentaram baixa toxicidade, comparando com as demais amostras, onde dos 10 indivíduos submetidos ao ensaio, aproximadamente 20% permaneceram imóveis após a exposição ao material coletado neste setor, sendo que a amostragem foi feita da tal forma que se buscou reproduzir exatamente a mesma concentração do ambiente nos béqueres de prova.

As *Daphnias magnas* expostas às amostras do setor de Prensa apresentaram alta imobilidade, o que mostra que mesmo este setor não tendo apresentado quantidades detectáveis de sílica livre cristalina nos ensaios de difração de raios X, a quantidade de poeira total e, principalmente, o tamanho de partícula diminuto, também são potencialmente perigosos e requerem atenção, mesmo que os limites de tolerância previstos pela norma NR 15 estejam sendo respeitados e o setor seja considerado salubre.

O setor de Retífica a Seco apresentou o maior valor de imobilidade dos organismos-testes e condiz com o esperado, uma vez que foi o setor com maior concentração de poeira total e maior teor de sílica livre cristalina, com 4,83% nas amostras.

Os resultados expressos pelo filtro branco serão discutidos posteriormente em um item próprio.

5.4.2. Citotoxicidade

O teste do MTT quantifica o dano induzido por um agente no metabolismo celular e é um dos principais indicadores de citotoxicidade. As células utilizadas são de fígado humano (HepG2) e os resultados de citotoxicidade são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultados de citotoxicidade com MTT em células de fígado.

Locais	Amostra bruta	Viabilidade celular (%)	Amostra diluída	Viabilidade celular (%)
Atomizador 1	3,8	3,5 ±0,4	81,2	79,3 ±2,7
Atomizador 2	3,2		77,4	
Prensa 1	3,9	3,9 ±0,0	84,3	83,4 ±1,2
Prensa 2	3,9		82,6	
Retífica 1	3,6	3,5 ±0,1	77,8	77,4 ±0,5
Retífica 2	3,5		77,1	
Filtro Branco 1	3,7	3,6 ±0,1	80,3	77,1 ±4,4
Filtro Branco 2	3,6		74,0	

Fonte: Autora, 2022.

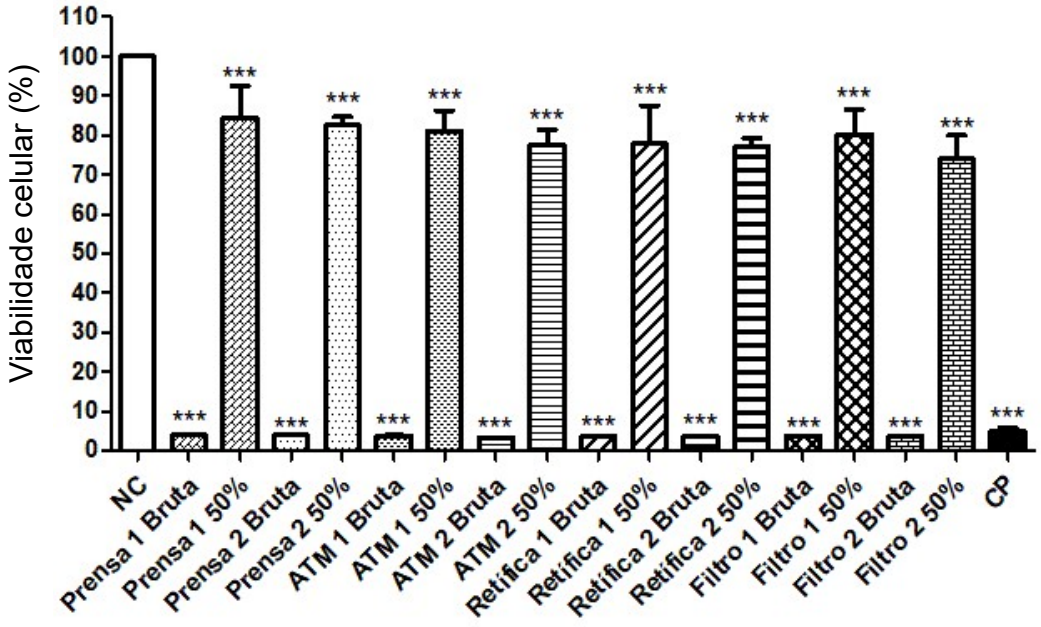
As células expostas às amostras do setor de Atomização apresentaram alta citotoxicidade, apenas 3,5% de viabilidade celular; considerando-se o desvio padrão, todas as amostras apresentaram a mesma viabilidade baixa. Diluindo-se as amostras, o que seria compatível com a redução da concentração de material particulado em 50%, a viabilidade aumenta de forma significativa para cerca de 80%.

O setor de Prensa apresentou o melhor resultado de viabilidade, ou seja, menos citotoxicidade entre as amostras; isso está relacionado com a não detecção de sílica livre cristalina. Os setores que apresentaram este material, mesmo que em baixa concentração, obtiveram menor viabilidade celular.

O setor de Retífica a Seco mais uma vez obteve os piores resultados, apresentando maior dano celular; trata-se do local com maior concentração de poeira total e de sílica livre cristalina.

Este resultado corrobora para a importância da quantificação da sílica livre cristalina, já que este possui um potencial nocivo. Entretanto, não é o único agente, uma vez que o setor de Prensa não havia sílica livre cristalina e também apresentou alta citotoxicidade. Assim sendo, o tamanho de partícula se mostra tão fundamental para a quantificação quanto a sílica livre cristalina.

Figura 24 – Avaliação da citotoxicidade das amostras pelo ensaio de MTT usando células de HepG2 expostas por 24 h. Controle Negativo (NC; meio de cultura) e Controle Positivo (PC; DMSO 20%).



Fonte: Autora, 2022.

Na Figura 23, as barras representam a média e o correspondente desvio padrão: *** diferença significativa em relação ao controle negativo em $p < 0,001$ (ANOVA, teste de Dunnett).

A Figura 23 mostra a importância de se tomar medidas de controle quando o agende de risco está no nível de ação, já que este representa 50% do limite de tolerância. Nos setores amostrados, a maioria estava dentro do limite de tolerância, mesmo assim apresentaram baixa viabilidade celular, o que representa alto risco à saúde do trabalhador. De mesmo modo, ao se reduzir a concentração pela metade, aumenta-se a qualidade do ar de forma exponencial e se reduz o risco da exposição prolongada.

As amostras submetidas apenas aos filtros brancos não expostos também apresentaram morte celular, o que gerou desconfianças sobre a influência do filtro dos resultados obtidos.

5.4.3. Influência do filtro branco

Os filtros utilizados na pesquisa (Zefon Internacional, 5 µm, 37 mm, Plain White, USA) são materiais inertes, produzidos em PVC, e foram submetidos à vibração em ultrassom, com a mesma potência e tempo dos filtros utilizados para a coleta. Sua finalidade seria o controle negativo, em que nenhuma célula ou organismo vivo deveria sofrer influência. Entretanto, não foi o que ocorreu e nos ensaios de citotoxicidade e toxicidade houve morte celular pela simples exposição a este material.

Então, repetiu-se os ensaios com o filtro branco em 3 condições:

1. mesmo procedimento de ultrassom;
2. ultrassom em banho;
3. sem ultrassom, com o mesmo tempo em contato com a água deionizada.

Em todos esses ensaios houve morte celular.

Embora o PVC seja considerado um material inerte, porém em sua composição pode haver a presença de bisfenol A (BPA) que é um composto amplamente difundido no ambiente, presente na gênese de plásticos e resinas, como o cloreto de polivinil (PVC). Sua estrutura química contém monômeros associados que

em temperatura elevada, o torna um importante contaminante ambiental. A revisão de estudos que apontaram que altas doses de BPA estavam associadas a efeitos desreguladores endócrinos, levando a distúrbios de função sexual masculina (FENG *et al*.; 2017) e correlação com maior incidência de câncer de próstata e de mama (TSE *et al*.; 2017). O BPA tem efeito mitogênico na tireóide, podendo também estar envolvido no desenvolvimento de malignidade tireoidiana (FURLANETTO *et al*.; 2001).

Os resultados das investigações mostraram que o BPA exerce efeitos multidirecionais em organismos vivos porque interage com os receptores, gera ROS (espécies reativas de oxigênio), altera sinalização celular, provoca alterações mutagênicas e inibe a metilação do DNA (BERNARDO, NAVAS, ALCÂNTARA, 2015).

Há a suspeita que esta seja a causa da morte celular em contato com os filtros. Então para essa pesquisa, a influência do filtro foi desconsiderada, uma vez que estava presente em 100% das amostras ensaiadas, o que torna uma variável fixa e conhecida.

Porém sugere-se para futuras pesquisas a utilização de outro método de extração e até mesmo a utilização de outro tipo de filtro para a coleta. Assim como a investigação da presença de Bisfenol A nos filtros utilizados.

6. CONSIDERAÇÕES SOBRE AS MEDIDAS DE CONTROLE

Nos processos produtivos onde ocorrem a geração e dispersão de poeiras de sílica cristalina, o controle da exposição deveria ser considerado prioridade para as empresas e para os trabalhadores, assim como para a sociedade em geral, face a propriedade carcinogênica da sílica e a silicose ser uma doença irreversível.

As normas regulamentadoras nº 01 e nº 09 trazem uma hierarquia de medidas de controle que devem ser respeitadas, em que as medidas de prevenção implementadas deverão levar em conta a participação dos trabalhadores, já que são os maiores interessados, respeitando-se a seguinte ordem de prioridade:

I. eliminação dos fatores de risco; sempre que possível a atuação será feita na fonte, com o objetivo de se extinguir a produção de poeira;

II. minimização e controle dos fatores de risco com a adoção de medidas de proteção coletiva, adequações de equipamentos, mudanças de *lay out*, manutenções preventiva e corretiva, para se reduzir a emissão de material particulado para o ambiente;

III. minimização e controle dos fatores de risco, com a adoção de medidas administrativas ou de organização do trabalho, como o rodízio de atividade, para locais com menor concentração, para que a dose diária que o trabalhador está exposto seja reduzida significativamente; e

IV. adoção de medidas de proteção individual; quando todas as medidas anteriores forem cessadas, deverá ser fornecido o EPI indicado para cada atividade.

Em todo o ambiente industrial, observou-se uma boa qualidade do ar, que atende aos critérios e parâmetros das legislações vigentes, porém apenas atender a uma norma não garante a ausência de fatores de risco aos trabalhadores.

Sistema de captação de pós, com o uso de filtro de mangas, tem se mostrado eficiente, com uma boa sucção do material particulado, porém é fundamental realizar manutenção preventiva para garantir a eficiência de coleta dos pós, evitando-se a incrustação das tubulações e conservação das mangas, uma vez que a umidade do ar gera um fator de entupimento das mangas.

As perdas de carga pela distância entre o ponto de coleta e a localização do filtro fazem com que o sistema perca eficiência. Então a localização, potência e característica das mangas devem ser observadas para a otimização do sistema de captação.

Essas ações reduzem significativamente a quantidade de poeira total no ambiente, inclusive possibilitam a recuperação deste material particulado para reuso no processo produtivo, sendo uma forma de reaproveitamento e desoneração.

Além de ações de engenharia, que normalmente envolvem custos, ações administrativas também precisam ser implantadas, como capacitação e treinamento, para o uso racional do ar comprimido, para limpeza de equipamentos e muito menos para o uso pessoal, visto o alto risco desta prática. Deve-se evitar varrer o chão, para que o pó decantado não seja colocado novamente em suspenção, em substituição o uso de aspiradores de pó industriais de grande potência. E a umidificação do ambiente, sempre que possível, deve ser feita.

Outra medida administrativa que reduz significativamente o risco da exposição é o rodízio de atividades, deixando o trabalhador o menor tempo possível nestes ambientes insalubres, fazendo com que a dose diária seja minimizada.

Apenas após a adoção de todas essas medidas conhecidas, e se mesmo assim ainda restar pontos de emissão de material particulado, o trabalhador deve ser protegido por equipamentos de proteção individual; desta forma, cria-se uma barreira física adicional, evitando a inalação e posterior deposição destes materiais no organismo.

A simples distribuição de equipamentos de proteção individual não basta, o trabalhador precisa ser orientado sobre a forma correta de uso, higienização, manutenção, critérios para substituição, guarda e conservação do seu equipamento, cabendo ao empregador a responsabilidade de cobrar o uso durante a jornada de trabalho.

A realização de exames periódicos, previstos na NR 07 e nos Programas de Controle Médico de Saúde Ocupacional de cada empresa, prescritos pelo médico do trabalho, como a espirometria e o raio X de tórax, realizados periodicamente, em tempo não superior a 12 meses, previnem agravos à saúde e a detecção precoce de qualquer perda da capacidade respiratória, preservando o estado de saúde do trabalhador.

7. CONCLUSÃO

Para estudar os impactos toxicológicos *in vitro* do material particulado disperso no ar em ambientes internos de uma indústria cerâmica e a exposição ocupacional dos trabalhadores, foram determinadas as concentrações de poeira nas frações respiráveis, as quantidades de sílica livre cristalina em cada ambiente e o tamanho das partículas gerados durante uma jornada de trabalho habitual em uma indústria cerâmica. Posteriormente, teste biológico com células humanas foram realizados para determinação da citotoxicidade e com o uso do organismo *Daphnia magna* para determinar a toxicidade deste material coletado.

Os resultados obtidos, a partir deste estudo, demonstram que a qualidade do ar que os trabalhadores de cerâmicas estão expostos apresentam concentrações de poeiras com material particulado muito finos; essa poeira é gerada principalmente pelo desbaste de peças já confeccionadas (retífica a seco), secagem da barbotina para formação do pó atomizado (atomização) e formação das peças cerâmicas (prensagem), nesta ordem de grandeza.

Quanto aos impactos toxicológicos provocados pelo material particulado, nesta cerâmica avaliada, o setor de retífica a seco apresentou maior concentração de sílica livre cristalina e também foi o que teve maior taxa de imobilidade, ou seja, maior toxicidade entre as amostras testadas, e menor viabilidade celular, sendo o local mais citotóxico da indústria em questão. O setor de prensagem, que não foi detectado sílica livre cristalina, apresentou os melhores resultados citotoxicidade, com a maior viabilidade celular, de 83%, porém não teve o melhor resultado de toxicidade, com uma alta imobilidade das *Daphnias magnas* expostas. Isto mostra que não apenas a sílica livre cristalina deve ser controlada, mas também o tamanho de partícula, pois partículas ultrafinas podem ser tóxicas para os organismos vivos.

Os resultados de medição dos tamanhos das partículas indicaram que a poeira suspensa no ar da indústria cerâmica era composta predominantemente por partículas de diâmetro inferior a 10 μm, apresentando partículas inclusive inferiores a 2,5 e 1,0 μm. Essa faixa de tamanhos é a de maior deposição alveolar e, portanto, de maior risco de se adquirir silicose e câncer de pulmão. De modo geral, os resultados são alarmantes quanto ao que prevê a legislação internacional, que traz o limite de exposição ocupacional de 0,05 mg/m³ como recomendado pela ACGIH, estando a

norma brasileira defasada e gerando um potencial risco aos trabalhadores, pois a preocupação da indústria muitas vezes se restringe a atender a legislação nacional.

Os resultados *in vitro* demonstram a importância de manter a concentração dos setores abaixo do nível de ação, pois a redução da concentração de poeira ambiente em 50%, aumentou a viabilidade celular de 3 para 80%, em todos os setores.

Considerando que a indústria onde o estudo foi realizado é uma referência nacional e internacional em saúde e segurança dos trabalhadores, demostram a preocupação com o restante do seguimento, pois a maioria das cerâmicas brasileiras não adotam medida de controle de caráter coletivo, pode-se inferir que a situação da exposição a poeiras no Brasil e, principalmente, à sílica deva ser ainda mais preocupante do que foi identificado por este estudo. As medições realizadas dão, não somente uma ideia aproximada do panorama da qualidade do ar desta indústria cerâmica, mas podem ser um indicativo da provável situação de outras cerâmicas pelo país. A divulgação dessas informações serve como um alerta, pois apenas atender a legislação atualmente vigente no Brasil não é o suficiente para garantir, com segurança, a saúde dos trabalhadores. Por isso que investimentos em proteções coletivas, programas de proteção respiratórias, sistemas de captação de pó, capacitação dos trabalhadores e exames periódicos são fundamentais para proteção das pessoas.

8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se o desenvolvimento de novas pesquisas, em outras indústrias deste mesmo seguimento, para que se tenha critérios de comparação com diferentes práticas adotadas por cada empresa, inclusive em empresas de cerâmica vermelha (fabricação de tijolos e telhas) e cerâmica branca que utilizem diferentes processos produtivos (via seca e via úmida), assim como a definição do que seria um limite de tolerância seguro, visto que o atualmente proposto pela NR15 não é o indicado, como demostrou o estudo em questão.

Como já relatado durante o trabalho, sugere-se também a utilização de outras formas de coleta, com filtros de diferentes materiais, para que não haja influência desta composição nos resultados biológicos.

REFERÊNCIAS

ABCERAM, Associação Brasileira de Cerâmica. **Fluxogramas – Processo de fabricação.** Disponível em: www.anfacer.org.br, acessado em 13 de setembro de 2021.

ABNT NBR13006:2020. **Placas cerâmicas - Definições, classificação, características e marcação.** Publicação: 11/12/2020.

ABU-SHAMS, K.; FANLO, P.; LORENTE, M. P. **Silicosis. Anales Del Sistema Sanitario De Navarra**, Pamplona, v. 28, Suppl. 1, p. 83-89, 2005.

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNIA SANITÁRIA (ANVISA). **RE/ANVISA nº 09: Avaliação da qualidade do ar interior, 2003.** Disponível em: https://conforlab.com.br/legislacao/resolucao09.pdf . Acessado em: 12 agosto. 2021.

AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS. **1993-1994 Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents and Biological Exposure Indices**. Cincinnati, OH: ACGIH, 1994. p.42-45. **and toxicity. Biointerphases.** 2: 4 (December 2007) 17- 71.

ANFACER, **Setor Cerâmico Brasileiro em números 2020**. Disponível em: www.anfacer.org.br, acessado em 13 de setembro de 2021.

BARBA, A., BELTRÁN, V., FELÍU, C., et al. **Matérias primas para la fabricación de soportes de baldosas cerâmicas.** Instituto de Tecnologia Cerâmica – AICE, 1ª Edición, Castellón, España, 1997, 291p.

Bernardo PEM, Navas SA, Murata LTF, Alcântara MRS. **Bisfenol A: o uso em embalagens para alimentos, exposição e toxicidade – Uma Revisão.** Rev Inst Adolfo Lutz. São Paulo, 2015;74(1):1-11.

BLACKFORD, J. A. Jr.; ANTONIN, J. M.; CASTRANOVA, V.; DEY, R. D. **Intratracheal instillation of silica up-regulates inducible nitric oxide synthase gene expression and increases nitric oxide production in alveolar macrophages and neutrophilis.** American Journal of Respiratory Cell And Molecular Biology, New York, v. 11, n. 4, p. 426-431, 1994.

BRENTANO, Débora M. **Desenvolvimento e aplicação do teste de toxicidade crônica com *Daphnia Magna*: avaliação de efluentes tratados de um aterro sanitário**. Dissertação de mestrado, 2006, 145p. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

BRICKUS, L., NETO, F. **A qualidade do ar de interiores e a química.** Revisão Química Nova 22 (1). Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0100-40421999000100013 . Acessado em: 03/10/2021.

CALLISTER JR., William D. **Ciência e engenharia de materiais uma introdução**. 10. Rio de Janeiro LTC 2020 1 recurso online ISBN 9788521637325.

CAMNER P., BAKKE B. **Nose or mouth breathing? Environmental research**; 21: 394–398; 1980.

CASTRANOVA, V**. From coal mine dust to quartz: mechanism of pulmonary pathogenicity. Inhalation Toxicology**, New York, v. 12, Suppl. 3, p. 7-14, 2000.

CASTRANOVA, V. **Signaling pathways controlling the production of inflammatory mediators in response to crystalline silica exposure: role of reactive oxygen/nitrogen species.** Free Radical Biology & Medicine, New York, v. 37, n. 7, p. 916-925, 2004.

CASTRANOVA, V.; KANG, J. H.; MOORE, M. D.; PAILES, W. H.; FRAZER, D. G.; SCHEWEGLER-BERRY, D. **Inhibition of stimulant-induced activation of phagocytic cells with tetrandrine.** Journal of Leukocyte Biology, New York, v. 50, n. 4, p. 412-422, 1991.

CASTRANOVA, V.; VALLYATHAN, V. **Silicosis and coal workers' pneumoconiosis. Evironmental Health Perspectives**, Research Triangle Park, N. C., v. 108, Suppl. 4, p. 675-684, 2000.

CHEN, F.; SHI, X. **Signaling from toxic metals to NF-kappaB and beyond: not just a matter of reactive oxygen species.** Evironmental Health Perspectives, Research Triangle Park, N. C., v. 110, Suppl. 5, p. 807-811, 2002.

CHI CHIU LEUNG, IGNATIUS TAK SUN YU, WEIHONG CHEN. **Silicose,** DOI:10.1016/S0140-6736(12)60235-9

DAVIS, G. S. **Pathogenesis of silicosis: current concepts and hypotheses.** Lung, New York, v. 164, n. 3, p. 139-154, 1986

DE CAPITANI, E. M. **Silicosis (still) among us**. Jornal Brasileiro de Pneumologia, São Paulo, v. 32, n. 6, p. XXIII-XXXV, 2006.

DOCKERY, D., POPE, C., XU, X., et al. **An association between air pollution and mortality in six U.S. cities**. N Engl J Med. Dec 9; 329(24):1753-9; 1993.

DONROE, J.A., MAURTUA-NEUMANN, P.J., GILMAN, R.H., et al. **Vigilância da silicose precoce em mineradores de altitude usando oximetria de pulso**. *Int J Ocupar Saúde Ambiental* 2008; 14: 187-92.

DOSREIS, G. A.; BORGES, V. M.; ZIN, W. A. **The central role of Fas-ligand cell signaling in inflammatory lung diseases.** Journal of Cellular and Molecular Medicine, Bucharest, v. 8, n. 3, p. 285-293, 2004.

ELDER, A., GELEIN, R., SILVA, V., et al. **Translocation of Inhaled Ultrafine Manganese Oxide Particles to the Central Nervous System.** Environ Health Perspective 2006 August; 114(8), 1172–1178; 2006.

EPA (Environmental Protection Agency). **Particulate Matter (PM) Pollution: What is PM, and how does iy get into the air?** 2016. Disponível em: https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics#PM . Acessado em agosto de 2022.

FENG, M. J.; WU, X. Q.; LI, J.; DING, L.; WANG, Z. Q.; SHEN, Y.; SONG, Z. C.; WANG, L.; YANG, Q.; WANG, X. P.; LI, Q.; WANG, J. T. **Relationship between daily exposure to bisphenol A and male sexual function-a study from the reproductive center**. Enviroment International, v. 107, p. 1-7, 2017.

FREIRE-DE-LIMA, C. G.; NASCIMENTO, D. O.; SOARES, M. B.; et al**. Uptake of apoptotic cells drives the growth of a pathogenic trypanosome in macrophages.** Nature, London, v.403, n. 6766, p. 199-203, 2000.

FUBINI, B.; HUBBARD, A. **Reactive oxygen species (ROS) and reactive nitrogen species (RNS) generation by silica in inflammation and fibrosis**. Free Radical Biology & Medicine, New York, v. 34, n. 12, p. 1507-1516, 2003.

FUNDACENTRO, Fundação Jorge Duprat Figueiredo, de Segurança e Medicina do Trabalho. **Programa de Proteção Respiratória – PPR**. Disponível em: https://www.protecaorespiratoria.com/wp-content/uploads/2016/11/Novo-PPR-Fundacentro.pdf Acessado em: 01/10/2021.

FURLANETTO, T. W.; NUNES JR, R. B.; SOPELSA, A. M.; MACIEL, R. M. **Estradiol decreases iodide uptake by rat thyroid follicular FRTL-5 cells.** Brazilian Journal of Medical and Biological Research, v. 34, n. 2, p. 259-263, 2001.

GANBLE, J.F. **Silicate Pneumoconiosis**. In: NIOSH. Occupational Respiratory Diseases. Washington: U.S. Department of Health and Human Services. Public Health Service. Centers for Disease Control, 1986. NIOSH Publication N° 86- 102, p.243-285.

GOMES, J., MIRANDA, R., ALBUQUERQUE, P., ESTEVES, H. **Relatório de execução final do projecto nº 122 AJP/11 – Fumos de soldadura – Avaliação de Nanopartículas Emitidas e sua Influência na Saúde dos Trabalhadores Expostos**; ACT; 2017

HANSELL, D.M., LYNCH, D.A., MCADAMS, H.P., BANKER, A.A. **Imagem de doenças do tórax**, 5ª ed. St Louis, MO: Mosby Elsevier, 2010: 463-68.

HINDS, W.C. **Aerosol Technology: Properties, Behavior and Measurement of Arborne Particles.** USA: John Wiley & Sons, 1982. 425p.

HNIZDO, E., MURRAY, J., SLUIS-CREMER, G.K., THOMAS, R.G. **Correlação entre o diagnóstico radiológico e patológico da silicose: um estudo de base populacional de autópsia.** Am J Ind Med 1993; 24: 427-45.

HOTZA, D. **Etimologia e uso em diferentes línguas de alguns termos técnicos empregados na fabricação cerâmica tradicional. Cerâmica Industrial**, v. 12, n. 4, p. 17-21, 2007.

IBALD-MULLI A. et al. **Epidemiological evidence on health effects of ultrafine particles**. In J. Aerosol Med. Depos. 15 (2): 189-201; 2002.

ISO, **10993–5**, Int. Stand. Organ. 3 Ed , 2009 42.

GALVAO, J., DAVIS, B., TILLEY, M., et al. **Unexpected low-dose toxicity of the universal solvent DMSO**, FASEB J. 28 (2014) 1317–1330, https://doi.org/10.1096/fj.13-235440.

LANGER, A.M. **Mineralogy**. In: NIOSH. Occupational Respiratory Diseases Washington: U.S. Department of Health and Human Services. Public Health Service. Centers for Disease Control, 1986. NIOSH Publication N° 86-102, p.3-40.

LEE, S.C.; CHANG, M. **Indoor and outdoor air quality investigation at schools in Hong Kong.** Chemosphere, v. 41, p. 109-113, 2000

LIPPMANN, M. **Exposure Assessment Strategies for Crystalline Sílica Health Effects**. Appl. Occup. Environ. Hyg., v.10, n°12, p.981-990, 1995.

LIPPMANN, M. **Respiratory Tract deposition and Clearance of Aerosols.** In: LEE, S.D. et al. Aerosols: Research, Risk Assessment and Control Strategies. USA: Lewis Publishers, 1986. p.43-57.

LOPES, A.J., MOGAMI, R., CAPONE, D., TESSAROLLO, B., DE MELO P.L., JANSEN, J.M**. Tomografia computadorizada de alta resolução na silicose: correlação com radiografia de tórax e provas de função pulmonar.** J Bras Pneumol 2008; 34: 264-72.

LU, F.C. **Basic Toxicology: Fundamentals, Target Organs, and Risk Assessment**. Taylor & Francis. USA, 1996.

MAGALHÃES, W. L.E, THÁ, E.L, LEME, D.M. **Método de determinação de concentrações não citotóxicas para avaliação da capacidade protetora da lignina contra danos ao DNA.** Embrapa, Colombo, PR. P. 12, 2018.

MORROW, P.E. **Dust Overloading of the Lungs: Update and Appraisal. Toxicol. Appl. Pharm.**, n°113, p.1-12, 1992.

MOSIEWICZ, J., MYŸLIŸSKI, W., ZŸOMANIEC, G., CZABAK-GARBACZ, R., KRUPSKI, W., DZIDA, G. **Valor diagnóstico da tomografia computadorizada de alta resolução na avaliação de alterações nodulares na pneumoconiose em trabalhadores de fundição em Lublin**. Ann Agric Environ Med 2004; 11: 279-84.

MOSMANN, T**. Rapid colorimetric assay for cellular growth and survival: application to proliferation and cytotoxicity assays.** Journal of immunological methods, v. 65, n. 1-2, p. 55-63, 1983.

MOSSMAN, B. T.; CHURG, A. **Mechanisms in the pathogenesis of asbestosis and silicosis.** American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine, New York, v. 157, n. 5 Pt 1, p. 1666-1680, 1998.

MOTTA, J. F. M., CABRAL, M., TANNO, L.C., ZANARDO, A. **As Matérias-Primas Cerâmicas. Parte II: Os Minerais Industriais e as Massas da Cerâmica Tradicional**. Revista Cerâmica Industrial, SP, ed. 7, 2002.

NATIONAL INSTITUTE FOR OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH. **Health Effects of Occupational Exposure to Respirable Crystalline Sílica.** USA: NIOSH Department of Health and Human Services. Center for Disease Control and Prevention, 2002. DHHS (NIOSH) Publication No. 2002-129

NEMMAR, A., HOET, P.H.M., VANQUICKENBORNE, B., et al. **Passage of inhaled particles into the blood circulation in humans**. In Circulation 105, 411-414; 2002.

NHO. Norma de Higiene Ocupacional – **NHO 08: Coleta de material particulado sólido suspenso no ar de ambientes de trabalho**. Procedimento técnico. São Paulo : Fundacentro, 2007. 24 p.

OMS, Organização Mundial da Saúde. **Diretrizes globais de qualidade do ar: material particulado (PM2,5 e PM10).** 2005.

OOI, G.C., TSANG, K.W., CHEUNG, T.F., et al. **Silicose em 76 homens: avaliação qualitativa e quantitativa por TC – estudo de correlação clínico-radiológica.** Radiologia 2003; 228: 816-25

PENTTINEN, P., TIMONEN, K., TIITTANEN, P., MIRME, A., RUUSKANEN, J. AND PEKKANEN, J. (2001) **Number Concentration and Size of Particles in Urban Air: Effects on Spirometric Lung Function in Adult Asthmatic Subjects. Environmental Health Perspectives,** 109, 319-323. https://doi.org/10.1289/ehp.01109319

PEKKANEN, J. **Ultrafine particles in urban air and respiratory health among adult asthmatics**. Eur Respir J 17:428–435; 2001.

PETERS, A., WICHMANN, H., TUCH, T., HEINRICH, J., HEYDER, J. **Respiratory effects are associated with the number of ultrafine particles. Am J Respir. Crit. Care Med** 155:1376–1383; 1997.

POPE, C. III **Epidemiological evidence on health effects of ultrafine particles. J. Aerosol Med. Depos.** 15 (2): 189-201; 2004.

POPE, C.III **Epidemiology of fine particulate air pollution and human health: Biologic mechanisms and who's at risk? Environ. Health Perspective**; 108; S713– S723; 2000.

RAYMOND, L. W.; WINTERMEYER, S. **Medical surveillance of workers exposed to crystalline silica. Journal of Occupational and Environmental Medicine**, Baltimore, v. 48, n. 1, p. 95-101, 2006.

REED, J. S. **Principles of ceramics processing.** 2. ed. New York: Wiley, 1995.

RIBEIRO, F. S. N. **O mapa de exposição a sílica no Brasil**. UERJ / Ministério da Saúde. 2010, 94 p.

RIBEIRO, F. S. N.; CAMARGO, E. A.; ALGRANTI, E.; FILHO, V. W. **Occupational exposure to silica in Brazil in 2001.** Revista Brasileira de Epidemiologia, São Paulo, v. 11, n. 1, p. 89-96, 2008.

RISS, T.L.; NILES, A. L.; MINOR, L**. Cell Viability Assays Guidance Manual. Assay Guidance Manual,** EUA: Eli Lilly & Company and the National Center for Advancing Translational Sciences, 2004. P. 1-23.

RUCKERT, R. **Air Polution and Markers of inflammation and coagulation in Patients with Coronary Heart Disease.** Am J. Respir. Crit. Cade Med. 173(4): 432 – 441; 2006.

SANDERSON, W. T.; STEENLAND, K.; DEDDENS, J. A. **Historical respirable quartz exposures of industrial sand workers: 1946- 1996.** American Journal of Industrial Medicine, New York, v. 38, n. 4, p. 389-398, 2000.

SANTOS, A. M. A. **Exposição Ocupacional a Poeiras em Marmorarias: Tamanhos de Partículas Característicos,** Escola de Engenharia da UFMG, p. 192, Belo Horizonte. 2005.

STRATMEYER, M., GOERING, P., UMBREIT, T., HITCHINS, V. **What do we know about the bio effects of nanoparticles: developing experimental approaches for safety assessment.** Biomedical micro devices 2008 10, 9261-9; 2008.

TELES, J. **Silicose e esclerose sistêmica (síndrome de Erasmus): a importância do reconhecimento da associação entre doenças**. Rev Bras Med Trab [internet]. 2016. Disponível em: https://cdn.publisher.gn1.link/rbmt.org.br/pdf/v14n1a06.pdf. Acessado em 27/09/2021;

TERRA FILHO, M.; SANTOS, P. **Silicosis.** Jornal Brasileiro de Pneumologia, Brasília, v. 32, Suppl 2, p. S41-S47, 2006.

TSE, L, A.; LEE, P. M. Y.; HO, W. M.; LAM, A. T.; LEE, M. K.; NG, S. S. M.; HE, Y.; LEUNG, K. S.; HARTLE, J. C.; HU, H.; KAN, H.; WANG, F.; NG, C. F. **Bisphenol A and other environmental risk factors for prostate cancer in Hong Kong.** Enviroment International, n. 107, 2017.

VAN DER BRÛLE, S.; MISSON, P.; BÜHLING, F.; LISON, D.; HUAUX, F. **Overexpression of cathepsin K during silica-induced lung fibrosis and control by TGF-beta.** Respiratory Research, London, v. 6, n. 84, 2005.

VINCENT, J.H. **Aerosol Science for Industrial Hygienists**. 5 ed., U.K.: Elsevier Science Ltd, 1995. 411p.

WEILL, H. **Risk Analysis and Public Policy in Relation to Sílica Exposure**. Appl. Occup. Environ. Hyg., v. 10, n.12, p.1154-1156, 1995

WILLEKE, K., BARON, P. A. **Aerosol Measurement: Principles, Techniques and Applications**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1993. 876 p.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide**. 2021. xxi, 267 p. World Health Organization, Publications.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Hazard Prevention and Control in the Work Environment: Airborne Dust. Prevention and Control Exchange (PACE).** Geneva: WHO, Department of Protection of the Human Environment, Occupational Environmental Health, WHO/SDE/OEH/99.14, 1999.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Air Quality Air Quality Guidelines Global Update 2005 Guidelines. Global Update 2005. Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide**. Part 2|Risk assessment of selected pollutants.