

O TAMANHO DAS PARTÍCULAS DE POEIRA SUSPENSAS NO AR DOS AMBIENTES DE TRABALHO



MINISTÉRIO
DO TRABALHO E EMPREGO



FUNDACENTRO
FUNDAÇÃO JORGE DUPRAT FIGUEIREDO
DE SEGURANÇA E MEDICINA DO TRABALHO

O TAMANHO DAS PARTÍCULAS DE POEIRA
SUSPENSAS NO AR DOS AMBIENTES DE TRABALHO

PRESIDENTE DA REPÚBLICA
Fernando Henrique Cardoso
MINISTRO DO TRABALHO E EMPREGO
Francisco Dornelles

FUNDACENTRO

PRESIDÊNCIA

Humberto Carlos Parro

DIRETORIA EXECUTIVA

José Gaspar Ferraz de Campos

DIRETORIA TÉCNICA

Sônia Maria José Bombardi

DIRETORIA DE ADMINISTRAÇÃO E FINANÇAS

Antonio Sérgio Torquato

ASSESORIA DE COMUNICAÇÃO SOCIAL

José Carlos Crozeira

Alcinéa Meigikos dos Anjos Santos

O Tamanho das Partículas de Poeira Suspensas no Ar dos Ambientes de Trabalho

*Adaptação da Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso
de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da
Universidade Federal de Minas Gerais
Orientador: Prof. Dr. Raul Zanoni Lopes Cançado*

MINISTÉRIO
DO TRABALHO E EMPREGO



FUNDACENTRO
FUNDAÇÃO JORGE DUPRAT FIGUEIREDO
DE SEGURANÇA E MEDICINA DO TRABALHO

2001

*Aos meus pais, Alcy e Iodiviga, pelas oportunidades que me proporcionaram.
Ao meu marido, Germano, pelo incentivo e apoio incondicionais.
À minha filha, Lumena, pela compreensão e tempo que deixei de lhe dedicar.*

Agradecimentos

Agradeço a Deus pelas oportunidades de aprendizado que me foram oferecidas em toda a minha vida e aos amigos especiais que não precisam ter seus nomes citados.

Ao Prof. Dr. Raul Zanoni Lopes Cançado pela orientação, apoio, confiança e liberdade com que permitiu que este trabalho se desenvolvesse.

À Iracema Fagá pelo incentivo constante, sugestões, carinho e dedicação nos momentos em que precisei de seu auxílio e amizade.

À Sônia Maria José Bombardi e Robson Spinelli Gomes pela confiança e colaboração em tudo que solicitei.

À Norma Conceição do Amaral e Ana Maria Tibiriçá Bon pela paciência e colaboração durante a execução deste trabalho e amizade nos momentos difíceis.

Ao Carlos Sérgio da Silva pela compreensão nos momentos finais deste trabalho, mas principalmente pela amizade e apoio nas dificuldades pessoais.

Ao Marcelo Souza pela dedicação, camaradagem e colaboração para o bom encaminhamento das análises realizadas na UFMG.

À Sandra Cristina E. M. Teixeira, Eliomar Evaristo Ferreira e Patrícia M. T. de Azevedo pela colaboração nas análises por microscopia eletrônica de varredura e granulômetro realizadas na UFMG.

Ao Prof. Dr. Henrique Kahn, responsável pelo Laboratório de Caracterização Tecnológica (LCT) do Departamento de Engenharia de Minas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, pela colaboração direta na montagem das rotinas de análise de imagem e disponibilização do microscópio ótico, microscópio eletrônico de varredura e analisador de partículas à laser do LCT para a realização das análises.

À Eliana Satiko Mano e Isabel Aparecida Alves dos Santos pela colaboração nas análises por microscopia eletrônica de varredura e analisador de partículas à laser realizadas no LCT.

À Fundacentro, onde adquiri a base para a compreensão e valorização do trabalho e do trabalhador brasileiro.

“ Ainda que os operários cubram seu rosto, absorvem pelo nariz e pela boca revolteantes átomos de gesso que penetram nas vias respiratórias e, misturados à linfa, se aglutinam em nódulos ou se incrustam nos sinuosos condutos pulmonares, interceptando a respiração.”

*Bernardino Ramazzini
As Doenças dos Trabalhadores, 1700*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	19
2. POEIRA	21
2.1 Classificação das Poeiras	22
2.1.1 Efeitos sobre o organismo	23
2.1.1.1 Efeitos fibrogênicos	23
2.1.1.2 Efeitos cancerígenos	23
2.1.1.3 Efeitos tóxicos sistêmicos	23
2.1.1.4 Efeitos cutâneos	24
2.1.1.5 Efeitos irritantes	24
2.1.2 Partículas na respiração	24
2.1.2.1 Mecanismos de defesa do sistema respiratório	24
2.1.2.2 Reação do pulmão às partículas de poeira inalada	25
3. AVALIAÇÃO DA EXPOSIÇÃO OCUPACIONAL A POEIRAS	29
3.1 Convenções para Amostragem de Poeiras	30
3.2 Amostragem de Aerodispersóides	34
3.2.1 Bombas de amostragem	34
3.2.2. Meio de coleta	34
3.2.2.1 Seleção do filtro	35
3.2.2.3 Separadores de partículas	37
3.3 Estratégia de Amostragem	38
3.4 Análises de Poeiras	41
3.5 Legislação Ocupacional para Poeiras	42
3.5.1 Limites de exposição	42
3.5.2 Legislação brasileira	44

3.6	Controle Exposição Ocupacional à Poeira	45
3.6.1	Medidas de controle relativas ao ambiente de trabalho	46
3.6.2	Medidas de controle relativas ao trabalhador	47
3.6.3	Recomendações gerais	48
4.	MEDIÇÃO DO TAMANHO DAS PARTÍCULAS	49
4.1	O Tamanho das Partículas	50
4.1.1	Diâmetro equivalente	50
4.1.2	Distribuição de tamanho de partícula	52
4.1.3	Significado prático do tamanho de partícula	56
4.2	Medição de Tamanho de Partícula por Microscopia	57
4.2.1	Medição por microscopia ótica	58
4.2.1.1	Preparação da amostra	59
4.2.1.1.1	Amostras coletadas sobre filtros	60
4.2.2	Medição por microscopia eletrônica de varredura	61
4.2.2.1	Preparação da amostra	62
4.2.3	Análise de imagem como auxiliar na medição de tamanho de partícula	64
4.2.3.1	Preparação da amostra	69
4.3	Análise de tamanho de partículas por difração de luz a laser	70
4.3.1	Preparação da amostra	70
5.	MODELO DE APLICAÇÃO: amostras coletadas em ambiente de trabalho	71
5.1	Descrição do Local de Trabalho	71
5.2	O Processo de Trabalho	72
5.3	Coleta das Amostras	74
5.4	Análise das Amostras	74
5.5	Dados de Medição	76
5.6	Confirmação do Resultado Obtido	84
5.7	Comparação dos resultados de medição de tamanho de partícula com os resultados de concentração em massa obtidos durante avaliação ambiental	86
6.	CONCLUSÕES	87
7.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	89
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91

LISTA DE TABELAS

Tabela III.1: Divisão do trato respiratório em bases anatômicas de referência segundo o mecanismo de deposição das partículas	31
Tabela III.2: Convenções adotadas pela ACGIH, ISSO e CEN para porcentagens em massa de poeira inalável, torácica e respirável	33
Tabela III.3: Técnicas mais utilizadas para análises de amostras ambientais de poeira	42
Tabela III.4: Limites de tolerância brasileiros para poeiras minerais	44
Tabela V.1: Número de partículas medidas por amostra analisada	75
Tabela V.2: Dados de medição de tamanho de partícula da amostra P-100A, coletada junto à Peneira #100, obtidos por microscopia ótica associada a sistema de análise de imagem e classificados em intervalos de classe de igual comprimento linear	76
Tabela V.3: Dados de medição de tamanho de partícula da amostra P-100A, coletada junto à Peneira #100, obtidos por microscopia ótica associada a sistema de análise de imagem e classificados em intervalos de classe de igual comprimento logarítmico de diâmetros	78
Tabela V.4: Parâmetros característicos das distribuições de tamanho de partícula para as amostras coletadas no local avaliado, obtidos à partir do gráfico de distribuição da frequência acumulada construído em escala de log-probabilidade	80
Tabela V.5: Dados globais de medição de tamanho de partícula no laboratório de classificação de areia, obtidos por microscopia ótica e sistema de análise de imagem Q-600	81
Tabela V.6: Dados de porcentagem em massa por intervalo de classe para os dados globais de medição de tamanho de partícula no laboratório de classificação de areia	83
Tabela V.7: Dados de medição de tamanho de partícula para a amostra-teste coletada próximo às peneiras classificadoras, obtidos com o Analisador de Partículas à Laser, marca Sympatec	84

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Representação esquemática das principais regiões do trato respiratório e sua correspondência com as frações inalável, torácica e respirável	32
Figura 3.2: Aspecto do filtro de membrana de éster de celulose observado por microscopia eletrônica	36
Figura 3.3: Aspecto do filtro de membrana de policarbonato observado por microscopia eletrônica	36
Figura 3.4: Aspecto do filtro de membrana de PVC observado por microscopia eletrônica	36
Figura 4.1: Diâmetro equivalente medido com base em diversas propriedades da partícula	51
Figura 4.2: Exemplo de distribuição de tamanho de partícula típico das poeiras	52
Figura 4.3: Distribuição do tamanho de partícula da figura 4.2 construída em escala logarítmica para o tamanho de partícula	53
Figura 4.4: Distribuição de frequência acumulada das partículas construída em escala logarítmica	54
Figura 4.5: Distribuição de frequência acumulada das partículas construída em escala log-probabilidade	55
Figura 4.6: Métodos para medição do diâmetro da partícula por microscopia	58
Figura 4.7: Fotomicrografia obtida ao microscópio ótico com aumento de 500X	60
Figura 4.8: Fotomicrografia obtida ao microscópio eletrônico de varredura com aumento de 5000X	63
Figura 4.9: Exemplos de recursos de edição de imagem	66
Figura 4.10: Exemplos de medições quantitativas de partículas	67

Figura 4.11:	Esquema de varredura do filtro para seleção dos campos de visualização destinados à medição do tamanho das partículas por microscopia ótica	68
Figura 4.12:	Esquema do quadro de medição do analisador de imagem	69
Figura 5.1:	Vista geral da descarga das peneiras classificadoras	72
Figura 5.2:	Ensacamento da areia classificada	73
Figura 5.3:	Amostrador de poeira inalável, tipo IOM, marca SKC	74
Figura 5.4:	Curva de distribuição de frequência dos dados de medição de tamanho de partícula da amostra P-100A, coletada junto à Peneira #100, construída a partir dos dados da tabela V.2	77
Figura 5.5:	Curva de distribuição de frequência dos dados de medição de tamanho de partícula da amostra P-100A coletada junto à Peneira #100, construída a partir dos dados da tabela V.3	78
Figura 5.6:	Curva de distribuição de frequência acumulada dos dados de medição de tamanho de partícula da amostra P-100A coletada junto à Peneira #100, construída a partir dos dados da tabela V.3, em escala de log-probabilidade	79
Figura 5.7:	Curva de distribuição de frequência dos dados globais de medição de tamanho de partícula do laboratório de classificação de areia, obtidos por microscopia ótica acoplada a sistema de análise de imagem Q-600	82
Figura 5.8:	Gráfico de porcentagem acumulada em massa para os dados globais de medição de tamanho de partícula no laboratório de classificação de areia	83
Figura 5.9:	Gráfico de porcentagem acumulada em massa para os dados de medição de tamanho de partícula da amostra-teste, coletada junto às peneiras classificadoras	85

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 01: Fórmula de Brief & Scala	45
Equação 02: Fórmula para determinação gráfica do desvio padrão geométrico pela inclinação da reta obtida na distribuição de frequência acumulada	55
Equação 03: Fórmula da densidade	57
Equação 04: Fórmula do volume	57
Equação 05: Cálculo da massa por intervalo de classe	57

1 INTRODUÇÃO

*E*xistem muitos tipos de partículas suspensas no ar do ambiente onde o homem vive, porém algumas são peculiares do ambiente de trabalho. A variedade de poeiras às quais os trabalhadores estão expostos, na forma de substância pura ou em misturas, é muito grande.

A inalação é a forma mais comum de entrada das poeiras no organismo. Os efeitos das poeiras inaladas dependem das espécies químicas que as compõem, da sua concentração no ar, do local de deposição no sistema respiratório e do tempo de exposição do trabalhador a essas poeiras.

O tamanho da partícula inalada é o fator que determina o local de deposição no organismo e o potencial de risco da exposição, uma vez que nem toda partícula consegue penetrar no trato respiratório, e dentre as que penetram nem todas chegam ao pulmão.

O risco à saúde pode ser avaliado adequadamente somente depois de se medir o número relativo de partículas insolúveis, pequenas e grandes, presentes no ambiente. As partículas grandes insolúveis são capturadas nas passagens nasais e vias aéreas superiores, e são rapidamente eliminadas pela tosse, espirro ou engolidas. Elas são preocupantes no trato respiratório superior somente se produzirem irritação local ou propagação para tecidos adjacentes contatados. Entretanto, se partículas grandes são solúveis, elas podem ser absorvidas e transportadas para um

órgão crítico ou de concentração após a dissolução nos fluidos presentes no organismo humano.

Já as partículas pequenas insolúveis podem se depositar nos espaços mais profundos do pulmão. Elas podem ser removidas pelos processos fisiológicos de proteção e limpeza ou podem ser retidas no corpo por longos períodos. A combinação desses diversos processos governa o potencial de risco das poeiras.

Métodos para medição de tamanho de partícula em aerodispersóides são pesquisados desde o início do século XX. O interesse por essa área tem sido mais intenso nos últimos 30 anos, estimulado pelo aumento da poluição urbana, por estudos sobre doenças ocupacionais causadas pela exposição a poeira e pelo desenvolvimento de dispositivos para controle de salas limpas destinadas a trabalhos com componentes eletrônicos.

Muitos métodos para a medição de tamanho de partícula foram refinados ou desenvolvidos durante esse período, partindo da microscopia para métodos instrumentais automatizados.

As técnicas utilizadas para determinação da distribuição de tamanho de partícula devem levar em consideração as necessidades da Higiene Ocupacional.

Os resultados de distribuição de tamanho de partícula podem ser associados aos métodos comumente usados para identificação e determinação de concentração, fornecendo, assim, mais informações sobre os riscos nos ambientes de trabalho.

Ao se estudar as poeiras, deve-se ter em mente que, em quantidade excessiva, elas sobrecarregam os sistemas de proteção e limpeza do organismo, favorecendo a instalação de doenças respiratórias. Para qualquer tipo de poeira, o grau de risco para a saúde depende do tipo de exposição e de fatores individuais. A exposição é caracterizada principalmente pelo tipo de poeira, sua concentração no ar e duração da exposição. Os fatores individuais consideram a constituição geral e estado de saúde do indivíduo exposto (no caso, o trabalhador), o que inclui o estado funcional do trato respiratório superior, o funcionamento e estrutura dos pulmões, o estado imunológico geral e reatividade bioquímica. Todos esses fatores desempenham seu papel na origem de doenças respiratórias.

O exame de uma amostra de ar extraída de qualquer ambiente, seja ele de trabalho ou não, revela a presença de partículas de vários tamanhos, formas e composições químicas.

Os aerodispersóides são definidos como uma reunião de partículas, sólidas ou líquidas, suspensas em um meio gasoso pelo tempo suficiente para permitir a observação ou medição. O tamanho das partículas presentes em um aerodispersóide varia na faixa de 0,001 a 100 μm ⁽¹⁾.

As partículas líquidas podem ser produzidas por:

- ruptura mecânica de líquidos, e são chamadas de névoas;
- ou condensação de vapores de substâncias que são líquidas à temperatura ambiente, e são chamadas de neblinas ⁽²⁾.

As partículas sólidas são produzidas por:

- ruptura mecânica de sólidos, e são chamadas de poeiras;
- ou condensação de vapores de substâncias que são sólidas à temperatura ambiente, e são chamadas de fumos ⁽²⁾.

Vários nomes são usados para descrever o material particulado suspenso no ar. O nome partícula se refere a uma unidade simples da matéria, tendo, geralmente, uma densidade próxima da densidade intrínseca do material original.

Partículas individuais podem ser homogêneas ou heterogêneas, conter uma ou várias espécies químicas, bem como consistir de materiais sólidos, líquidos ou ambos ⁽¹⁾.

2.1 Classificação das poeiras

Poeira é toda partícula sólida de qualquer tamanho, natureza ou origem, formada por trituração ou outro tipo de ruptura mecânica de um material original sólido, suspensa ou capaz de se manter suspensa no ar. Essas partículas geralmente têm formas irregulares e são maiores que $0,5 \mu\text{m}$ ⁽¹⁾.

As poeiras podem ser classificadas segundo algumas características básicas:

a) Forma da partícula ^(1,3)

A forma da partícula é um importante fator que influencia os processos de impactação e deposição inercial no sistema respiratório e os projetos de instrumentos adequados para amostragem e análise de partículas. A variedade de formas existentes para as partículas é ilimitada. Alguns exemplos podem ser citados, como as esféricas, cúbicas, irregulares, com formato de flocos, fibras, cadeias, plaquetas ou escamas.

b) Origem da partícula ⁽⁴⁾

As partículas podem ser classificadas de acordo com sua origem em:

- Minerais - Ex.: quartzo e misturas que contenham quartzo (carvão, caulim, quartzito, areia, argila); asbesto e misturas que contenham asbesto (asbesto bruto, crisotila, anfibólios; fibrocimento, talco); metais e compostos metálicos (alumínio, ferro, chumbo, manganês, berílio, crômio, cádmio);
- Animais - Ex.: peles, couros, pêlos, plumas, escamas;
- Vegetais - Ex.: madeiras, grãos, cereais, algodão, palha, juta, cânhamo, bagaço, linho, sisal.

c) Tamanho da partícula e distribuição de tamanho ⁽³⁾

A faixa de tamanhos das partículas encontradas na atmosfera é muito grande ($0,001$ a $100 \mu\text{m}$). Historicamente, dados individuais de tamanho são analisados para obter a distribuição de tamanho de partículas características. A maioria dos processos envolvendo partículas depende do tamanho da partícula e o estudo do comportamento geral da população de partículas requer o conhecimento do número de partículas que existe em cada faixa de tamanho. O local de deposição das partículas no sistema respiratório humano depende diretamente do tamanho das partículas. Para os estudos de Higiene Ocupacional as faixas de tamanho de maior interesse estão divididas de modo a relacioná-las com seu local de deposição, como:

- inaláveis – partículas menores que 100 μm , capazes de penetrar pelo nariz e pela boca;
- torácicas – partículas menores que 25 μm , capazes de penetrar além da laringe;
- respiráveis – partículas menores que 10 μm , capazes de penetrar na região alveolar.

2.1.1 Efeitos sobre o organismo

As poeiras ocupam um lugar de destaque entre os contaminantes químicos industriais do ar devido aos efeitos que podem exercer sobre a saúde dos trabalhadores. Os riscos ocupacionais que elas podem originar variam desde um simples incômodo inicial até doenças mais graves como pneumoconiose e câncer. A seguir são citados os principais efeitos produzidos por elas ⁽⁴⁻⁶⁾.

2.1.1.1 Efeitos fibrogênicos

Os efeitos fibrogênicos são causados por aquelas poeiras capazes de desencadear uma reação que produz uma fibrose localizada ou difusa do tecido pulmonar, como no caso do quartzo e do asbesto. O acúmulo de poeira respirável de quartzo no pulmão ocasiona lesões pulmonares nodulares. A lesão pulmonar é irreversível e a deterioração da função pulmonar acarreta graves conseqüências cardíacas. Para o asbesto, a penetração da poeira fina nos alvéolos origina uma fibrose difusa com engrossamento pleural. A inalação de poeira de asbesto pode originar tumores malignos, como câncer bronquial ou mesoteliomas, com ou sem sinais simultâneos de asbestose.

2.1.1.2 Efeitos cancerígenos

As causas de câncer podem compreender fatores externos e internos. Os agentes carcinógenos afetam os mecanismos reguladores bioquímicos transformando as células normais em células malignas, ou fazendo com que células cancerosas adormecidas recobrem a atividade.

2.1.1.3 Efeitos tóxicos sistêmicos

O indicador fundamental do comportamento de uma substância como tóxico sistêmico é o fato de que seus efeitos vão mais além do trato respiratório. Sua ação é exercida de forma exclusiva ou compartilhada em outras partes do corpo, como no sistema nervoso central, no fígado ou nos rins.

2.1.1.4 Efeitos cutâneos

Devido ao seu formato, composição química ou capacidade de adsorver outras substâncias, certas poeiras podem dar origem a dermatites irritativas ou alérgicas. Em algumas ocasiões, sua inalação pode produzir urticária alérgica.

2.1.1.5 Efeitos irritantes

Esses efeitos compreendem a irritação da mucosa dos olhos e do trato respiratório, provocando avermelhamento, queimação, lacrimejo, tosse, espirro e inchaço.

2.1.2 Partículas na respiração ^(4, 7)

O caminho que as partículas de poeira percorrem no sistema respiratório é constituído pelo nariz, boca, faringe, laringe, árvore traqueobronquial e alvéolos pulmonares.

Nariz - Constitui um filtro no qual o ar é aquecido, umedecido e onde as partículas são parcialmente removidas. A retenção das partículas se inicia pelo impacto com as paredes nasais e por sedimentação. As partículas depositadas são eliminadas por espirros e se depositam na parte posterior ciliada de onde podem ser extraídas ou levadas para a faringe.

Faringe e laringe - As partículas retidas nas mucosas da cavidade bucal, garganta, faringe e laringe podem ser eliminadas ao se cuspir ou são engolidas.

Árvore traqueobronquial - Neste trecho as partículas podem ser retidas por impacto contra as paredes ou simplesmente por sedimentação, devido a perda de velocidade do ar. As partículas retidas podem ser impulsionadas até o exterior pelos cílios existentes nessa região.

Região alveolar - As partículas que alcançaram a região alveolar depositam-se nas paredes, tanto por difusão como por sedimentação. O mecanismo de expulsão é muito lento e só parcialmente conhecido. A maior parte destas partículas são retidas nas paredes alveolares.

2.1.2.1 Mecanismos de defesa do sistema respiratório ^(6, 8-12)

O aparelho respiratório intercepta a maior parte das partículas inaladas, que passam através do nariz e da boca e ao longo dos canais de condução de ar, antes que elas atinjam as partes mais delicadas do pulmão. O pulmão tem capacidade para remover parte da poeira depositada através do movimento mucociliar, movimento de limpeza do sistema respiratório que é auxiliado pela membrana mucosa e pelos cílios das células de defesa, e do sistema de macrófagos, células de defesa do corpo encarregadas da eliminação de organismos estranhos através do processo da fagocitose. Também é importante saber que as células do pulmão, incluindo

as superfícies em contato com o ar, normalmente têm uma rápida renovação ou taxa de reposição, onde as células com a superfície parcialmente danificada são rapidamente trocadas por células novas e normais.

Entretanto, a capacidade de auto proteção e reparo de danos tem um limite. A **deposição excessiva de poeira** pode causar efeitos adversos no aparelho respiratório.

Dependendo da natureza química e física das partículas inaladas e também dos compostos químicos adsorvidos sobre suas superfícies, a resposta biológica pode ser de vários graus, desde uma reação não danosa, passando por leve e séria, até uma reação certamente fatal.

Outro fator importante que governa a resposta biológica é a relação entre a quantidade de partículas depositada nos pulmões e a porção de partículas efetivamente retida. Essa relação mostra que as respostas biológicas estão relacionadas com a concentração e o tamanho das partículas.

Partículas em contato com o tecido das células provocam uma resposta específica para cada tipo particular de célula. Essa resposta pode ser passageira ou temporária com danos à célula, desde aqueles não persistentes até os mais sérios. Por outro lado, danos persistentes ou morte da célula pode ocorrer, levando a alterações secundárias do tecido de vários graus de gravidade.

Devido às variações no número de células que produzem respostas, à capacidade ou normalidade de reposição e reparo das células, à sobrevivência imunológica da célula e à hiperatividade ou sensibilidade de reação das células, a resposta total do tecido pode ser muito diferente para cada indivíduo exposto em condições similares.

2.1.2.2 Reação do pulmão às partículas de poeira inalada ^(6, 8, 11)

Considerando os componentes celulares, a organização do pulmão e a maneira pela qual as células respondem ao estímulo ou ao dano, pode-se antecipar as várias reações desse órgão à deposição de poeira. Tais reações dependerão da natureza e do número de partículas específicas depositadas, bem como da influência de agentes coexistentes inalados e da reatividade do indivíduo.

O comportamento físico das partículas suspensas no ar e no arranjo anatômico dos tubos condutores de ar do sistema respiratório indica que partículas maiores que 10 μm de diâmetro são removidas, na sua maioria, na passagem da corrente de ar através do nariz e vias aéreas superiores.

A deposição de poeira na região traqueobronquial normalmente estimula um fluxo de muco para auxiliar o trabalho de condução dos cílios ali existentes (sistema mucociliar). Se a produção de muco é excessiva, ou se esse muco não é removido adequadamente, ele pode acumular nas passagens de ar, reduzindo o volume

dos tubos condutores e elevando a resistência ao fluxo de ar. A estimulação prolongada das células e das glândulas de secreção do muco pode induzir a hipertrofia ou alargamento dessas estruturas, que podem ser invadidas pelo muco e causar um persistente estreitamento das passagens de ar e a elevação da resistência ao fluxo de ar.

As partículas depositadas além do bronquíolo terminal e da região onde ocorre movimento mucociliar induzem várias reações:

- a) Se a lâmina de muco do bronquíolo terminal se estende para regiões mais distantes, partículas que caem nessa lâmina podem ser puxadas lentamente pelo sistema mucociliar e removidas.
- b) Partículas depositadas nos alvéolos do pulmão podem ser rapidamente ingeridas por macrófagos, cuja função é processar material estranho. Alguns dos macrófagos, com suas partículas ingeridas, se movem sobre a escada mucociliar e aparecem na saliva ou são engolidos. Outros macrófagos morrem, descarregam as partículas, que são reingeridas por novos macrófagos, e esse processo é repetido indefinidamente.

A vida do macrófago sob circunstâncias normais é medida em termos de semanas ou talvez um mês ou mais. Sua vida pode ser encurtada se a partícula ingerida é especialmente tóxica, como é o caso da sílica livre cristalizada, que mata o macrófago em um período de horas ou dias.

Partículas de poeira que se alojam nos alvéolos estimulam o recrutamento e acúmulo dos macrófagos nessa área provocando reações intensas dos tecidos do pulmão com a morte dos macrófagos.

- c) Fibroblastos são células presentes no interstício do pulmão que podem ser estimuladas para formar quantidades excessivas de retículo e colágeno. A formação excessiva de colágeno acompanha a inflamação prolongada ou crônica na maioria dos órgãos do corpo. Esta é uma parte da familiar formação de cicatriz nos tecidos que pode agir tanto sobre a pele como dentro do pulmão. A fibrose pulmonar é uma seqüela comum da inflamação pulmonar crônica. Os produtos liberados pela morte dos macrófagos estimulam os fibroblastos na produção excessiva de colágeno, promovendo o desenvolvimento da fibrose (cicatrizes pulmonares).
- d) A transformação maligna é um fato que pode ocorrer com qualquer célula do corpo que se divide, e isto não é uma exceção para o pulmão. Devido à rápida regeneração das células do pulmão há provavelmente maior vulnerabilidade às alterações carcinogênicas pela presença da poeira ou outros agentes.

Com base em todas as considerações anteriores, pode-se antecipar que a poeira depositada nos pulmões pode induzir:

- Pequena ou nenhuma reação.
- Hiperprodução de secreção de muco.
- Hipertrofia das glândulas de secreção de muco.
- Recrutamento de macrófagos e ingestão de partículas.
- Proliferação crônica ou reação inflamatória.
- Reticulose.
- Fibrose.
- Transformação maligna das células (câncer).

O objetivo principal e fundamental da Higiene Ocupacional é a prevenção das doenças profissionais que podem ser originadas por agentes nocivos presentes no ambiente de trabalho. A prevenção é realizada através de ações destinadas a evitar precocemente qualquer alteração fisiológica que implique em alguma resposta danosa à saúde dos trabalhadores.

Para cumprir este objetivo, a Higiene Ocupacional está continuamente desenvolvendo e aperfeiçoando uma série de metodologias que, através da detecção, quantificação e controle dos possíveis contaminantes presentes no ambiente de trabalho, evitem o surgimento das doenças profissionais.

Nesse contexto, a avaliação ambiental é um diagnóstico sobre a situação produzida por um ou vários fatores ambientais, e inclusive, a ação combinada deles, baseada nos dados obtidos em medições ou estimadores da exposição, e comparados com critérios ou padrões de exposição ⁽⁴⁾.

A natureza das doenças e o grau de probabilidade de sua ocorrência em situações de exposição a poeiras depende da combinação de muitos fatores, entre eles ⁽¹³⁾:

- a distribuição de tamanho de partícula (que governa como a poeira entra no corpo, via inalação, e onde é depositada no trato respiratório);
- a concentração de poeira no ambiente (que governa quanto pode ser depositado), e

- a forma e reatividade das partículas (que governam o destino subsequente e as respostas biológicas para a presença das partículas em contato com tecidos vulneráveis).

3.1 Convenções para Amostragem de Poeiras

A avaliação do risco ocupacional, ou seja, a probabilidade de uma pessoa sofrer um determinado dano para sua saúde devido às condições de trabalho⁽¹⁴⁾, causado pela inalação de material particulado potencialmente tóxico, usualmente requer a medição de sua concentração em massa. Esse risco é melhor avaliado quando as partículas que não contribuem para isto são excluídas da concentração medida.

As primeiras recomendações para a avaliação de poeiras nos ambientes de trabalho levavam, então, em consideração apenas duas categorias de poeiras:

- poeira respirável, composta de partículas menores que 10 µm;
- poeira total, composta por todo material particulado que está suspenso no ar.

A definição da fração respirável para poeiras suspensas no ar foi originalmente recomendada pelo British Medical Research Council (BMRC) em 1952, e internacionalmente adotada em 1959 durante a “*Johannesburg Pneumoconiosis Conference*”. À partir daí, dispositivos seletores, conhecidos como ciclones, foram desenvolvidos para separar as partículas menores que 10 µm, consideradas como as causadoras das pneumoconioses.

No caso da *poeira total*, sua frágil definição é fortemente afetada pelos métodos escolhidos para a sua medição. Esses métodos variam de país para país, incluindo diferenças nas características dos dispositivos de coleta, tipos de filtros utilizados, fluxo ajustado para amostragem da poeira, técnicas de coleta adotadas, etc. Diversos experimentos têm demonstrado que existem variações consideráveis de desempenho entre amostradores utilizados para coletar a mesma poeira sob condições ambientais idênticas. Assim, aquilo que se chama de poeira total acaba sendo simplesmente o particulado que ficou retido sobre o filtro⁽¹⁵⁾.

Apesar desses problemas essas recomendações para amostragem de poeira são seguidas ainda hoje. A maioria dos limites de exposição para particulados, adotados em diversos países, são expressos em termos de concentração em massa de poeira total. Os estudos mais recentes, porém, mostram que a medição da massa total de partículas suspensas no ar é inadequada para prever os efeitos da maioria dos aerodispersóides inalados^(13, 16-18).

Definições mais abrangentes que a de poeira total passaram a ser necessárias para explicar doenças como câncer nasal e bronquial e bronquite crônica, causadas

por partículas que se depositam nas vias aéreas superiores e região traqueobronquial ⁽¹⁹⁾.

Nos últimos 20 anos vários estudos foram realizados para quantificar a fração de partículas suspensas no ar que realmente entram no sistema respiratório, procurando estabelecer uma analogia direta dos instrumentos de amostragem com o que acontece durante a inalação humana, concluindo-se que partículas maiores que 100 µm possuem pequena probabilidade de penetração no sistema respiratório ^(7, 17).

Para melhor compreensão das frações estabelecidas por convenção, o trato respiratório foi dividido, como mostra a tabela III.1, em regiões consideradas bases anatômicas para identificação das frações de partículas relevantes. As especificações para construção de instrumentos de amostragem e definição de limites de exposição para amostragens por seleção de tamanho de partícula também são baseadas nessa referência.

Tabela III.1 Divisão do trato respiratório em bases anatômicas de referência segundo o mecanismo de deposição das partículas

Região	Estruturas Anatômicas	Localização	Doenças relacionadas
1. Vias Aéreas Superiores	Nariz Boca Nasofaringe Orofaringe Laringofaringe Laringe	Extratorácica	Irritação do septo nasal, faringe e laringe Câncer de faringe e laringe
2. Região Traqueobronquial	Traquéia Brônquios Bronquíolos (bronquíolos terminais)	Torácica (pulmonar)	Broncoconstrição Bronquite crônica Câncer bronquial
3. Região de Troca de Gases	Bronquíolos respiratórios Dutos alveolares Sacos alveolares Alvéolos	Alveolar	Pneumoconioses Enfisema Alveolite Câncer pulmonar

A aplicação das informações sobre como o tamanho da partícula determina a inalabilidade (a fração em massa que realmente entra pela boca e nariz durante a inalação) e a região de deposição das partículas dentro do trato respiratório pode permitir que as amostras coletadas seletivamente com relação ao tamanho das partículas se relacionem mais diretamente com o risco ocupacional oferecido pelo aerodispersóide inalado ^(7, 20).

Entidades importantes como o British Medical Research Council (BMRC), a U.S. Atomic Energy Commission, a American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH), a U.S. Occupational Safety and Health Administration (OSHA), a U.S. Environmental Protection Agency (EPA), o Co-

mité Europeén de Normalisation (CEN) e a International Standards Organization (ISO) reconhecem a importância do tamanho das partículas nos riscos ocupacional e ambiental relacionados com a inalação^(13,16,20).

No começo dos anos 90 iniciou-se um processo de harmonização internacional das definições quantitativas das massas de particulado capazes de penetrar em cada uma das regiões apresentadas na Tabela III.1. A adoção de um padrão de convenção único para a amostragem por seleção de tamanho de partícula reduz esforços, confusão e custos por parte dos envolvidos na avaliação do potencial de risco da inalação de partículas nos ambientes de trabalho, e direciona o desenvolvimento de projetos de amostradores ideais para esse tipo de trabalho⁽²¹⁻²⁴⁾.

A American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH, 1993), e a International Standards Organization (ISSO, 1991) e o Comité Europeén de Normalisation (CEN, 1991) definiram convenções de amostragem cumulativas, onde o particulado inalável é visto como uma fração de todo o aerodispersóide presente no local de trabalho, e os particulados torácico e respirável são sub frações da fração inalável^(7, 13,16,17, 20-22, 27, 28).

Os amostradores devem coletar as frações inalável, torácica e respirável, que incluem aquelas partículas que se espera que entrem nas vias aéreas superiores, pulmões e região alveolar dos pulmões, respectivamente, conforme mostrado na Figura 3.1.

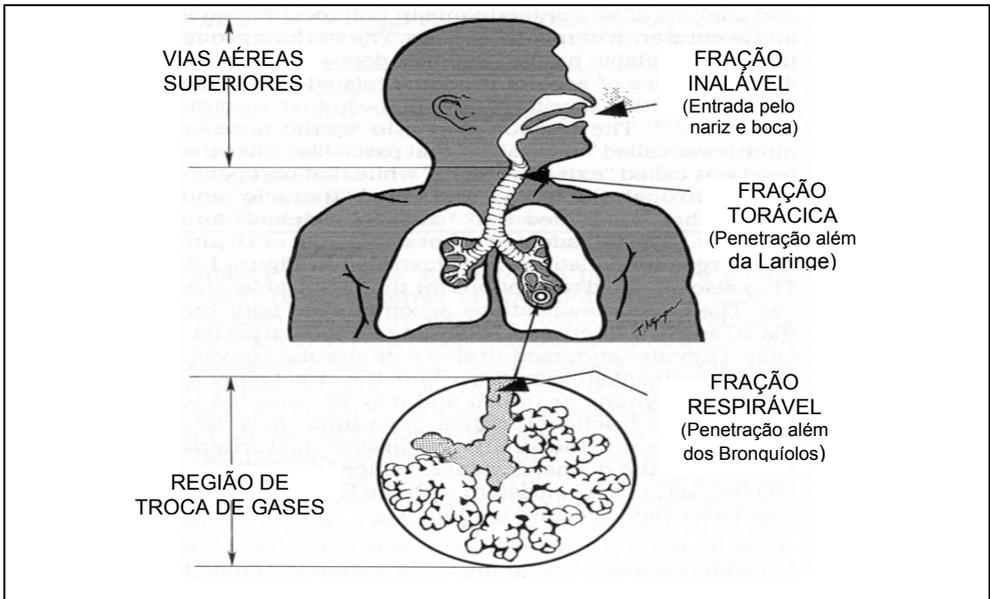


Figura 3.1: Representação esquemática das principais regiões do trato respiratório e sua correspondência com as frações inalável, torácica e respirável⁽¹⁹⁾

A fração inalável ^(20, 29) é entendida como a porção de aerodispersóide que passa pelas narinas e pela boca, e entra no trato respiratório durante a inalação. É apropriada para avaliação do potencial de risco de materiais suspensos que exercem um efeito adverso se depositados no trato respiratório como um todo.

A fração torácica ^(20,27,29) é a porção composta por partículas que são pequenas o suficiente para passar pela laringe e entrar nos pulmões durante a inalação. Essa fração é utilizada na avaliação do risco ocupacional que está associado com os materiais suspensos no ar que exercem um efeito adverso ao serem depositados nas regiões traqueobronquial e de troca de gases.

A fração respirável ^(20,27,29) é a porção composta de partículas que são pequenas o suficiente para entrar na região alveolar dos pulmões durante a inalação. Essa definição reconhece e confirma o que foi estabelecido na Segunda Conferência sobre Pneumoconioses em Joanesburgo (1959).

As porcentagens em massa representativas dos tamanhos de partículas em cada fração são mostradas na Tabela III.2.

Tabela III.2 Convenções adotadas pela ACGIH, ISO e CEN para porcentagens em massa de poeira inalável, torácica e respirável

Inalável		Torácica		Respirável	
Diâmetro aerodinâmico das partículas (µm)	Massa de particulado inalável (MPI) (%)	Diâmetro aerodinâmico das partículas (µm)	Massa de particulado torácico (MPT) (%)	Diâmetro aerodinâmico das partículas (µm)	Massa de particulado respirável (MPR) (%)
0	100	0	100	0	100
1	97	2	94	1	97
2	94	4	89	2	91
5	87	6	80,5	3	74
10	77	8	67	4	50
20	65	10	50	5	30
30	58	12	35	6	17
40	54,5	14	23	7	9
50	52,5	16	15	8	5
100	50	18	9,5	10	1
		20	6		
		25	2		

Uma vez que o efeito de cada tipo de poeira tóxica inalada depende da região de deposição, associada com o tamanho das partículas, e da concentração de poeira no ambiente, pode-se avaliar melhor o risco ocupacional a partir do conhecimento das concentrações em massa dentro das várias faixas de tamanhos de partículas que se depositam no trato respiratório.

3.2 Amostragem de Aerodispersóides

Os instrumentos de amostragem são o meio técnico pelo qual o particulado pode ser coletado, dentro das convenções adotadas para amostragem, para posterior quantificação da massa de poeira ⁽¹³⁾. As amostragens de poeiras são realizadas com o auxílio de um conjunto amostrador composto de ⁽⁴⁾:

- uma bomba de amostragem,
- um porta-filtro, contendo o filtro adequado para o tipo de poeira que se pretende coletar,
- um separador de partículas, quando se deseja coletar poeira em uma faixa de tamanho específico.

Para efeito de avaliação da exposição ocupacional do trabalhador o conjunto amostrador deve simular a respiração humana, fazendo com que o ar carregado de partículas passe através de um dispositivo que retenha as partículas que provavelmente se depositariam no trato respiratório⁽⁷⁾. A bomba de amostragem aspira o ar contaminado fazendo-o passar por um separador de partículas que seleciona as partículas que se deseja estudar, por faixa de tamanho, deixando-as passar para um filtro coletor que as retém.

3.2.1 Bombas de amostragem ^(4, 30-32)

As bombas utilizadas para a amostragem de aerodispersóides são instrumentos portáteis encarregados de fazer passar um determinado volume de ar através dos filtros de coleta. Estas bombas devem possuir um sistema de controle de vazão para ajustes, na maioria das vezes na faixa de 1,0 a 3,0 litros por minuto, baterias recarregáveis e um sistema automático de controle de fluxo que lhes permita compensar, de maneira instantânea, as variações no fluxo do ar aspirado, com uma precisão de $\pm 5\%$. O valor da vazão de amostragem é selecionado de acordo com a metodologia específica adotada para cada tipo de poeira que se pretende coletar e do tipo de separador de partículas utilizado.

3.2.2 Meio de coleta ^(3, 33, 34)

A filtração é a técnica mais utilizada para a coleta de aerodispersóides. Meios filtrantes de muitos tipos diferentes e com variadas propriedades são fabricados para atender aos requisitos de amostragem e análise de aerodispersóides específicos.

Os filtros de membrana, fabricados em vários materiais, diâmetros e tamanhos de poro, são os meios mais usados para a amostragem de particulados. São produzidos como uma camada contínua de material, normalmente um polímero,

com poros de tamanho uniforme, determinados com precisão. Removem as partículas filtradas principalmente por interceptação, ainda que os mecanismos de impactação e difusão também atuem de alguma forma. Partículas maiores que o tamanho do poro do filtro são retidas na superfície do filtro ou próximo dela.

O número de poros desses filtros é bastante alto, ao redor de 70 a 80% da superfície do filtro, permitindo razoável taxa de fluxo de ar enquanto a perda de carga do filtro ainda é pequena. Uma vez que as partículas são coletadas na região da superfície do filtro, os poros tendem a se tornar obstruídos rapidamente, aumentando a perda de carga do filtro devido à resistência à passagem do ar.

Os filtros de membrana não são indicados nos casos onde grandes volumes de ar contendo partículas grossas e pesadas precisam ser amostrados. Por outro lado, esses filtros são muito úteis para vários tipos particulares de análise devido às suas propriedades de seleção por tamanho ou composição química.

3.2.2.1 Seleção do filtro ⁽³⁾

A análise química das partículas coletadas por filtração são diretamente influenciadas pelo filtro escolhido. Se, por exemplo, é necessário realizar uma análise das partículas metálicas depositadas sobre o filtro, o conteúdo de metais na composição do filtro deve ser o menor possível. Se o filtro é calcinado como parte da análise, então um baixo conteúdo de cinzas será um critério para a seleção do filtro. Se o filtro deve ser dissolvido durante a análise, então é necessário conhecer sua solubilidade em vários reagentes.

Para as análises de particulados utilizando a microscopia ótica é necessário conhecer as características óticas do filtro, como índice de refração e cor, e reatividade com substâncias que possam torná-lo transparente. Para análises por microscopia eletrônica, é necessário que o filtro seja plano e liso para permitir uma boa visualização das partículas contra o fundo do filtro. Análise gravimétrica pede que o filtro tenha pequena massa por unidade de área, além de baixa higroscopicidade.

A maioria dos fabricantes fornecem tabelas contendo informações sobre as características de seus filtros, tais como diâmetro dos poros, espessura, massa por unidade de área, solubilidade e tempo de dissolução, conteúdo de cinzas, eficiência de coleta. A composição química é fornecida para alguns tipos de filtros selecionados.

O tamanho do poro do filtro é selecionado considerando-se o tamanho das menores partículas a serem coletadas. As Figuras 3.2, 3.3 e 3.4 mostram o aspecto dos filtros de membrana de éster de celulose, policarbonato e PVC, respectivamente. As imagens mostradas foram obtidas por microscopia eletrônica.

Figura 3.2 Aspecto do filtro de membrana de éster de celulose observado por microscopia eletrônica

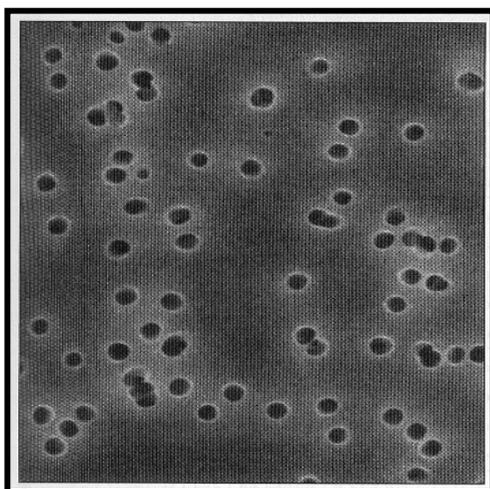
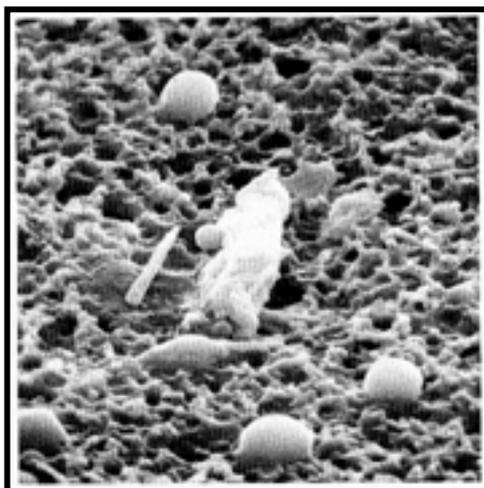
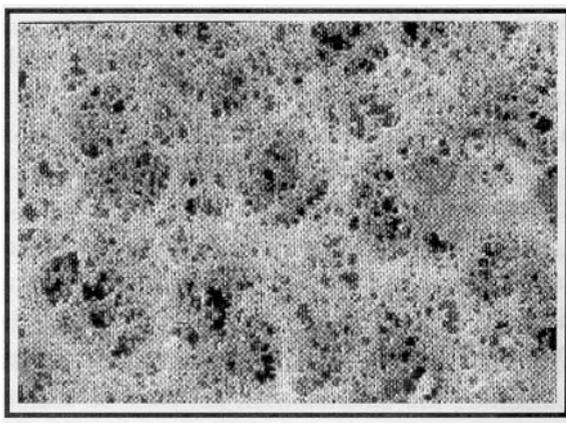


Figura 3.3 Aspecto do filtro de membrana de policarbonato observado por microscopia eletrônica

Figura 3.4 Aspecto do filtro de membrana de PVC observado por microscopia eletrônica



3.2.3 Separadores de partículas ^(4, 15,30, 31, 35 - 39)

Quando há necessidade de separação de partículas para avaliação da exposição dentro de uma faixa de tamanhos pré-determinada, como no caso de poeira inalável, tóracica ou respirável, utiliza-se algum tipo de dispositivo seletor de partículas para amostragem segundo a curva específica de separação destinada ao estudo.

Esse dispositivo pode estar acoplado a um porta-filtro que contém o filtro de membrana adequado para a coleta das partículas selecionadas ou o próprio seletor pode abrigar diretamente um ou mais filtros de membrana.

O ciclone é o separador de partículas mais antigo utilizado para a separação de partículas na faixa respirável, podendo ser encontrado em diversos tipos de materiais e formatos, além do tradicional ciclone de nylon de 10 mm. O ciclone funciona de maneira semelhante a uma centrífuga. A rápida circulação de ar dentro de sua câmara separa as partículas de poeira de acordo com seu diâmetro aerodinâmico equivalente. As partículas de poeira respirável são coletadas sobre um filtro enquanto as partículas maiores são recolhidas em um recipiente acoplado ao ciclone.

Os vários modelos de ciclones produzidos mais recentemente oferecem características especiais que os diferenciam uns dos outros. Como exemplo pode-se citar a série de ciclones da SKC, como o ciclone de alumínio, ciclone compacto de plástico condutivo, ciclone de nylon com revestimento condutivo, amostrador em espiral. Todos esses dispositivos garantem eliminar os problemas devidos à eletricidade estática associados com os ciclones de nylon tradicionais.

O ciclone de alumínio pode ser encontrado nos tamanhos de 25 ou 37 mm e deve ser acoplado a porta-filtro de mesmo tamanho. O ciclone compacto de plástico condutivo possui o porta-filtro como parte integrante do próprio dispositivo, sendo capaz de abrigar o filtro de coleta em seu interior. O ciclone de nylon com revestimento condutivo é semelhante ao ciclone de nylon tradicional, porém com a vantagem do revestimento condutivo, devendo ser acoplado a um porta-filtro. O amostrador espiral para coleta de poeira respirável possui corpo compacto e se diferencia dos ciclones por ser capaz de funcionar em qualquer posição. Utiliza o princípio da deposição de partículas em uma cavidade espiral. Essa deposição é causada pelo fluxo secundário dentro do dispositivo durante a amostragem. As partículas maiores são retidas pela espiral enquanto as partículas menores são retidas pelo filtro de coleta colocado no interior do dispositivo.

No caso da coleta de particulados nas faixas inalável e torácica, estudos ainda estão sendo feitos para desenvolver novos dispositivos portáteis para seleção de partículas destinados à avaliação da exposição ocupacional dos trabalhadores. Alguns modelos já estão disponíveis para comercialização. Como exemplo pode-se

citar o amostrador IOM para coleta de poeira inalável, o amostrador de poeira inalável tipo Button, ambos da SKC e o amostrador triplo RESPICON, para coleta das poeira inalável, torácica e respirável em uma única amostragem.

O amostrador IOM possui face aberta para a entrada da poeira inalável coletada e é produzido em plástico condutivo. Abriga um filtro de coleta de 25 µm de diâmetro dentro do corpo do dispositivo. O amostrador de poeira inalável tipo Button possui face de entrada coberta por uma superfície porosa curva, que segundo informação do fabricante tem o objetivo de impedir que partículas maiores que 100 µm entrem por projeção ou sedimentação. O amostrador RESPICON é um impactador virtual capaz de abrigar três filtros de coleta para a amostragem simultânea das frações inalável, torácica e respirável.

Antes da escolha de qualquer um desses dispositivos separadores de partículas é recomendável que se dedique um tempo para estudar suas características particulares, tipos específicos de aplicação e seu funcionamento. Outros fatores importantes a serem considerados são os critérios ou convenções para seleção de tamanho de partícula atendidos pelo dispositivo (ACGIH/ISO/CEN), vazão ou fluxo de ar indicado para aplicação e calibração do dispositivo de amostragem. Essas informações são essenciais para utilização correta e obtenção de dados confiáveis sobre a exposição do trabalhador e podem ser obtidas através de catálogos ou via *Internet* consultando os *sites* dos fabricantes.

3.3 Estratégia de Amostragem

A estratégia de amostragem descreve como os instrumentos de medição devem ser usados para a avaliação da exposição ocupacional (de indivíduos ou grupos de indivíduos), envolvendo considerações de onde amostrar, duração e frequência da coleta, levando em conta a variabilidade no ambiente de trabalho ⁽⁴⁾.

Uma etapa anterior à coleta de amostras é fixar o objetivo que se deseja atingir, que pode ser, por exemplo:

- verificar se existe risco para a saúde do trabalhador;
- verificar se o ambiente de trabalho atende aos requisitos da legislação vigente;
- monitorar a eficiência das práticas de trabalho e controles de engenharia adotados;
- colher dados para uso em estudos epidemiológicos;
- identificar trabalhos ou tarefas específicas de alto risco para que ações corretivas possam ser tomadas.

Com base no conhecimento sobre a disponibilidade de equipamentos, tempo necessário para a execução da coleta de amostras, exatidão dos procedimentos de amostragem e análise que serão utilizados, dados sobre o ambiente de trabalho e atividades específicas de cada trabalhador, adota-se a estratégia de amostragem mais adequada.

No caso da exposição ocupacional a poeiras, muitos processos e operações de trabalho já são suspeitos com relação ao potencial de risco oferecido para a saúde dos trabalhadores. Entre as operações que são fontes geradoras de poeiras podemos citar como exemplos:

- operações com sólidos: descarregamento, mistura, separação, extração, britagem, moagem, transporte, carregamento, ensacamento;
- pulverização pressurizada: limpeza de peças, jateamento abrasivo, pintura, desengraxamento;
- operações de moldagem: corte, esmerilhamento, enchimento, moagem, moldagem, rebarbação, serragem, perfuração.

As informações sobre os riscos ocupacionais específicos oferecidos pelas poeiras e o conhecimento dos processos e operações envolvidas são complementados pela visita ao local de trabalho. É nesse momento que o risco potencial pode ser identificado e se obtém uma visão preliminar sobre as condições reais de exposição dos trabalhadores. A esse conjunto de informações dá-se o nome de reconhecimento de risco.

A visita ao local de trabalho envolve a observação da rotina dos trabalhadores com relação à execução de suas tarefas e a verificação de características do ambiente que possam influenciar a exposição dos trabalhadores à poeira, como por exemplo⁽⁴²⁾:

- tipos de operações de trabalho;
- condições potencialmente perigosas e fontes geradoras de poeira, lembrando que as poeiras que não podem ser vistas são as que oferecem maior risco para o trabalhador, pois são justamente as que se encontram na faixa respirável^(3, 37).
- posicionamento dos trabalhador em relação às fontes geradoras de poeira;
- número de trabalhadores por operação;
- número de trabalhadores que circulam pela área;
- horários de trabalho (turnos e ciclos de trabalho);
- procedimentos de trabalho usados para desempenho das tarefas;
- existência de ventilação natural e de sistemas de ventilação artificial;
- uso de equipamento de proteção individual.

Uma vez que, através da visita preliminar ao ambiente de trabalho, se identifique a possibilidade de qualquer exposição que represente risco à saúde do trabalhador, inicia-se a etapa de planejamento da estratégia de amostragem, que consiste de⁽⁴²⁾:

a) Seleção do tipo de amostragem a ser realizada

O resultado da amostragem deve representar as condições reais de trabalho e de exposição a que estão submetidos os trabalhadores. Dependendo do objetivo da avaliação pode-se optar entre^(20, 42):

- “Amostragem pessoal”, onde o dispositivo de amostragem é colocado na lapela do trabalhador, posicionado na zona respiratória (150 ± 50 mm das narinas do trabalhador).
- “Amostragem ambiental ou do ar geral (estática)”, onde o dispositivo de amostragem é colocado em um local fixo na área de trabalho.

b) No caso de amostragem pessoal, seleção dos trabalhadores para o uso dos dispositivos de amostragem

- Trabalhadores de risco máximo: seleção dos trabalhadores que presumivelmente estão expostos ao maior risco.
- Seleção aleatória de trabalhadores dentro de um grupo homogêneo de risco, quando não é possível identificar diferenças de exposição entre os trabalhadores.

c) Escolha do tempo de duração da amostragem

De modo geral, seguindo a terminologia comumente aceita, proposta pelo NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health), podemos selecionar um dos seguintes tipos de amostragens:

- “Amostragem com amostra única de período completo”, onde uma só amostra cobre toda a jornada de trabalho de 8 horas.
- “Amostragem com amostras consecutivas de período completo”, onde ao longo de toda a jornada de trabalho de 8 horas se obtêm duas ou mais amostras de mesma ou diferentes durações.
- “Amostragem com amostras consecutivas de período parcial”, onde amostras de igual ou diferentes durações cobrem parte do tempo de exposição dos trabalhadores. Neste caso, deve ser amostrado pelo menos 70% da jornada de trabalho diária e semanal, o que corresponde a 6 a 7 horas em um dia e 3 a 4 dias em uma semana.

- “Amostragem com amostras pontuais”, onde amostras de curta duração (menos de uma hora, em geral alguns minutos de duração) são tomadas aleatoriamente durante a jornada de trabalho.

Devido às variações nas amostragens, às flutuações nos ambientes de trabalho, à existência de erros de outras origens, a exposição medida raramente coincide com a exposição verdadeira. Assim qualquer resultado de amostragem em Higiene Ocupacional será sempre uma estimativa da exposição média verdadeira. Por isso, devem ser empregados conhecimentos de estatística para se estabelecer um intervalo de confiança em torno do qual o valor da exposição estimada contenha o valor verdadeiro da exposição.

3.4 Análises de Poeiras

Para a análise bem sucedida de amostras ambientais de poeira, vários fatores estão intimamente correlacionados, como o tipo de poeira a ser analisada, o tipo de filtro de coleta, as técnicas de amostragem e análise adotadas.

Com o objetivo de se conhecer as possíveis interferências analíticas e se fazer as correções necessárias para a aplicação da técnica analítica adequada, é de vital importância, e em muitos casos imprescindível, que a amostra seja acompanhada de toda informação possível com relação à natureza da poeira, processos de trabalho e características do ambiente.

O tipo de filtro utilizado para a coleta de particulados deve ser compatível com as técnicas analíticas a serem usadas posteriormente. As características do filtro devem ser analisadas levando-se em consideração o estado físico, natureza e comportamento dos contaminantes que se deseja reter, visando a coleta e transporte de amostras estáveis.

Várias técnicas analíticas são utilizadas para a determinação da concentração de poeira suspensa no ar de ambientes de trabalho. As técnicas mais comuns para análise de amostras ambientais de poeiras são a gravimetria, a difratometria de raios-x, a espectrometria de infravermelho, espectrometria de absorção atômica e a microscopia ótica⁽⁴³⁻⁴⁵⁾.

Tabela III. 3 Técnicas mais utilizadas para análises de amostras ambientais de poeira

Tipo de Poeira	Filtro de Coleta	Técnica Analítica
Poeira contendo sílica	Filtro de membrana de PVC	<ul style="list-style-type: none"> • Gravimetria • Difração de Raios-x • Espectrometria de Infravermelho
Asbesto / Fibras	Filtro de membrana de éster de celulose	<ul style="list-style-type: none"> • Microscopia Ótica com Contraste de Fase
Poeira Metálica	Filtro de membrana de éster de celulose	<ul style="list-style-type: none"> • Espectrometria de Absorção Atômica
Poeiras Não Classificadas	Filtro de membrana de PVC ou Teflón	<ul style="list-style-type: none"> • Gravimetria

Apesar de ser inespecífica, a gravimétrica é a técnica mais comum para determinação da concentração de poeira suspensa no ar de ambientes de trabalho. Porém, quando se deseja obter mais informação sobre a poeira ou sobre algum componente específico, é necessária a utilização de outra técnica analítica mais adequada.

Na aplicação das metodologias analíticas citadas:

- a análise de fibras por microscopia ótica avalia diretamente o tamanho das fibras depositadas sobre o filtro de coleta e os resultados são emitidos com base na contagem de fibras medidas dentro da faixa respirável^(43,46);
- o resultado da análise de sílica por difração de raios-x é dependente do tamanho de partícula, exigindo que amostras coletadas para análise e padrão analítico tenham distribuição de tamanho de partícula similar^(45,47,48);
- as demais metodologias citadas não são afetadas pelo tamanho das partículas analisadas; a amostra não sofre classificação de tamanho de partícula, nem durante a coleta (amostragem de poeira total) nem durante a análise⁽¹⁹⁾; e é principalmente nesses casos que o conhecimento prévio sobre a distribuição de tamanho das partículas presentes no ambiente complementaria os dados de concentração de particulado presente no ar.

3.5 Legislação Ocupacional para Poeiras

3.5.1 Limites de exposição

A ACGIH define os limites de exposição⁽²⁹⁾ como os valores referentes às concentrações das substâncias químicas dispersas no ar que representam as

condições sob as quais acredita-se que a maioria dos trabalhadores possa estar exposta, repetidamente, dia após dia, sem sofrer efeitos adversos à sua saúde. Alerta, porém, que devido à grande variação na suscetibilidade individual, uma pequena percentagem de trabalhadores pode experimentar um desconforto com relação a certas substâncias, em concentrações iguais ou inferiores aos limites de exposição; uma menor percentagem poderia ser mais seriamente afetada por agravamento de uma condição preexistente ou pelo desenvolvimento de uma doença ocupacional.

Diversas organizações no mundo inteiro estão envolvidas no estabelecimento de limites de exposição, também referido na literatura mais antiga como limites de tolerância.

As variações entre os valores dos limites vigentes pelos diversos países, para uma mesma substância, demonstram a fragilidade desses limites. Os critérios e os tipos de informação utilizados para o seu estabelecimento também variam de substância para substância. Os limites podem ser baseados em dados obtidos da experiência na indústria, de estudos experimentais com humanos ou com animais, além de sofrerem a influência de acordos políticos ^(49 - 51).

Os limites de exposição não consideram fatores importantes, como ⁽⁵⁰⁾:

- diferenças de suscetibilidade entre indivíduos;
- suscetibilidade diferenciada para mulheres, crianças e idosos;
- diferenças genéticas na população;
- diferenças no estado de saúde dos trabalhadores, como nutrição e doenças anteriores ou atuais que podem ser agravadas;
- condições de vida e higiene pessoal;
- exposição a mais de um contaminante;
- influências climáticas (calor, altitude, umidade);
- diferenças na carga de trabalho (esforço físico dos trabalhadores).

Mesmo assim, são considerados como ferramentas importantes para o controle das doenças ocupacionais. Porém suas limitações devem ser conhecidas para que possam ser aplicados de forma adequada.

A exemplo de outros países, o Brasil adotou o modelo americano da ACGIH e o incluiu em sua legislação, embora esses limites tenham sido criados originalmente com a intenção de servirem apenas como **guias** ou **recomendações** para o controle de riscos potenciais à saúde.

A Declaração de Princípios no uso dos Valores Limites de Exposição, aprovada pela direção da ACGIH, em março de 1988, diz:

“Os valores limites de exposição não foram desenvolvidos para serem usados como normas legais, e a ACGIH não recomenda seu uso como tal. Contudo, reconhece-se que, em certas situações, pessoas ou organizações possam querer fazer uso destas recomendações ou guias como suplemento para seus programas de saúde e segurança ocupacional. A ACGIH não se opõe ao uso desta forma, desde que o uso dos limites de exposição venham a contribuir para a otimização da proteção do trabalhador. Não obstante, os usuários devem reconhecer as restrições e limitações nessa utilização, assumindo as responsabilidades por este tipo de uso.”⁽²⁹⁾

3.5.2 Legislação brasileira ⁽²⁶⁾

A Legislação Brasileira, através da NR-15 - Anexo nº 12 - LIMITES DE TOLERÂNCIA PARA POEIRAS MINERAIS, estabelece Limites de Exposição para apenas 3 tipos de poeiras minerais:

- Asbesto
- Sílica livre cristalizada
- Manganês e seus compostos

Os limites de exposição para asbesto e manganês foram revisados pela Portaria nº 1 de 28/05/91 e Portaria nº 8 de 05/10/92, respectivamente. Os limites para sílica livre cristalizada permanecem os mesmos desde 08 de junho de 1978, data da publicação da Portaria nº 3214, que regulamentou a Lei nº 6514, de 22 de dezembro de 1977, que aprovou as Normas Regulamentadoras (NR's) relativas à Segurança e Medicina do Trabalho.

Os limites de tolerância brasileiros foram baseados nas recomendações da ACGIH publicadas em 1974, corrigidos para a jornada de trabalho de 48 horas, vigente no Brasil em 1978, e permanecem os mesmos até hoje, sem considerar que diversas substâncias constantes da lista brasileira passaram a ter indicação de potencial carcinogênico ⁽⁵²⁾.

Tabela III. 4 Limites de tolerância brasileiros para poeiras minerais

POEIRA MINERAL	LIMITE DE TOLERÂNCIA
• Asbesto	Asbesto crisotila: 2,0 fibras/cm ³ * Proibido o uso de anfíbolios
• Manganês e seus compostos	5 mg/m ³ Poeira respirável: $LT = \frac{8}{\% \text{ quartzo} + 2}$
• Sílica livre cristalizada	$LT = \frac{24}{\% \text{ quartzo} + 3}$

Por outro lado, a ACGIH revisa seus limites a cada 2 anos, e atualmente atribui limites para mais de 40 tipos diferentes de poeiras, alguns dos quais com indicação para amostragem de poeira inalável. A ACGIH ainda recomenda limite de exposição para Poeiras Não Classificadas (PNOC) ⁽²⁹⁾.

Na ausência de Limite de Tolerância estabelecido pela Legislação Brasileira, recomendava-se que se usasse o Limite de Exposição correspondente, adotado pela ACGIH, como uma postura profissional. À partir de 1994 essa recomendação passou a fazer parte da NR-9: PROGRAMA DE PREVENÇÃO DE RISCOS AMBIENTAIS (PPRA), regulamentada pela Portaria n° 25, de 29 de dezembro de 1994, que alterou a Portaria n° 3214, tornando a recomendação anterior uma ferramenta legal ⁽²⁶⁾.

Os limites de exposição adotados pela ACGIH, quando aplicados para jornadas de trabalho maiores que 40 horas semanais devem ser corrigidos através de um fator de redução obtido com a aplicação da Fórmula de Brief & Scala ⁽²⁾:

$$\boxed{FR = \frac{40}{h} \times \frac{168 - h}{128}} \quad (\text{equação 01})$$

onde: FR = fator de redução
h = jornada de trabalho em horas

Devido às limitações apresentadas pelos limites de exposição, a sua aplicação deve ser obrigatoriamente complementada com outras informações que possam auxiliar na sua interpretação.

O desenvolvimento e aperfeiçoamento de metodologias analíticas, as novas técnicas de detecção, com aumento de sensibilidade e especificidade, podem ser integradas com os procedimentos para diagnóstico precoce, prevenção de doenças e correção de qualquer desvio da situação aceitável para um ambiente de trabalho.

É necessário que a avaliação dos dados, relativos aos efeitos da exposição dos trabalhadores a contaminantes ambientais, seja realizada de maneira científica. Isso ajuda a resguardar a saúde dos trabalhadores das possíveis influências políticas ou socio-econômicas que possam afetar os Limites de Exposição.

3.6 Controle Exposição Ocupacional à Poeira

Para que a poeira cause algum dano é necessário que ela penetre no organismo humano e atinja os órgãos sensíveis à sua ação. Por isso é necessário conhecer as condições de dispersão de particulados no ar do ambiente de trabalho para que se possa adotar as medidas adequadas de controle da poeira.

As medidas de controle mais indicadas para cada situação deveriam ser estudadas como antecipação de riscos, prevista na fase de projeto de uma instalação industrial. Normalmente esse estudo é feito após a avaliação ambiental, quando a produção já está em andamento ^(4, 53).

Os princípios básicos da tecnologia de controle são simples ^(53, 54):

- sempre que possível, evitar o uso de materiais em pó, ou que poeira seja formada e liberada durante o processo industrial;
- se isto não for possível, conter a poeira de tal forma que esta não se propague no ambiente de trabalho;
- se isto não for possível ou suficiente, isolar a poeira ou diluí-la no ambiente de trabalho;
- e em último caso, colocar um bloqueio na via de entrada do organismo (vias respiratórias do trabalhador) para impedir que a poeira alcance o pulmão.

Portanto a hierarquia dos controles deve ser ⁽⁵⁴⁾:

1. controle do agente de risco na fonte de geração de poeira;
2. controle do agente de risco na trajetória (entre a fonte e o receptor);
3. controle do agente de risco no receptor (trabalhador).

O ideal seria a eliminação completa de qualquer agente que pudesse afetar a saúde nos ambientes de trabalho, mas na prática isto nem sempre é possível. O que freqüentemente se procura atingir é a redução máxima da concentração de poeira, de modo a minimizar o risco.

3.6.1 Medidas de controle relativas ao ambiente de trabalho^(2,53-55)

As estratégias para controle de poeiras devem visar principalmente a prevenção de danos à saúde do trabalhador através de medidas de controle coletivas, que beneficiam o maior número de trabalhadores possível. Essas medidas devem ser instaladas tanto na fonte como na trajetória de propagação da poeira, poupando o trabalhador do uso de equipamentos de proteção individual. São aquelas que:

- (a) eliminam ou reduzem a utilização de materiais em pó ou a formação de poeiras, como:
 - “substituição de materiais nocivos” por outros menos tóxicos ou que dêem origem a menor risco, levando em consideração sua viabilidade técnica e econômica, e principalmente a “não introdução” de um novo risco;

- “modificações em processos e equipamentos”, visando o menor risco possível, as facilidades para limpeza e manutenção e características de isolamento entre o homem e a poeira gerada.

(b) previnem a liberação de poeiras no ambiente de trabalho, como:

- sistemas fechados
- enclausuramento
- ventilação local exaustora
- armazenamento adequado das matérias-primas em pó
- utilização de métodos úmidos

(c) reduzem a concentração de poeira no ar ambiente, como:

- ventilação geral diluidora e ventilação local exaustora
- limpeza dos locais de trabalho

A ventilação local exaustora captura o contaminante no seu ponto de origem antes que o mesmo se espalhe pelo ambiente e atinja a zona respiratória do trabalhador, usando para isto a menor quantidade de ar possível. O contaminante capturado é levado por tubulações, ao exterior ou ao sistema de coleta adequado, tendo-se o cuidado de evitar a contaminação do ambiente externo ^(2, 54).

A ventilação geral diluidora diminui a concentração de contaminantes ambientais através da introdução de grandes volumes de ar, efetuando a diluição dos mesmos. É recomendada para aqueles ambientes nos quais o contaminante é produzido em vários lugares de um mesmo recinto ⁽²⁾.

3.6.2 Medidas de controle relativas ao trabalhador ⁽⁵⁴⁻⁵⁷⁾

Também são parte de uma estratégia de controle, porém devem ser vistas como medidas complementares e que raramente substituem as medidas relativas ao ambiente de trabalho. Na maioria da vezes requerem planejamento e controle administrativo para sua execução, como:

- limitação do tempo de exposição
- educação / treinamento
- práticas de trabalho adequadas
- vigilância à saúde através de exames médicos periódicos
- higiene pessoal e das roupas de trabalho
- utilização de equipamentos de proteção individual (EPIs)

Os EPIs devem ser considerados o último recurso, utilizados apenas quando outros métodos de controle não são realmente possíveis, e em casos espe-

ciais como operações esporádicas, como as de trabalhos de manutenção, quando um ou muito poucos trabalhadores são expostos. Os EPIs constituem sempre solução temporária ou de emergência.

3.6.3 Recomendações gerais

As medidas de controle devem ter sua eficiência continuamente acompanhadas através de avaliações ambientais periódicas. A manutenção de sistemas de prevenção é extremamente importante. O acompanhamento constante das condições do ambiente de trabalho permite que as providências sejam tomadas tão logo se perceba qualquer alteração. As medidas de controle assim como os hábitos de proteção se deterioram com o tempo, e a falsa sensação de segurança deixa os trabalhadores desprotegidos⁽⁵⁴⁻⁵⁶⁾.

MEDIÇÃO DO TAMANHO DAS PARTÍCULAS

A prática da higiene ocupacional é voltada para o reconhecimento, avaliação e controle dos fatores ambientais originados do ou no local de trabalho, que podem causar danos à saúde ou bem-estar, ou desconforto significativo e ineficiência entre trabalhadores ou entre membros da comunidade. Um desses fatores é a quantidade de partículas sólidas finamente divididas suspensas no ar como resultado de diversos tipos de processos de trabalho.

A determinação da distribuição de tamanho de partícula e a interpretação do papel do tamanho das partículas nos efeitos à saúde do trabalhador contribuíram com uma importante parcela dos avanços da Higiene Ocupacional. Os episódios da silicose, no início dos anos 30, forneceram um considerável impulso para os estudos sobre a medição do tamanho e comportamento das partículas de poeira⁽⁵⁸⁾.

O conhecimento sobre a distribuição do tamanho das partículas presentes no ar de ambientes de trabalho pode auxiliar a:

- localizar regiões do sistema respiratório atingidas com maior intensidade pelas partículas inaladas,
- localizar condições operacionais onde possa existir maior risco durante a exposição,
- ajudar na escolha dos dispositivos de amostragem mais adequados para tomada de amostras,
- avaliar o desempenho de equipamentos de controle.

Amostragem de aerodispersóides para medir tamanho de partícula também é executada em muitas pesquisas e investigações experimentais e na avaliação de características de coleta de amostradores de ar⁽³⁴⁾.

É importante que na obtenção, registro, comparação ou interpretação de resultados de medição tamanho de partícula se considere a teoria e limitações dos métodos de amostragem e análise empregados e o significado dos dados de tamanho de partícula obtidos. Qualquer dado de tamanho de partícula deve estar relacionado aos métodos de amostragem e medição usados.

A exposição dos trabalhadores a material particulado pode ser avaliada adequadamente somente quando todos os tamanhos de partícula presentes na zona respiratória dos trabalhadores estão representados na amostra em proporções adequadas, e os parâmetros que influenciam a amostragem em ambientes ocupacionais são estudados adequadamente.

4.1 O Tamanho das Partículas

A faixa de tamanhos de partículas dos aerodispersóides é extremamente grande. Para cada objetivo de amostragem há tamanhos de partícula de maior interesse. A estratégia de amostragem deve ser planejada de modo a favorecer a coleta eficiente e a medição do tamanho de tais partículas com exatidão e precisão aceitáveis.

Os métodos de coleta de particulados devem ser selecionados de maneira a preservar o formato das partículas em relação ao estado original do aerodispersóide. Os resultados obtidos durante a medição de tamanho terão pouca ou nenhuma relação com o tamanho ou forma das partículas no estado original do aerodispersóide se o método de coleta alterar essa forma.

4.1.1 Diâmetro equivalente^(1, 34, 59)

O tamanho de uma partícula é a dimensão que melhor caracteriza seu estado de subdivisão. Para partículas esféricas, o diâmetro é uma medida adequada e suficiente, mas as partículas de formas irregulares necessitam da medição de várias dimensões para serem caracterizadas.

Para descrever uma partícula tridimensional irregular através de um único número adotou-se o diâmetro equivalente, que é determinado pela medição direta do diâmetro da partícula ou pela medição de algum parâmetro que esteja relacionado com o seu tamanho.

Vários tipos de diâmetros equivalentes podem ser extraídos a partir de técnicas que medem diferentes propriedades físicas específicas da partícula, como volume, área, resistência à movimentação em um gás ou poder de espalhamento da luz. O mais usado desses diâmetros é o diâmetro esférico equivalente, que corresponde ao diâmetro de uma esfera que tem o mesmo valor da propriedade

física da partícula irregular que está sendo medida. A figura 4.1 ilustra uma partícula cujo diâmetro equivalente foi medido baseado em diversas propriedades.

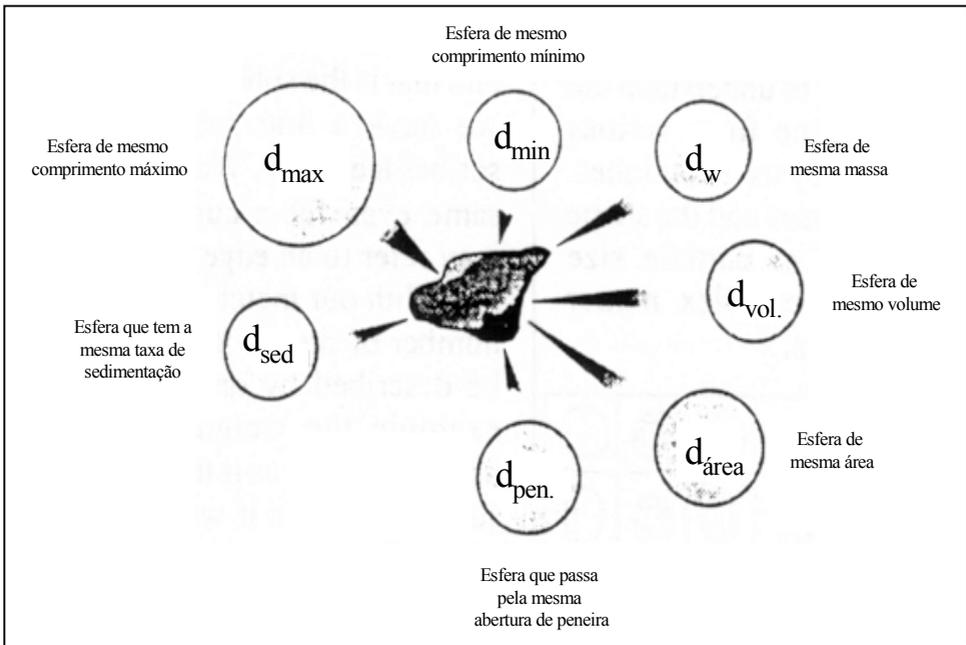


Figura 4.1 Diâmetro equivalente medido com base em diversas propriedades da partícula ⁽⁷⁹⁾

Devemos estar cientes de que a técnica de caracterização de tamanho, que mede uma determinada propriedade da partícula (por exemplo, diâmetro equivalente através da área), dará respostas diferentes de outra técnica que mede uma propriedade ou dimensão diferente da primeira (por exemplo, diâmetro equivalente através do volume).

Todas as técnicas fornecem resultados aceitáveis. Mas, quando propriedades diferentes da partícula são medidas não é possível comparar diretamente esses resultados.

Recomenda-se que as medições sejam feitas sempre da mesma maneira e com a mesma técnica, e que o método utilizado sempre seja registrado ⁽⁵⁹⁾.

Para garantir a validade estatística dos resultados de análise de tamanho, as partículas submetidas a medição devem ser escolhidas de maneira completamente aleatória. Nesse tipo de análise, apenas uma fração do número total de partículas que compõe a população de partículas estudada tem o seu tamanho de fato medido. Por isso, é essencial seguir regras criteriosas em todas as fases da amostragem e análise.

4.1.2 Distribuição de tamanho de partícula

O diâmetro é a dimensão que melhor caracteriza o tamanho de uma partícula. Entretanto, quando partículas de muitos tamanhos estão juntas, como no caso dos aerodispersóides, o diâmetro sozinho não é suficiente para descrever os tamanhos de todas as partículas presentes ^(58, 59).

A descrição da quantidade de partículas com relação ao seu tamanho é chamada de função distribuição. Os dados de medição de tamanho de partícula podem ser apresentados na forma de distribuição de frequência ou de distribuição de frequência acumulada, usando uma combinação do parâmetro de medição com o parâmetro de quantidade. Por exemplo, diâmetro versus porcentagem em número, volume ou massa. Os dados obtidos na medição do tamanho de partícula são classificados de acordo com faixas de tamanhos chamadas intervalos de classe ^(19, 34).

A maioria dos aerodispersóides formados por processos de cominuição de matérias-primas possuem distribuições de tamanho de partícula que obedecem à função de distribuição lognormal. Quando os tamanhos são colocados em um gráfico como uma função do número de vezes que cada tamanho ocorre, uma distribuição assimétrica é obtida ^(58, 59), como mostra a figura 4.2.

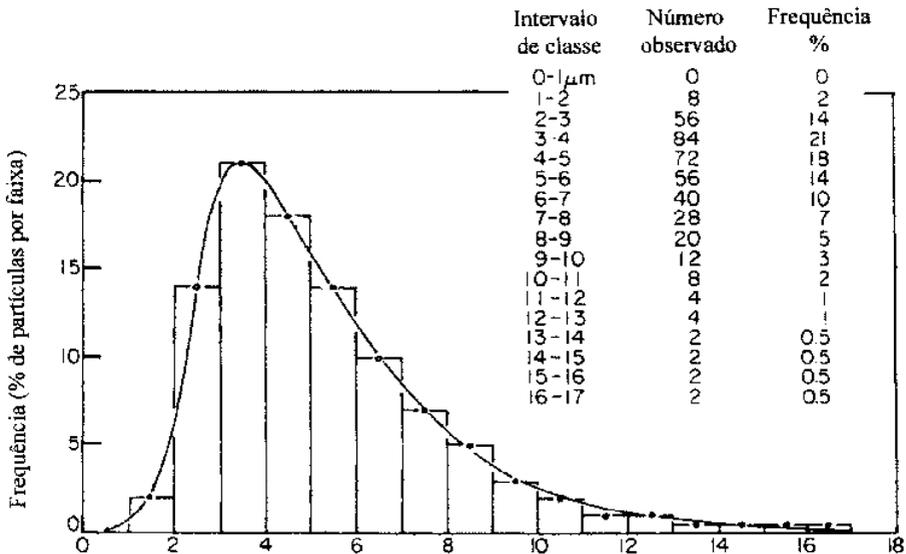


Figura 4.2 Exemplo de distribuição de tamanho de partícula típico das poeiras ⁽⁵⁸⁾

Partículas lognormalmente distribuídas mostradas desta maneira geram uma curva típica, altamente desviada, com a maior inclinação sobre o lado das partículas de diâmetro menor. Isto indica que um grande número de partículas pequenas estão presentes na amostra.

Quando a mesma distribuição de partículas mostrada na Figura 4.2 é classificada de acordo com intervalos de classe de igual comprimento logarítmico de diâmetro, como é apresentado na figura 4.3, nota-se que uma curva normal é obtida quando os pontos médios de cada intervalo de classe são conectados. Este tipo de curva é típica de um conjunto de partículas cujo tamanho é verdadeiramente lognormalmente distribuído. Fazer essa transformação é da maior importância, pois dessa maneira a distribuição lognormal passa a obedecer a todas as leis estatísticas que regem a distribuição normal ^(55, 56, 59).

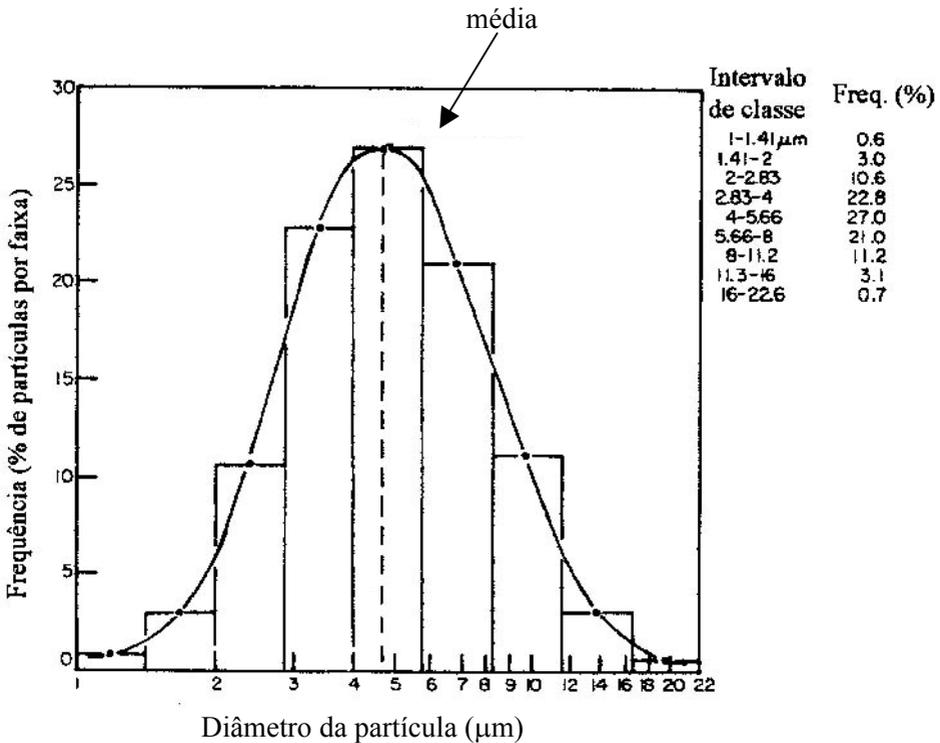


Figura 4.3 Distribuição do tamanho de partícula da Figura 4.2 construída em escala logarítmica para o tamanho de partícula ⁽⁵⁸⁾

A distribuição normal é caracterizada pelos parâmetros que medem a tendência central da distribuição (média aritmética) e pela dispersão ao redor da tendência central (desvio padrão) ⁽⁵⁸⁾.

No caso da distribuição lognormal transformada em distribuição normal, como na Figura 4.3, o valor de tendência central é agora melhor denominado de média geométrica, e o desvio padrão é chamado de desvio padrão geométrico.

Outra forma de apresentar os dados é através da distribuição de frequência acumulada. Este tipo de gráfico é mais útil para a análise da distribuição de tamanho de partícula. A porcentagem acumulada de poeira que é mais fina (ou mais grossa) que um determinado tamanho, é mostrada em função do limite superior do intervalo de classe, em uma escala logarítmica, como na Figura 4.4.

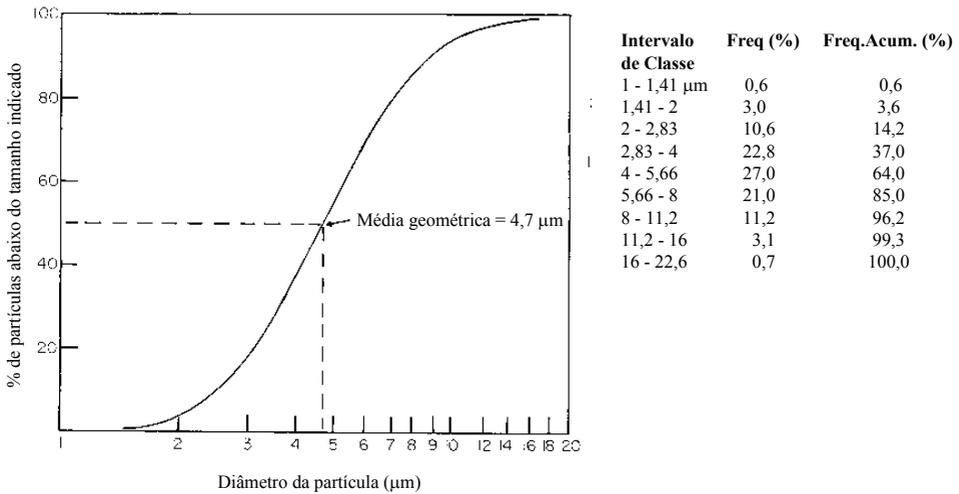


Figura 4.4 Distribuição de frequência acumulada das partículas construída em escala logarítmica ⁽⁵⁸⁾

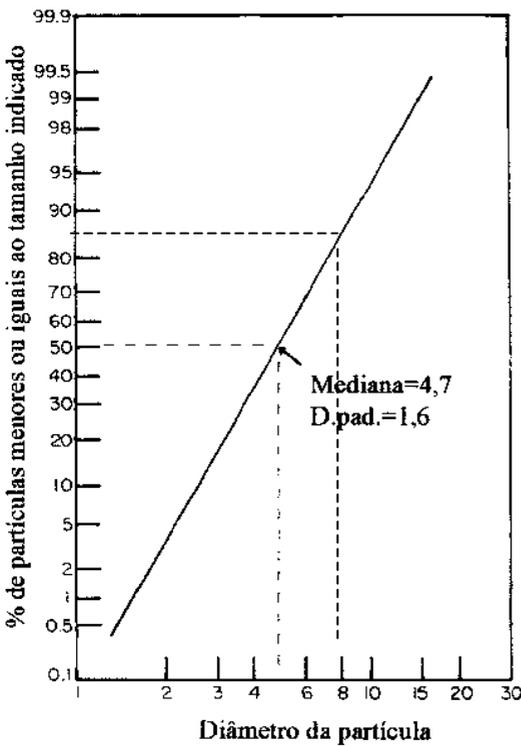
A determinação dos dois parâmetros que definem uma distribuição, a média e o desvio padrão, que são a média geométrica e o desvio padrão geométrico quando se emprega os logaritmos dos números, é facilitada ainda mais pelo uso da escala log-probabilidade (abscissa em escala logarítmica e ordenada em escala de probabilidade). Nesse tipo de construção gráfica a curva de distribuição de frequência acumulada obtida é uma reta, como mostrado na Figura 4.5. Podemos, então, ler a média geométrica e o desvio padrão geométrico dos diâmetros das partículas diretamente nesse gráfico.

No gráfico da distribuição de frequência acumulada a média geométrica é o valor de diâmetro correspondente a 50% dos tamanhos medidos, dividindo a curva de frequência ao meio.

A dispersão da distribuição, ou desvio padrão geométrico, é determinada através do mesmo gráfico. Utilizam-se os valores de diâmetro correspondentes a 84,1% e 50% dos valores medidos projetados sobre a reta e aplica-se a equação 02.

$$s_{\text{eg}} = \frac{84,1\% \text{ dos tamanhos}}{50\% \text{ dos tamanhos}}$$

(equação 02)



Intervalo de Classe	Freq (%)	Freq.Acum. (%)
1 - 1,41 μm	0,6	0,6
1,41 - 2	3,0	3,6
2 - 2,83	10,6	14,2
2,83 - 4	22,8	37,0
4 - 5,66	27,0	64,0
5,66 - 8	21,0	85,0
8 - 11,2	11,2	96,2
11,2 - 16	3,1	99,3
16 - 22,6	0,7	100,0

Figura 4.5 Distribuição de frequência acumulada das partículas construída em escala log-probabilidade⁽⁵⁸⁾

4.1.3 Significado prático do tamanho de partícula⁽¹⁾

Apesar da média geométrica e do desvio padrão geométrico descreverem completamente a distribuição lognormal, esses parâmetros não têm um significado físico para ajudar na interpretação de resultados experimentais. Um diâmetro médio é apenas o diâmetro de uma partícula hipotética que de alguma maneira representa o total de partículas presentes na amostra.

Para os aerodispersóides, o interesse está frequentemente centrado no comportamento aerodinâmico das partículas. Os dados das distribuições de tamanho obtidos na forma de frequência por número, volume ou massa devem ser convertidos no tipo de informação mais adequado, se o comportamento aerodinâmico precisa ser levado em consideração^(19, 59).

O diâmetro aerodinâmico equivalente é definido como o diâmetro de uma partícula esférica de densidade igual a uma unidade, que tem o mesmo comportamento aerodinâmico que a partícula real considerando seu tamanho, forma e densidade. Essa informação é crucial para determinar se uma partícula é capaz de penetrar em um filtro, ser removida por um separador de partículas ou se depositar no pulmão.

O diâmetro aerodinâmico de uma partícula pode ser medido através da determinação da velocidade da partícula em um fluxo conhecido. Instrumentos usando esse princípio, como o Aerodynamic Particle Sizer Spectrometer e o Aerosizer Particle Size Analyzer da TSI Incorporated, são utilizados para medir o diâmetro aerodinâmico das partículas.

O diâmetro aerodinâmico pode ser muito diferente do diâmetro linear medido diretamente sobre a partícula devido às variantes de forma e densidade dessa partícula; entretanto, ele serve como uma base para comparação em casos onde as propriedades aerodinâmicas da partícula são de interesse maior⁽³⁾.

O diâmetro médio que mais se aproxima do diâmetro aerodinâmico médio é o diâmetro médio mássico, que é o diâmetro baseado na massa das partículas. Para o diâmetro médio mássico metade da massa das partículas é constituída por partículas com diâmetro menor que o diâmetro linear médio e a outra metade da massa das partículas por partículas de diâmetro maior⁽¹⁾. O diâmetro médio mássico é o diâmetro que melhor caracteriza a deposição de partículas no trato respiratório. Quando a poeira é composta por partículas de um único material, o diâmetro médio mássico pode ser obtido graficamente a partir da curva de distribuição de frequência dos dados de medição. Calcula-se a massa das partículas medidas em cada intervalo de classe com base na densidade do material estudado e no diâmetro esférico equivalente.

Considerando as equações 03 e 04:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{equação 03})$$

$$V = \frac{\pi d^3}{6} \quad (\text{equação 04})$$

Pode-se calcular a massa através da equação 05:

$$m = \frac{\pi d^3}{6} \cdot \rho \cdot n \quad (\text{equação 05})$$

onde:

- n = número de partículas medidas no intervalo de classe
- m = massa da partícula
- d = diâmetro médio das partículas no intervalo de classe
- ρ = densidade do material que deu origem às partículas

Deve-se observar que a massa das partículas medidas em cada intervalo de classe está relacionada com o número de partículas medidas no intervalo de classe.

Lembrando que a maioria dos limites de exposição para particulados são expressos em termos de concentração em massa de poeira e que as convenções adotadas pela ACGIH, ISO e CEN são expressas em termos de porcentagens em massa de poeira para as frações inalável, torácica e respirável, como mostrado na Tabela III.2, o diâmetro médio mássico obtido dessa maneira pode fornecer indicações sobre a região predominante de deposição das partículas no trato respiratório.

Para os estudos de medição de tamanho de partícula podem ser utilizadas diversas técnicas, tais como microscopia ótica, microscopia eletrônica de varredura, análise de partículas por difração de luz a laser, medição de diâmetro aerodinâmico e outras.

4.2 Medição de Tamanho de Partícula por Microscopia

Para medição do tamanho de partículas irregulares por microscopia o diâmetro equivalente é dado pelo comprimento de qualquer interseção linear que melhor descreva o diâmetro da partícula. A observação da silhueta de uma partícula e o cálculo do diâmetro de um círculo que tem a mesma área dará o diâmetro equivalente da área projetada pela partícula.

Alguns dos métodos de medição de diâmetro de partículas irregulares são ilustrados na figura 4.6.

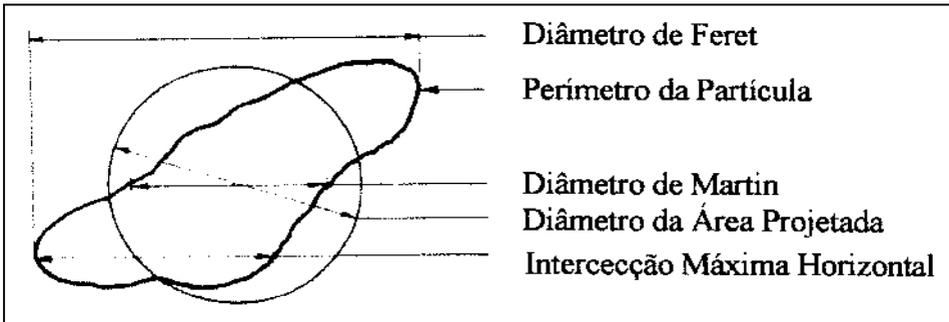


Figura 4.6 Métodos para medição do diâmetro da partícula por microscopia ⁽⁵⁹⁾

Os métodos mais utilizados para medição do tamanho da partícula por microscopia são:

- diâmetro de Feret: distância entre duas linhas tangentes à projeção da partícula, em alguma direção pré fixada (horizontal ou vertical);
- diâmetro de Martin: comprimento do segmento, paralelo a alguma direção pré fixada (horizontal ou vertical), que divide a projeção da partícula em duas áreas iguais;
- diâmetro da área projetada: diâmetro de um círculo que tem a mesma área projetada que a partícula em uma posição estável;

4.2.1 Medição por microscopia ótica

A microscopia ótica ainda é a técnica analítica mais utilizada para medição de tamanho de partícula. Apesar de estar sendo substituída, nos últimos anos, por técnicas automáticas mais avançadas e rápidas, ela ainda permanece como técnica de referência devido a suas capacidades e facilidades, como ⁽⁵⁸⁻⁶⁰⁾:

- fornecer informações sobre tamanho, forma, cor, índice de refração, cristalografia;
- a quantidade de amostra necessária para análise é pequena e amostras representativas podem ser obtidas com instrumentos de amostragem adequados;
- a observação direta das partículas dá um certo grau de credibilidade e confiança aos resultados;
- a observação direta permite ao microscopista obter ou deduzir informações sobre a presença de aglomerados, corpos defeituosos ou outras indicações de falta de homogeneidade;

- baixo custo do equipamento comparado ao de outros tipos de equipamentos destinados à mesma finalidade.

O microscópio ótico é indicado para identificação e medição de tamanhos de partículas na faixa de diâmetro entre 0,8 e 20 μm ⁽³⁾. Detecção de partículas menores que as limitadas por esta faixa depende da resolução do instrumento. Um limite inferior teórico poderia chegar a até 0,2 μm , dependendo dos acessórios instalados e do ajuste do microscópio. Na prática, a medição deve ser executada somente para partículas pelo menos 10 vezes maiores que o limite de resolução da lente objetiva usada ^(60, 61).

Recomenda-se que a medição de tamanho de partícula por microscopia ótica seja limitada a tamanhos de até 75 μm , mas partículas maiores podem ser medidas desde que não estejam em uma proporção superior a 10% do número total de partículas de poeira medidas. Se a proporção exceder 10%, essas partículas devem ser removidas e analisadas separadamente por uma técnica mais adequada ⁽⁶⁰⁾.

4.2.1.1 Preparação da amostra ^(3, 59-61)

A maioria das amostras de particulado requer preparação especial para análise por microscopia. Partículas depositadas sobre uma superfície lisa de vidro, do tipo de uma lâmina de microscópio, são o ideal para análise por microscopia ótica.

O cuidado na preparação da amostra destinada à medição de tamanho é uma das recomendações mais importantes. As partículas devem ser representativas da população da qual elas são obtidas e devem estar dispersas uniforme e aleatoriamente sobre a lâmina de microscópio, sem preferência de tamanho ou forma, uma vez que somente algumas regiões, selecionadas de acordo com alguma regra predefinida, serão examinadas. Atenção especial deve ser dada:

- à presença de aglomerados e quebra de partículas individuais;
- ao grau de dispersão do particulado sobre a lâmina;
- ao estabelecimento de um procedimento de preparação de amostras que seja simples, produza erro mínimo e alta reprodutibilidade;
- à escolha de um meio de montagem que produza bom contraste entre as partículas e esse meio, e que não reaja ou dissolva as partículas;
- à limpeza dos materiais de suporte da amostra, como lâminas e lamínulas para microscopia;
- à quantidade de particulado nas amostras, evitando-se campos de visualização muito carregados, já que partículas encostadas ou sobrepostas geram erros de medição. Sugere-se 30 a 50 partículas por campo de visualização.

4.2.1.1.1 Amostras coletadas sobre filtros ⁽⁶²⁻⁶⁷⁾

A deposição de partículas diretamente sobre a superfície de filtros de membrana permite o exame das partículas que estão aproximadamente no mesmo plano focal. O filtro de membrana pode ser montado sobre uma lâmina de microscópio utilizando-se uma substância adesiva ou um solvente que possa torná-lo transparente. O processo de transparentação do filtro é o mais indicado, pois não envolve o movimento das partículas sobre a superfície do filtro e fornece bom contraste entre a partícula e o meio que a rodeia.

O reagente mais adequado para a transparentação do filtro de membrana deve ser estudado de acordo com o tipo de partícula a ser analisada e o tipo de filtro utilizado para coleta das mesmas.

A Figura 4.7 apresenta uma amostra de poeira contendo quartzo coletada sobre filtro de membrana de éster de celulose de 0,8 μm de poro e preparada para visualização por transparentação usando-se o método da acetona/triacetina⁽⁶⁴⁾. O filtro foi colocado sobre uma lâmina de microscópio e exposto ao vapor de acetona por alguns segundos; sobre o filtro transparentado foi colocada uma gota de triacetina e uma laminula de proteção, aguardando-se 24 horas antes da visualização ao microscópio ótico. Nessa imagem podem ser observados aspectos como forma, tamanho, presença de aglomerados de partículas, homogeneidade da amostra com relação à distribuição dos vários tamanhos sobre o filtro.

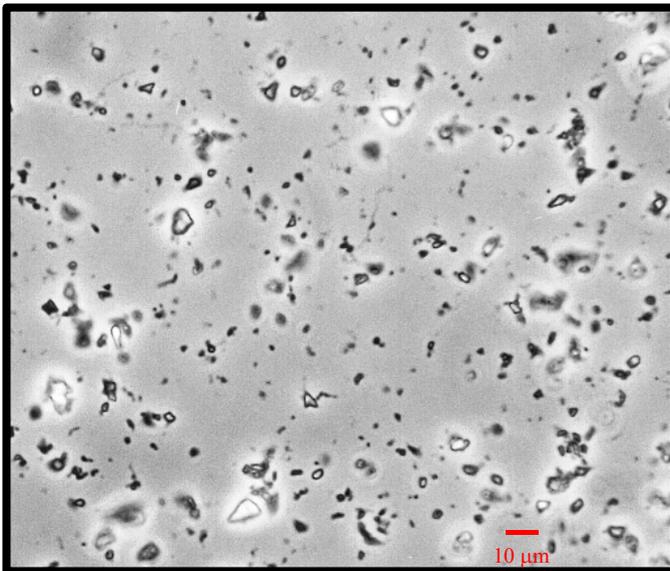


Figura 4.7 Fotomicrografia obtida ao microscópio ótico com aumento de 500X

4.2.2 Medição por microscopia eletrônica de varredura

O microscópio eletrônico é uma ferramenta poderosa para o estudo de poeiras e fumos submicrométricos relacionados com a higiene ocupacional. Ele permite a observação, contagem e medição de tamanho de partículas de até cerca de 0,001 μm , em contraste com o limite de resolução do microscópio ótico. Detalhes da superfície das partículas depositadas sobre um filtro podem ser observados com clareza, profundidade de foco e alta magnificação.

As aplicações gerais da microscopia eletrônica de varredura em pesquisas sobre partículas finas não eliminam a necessidade da microscopia ótica. Elas devem ser consideradas complementares, cada uma com suas próprias vantagens especiais.

A microscopia eletrônica de varredura oferece as seguintes vantagens:

- as amostras são fáceis de preparar e dispensam replicatas;
- examina a superfície da amostra, fornecendo informações sobre tamanho, forma, textura e topografia da superfície;
- pode-se perceber a contaminação da superfície da partícula;
- aglomerados e impurezas podem ser observados diretamente;
- amostras coletadas sobre filtros de membrana podem receber recobrimento metálico diretamente sem outro tipo de preparação;
- a capacidade de variar rapidamente a magnificação de valores baixos a altos possibilita a análise de uma partícula individualmente;
- a composição elementar de partículas individuais pode ser determinada, quando a microscopia eletrônica está acoplada a uma técnica de microanálise.

Por outro lado, as principais desvantagens da microscopia eletrônica são o alto custo do equipamento, o custo e complexidade de operação e manutenção e o alto nível de experiência do operador.

A principal razão para a sua utilização é a alta resolução obtida quando as amostras são examinadas. Uma importante característica da microscopia eletrônica de varredura é a aparência tridimensional da imagem da amostra, que é um resultado direto da grande profundidade de foco, além do efeito de contraste produzido pelo realce de sombras. A profundidade de foco do microscópio eletrônico de varredura (MEV) é de aproximadamente 300 vezes a do microscópio ótico, e devido a essa valiosa característica o MEV é capaz de fornecer muitas informações sobre a textura da superfície de partículas.

O exame das amostras pode ser feito tanto sobre imagens da tela gravadas em arquivo como podem ser processadas ao vivo. A qualidade da análise depende da dispersão das partículas sobre o filtro de coleta e da nitidez da imagem obtida, ou

seja, do contraste e do foco. A partir desse ponto, a medição do tamanho da partícula prossegue da mesma forma que para as análises por microscopia ótica.

4.2.2.1 Preparação da amostra ^(3, 62, 68)

De uma maneira geral, a preparação de amostras, para análise por microscopia eletrônica de varredura, é muito simples. Na maioria dos casos, só é necessário escolher um suporte de tamanho adequado e montá-lo diretamente no porta-amostras do MEV.

Amostras de materiais não condutivos devem ser recobertas com uma fina camada de um material condutor (carbono ou um metal adequado) para evitar o acúmulo de carga negativa originária do feixe de elétrons.

Porém, quando se trata de análise de tamanho de partícula, a técnica de preparação deve ser cuidadosamente estudada e testada, de maneira a não comprometer a análise das imagens produzidas devido a características especiais das partículas.

- A maioria das partículas são não-condutivas. Partículas ambientais são tipicamente compostas de minerais, como silicatos. Partículas não-condutivas que adquirem carga sob o feixe de elétrons podem ser mecanicamente instáveis durante a observação ao MEV e podem ser perdidas devido à repulsão eletrostática.
- Partículas metálicas, quando preparadas de maneira que fiquem expostas à umidade atmosférica, se oxidam rapidamente devido a elevada razão superfície-volume das partículas comparada à de um material compacto.
- As técnicas usadas para a coleta das partículas freqüentemente têm influência na escolha da subsequente técnica de preparação. O embutimento das partículas nos poros do filtro de coleta pode resultar em uma situação onde as partículas estão obscurecidas para observação direta, necessitando de uma remoção parcial do filtro ou separação completa das partículas, o que não é aconselhável devido à possível modificação morfológica das partículas.
- A penetração do feixe de elétrons através da partícula se tornará significativa para partículas com espessura menor que 1 μm e o subsequente espalhamento a partir do suporte de deposição causará redução no contraste da imagem e aumento nas contribuições estranhas à amostra.

Problemas devidos a utilização de filtros são freqüentes nas análises de partículas. Existem diversos tipos de filtros para coleta de amostras ambientais. A preparação adequada depende da natureza do filtro e das partículas.

Os filtros de membrana de policarbonato são particularmente indicados para coleta com posterior análise por microscopia eletrônica de varredura por serem suficientemente planos e sem relevo característico. Isso permite o exame direto das partículas sem sua remoção do filtro. Após a aplicação de uma cobertura condutora o efeito do acúmulo de carga é eliminado tanto do filtro como das partículas.

A Figura 4.8 apresenta uma amostra de poeira contendo quartzo coletada sobre filtro de membrana de policarbonato de 0,2 μm de poro. O filtro contendo a amostra foi fixado pelas bordas, com tinta de carbono, em um substrato de tamanho adequado ao suporte de amostras do microscópio eletrônico de varredura utilizado, e depois metalizado com liga de ouro-paládio. Nessa imagem podem ser observados aspectos como forma, tamanho, presença de aglomerados de partículas, aparência da superfície das partículas, presença de partículas pequenas aderidas à superfície de partículas maiores.

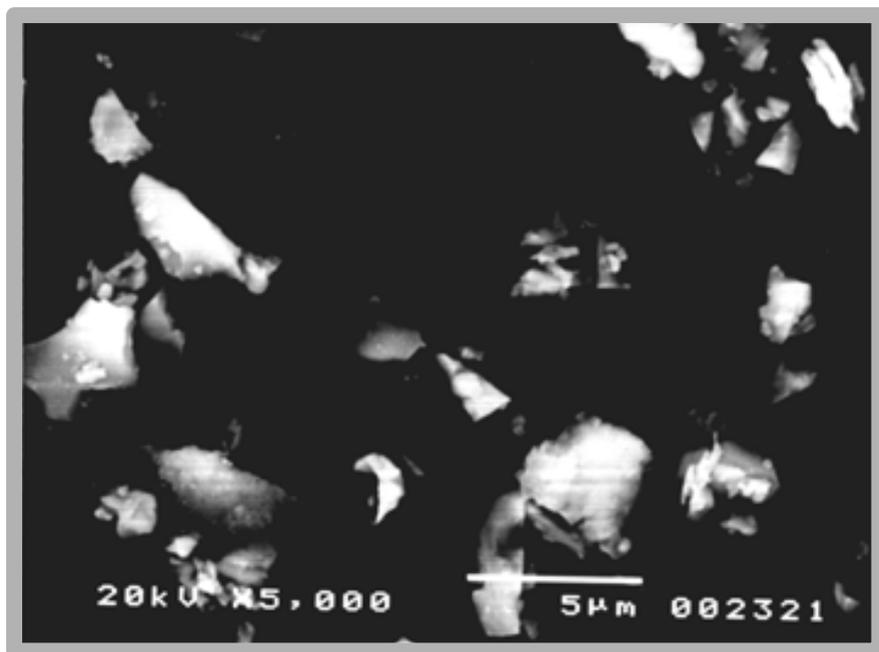


Figura 4.8 Fotomicrografia obtida ao microscópio eletrônico de varredura com aumento de 5000X

4.2.3 Análise de imagem como auxiliar na medição de tamanho de partícula

Os avanços dos últimos anos, na área da informática, têm permitido o desenvolvimento e aperfeiçoamento de diversos equipamentos para análise automática e semi-automática de imagens. Reconhecimento, contagem e medição de tamanho, forma, posição, densidade e outras propriedades similares de objetos presentes em uma imagem são tarefas que podem ser executadas com relativa facilidade e excelente reprodutibilidade pelos microcomputadores. Vários programas especialmente desenvolvidos para medição de tamanho de partícula estão disponíveis no mercado, fornecendo excelentes resultados.

Os programas para análise de imagem usados para a medição de partículas foram desenvolvidos principalmente para preservar a natureza relativamente absoluta dos métodos baseados na microscopia, enquanto reduzem a subjetividade e fadiga do operador associadas com medições manuais.

Deve-se lembrar, porém, que os sistemas para análise de imagem não são capazes de discriminar defeitos causados por deficiências na preparação da amostra ou ajustes inadequados do microscópio da mesma maneira que o olho humano do operador e também não fazem ajustes de foco durante as medições em um campo de visualização.

Sistemas totalmente automáticos requerem que as partículas estejam homogeneamente dispersas e claramente separadas umas das outras, pois o programa analisador de imagem confunde partículas encostadas ou sobrepostas e as conta e mede como se fossem uma única partícula.

Nos programas semi-automáticos, ou interativos, o operador pode selecionar ou rejeitar partículas, separar agregados e decidir sobre a escolha de campos de visualização. Muitas possibilidades estão disponíveis no mercado e estas diferem bastante em termos de sofisticação, preço, recursos, modo e velocidade de operação.

A análise de imagem oferece outras vantagens sobre a medição manual de partículas ^(65, 73-76):

- vários tipos de medições podem ser feitas em cada partícula simultaneamente;
- o procedimento de medição é padronizado;
- pode-se retornar a um campo visualizado para verificação;
- diversos métodos de cálculo de tamanho de partícula podem ser aplicados simultaneamente;
- programas adequados permitem a discriminação de partículas de diferentes morfologias;
- os resultados de análise podem ser apresentados no formato final necessário para interpretação dos dados, por exemplo, como histogramas cumulativos de número de partículas por faixa de tamanho.

O processo de análise e medição da imagem é composto de seis etapas principais:

- (1) aquisição da imagem;
- (2) digitalização da imagem;
- (3) processamento da imagem;
- (4) edição da imagem;
- (5) análise da imagem;
- (6) tratamento e apresentação de dados.

A formação da imagem é uma etapa crucial em análise de imagem. O analisador de imagem pode receber as imagens através de uma câmera de televisão de alta resolução, em interface com um microscópio ótico, ou aceitar imagens digitalizadas vindas de um microscópio eletrônico.

Uma imagem pode ser digitalizada a partir de sinais obtidos em tempo real (ao vivo), de uma cópia da imagem original gravada para tratamento posterior ou de uma cópia fotográfica da imagem (fotomicrografia). Uma vez digitalizadas, as imagens podem ser armazenadas para análise e processamento futuro ou para objetivo de arquivo.

As várias regras de processamento de imagem são aplicadas para produzir uma imagem modificada ou processada que realça algum aspecto da imagem original em relação a outros. Isto funciona como um filtro que seleciona certos tipos de dados da imagem. Dependendo do que é considerado de maior interesse é possível construir uma operação de processamento adequada para destacar tal característica da informação de fundo da imagem, de maneira que a mesma possa ser medida com melhor definição.

Após o processamento, muitas vezes é necessário que a imagem seja editada. Nesse momento objetos podem ser selecionados para exame ou eliminados, partículas que se tocam podem ser separadas, objetos em particular, bordas, contornos ou alguma outra estrutura definida podem ser corrigidos. Alguns exemplos de edição de imagem são mostrados na figura 4.9.

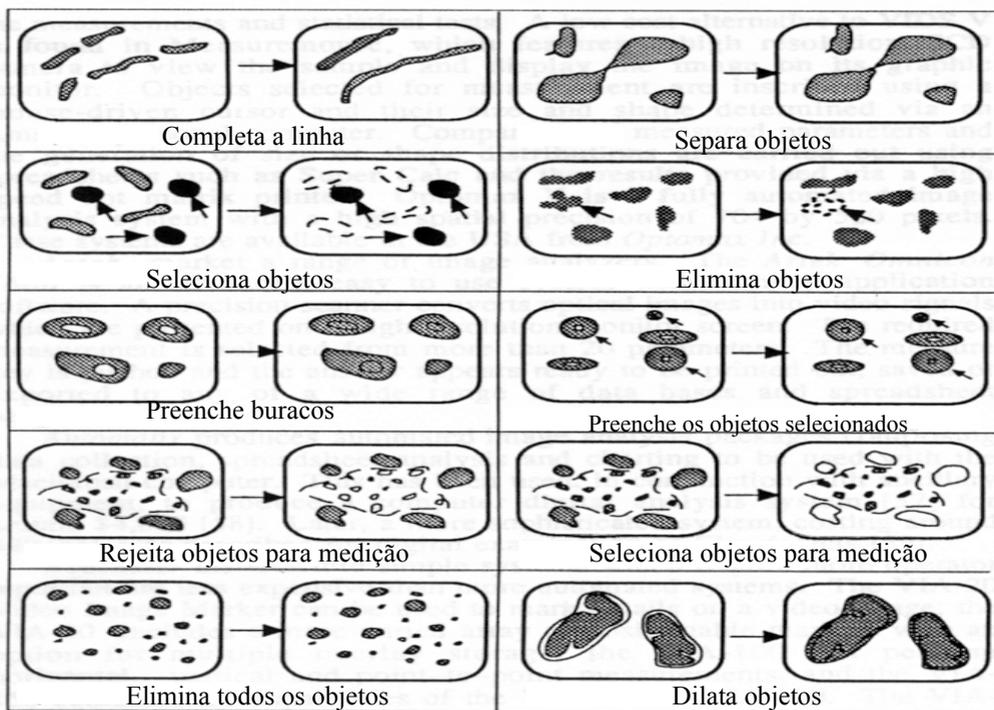


Figura 4.9 Exemplos de recursos de edição de imagem ⁽⁷⁰⁾

A análise da imagem envolve operações que quantificam algum aspecto da imagem. A análise pode ser executada sob dois pontos de vista diferentes: medições gerais, que se aplicam ao campo de visualização inteiro, como por exemplo a contagem do número de partículas, e aquelas que se aplicam individualmente para cada partícula dentro da imagem, como por exemplo medições de tamanho, forma, posição e brilho. Alguns exemplos de medidas quantitativas são mostrados na Figura 4.10.

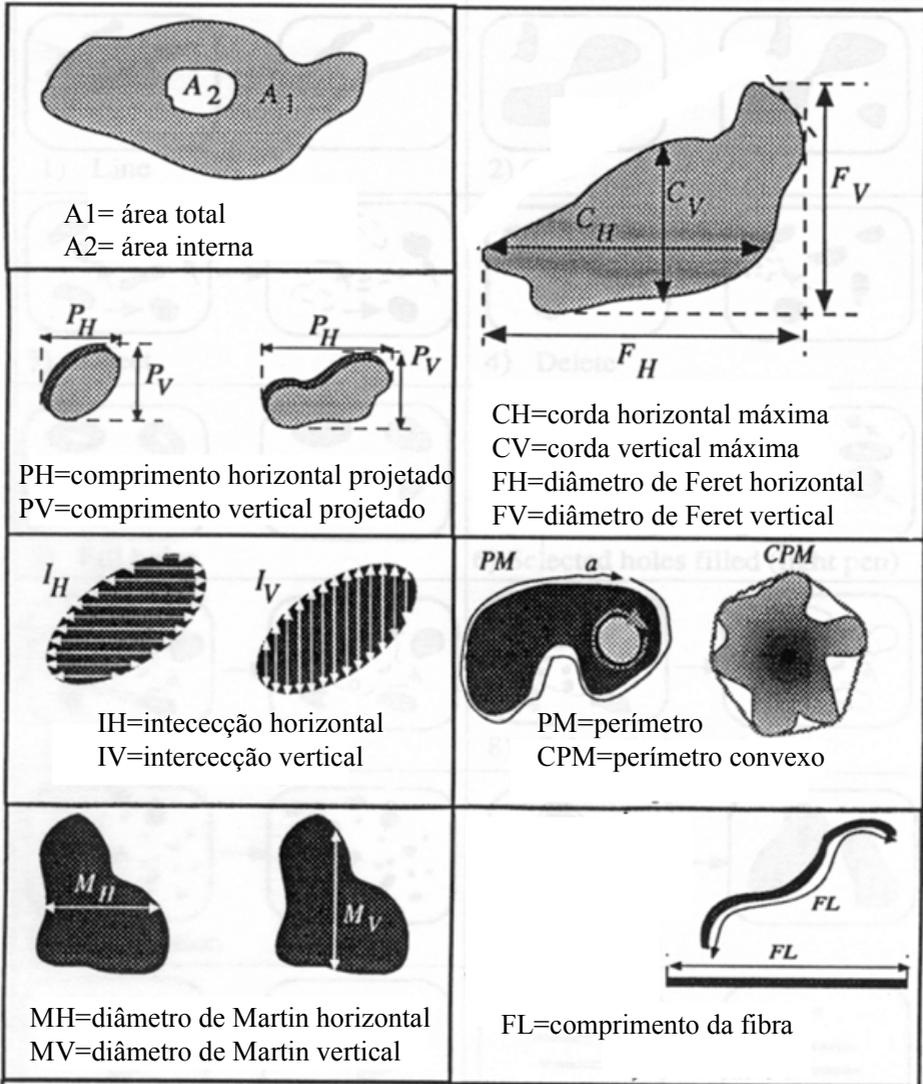


Figura 4.10 Exemplos de medições quantitativas de partículas⁽⁷⁰⁾

A calibração linear do analisador de imagens é realizada utilizando-se uma escala micrométrica padrão, no caso de imagens obtidas por microscopia ótica, ou através da escala do microscópio eletrônico.

Para a obtenção das imagens cada filtro contendo as partículas é percorrido em uma direção pré determinada (horizontal ou vertical), conforme mostrado na Figura 4.11, com campos de visualização selecionados aleatoriamente. As mudanças de campos de visualização podem ser realizadas manualmente ou programadas pelo equipamento em uso (microscópio ótico ou eletrônico), caso este recurso esteja disponível. Dependendo o tipo de programa utilizado (automático, semi-automático ou manual), esses campos podem ou não ser recusados quando conveniente.

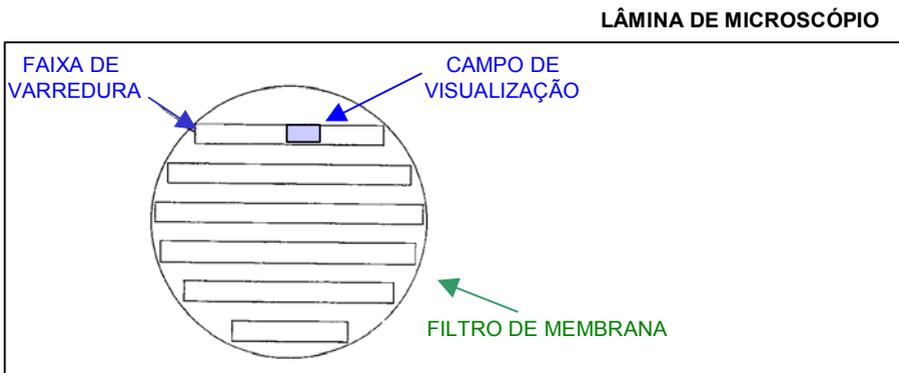


Figura 4.11 Esquema de varredura do filtro para seleção dos campos de visualização destinados à medição do tamanho das partículas por microscopia ótica

Os programas de medição geralmente são ajustados para aceitar todas as partículas presentes dentro do quadro de medição que não tocam suas linhas limites. A medição das partículas que tocam essas linhas limites deve obedecer a regras pré-definidas. Por exemplo, partículas que tocam as linhas limites podem ser todas rejeitadas para medição, ou são rejeitadas apenas as partículas que tocam as linhas limites direita e inferior do quadro que demarca o campo de visualização, conforme mostra a Figura 4.12. Nessa figura as formas hachuradas representam as partículas aceitas e as formas não hachuradas representam as partículas rejeitadas para medição.

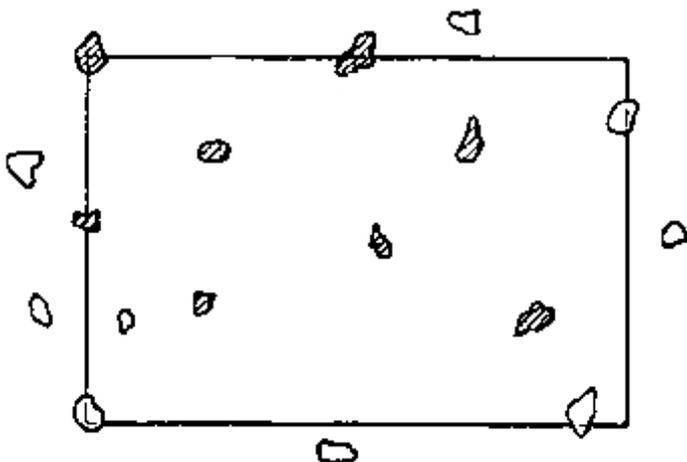


Figura 4.12 Esquema do quadro de medição do analisador de imagem.

Programas de medição automáticos não permitem a interferência do operador nos casos de partículas agrupadas. Os ajustes de foco são feitos antes da aquisição da imagem e as medições são feitas sob o melhor ajuste de foco geral da imagem inicial. Já os programas semi-automáticos ou interativos permitem que o operador corrija defeitos de contagem e medição.

Quando as medições são realizadas sobre um grande número de objetos de um mesmo tipo, normalmente é necessário algum tipo de tratamento estatístico dos dados, como o cálculo da média, desvio padrão, estabelecimento de relações entre diferentes parâmetros e a determinação da distribuição do número de objetos em função de um parâmetro, como por exemplo o tamanho. Os resultados do tratamento estatístico podem ser apresentados na forma de tabelas e gráficos.

4.2.3.1 Preparação da amostra ^(65 - 67, 73-76)

Para compensar todas as vantagens oferecidas, a análise de imagem exige cuidados especiais para o processo de medição em relação à medição de tamanho de partícula feita pelo método manual.

A imagem apresentada para análise, deve ser cuidadosamente preparada para reduzir ao mínimo os erros nas medições. Boas técnicas de preparação de amostras são muito mais importantes para esse tipo de trabalho, e maior cuidado deve ser tomado no ajuste dos instrumentos envolvidos na aquisição da imagem, como microscópio, câmara de TV e máquina fotográfica.

Todas as vantagens do analisador de imagem não são capazes de compensar as deficiências causadas por técnicas de preparação ruins, ajustes inadequados e microscópios de recursos pobres. Por isso, a qualidade da apresentação da imagem para o sistema deve ser melhor do que aquilo que seria aceitável para a microscopia convencional.

4.3 Análise de tamanho de partícula por difração de luz a laser ⁽⁷⁷⁻⁷⁹⁾

Para a medição do tamanho de partícula pela técnica de difração de luz a laser o diâmetro é determinado a partir do volume da partícula. Todas as partículas presentes na amostra são submetidas à medição, já que toda a amostra passa pelo feixe de laser. Como a quantidade de material necessário para a análise é pequena em comparação ao todo pesquisado, cuidados especiais devem ser tomados na amostragem.

Apesar de existir uma lacuna na aplicação da teoria dos analisadores de partículas a laser, já que suas medições são baseadas no conceito de partícula esférica, e a medição de partículas de forma irregular ainda não pode ser rigorosa, isso não reduz o interesse por esses instrumentos para os casos em que a velocidade, reprodutibilidade e manuseio simples são mais interessantes que a exatidão da medição.

Partículas suspensas, geralmente em um meio líquido, são medidas por recirculação da amostra em frente ao feixe de laser. As partículas passam através do feixe de laser e a difração é obtida para todas as partículas. Portanto, todas as partículas presentes na amostra são submetidas ao processo de medição.

Os métodos óticos baseados na difração da luz por partículas suspensas em um fluido têm sido muito usados para a análise de tamanho de partícula. A variável utilizada para a medição do tamanho de uma partícula individual, do tamanho médio ou da distribuição de tamanhos é o espalhamento da luz dentro de um certo ângulo do espaço, baseada no fato de que o ângulo de difração é inversamente proporcional ao tamanho da partícula. Portanto, partículas grandes espalham a luz a ângulos menores que as partículas pequenas.

A eletrônica moderna e a tecnologia dos computadores tornou possível analisar as distribuições de tamanho de partícula mais rápida e reprodutivelmente que os métodos tradicionais utilizados para essa finalidade.

4.3.1 Preparação da amostra ^(78, 79)

A análise de tamanho de partícula a laser exige que a amostra seja preparada de maneira a se obter um estado de dispersão adequado. As partículas devem estar separadas umas das outras, em um meio líquido que envolva completamente cada uma delas, de modo a não haver contato prolongado entre elas.

A dispersão adequada pode ser conseguida com o auxílio de agitação mecânica e/ou ultrassom, além da adição de um dispersante. A seleção do dispersante deve considerar a não solubilidade das partículas, compatibilidade química, viscosidade, densidades relativas, preço e métodos de descarte.

MODELO DE APLICAÇÃO AMOSTRAS COLETADAS EM AMBIENTE DE TREABALHO

Como exemplo de aplicação para as considerações apresentadas anteriormente foram coletadas amostras em um ambiente de trabalho no qual também se estava avaliando a exposição ocupacional à sílica livre cristalizada da maneira tradicional para esta finalidade. As amostras foram coletadas de maneira a possibilitarem um mapeamento completo do ambiente avaliado em termos da distribuição dos tamanhos de partícula presentes nos principais postos de trabalho.

5.1 Descrição do Local de Trabalho ⁽⁸⁰⁾

O local avaliado foi um laboratório onde se efetuava a classificação de areia de rio, por peneiramento, para utilização na construção civil. A areia era classificada segundo a norma brasileira NBR-7214 com as seguintes granulometrias: 0,15; 0,3; 0,6 e 1,2 mm. Para a separação granulométrica eram utilizadas cinco peneiras vibratórias: peneira mestra, peneira #16, peneira #30, peneira #50 e peneira #100. As atividades eram executadas por equipe formada por um encarregado e 7 ajudantes.

O laboratório estava instalado em um galpão de aproximadamente 15m de largura por 20m de comprimento, com pé direito de 4,5m de altura. O local possuía uma única porta frontal de 10m de largura por 3,5m de altura. As paredes eram construídas de tijolo aparente pintadas de branco. No alto das paredes existiam

pequenas janelas de vidro para entrada de ar e luz. O piso era de cimento e a cobertura era de telha de fibrocimento sem forro.

O local não possuía sistema de ventilação local exaustora ou qualquer outro tipo de medida para controle da geração e dispersão da poeira. A dispersão da poeira era agravada pela utilização de ventiladores axiais posicionados junto às peneiras. Os trabalhadores utilizavam máscaras descartáveis e uniformes fornecidos pela empresa.

5.2 O Processo de Trabalho⁽⁸⁰⁾

O processo de classificação de areia consistia das seguintes etapas:

- descarregamento da areia, por um caminhão basculante, tratamento com soda cáustica para remoção de impurezas e lavagem em betoneira;
- secagem da areia a 110°C em forno elétrico rotativo;
- transferência da areia para um depósito de resfriamento;
- alimentação da peneira mestra (separação da areia em 6 frações, sendo que a fração mais grossa e a fração mais fina eram descartadas);
- alimentação das peneiras #16, #30, #50 e #100 para classificação final;
- ensacamento manual da areia classificada;
- transporte manual dos sacos de 25 kg de areia para o local de armazenagem.



Figura 5.1 Vista geral da descarga das peneiras classificadoras

A descarga das frações classificadas era contínua e aberta, com descarregamento da areia por gravidade sobre caixas de madeira correspondentes a cada uma das frações ou sobre latas de 18 litros improvisadas. O ensacamento era feito manualmente com o auxílio de um funil e uma caneca.



Figura 5.2 Ensacamento da areia classificada

5.3 Coleta das Amostras

A coleta da poeira suspensa no ar do ambiente de trabalho foi realizada utilizando coletores “IOM Inhalable Dust Sampler” (Figura 5.3), contendo filtros de membrana de éster de celulose de 0,8 μm de poro, acoplados a bombas de amostragem portáteis com vazão ajustada para 2 λ/min .

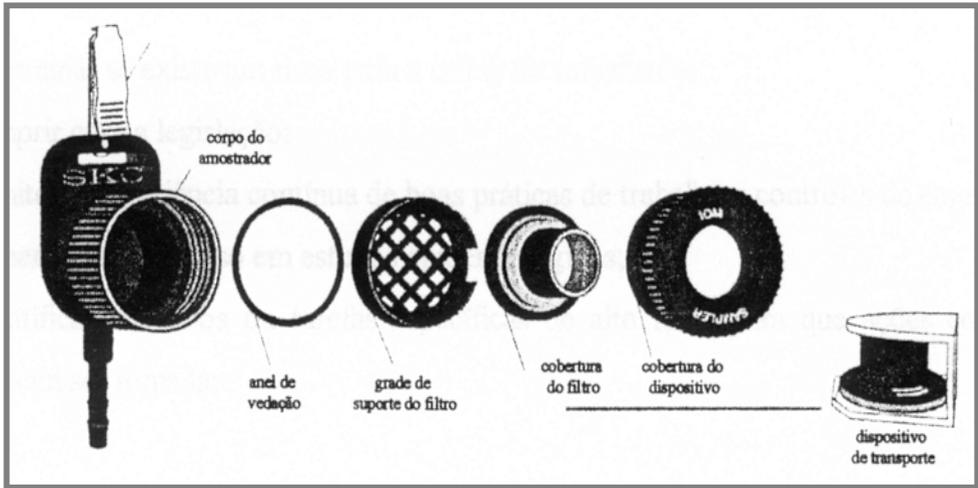


Figura 5.3 Amostrador de poeira inalável, tipo IOM, marca SKC

Foi realizada amostragem ambiental estática com os dispositivos de amostragem fixados junto às peneiras, forno e pontos de ensacamento. Esses pontos foram selecionados por serem identificados como fontes geradoras de poeira localizados em áreas de trabalho e circulação dos trabalhadores. Os dispositivos foram distribuídos de maneira a possibilitarem a avaliação de todo o ambiente de trabalho.

O tempo de coleta para cada amostra variou entre 5 e 50 minutos, dependendo do tempo de duração e da quantidade de poeira gerada em cada uma das operações. As amostras foram coletadas ao longo da jornada de trabalho, acompanhando o processo produtivo durante 4 dias consecutivos, em momentos de intensa geração de poeira e em momentos com geração mais branda de poeira.

5.4 Análise das Amostras

As amostras coletadas foram preparadas para análise por microscopia ótica com transparência dos filtros de membrana de éster de celulose sobre uma lâmina de microscópio usando o método da acetona/triacetina⁽⁶⁴⁾.

As amostras preparadas foram examinadas ao microscópio para seleção inicial. Amostras muito carregadas (com excesso de particulado, partículas aglomeradas e sobrepostas) foram descartadas.

As análises foram realizadas com o Microscópio Ótico, marca Leica, modelo DMRXP, acoplado ao Sistema de Análise de Imagem Quantimet-600 (Q-600), instalados no Laboratório de Caracterização Tecnológica - Departamento de Engenharia de Minas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. As imagens foram obtidas usando sistema de polarização em luz transmitida e Nicóis cruzados, com aumento de 500X. A calibração linear do analisador de imagens foi realizada utilizando-se uma escala micrométrica padrão, obtendo-se a referência de 1 pixel = 0,31 μm . As medições de tamanho de partícula foram realizadas com imagens “ao vivo”. O diâmetro selecionado para medição foi o *Diâmetro de Feret Horizontal*. Foram analisadas 20 amostras, medindo-se em média 2000 partículas por amostra, conforme dados da Tabela V.1.

Tabela V.1 Número de partículas medidas por amostra analisada

PONTO DE AMOSTRAGEM	AMOSTRA	Nº PARTICULAS MEDIDAS
Peneira #16	P-16/1	2028
	P-16/2	2024
	P-16/3	1146
Peneira #30	P-30/1	2029
	P-30/2	2029
	P-30/3	1339
Peneira #50	P-50/1	3017
	P-50/2	3019
	P-50/3	2008
Peneira #100	P-100/1	2016
	P-100/2	3025
Peneira Mestra	P-M/1	1793
	P-M/2	2994
	P-M/3	2026
Forno	F-1	1835
	F-2	2007
	F-3	1999
Ensacamento	E-1	2039
	E-2	2010
	E-3	2025

5.5 Dados de Medição

Os dados de medição de tamanho de partícula das amostras coletadas no ambiente de trabalho foram inicialmente classificados em intervalos de classe de igual comprimento linear de diâmetros, para verificação do tipo de distribuição de frequência. Todas as amostras com os dados assim classificados mostraram aderência à distribuição lognormal, demonstrando a possibilidade de tratamento conforme descrito no item 4.1.2 deste livro. Um exemplo desse tratamento é mostrado através da amostra P-100A, coletada junto à Peneira #100. Os dados de medição são apresentados na Tabela V.2 e Figura 5.4.

Tabela V.2 Dados de medição de tamanho de partícula da amostra P-100A, coletada junto à Peneira #100, obtidos por microscopia ótica associada a sistema de análise de imagem e classificados em intervalos de classe de igual comprimento linear

Intervalo de Classe (μm)	No. de Partículas Observado	Frequência em número (%)
<0,50	152	7,54%
0,5 - 1,5	840	41,67%
1,5 - 2,5	494	24,50%
2,5 - 3,5	218	10,81%
3,5 - 4,5	114	5,65%
4,5 - 5,5	57	2,83%
5,5 - 6,5	41	2,03%
6,5 - 7,5	31	1,54%
7,5 - 8,5	16	0,79%
8,5 - 9,5	13	0,64%
9,5 - 10,5	6	0,30%
10,5 - 11,5	7	0,35%
11,5 - 12,5	6	0,30%
12,5 - 13,5	4	0,20%
13,5 - 14,5	2	0,10%
14,5 - 15,5	3	0,15%
15,5 - 16,5	2	0,10%
16,5 - 17,5	5	0,25%
17,5 - 18,5	1	0,05%
18,5 - 19,5	1	0,05%
19,5 - 20,5	1	0,05%
> 20,5	2	0,10%
TOTAL	2016	100,00%

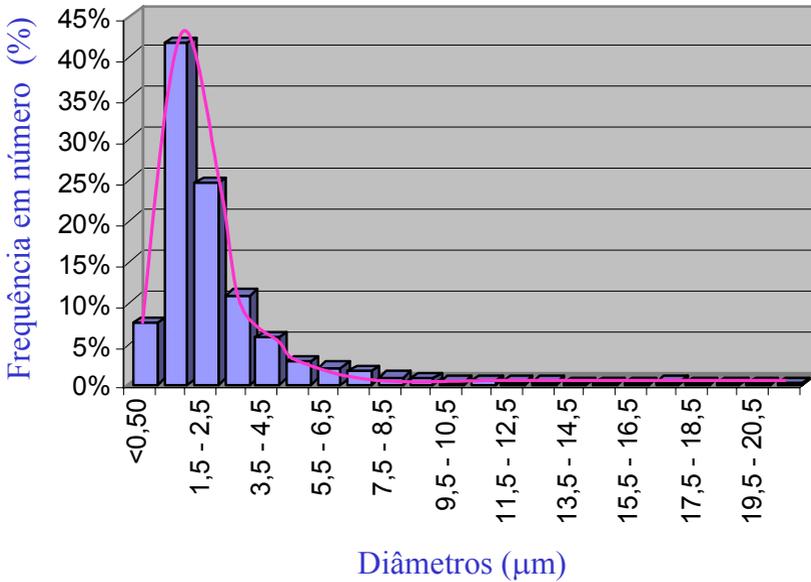


Figura 5.4 Curva de distribuição de frequência dos dados de medição de tamanho de partícula da amostra P-100A, coletada junto à Peneira #100, construída a partir dos dados da tabela V.2

Para a análise do comportamento dos dados medidos e obtenção dos parâmetros da distribuição foi feita uma nova classificação dos dados em intervalos de classe de igual comprimento logarítmico de diâmetros, como mostra a Tabela V.3.

Conforme o exposto no item 4.1.2, se uma distribuição de partículas lognormal é classificada de acordo com intervalos de classe de igual comprimento logarítmico de diâmetros, uma curva normal é obtida quando os pontos médios de cada intervalo de classe são conectados.

Tabela V.3 Dados de medição de tamanho de partícula da amostra P-100A, coletada junto à Peneira #100, obtidos por microscopia ótica associada a sistema de análise de imagem e classificados em intervalos de classe de igual comprimento logarítmico de diâmetros

Intervalo de Classe (μm)	Diâm. médio no intervalo (μm)	No. de Partículas Observado	Frequência em número (%)	Frequência acumulada (%)
0,49	0,49	152	7,54%	7,54%
0,5 - 0,7	0,60	170	8,43%	15,97%
0,7 - 1,0	0,90	279	13,84%	29,81%
1,0 - 1,4	1,20	329	16,32%	46,13%
1,4 - 2,0	1,70	346	17,16%	63,29%
2,0 - 2,8	2,40	293	14,53%	77,83%
2,8 - 4,0	3,40	201	9,97%	87,80%
4,0 - 5,6	4,80	111	5,51%	93,30%
5,6 - 8,0	6,80	71	3,52%	96,83%
8,0 - 11,3	9,65	37	1,84%	98,66%
11,3 - 16,0	13,65	16	0,79%	99,45%
16,0 - 22,6	19,30	9	0,45%	99,90%
22,6 - 32,0	27,30	1	0,05%	99,95%
32,0 - 45,2	38,60	1	0,05%	100,00%
TOTAL	-	2016	100,00%	-

A curva normal obtida a partir dos dados apresentados na Tabela V.3 é mostrada na Figura 5.5.

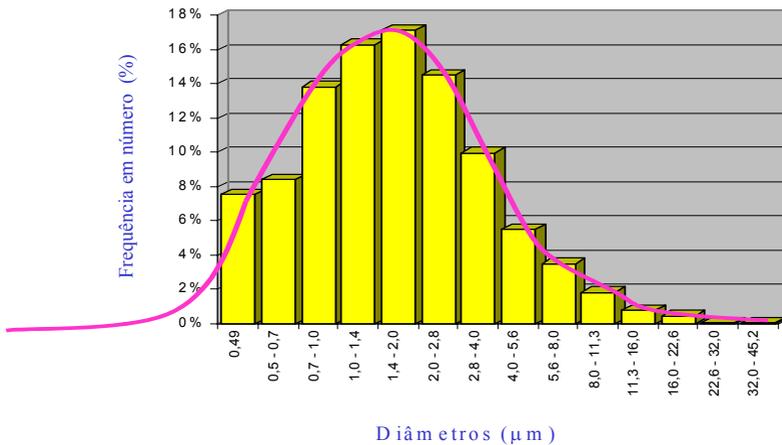


Figura 5.5 Curva de distribuição de frequência dos dados de medição de tamanho de partícula da amostra P-100A coletada junto à Peneira #100, construída a partir dos dados da tabela V.3

Os valores de média geométrica e desvio-padrão geométrico dos diâmetros da distribuição foram obtidos diretamente do gráfico de distribuição da frequência acumulada construído em escala de log-probabilidade para cada uma das amostras, conforme a equação 02 e exemplificado através da Figura 5.6.

$$s_g = \frac{84,1\% \text{ dos tamanhos}}{50\% \text{ dos tamanhos}}$$

(equação 02)

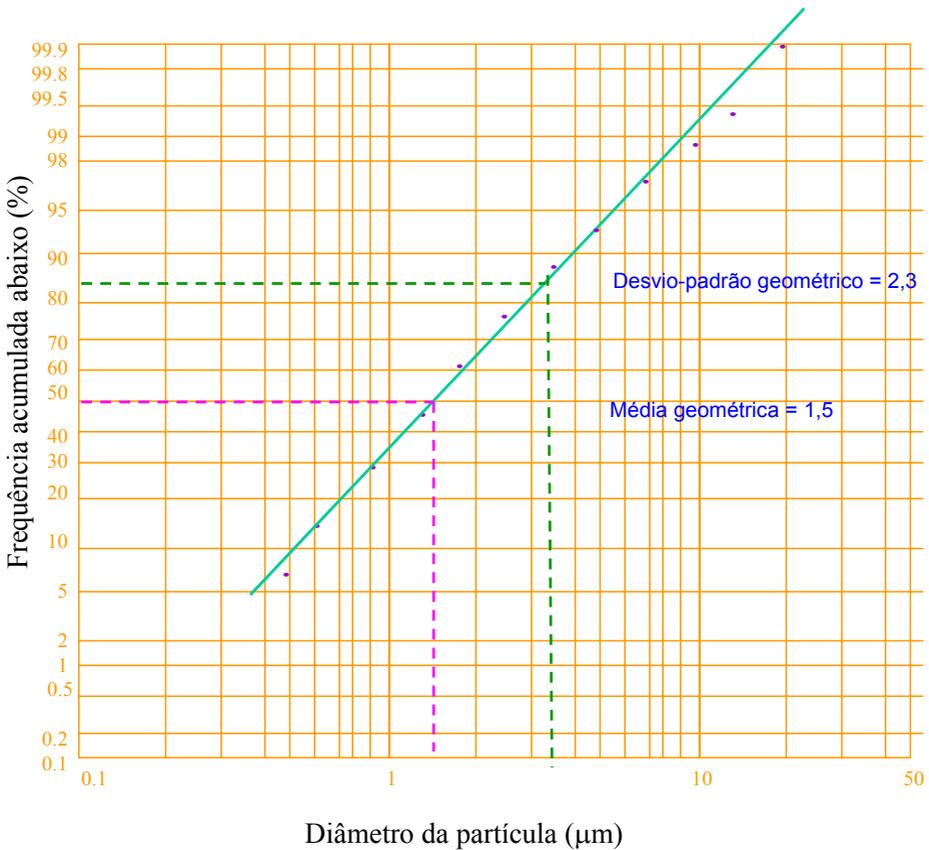


Figura 5.6 Curva de distribuição de frequência acumulada dos dados de medição de tamanho de partícula da amostra P-100A coletada junto à Peneira #100, construída a partir dos dados da tabela V.3, em escala de log-probabilidade.

As 20 amostras coletadas junto aos principais postos de trabalho do local avaliado foram tratadas da mesma maneira exemplificada através da amostra P-100A. Os valores da média geométrica e do desvio padrão geométrico dos diâmetros da distribuição, apresentados na tabela V.4, foram obtidos à partir dos gráficos de distribuição de frequência acumulada, construídos em escala de log-probabilidade, de maneira semelhante à utilizada na Figuras 5.6.

Tabela V.4: Parâmetros característicos das distribuições de tamanho de partícula para as amostras coletadas no local avaliado, obtidos à partir do gráfico de distribuição da frequência acumulada construído em escala de log-probabilidade.

Ponto de Amostragem	Amostra	Média Geométrica	Desvio padrão geométrico
PENEIRA 16	P-16 / A	2,2	2,5
	P-16 / B	2,0	2,3
	P-16 / C	1,8	2,5
PENEIRA 30	P-30 / A	2,1	2,7
	P-30 / B	2,4	2,6
	P-30 / C	2,5	2,7
PENEIRA 50	P-50 / A	2,0	2,5
	P-50 / B	2,1	2,7
	P-50 / C	2,6	2,7
PENEIRA 100	P-100 / A	1,5	2,3
	P-100 / B	2,0	2,5
PENEIRA MESTRA	P-M / A	2,1	2,7
	P-M / B	2,0	2,7
	P-M / C	1,9	2,8
FORNO	F / A	2,5	2,0
	F / B	2,3	2,7
ENSACAMENTO	E / A	1,9	2,4
	E / B	2,0	2,5

A observação da Tabela V.4 mostra que as partículas se distribuíam homogeneamente no ambiente de trabalho avaliado. De maneira geral, as amostras apresentam média geométrica e desvio padrão geométrico muito próximos. Esses parâmetros indicam que as partículas presentes nos principais postos de trabalho desse ambiente provavelmente obedecem à mesma distribuição lognormal.

Supondo que todas as partículas analisadas pertenciam a uma mesma distribuição lognormal, o número total de partículas observado em cada classe de tamanho foi somado e reunido na Tabela V.5 para representar a distribuição global de tamanhos de partícula no ambiente avaliado.

Tabela V.5 Dados globais de medição de tamanho de partícula no laboratório de classificação de areia, obtidos por microscopia ótica e sistema de análise de imagem Q-600

Intervalo de Classe (μm)	Diâm.médio da classe (μm)	Número de Partículas por classe	Frequência por classe (%)	Frequência acumulada (%)
0,49	0,49	2732	6,4	6,4
0,5 - 0,7	0,60	2757	6,5	12,9
0,7 - 1,0	0,90	4789	11,3	24,2
1,0 - 1,4	1,20	5752	13,5	37,7
1,4 - 2,0	1,70	6170	14,5	52,3
2,0 - 2,8	2,40	5916	13,9	66,2
2,8 - 4,0	3,40	5043	11,9	78,1
4,0 - 5,6	4,80	3614	8,5	86,6
5,6 - 8,0	6,80	2571	6,1	92,6
8,0 - 11,3	9,65	1530	3,6	96,3
11,3 - 16,0	13,65	908	2,1	98,4
16,0 - 22,6	19,30	452	1,1	99,5
22,6 - 32,0	27,30	175	0,4	99,9
32,0 - 45,2	38,60	52	0,1	100,0
45,2 - 64,0	54,60	5	0,0	100,0
TOTAL	-	42466	100,0	-

Observa-se através da Figura 5.7 que, devido ao elevado número de medições, considerados como dados globais, a curva obtida apresentou um traçado muito próximo ao da distribuição normal, para dados classificados em intervalos de classe de igual comprimento logarítmico de diâmetros. Esse fato demonstra a aderência à distribuição lognormal das partículas presentes no ar do laboratório de classificação de areia.

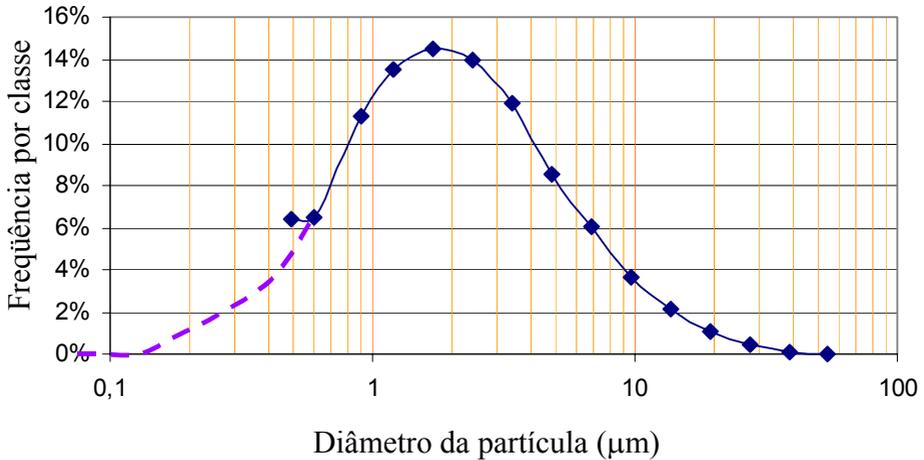


Figura 5.7 Curva de distribuição de frequência dos dados globais de medição de tamanho de partícula do laboratório de classificação de areia, obtidos por microscopia ótica acoplada a sistema de análise de imagem Q-600

Para facilitar a aplicação dos dados de medição para a avaliação da exposição dos trabalhadores, os dados de frequência em número foram transformados em frequência em massa através da equação 05, conforme comentado no item 4.1.3.

$$m = \frac{\pi d^3}{6} \cdot \rho \cdot n$$

(equação 05)

Sabendo-se que a areia utilizada no ambiente de trabalho avaliado possuía cerca de 99% em quartzo, a densidade adotada para as conversões foi de 2,65 g/cm³. A tabela V.6 mostra os dados convertidos.

Tabela V.6 Dados de percentagem em massa por intervalo de classe para os dados globais de medição de tamanho de partícula no laboratório de classificação de areia

Intervalo de Classe (μm)	Diâm.médio da classe (μm)	Número de Partículas por classe	Massa por classe (mg)	Massa por classe %	Massa acumulada %
0,49	0,49	2732	4,46E-07	0,002	0,002
0,5 - 0,7	0,6	2757	8,26E-07	0,004	0,006
0,7 - 1,0	0,9	4789	4,84E-06	0,022	0,028
1,0 - 1,4	1,2	5752	1,38E-05	0,063	0,091
1,4 - 2,0	1,7	6170	4,21E-05	0,191	0,282
2,0 - 2,8	2,4	5916	1,13E-04	0,517	0,799
2,8 - 4,0	3,4	5043	2,75E-04	1,252	2,051
4,0 - 5,6	4,8	3614	5,55E-04	2,525	4,575
5,6 - 8,0	6,8	2571	1,12E-03	5,106	9,682
8,0 - 11,3	9,65	1530	1,91E-03	8,685	18,366
11,3 - 16,0	13,65	908	3,20E-03	14,587	32,953
16,0 - 22,6	19,3	452	4,51E-03	20,525	53,478
22,6 - 32,0	27,3	175	4,94E-03	22,491	75,969
32,0 - 45,2	38,6	52	4,15E-03	18,890	94,859
45,2 - 64,0	54,6	5	1,13E-03	5,141	100,000
TOTAL	-	42466	2,20E-02	100,000	-

A leitura direta no gráfico de percentagem acumulada em massa, construído com os dados da tabela V.6 e apresentado na Figura 5.8 mostra que as partículas presentes no ambiente estudado como modelo possuíam diâmetro médio mássico de 18 μm . Isto é, o diâmetro correspondente a 50 % em massa dos valores medidos é de 18 μm .

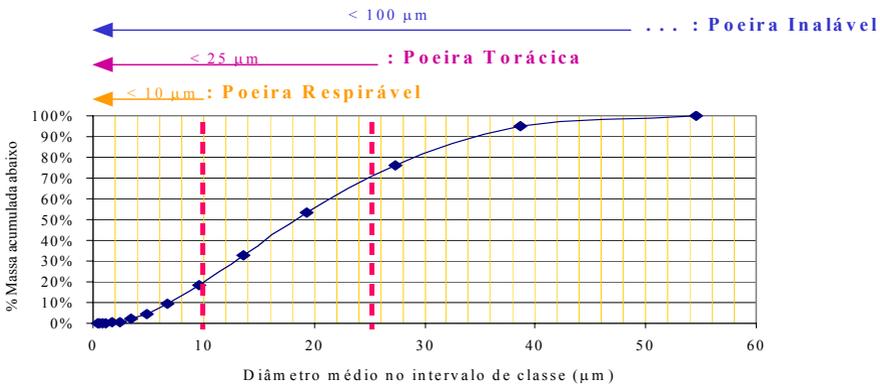


Figura 5.8 Gráfico de percentagem acumulada em massa para os dados globais de medição de tamanho de partícula no laboratório de classificação de areia

5.6 Confirmação do resultado obtido

Sabendo que a técnica de microscopia ótica pode apresentar deficiências para medição de tamanho de partícula presentes no início da faixa de interesse para a avaliação de aerodispersóides, ou seja, para partículas menores que 0,8 μm foi realizada a análise de uma amostra-teste utilizando analisador de partículas a laser.

A amostra-teste foi coletada de uma superfície plana localizada próxima à área das peneiras classificadoras, mas em local elevado e livre de deslocamento causado pela circulação dos trabalhadores. O local foi selecionado de modo a permitir que a poeira suspensa no ar pudesse se depositar e ser recolhida para análise. Os resultados dessa análise são mostrados na Tabela V.7.

Tabela V.7 Dados de medição de tamanho de partícula para a amostra-teste coletada próximo às peneiras classificadoras, obtidos com o Analisador de Partículas à Laser, marca Sympatec

Intervalo de Classe (μm)	Diâm.médio da classe (μm)	Frequência Por classe (%)	Frequência acumulada abaixo (%)
< 0,18	0,14	0,04	0,04
0,18 - 0,22	0,20	0,01	0,05
0,22 - 0,26	0,24	0,01	0,06
0,26 - 0,30	0,28	0,01	0,06
0,30 - 0,36	0,33	0,02	0,08
0,36 - 0,44	0,40	0,04	0,11
0,44 - 0,52	0,48	0,06	0,17
0,52 - 0,62	0,57	0,11	0,29
0,62 - 0,74	0,68	0,20	0,49
0,74 - 0,86	0,80	0,26	0,75
0,86 - 1,00	0,93	0,37	1,12
1,00 - 1,20	1,10	0,57	1,69
1,20 - 1,50	1,35	0,84	2,53
1,50 - 1,80	1,65	0,70	3,23
1,80 - 2,10	1,95	0,51	3,73
2,10 - 2,50	2,30	0,46	4,20
2,50 - 3,00	2,75	0,45	4,65
3,00 - 3,60	3,30	0,56	5,21
3,60 - 4,20	3,90	0,58	5,79
4,20 - 5,00	4,60	0,73	6,52
5,00 - 6,00	5,50	0,87	7,39
6,00 - 7,20	6,60	1,16	8,55
7,20 - 8,60	7,90	1,76	10,31
8,60 - 10,20	9,40	2,75	13,05
10,20 - 12,20	11,20	4,63	17,69
12,20 - 14,60	13,40	7,25	24,94
14,60 - 17,40	16,00	10,57	35,50
17,40 - 20,60	19,00	14,22	49,72
20,60 - 24,60	22,60	18,95	68,67
24,60 - 29,40	27,00	19,74	88,40
29,40 - 35,00	32,20	11,60	100,00

Como os dados de massa e volume são proporcionais com relação à densidade, as porcentagens de massa acumulada são as mesmas porcentagens de frequência acumulada em volume mostradas na Tabela V.7 e o diâmetro médio mássico de $19\ \mu\text{m}$ pode ser lido diretamente no gráfico de porcentagem acumulada em massa, mostrado na Figura 5.9. O resultado obtido pelo analisador de partículas a laser confirmou os resultados obtidos por microscopia ótica. Portanto esses dados puderam ser aproveitados para a avaliação do laboratório de classificação de areia, nessa faixa de aplicação.

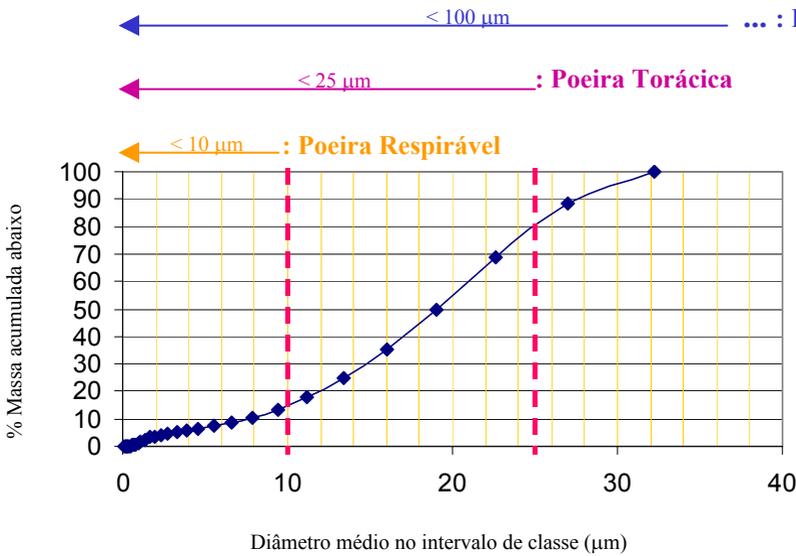


Figura 5.9 Gráfico de porcentagem acumulada em massa para os dados de medição de tamanho de partícula da amostra-teste, coletada junto às peneiras classificadoras

Os dados de medição de tamanho de partícula obtidos por microscopia ótica e confirmados pelo analisador de partículas à laser indicaram que 70 a 80%, em massa, das partículas medidas no laboratório de classificação de areia estão na faixa torácica (partículas $< 25\ \mu\text{m}$) e que destas, apenas 10 a 15%, em massa, estão na faixa respirável (partículas $< 10\ \mu\text{m}$). Essas informações mostram que o principal risco para os trabalhadores desse local está relacionado a doenças pulmonares de uma forma geral, sendo a silicose uma dessas doenças.

5.7 Comparação dos resultados de medição de tamanho de partícula com os resultados de concentração em massa obtidos durante avaliação ambiental

Durante o período em que foram coletadas amostras para determinação de tamanho de partícula, também foram coletadas amostras para determinação da concentração em massa de sílica livre cristalizada no mesmo local⁽⁸⁰⁾. Para esse tipo de determinação foi realizada a coleta das partículas respiráveis utilizando dispositivos amostradores acoplados a ciclones de nylon tradicionais. Esse tipo de coleta serve para avaliar principalmente o risco de silicose.

De 48 amostras coletadas especificamente para determinação da concentração de sílica livre cristalizada na faixa respirável^(44,45,80) somente 36 amostras possuíam massa suficiente para aplicação da metodologia utilizada para análise de sílica por difração de raios-x.

Dentre as amostras analisadas 17 apresentaram concentrações abaixo do limite de tolerância proposto pela legislação brasileira, não chegando a ultrapassar nem mesmo o nível de ação. Apenas 4 amostras apresentaram concentrações superiores ao limite de tolerância e outras 15 amostras ultrapassaram o nível de ação.



Sendo: LT = limite de tolerância e NA = nível de ação, onde $NA = \frac{1}{2} LT$

Em um ambiente onde a matéria-prima manipulada é composta exclusivamente por areia com mais de 95% de quartzo era de se esperar que fossem obtidas concentrações elevadas de sílica livre cristalizada.

Esse resultado pode ser melhor compreendido quando se observa a distribuição de tamanho de partícula do ambiente, conforme Figuras 5.8 e 5.9.

Nesse ambiente, a coleta somente da fração respirável⁽⁸¹⁾, comum para avaliação da exposição ocupacional à sílica livre cristalizada, deixou de fora a principal fração de particulado nocivo à saúde do trabalhador, tornando a avaliação ambiental incompleta.

6 CONCLUSÕES

As informações sobre a distribuição dos tamanhos de partícula, características de ambientes ou áreas de trabalho, indicam quais as regiões do trato respiratório que podem estar sendo atingidas com maior intensidade, podendo estar relacionadas com doenças respiratórias específicas.

O conhecimento prévio da distribuição de tamanho de partícula auxilia na seleção dos dispositivos de amostragem mais adequados para a coleta do particulado, e quando associado aos dados de concentração ambiental fornecem um mapeamento mais completo da situação de exposição do trabalhador.

O estudo de uma situação real, mostrada através do modelo de aplicação, revelou que a falta de conhecimento sobre a distribuição do tamanho das partículas presentes em um ambiente de trabalho pode levar a conclusões limitadas sobre a exposição ocupacional dos trabalhadores.

- Desenvolvimento de metodologia de amostragem para coleta de poeira suspensa no ar, em quantidade suficiente para a medição de tamanho de partícula, utilizando o Analisador de Partículas por Difração de Luz a Laser.
- Estudo de medição de tamanho de partícula, em amostras ambientais de poeira, utilizando outros tipos de observação com microscopia ótica: microscopia de campo escuro, microscopia com contraste de fase e microscopia com contraste de interferência.
- Investigação das características de exposição ocupacional à poeira, relacionadas a ramos de atividade específicos, aplicando a técnica de medição de tamanho de partícula mais viável.
- Atualização da legislação brasileira relativa aos limites de exposição para poeiras minerais.

1. WILLEKE, K., BARON, P. A. **Aerosol Measurement - Principles, Techniques and Applications**. Van Nostrand Reinhold, New York, 1993.
2. SOTO, J. M. G. et al. **Riscos Químicos**. Fundacentro, São Paulo, 1991.
3. MURPHY, C.H. **Handbook of Particles Sampling and Analysis Methods**. Verlag Chemie International, Flórida, 1984.
4. FUNDACIÓN MAPFRE. **Manual de Higiene Industrial**. Editorial MAPFRE, Espanha, 1991.
5. OIT. **Polvo, Efectos Biológicos**. Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo, p. 1892-1897, 1989.
6. BRAIN, J. D., VALBERG, P. A. **Deposition of Aerosol in the Respiratory Tract**. American Review of Respiratory Disease, Vol. 120, 1979.
7. LIDÉN, G. **Performance Parameters for Assessing the Acceptability of Aerosol Sampling Equipment**. Analyst, Vol. 119, 1994.
8. NIOSH. **The Pulmonary Effects of Inhaled Inorganic Dust**. Patty's Industrial Hygiene and Toxicology, Vol. 1, Cap. 7, 1978.
9. NIOSH. **Occupational Respiratory Diseases**. U.S. Department of Health Human Services. Public Health Service Centers for Disease Control, 1992.

10. CHAN, T. L., LIPPMANN, M. **Experimental Measurements and Empirical Modelling of the Regional Deposition of Inhaled Particles in Humans.** Am. Ind. Hyg. Assoc. J., Vol. 41, p. 399-409, 1980.
11. STAHLHOFEN, W., GEBHAART, J., HEYDER, J. **Experimental Determination of the Regional Deposition of Aerosol Particles in the Human Respiratory Tract.** Am. Ind. Hyg. Assoc. J. Vol. 41, p. 385-398, 1980.
12. NATIONAL RESEARCH COUNCIL OF CANADA, Subcommittee on Air. **Effects of Inhaled Particles on Human Health: Influence of Particle Size and Shape.** Canada, 1982.
13. VINCENT, J. H. **Measurement of Coarse Aerosols in Workplaces.** Analyst, Vol. 119, 1994.
14. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Glossary of Terms Related to Health, Exposure and Risk Assessment.** Research Triangle Park, Air Risk Information Support Center, 1987.
15. MARK, D., VINCENT, J. H. **A New Personal Sampler for Airborne Total Dust in Workplaces.** Ann. Occup. Hyg., Vol. 30, n° 1, p. 89-102, 1986.
16. VINCENT, J. H. **Measurement of Fine Aerosols in Workplaces a Review.** Analyst, Vol. 119, 1994.
17. VINCENT, J. H., MARK, D. **Entry Characteristics of Practical Workplace Aerosol Samplers in Relation to the ISO Recommendations.** Ann. Occup. Hyg. Vol. 34, n° 3, pp. 249-262, 1990.
18. OGDEN, T. L. , **An Inhalable-dust Sampler for Measuring the Hazard from Total Airborne Particle,** Ann. Occup. Hyg., Vol. 21, p. 41-50, 1978.
19. ACGIH. **Air Sampling Instruments for Evaluation of Atmospheric Contaminants.** American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 7th edition, Cincinnati, Ohio, 1989.
20. ACGIH. **Advances in Air Sampling.** Industrial Hygiene Science Series, Lewis Publishers, Michigan, U.S.A., 1990.
21. SODERHOLM, S. C. **Proposed International Conventions for Particle Size-selective Sampling.** Ann. Occup. Hyg., Vol. 33, n° 3, p. 301-320, 1989.
22. UNEP/WHO - United Nations Environment Programme/World Health Organization. **Measurement of Suspended Particulate Matter in Ambient Air.** GEMS/AIR Methodology Review Handbook Series, Vol. 3, 1994.
23. LIDÉN, G., KENNY, L. C. **Comparison of Measured Respirable Dust Sampler Penetration Curves with Sampling Conventions.** Ann. Occup. Hyg., Vol. 35, n° 5, p. 485-504, 1991.

24. PRODI, V. **A Personal Sampler Following ISO Recommendations on Particle Size Definitions.** J. Aerosol Sci., Vol. 17, p. 576-581, 1986.
25. OGDEN, T. L., WOOD, J. D. **Effects of Wind on the Dust and Benzene-soluble Matter Captured by a Small Sampler.** Ann. Occup. Hyg., Vol. 17, p. 187-195, 1974.
26. MINISTÉRIO DO TRABALHO. **Legislação do Trabalho.** Segurança e Medicina do Trabalho. Editora Atlas S.A., São Paulo, 1996.
27. ISO. **Air Quality - Particle Size Definitions for Health-related Sampling.** Technical Report ISO/TR 7708, Genebra, 1983.
28. VINCENT, J. H., ARMBRUSTER, L. **On the Quantitative Definition of the Inhalability of Airborne Dust.** Ann. Occup. Hyg. Vol. 24, nº 2, p. 245-248, 1981.
29. ACGIH. **1998 Limites de Exposição (TLVs) para Substâncias Químicas e Agentes Físicos e Índices Biológicos de Exposição (BELs).** Tradução ABHO - Associação Brasileira de Higienistas Ocupacionais, Campinas, SP, 1998.
30. FUNDACENTRO. **Norma para Avaliação da Exposição Ocupacional a Aerodispersóides.** Revista Brasileira de Saúde Ocupacional, nº 51, vol. 13, p. 64-68, 1985.
31. ABNT. **Agentes químicos no ar - Coleta de aerodispersóides por filtração.** Método de ensaio MB-3422, 1991.
32. ABNT. **Calibração de Vazão, pelo Método da Bolha de Sabão, de Bombas de Baixa Vazão utilizadas na Avaliação de Agentes Químicos no Ar.** Norma NBR-10562, 1988.
33. BROWN, R. C., WAKE, D. **Particle Size-selection by Simple Filters.** Health and Safety Executive. Presented at the Aerosol Society Conference, Bournemouth, 1988.
34. ACGIH. **Air Sampling Instruments for Evaluation of Atmospheric Contaminants.** American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 5th edition, Cincinnati, Ohio, 1978.
35. OIT. **Polvo, mostreo.** Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo, p. 1899-1905, 1989.
36. VINCENT, J. H., MARK, D. **Inhalable Dust Spectrometers as Versatile Samplers for Studying Dust-related Health Effects.** Ann. Occup. Hyg., Vol. 28, nº 1, p. 117-124, 1984.
37. MARK, D., VINCENT, J. H. **The Development of an Inhalable Dust Spectrometer.** Ann. Occup. Hyg., Vol. 28, nº 1, p. 125-143, 1984.

38. GIBSON, H., VINCENT, J. H., MARK, D. **A Personal Inspirable Aerosol Spectrometer for Applications in Occupational Hygiene Research.** Ann. Occup. Hyg., Vol. 31, n° 4A, p. 463-479, 1987.
39. CARLSON, K. H. et col. **A Comparison of Two Dustiness Evaluation Methods.** Am. Ind. Hyg. Assoc. J., Vol. 53, p. 448-454, 1992.
40. LIDÉN, G., KENNY, L.C. **Errors in Inhalable Dust Sampling for Particles Exceeding 100 µm.** Ann. Occup. Hyg., Vol. 38, n° 4, p. 373-384, 1994.
41. AITKEN, R. J., DONALDSON, R. **Large Particle and Wall Deposition Effects in Inhalable Samplers.** HSE Contract Reserch Report N° 117/1996. Institute of Occupational Medicine, Edinburg, 1996.
42. NIOSH. **Occupational Exposure Sampling Strategy Manual.** U.S. Department of Health, Education and Welfare. Public Health Service Centers for Disease Control, Cincinnati, 1977.
43. NIOSH. **NIOSH Manual of Analytical Methods.** 4th edition, U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service Centers for Disease Control and Prevention, Cincinnati, 1994.
44. SANTOS, A. M. A. **Determinação Gravimétrica de Aerodispersóides.** Revista Brasileira de Saúde Ocupacional, n° 66, vol. 17, p. 20-25, 1989.
45. SANTOS, A. M. A. **Determinação Quantitativa de Sílica Livre Cristalizada por Difração de Raios X.** Revista Brasileira de Saúde Ocupacional, n° 65, vol. 17, p. 55-59, 1989.
46. GRIFFITHS, W. D. **The Shape Selective Sampling of Fibrous Aerosols.** J. Aerosol Sci., Vol. 19, p. 703-713, 1988.
47. BHASKAR, R., LI, J., XU, L. **A Comparative Study of Particle Size Dependency of IR and XRD Methods for Quartz Analysis.** Am. Ind. Hyg. Assoc. J., Vol. 55, p. 605-609, 1994.
48. WIECEK, E. **The X-Ray Investigation of the Size of Crystallites in Quartz Dusts of Various Fibrogenic Properties.** Medycyna Pracy, Vol. 23, p. 81-89, 1982.
49. ARCURI, A. S. A., CARDOSO, L. M. N. **Limites de Tolerância?** Revista Brasileira de Saúde Ocupacional n° 74, Vol. 19, Fundacentro, São Paulo, 1991.
50. THOMAS, H. F. **Some Observations on Occupational Hygiene Standards.** Ann. Occup. Hyg., Vol. 22, p. 389-397, 1981.
51. HENSCHLER, D. **Exposure Limits: History, Philosophy, Future Developments.** Ann. Occup. Hyg., Vol. 28, n° 1, p. 79-92, 1984.

52. IARC. **Silica and Some Silicates, Coal Dust and Para-aramid Fibrils**. IARC Monographs on the Evaluation of the Carcinogenic Risk of Chemicals to Humans, International Agency for Research on Cancer, Vol 48, Lyon, France, 1997.
53. OIT. **Polvo, Control Industrial**. Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo, p. 1888-1892, 1989.
54. GOELZER B. I. F. **Apostila Introdução à Tecnologia de Controle em Saúde Ocupacional**. Higienista do Trabalho da Organização Mundial da Saúde.
55. GREENOUGH, G. K. **Industrial Dust Control - The Problems and Some Suggestions for Improvement**. Ann. Occup. Hyg., Vol. 32, n° 1, p. 45-57, 1988.
56. JACOBSON M. et col. **Dust Measurement and Control**. Coal Worker's pneumoconiosis, Vol. 200, Annals of the New York Academy of Sciences, N.Y., 1972.
57. TORLONI, M. e col. **Programa de Proteção Respiratória - Recomendações, Seleção e Uso de Respiradores**. Fundacentro, São Paulo, 1995.
58. SILVERMAN, L., BILLINS, C. E., FIRST, M. W. **Particle Size Analysis in Industrial Hygiene**. American Industrial Hygiene Association and U.S. Atomic Energy Commission (Division of Technical Information). Academic Press Inc., New York, 1971.
59. STOCKHAM, J. D., FOCHTMAN, E. G. **Particle Size Analysis**. Ann Arbor Science Publishers Inc., Michigan, 1979.
60. ALLEN, T. **Particle Size Measurement - Powder Sampling and Particle Size Measurement**. Volume I, 5th edition, Chapman & Hall, London, 1997.
61. BS 3406 (1993). **Methods for Determination of Particle Size Distribution. Part 4: Guide to Microscope and Image Analysis Methods**. British Standard, 1993.
62. MCCRONE, W. C., DELLY, J. G. **The Particle Atlas**, Volume I - Principles and Techniques. Ann Arbor Science Publishers Inc., Michigan, 1973.
63. ROOKER, S. J. **On the Visibility of Fibres by Phase Contrast Microscopy**. Am. Ind. Hyg. assoc. J., Vol. 43, n.7, p. 505-515, 1982.
64. ISO. **ISO 8672 - Air Quality - Determination of the Number Concentration of Airborne Inorganic Fibres by Phase Contrast Optical Microscopy - Membrane Filter Method**. Geneva, Switzerland, 1993.
65. VICKERS INSTRUMENTS INC. **Automatic Detection and Counting of Asbestos Fibers**. Am. Ind. Hyg. Assoc. J., Vol. 40, p. A-50 a A-53, 1979.

66. LE GUEN, J. M. M., GALVIN, S. **Cleating and Mounting Techniques for the Evaluation of Asbestos Fibres by the Membrane Filter Method.** Ann. Occup. Hyg., Vol. 24, n° 3, p. 273-280, 1981.
67. BURDETT, G. J. et al. **Mass Concentrations of Airborne Asbestos in the Non-occupational Environment - A Preliminary Report of U.K. Measurements.** Ann. Occup. Hyg., Vol. 28, n° 1, p. 31-38, 1984.
68. GOLDSTEIN, J.I. et al. **Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis.** Plenum Press, New York, USA, 1992.
69. IMAGE-PRO®. **The Proven Solution for Image Analysis.** Image-Pro Plus Version 1.3 for Windows. Reference Guide. Media Cybernetics, USA, 1995.
70. RUSSELL, J. C. **Computer-Assisted Microscopy: The Measurement and Analysis of Images.** Plenum Press, New York, USA, 1992.
71. INOUE, S. **Video Microscopy.** Plenum Press, New York, USA, 1989.
72. ALLEN, T. **Particle Size Measurement.** 4th edition, Chapman & Hall, London, 1990.
73. KENNY, L. C., ROOD, A. P. **Particle Size Analysis by Automated Optical Microscopy.** Health and Safety Executive, London, 1984.
74. KENNY, L. C. **Automated Focusing of an Optical Microscope.** Journal of Microscopy, Vol 132, n° 1, p. 97-107, 1983.
75. KENNY, L. C. **Asbestos Fibre Counting by Image Analysis - The Performance of the Manchester Asbestos Program on Magiscan.** Ann. Occup. Hyg., Vol. 28, n° 4, p. 401-415, 1984.
76. KENNY, L. C. **Automated Analysis of Asbestos Clearance Samples.** Ann. Occup. Hyg., Vol. 32, n° 1, p. 115-128, 1988.
77. SYMPATEC GmbH. **Manual de Operações.** Alemanha, 1985.
78. GRIFFITHS, D. **Palestra técnica: Análise de Tamanho de Partículas através da Técnica de Espalhamento de Luz à Laser.** Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, São Paulo, 1997.
79. RAWLE, A. **The Basic Principles of Particle Size Analysis.** Malvern Instruments Ltd., Spring Lane South, Malvern, UK
80. SANTOS, A.M.A., BON, A.M.T., AMARAL, N.C. **Avaliação Ambiental de Sílica Livre Cristalizada Realizada no Laboratório de Classificação de Areia do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S/A - IPT.** Relatório Técnico RT/02, Fundacentro, São Paulo, 1998.
81. ALTREE-WILLIAMS, S. et al. **Reference Material for the Quantitation of α -Quartz in Respirable Dust by X-Ray Diffraction.** Ann. Occup. Hyg., Vol. 24, n° 4, p. 347-356, 1981.