

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

LUCAS PAQUIELA PRATES

**ESTUDO DA EFICIÊNCIA DE COLETA DE MATERIAL
PARTICULADO EM UM LAVADOR DE GASES TÍPICO**

**VITÓRIA
2014**

LUCAS PAQUIELA PRATES

**ESTUDO DA EFICIÊNCIA DE COLETA DE MATERIAL
PARTICULADO EM UM LAVADOR DE GASES TÍPICO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Departamento de
Engenharia Mecânica do Centro
Tecnológico da Universidade Federal do
Espírito Santo, como requisito parcial
para obtenção do grau de Engenheiro
Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Juan Sergio
Romero Saenz

VITÓRIA

2014

LUCAS PAQUIELA PRATES

ESTUDO DA EFICIÊNCIA DE COLETA DE MATERIAL PARTICULADO EM UM LAVADOR DE GASES TÍPICO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Aprovado em 25 de Novembro de 2014.

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Juan Sergio Romero Saenz
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Prof. Rogerio Silveira de Queiroz
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

Prof. Rodrigo Guedes
Instituto Federal do Espírito Santo
Examinador

*“O gênio é um por cento de inspiração e
noventa e nove por cento de suor”*

Thomas A. Edison

AGRADECIMENTOS

À minha família, em especial meus pais Silvana e Renato e minha noiva, Laís, pelo suporte e carinho. Aos amigos e mestres por todo apoio nestes anos de faculdade.

Lista de figuras

Figura 1: Esquema do funcionamento de um lavador de gases.	10
Figura 2: Aceleração de uma partícula num fluido.	12
Figura 3: Faixas de tamanhos de partícula pelo mecanismo de formação.	17
Figura 4: Diâmetro das partículas de acordo com a substância.	17
Figura 5: Curvas de distribuição de tamanho de partículas.	19
Figura 6: Distribuição Típica de Tamanho de particulado.	21
Figura 7: Distribuição Log-normal de partículas.....	23
Figura 8: Função de distribuição normal típica.	24
Figura 9: Função de distribuição log-normal típica.	26
Figura 10: Escoamento ao redor de uma esfera.	29
Figura 11: Camada limite da esfera.	33
Figura 12: Camada limite da velocidade e difusão.	35
Figura 13: Cálculo das eficiências no Excel.	41
Figura 14: Curva de frequência para os diâmetros de partícula (azul) e gota (vermelho) na distribuição típica.	43
Figura 15: Eficiência de coleta para diferentes diâmetros de particulado em função do diâmetro de gota.	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores adotados para as propriedades.....	40
Tabela 2: Média ponderada para os percentis na distribuição típica.	42
Tabela 3: Eficiência na coleta de particulado de 10 μ m de diâmetro.....	50
Tabela 4: Eficiência na coleta de particulado de 20 μ m de diâmetro.....	51
Tabela 5: Eficiência na coleta de particulado de 30 μ m de diâmetro.....	52
Tabela 6: Eficiência na coleta de particulado de 40 μ m de diâmetro.....	53
Tabela 7: Eficiência na coleta de particulado de 50 μ m de diâmetro.....	52
Tabela 8: Eficiência na coleta de particulado de 60 μ m de diâmetro.....	54

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 MOTIVAÇÃO.....	110
1.2 OBJETIVO.....	110
1.3 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO	110
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	11
2.1 DINÂMICA DAS PARTICULAS EM FLUIDOS.....	11
2.1.1 Movimento sob influencia da gravidade	13
2.1.2 Movimento sob a influência da gravidade em ar padrão.....	14
2.2 PROPRIEDADES DO MATERIAL PARTICULADO	15
2.3 CURVAS DE DISTRIBUIÇÃO DOS DIÂMETROS DAS PARTÍCULAS	18
2.3.1 Propriedades Da Coleta	20
2.3.2 Função De Distribuição Normal	24
2.3.3 Função De Distribuição Log-Normal	25
2.4 EFICIÊNCIAS DA COLETA	27
3 MECANISMOS DE COLETA	29
3.1 INTERCEPTAÇÃO E IMPACTAÇÃO INERCIAL EM GOTAS ESFÉRICAS.....	29
3.1.1 Fluxo potencial ao redor de uma gota.....	30
3.1.2 Aproximação do Movimento das partículas	31
3.1.3 Efeitos da camada limite	33
3.2 DIFUSÃO	35
3.3 MODOS COMBINADOS DE COLETA.....	37

4 ESTUDO DE CASO	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
4.1 EFICIÊNCIA DAS INTERAÇÕES	40
4.2 EFICIÊNCIA GLOBAL	41
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
5.1 EFICIÊNCIA DAS INTERAÇÕES	43
5.2 EFICIÊNCIA GLOBAL	44
6 CONCLUSÃO	45
7 REFERÊNCIAS	46
APÊNDICE A – EFICIÊNCIAS DE COLETA DE PARTICULADOS	48

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, o desenvolvimento industrial se dá em uma velocidade nunca antes alcançada: constantemente há o nascimento de novas empresas, fábricas, etc. Esse desenvolvimento acelerado é acompanhado por uma grande preocupação, que é o impacto causado sobre o meio ambiente e a população. Dentre os vários tipos de poluição, aquela causada pela emissão de particulado na atmosfera através de chaminés é o foco do presente estudo.

A retenção de partículas, originadas de gases residuais, é um dos problemas de maior importância dentro do contexto da limitação da emissão de contaminantes gasosos. Dentre os principais problemas causados podemos citar: meteorológicos – a emissão de particulado favorece a formação de neblinas, modificando o microclima nas zonas altamente contaminadas; sanitários – as partículas em suspensão representam grande perigo para pessoas afetadas por enfermidades brônquicas crônicas; ambientais – o particulado depositado na vegetação obstrui estômatos e folhas, dificultando o normal desenvolvimento de muitas das atividades biológicas (fotossíntese). (LISBOA, 2008)

Com o propósito de controlar essas emissões, existem no mercado diversos equipamentos como filtros, precipitadores eletrostáticos, entre outros, inclusive o tema deste estudo: o lavador de gases.

1.1 MOTIVAÇÃO

Sabe-se que estas soluções são, em sua maioria, bastante onerosas. Sendo assim, existe a necessidade de se valer de um método cujo investimento seja mais adequado à realidade das pequenas e médias empresas que apresentam emissão de particulado em suas plantas.

Dessa forma, o lavador de gases mostra-se uma grande promessa como solução para esses casos, já que apresenta menores custos. Torna-se necessário, então, um estudo mais detalhado de seu funcionamento a fim de se determinar sua aplicabilidade para as mais diversas situações.

1.2 OBJETIVO

O propósito do estudo apresentado é explorar as bases teóricas de coleta e separação de partículas em um gás, pela ação de gotas. Para tanto foram simuladas funções densidade de probabilidade de diâmetros de material particulado contido em um fluxo de gás e de gotas de água contidas em um spray. Os mecanismos físicos de coleta e separação serão considerados na interação das duas correntes e calculadas eficiências por faixas de diâmetros, tanto das partículas quanto das gotas.

1.3 PRINCIPIO DE FUNCIONAMENTO

Conforme a figura 1, o gás, carregado com material particulado (poluente), atravessa forçadamente uma aspersão de gotas. Nesta situação as partículas se chocam contra essas gotas, onde se depositam e são removidas do gás. O gás sai então limpo pela parte superior do lavador, enquanto o líquido contendo particulado se deposita no fundo do dispositivo, podendo ser limpo para reuso.

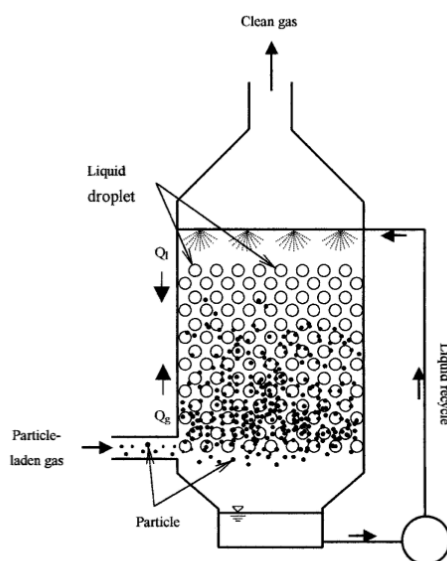


Figura 1: Esquema do funcionamento de um lavador de gases.

Fonte: (KIM. 2001)

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 DINÂMICA DAS PARTICULAS EM FLUIDOS

O movimento de partícula esférica inicialmente em repouso sob ação de força externa $\mathbf{F}$ pode ser descrito a partir da equação (1) (CRAWFORD, 1976), a seguir:

$$\mathbf{F} + \mathbf{F}_D = m \frac{d\mathbf{V}}{dt} = \rho_p \bar{V} \frac{d\mathbf{V}}{dt} \quad (1)$$

Onde:

- $\mathbf{F}_D$ é a força de arrasto;
- m é a massa da partícula;
- ρ_p é a densidade da partícula;
- $\bar{V}$ é o volume da partícula;

Sendo $\mathbf{F}_D$ dada em termos da área frontal, velocidade e coeficiente de arrasto pela equação (2):

$$\mathbf{F}_D = -C_D \frac{\rho A_p}{2} V \mathbf{V} \quad (2)$$

De posse das equações (1) e (2), tem-se:

$$\mathbf{F} = \rho_p \bar{V} \frac{d\mathbf{V}}{dt} + \frac{1}{2} C_D \rho A_p V \mathbf{V} \quad (3)$$

Que pode ser decomposta em função das direções x, y e z (F_x , F_y e F_z) para as velocidades u, v e w respectivamente. Sendo $\mathbf{V}$ a velocidade e $V = |\mathbf{V}|$

Considerando partículas esféricas temos:

$$F_x \frac{6}{\pi d^3 \rho_p} = \frac{du}{dt} + \frac{3\rho C_D}{4\rho_p d} V u \quad (4)$$

E de forma semelhante nas direções y e z, trocando 'u' por 'v' e 'w' respectivamente.

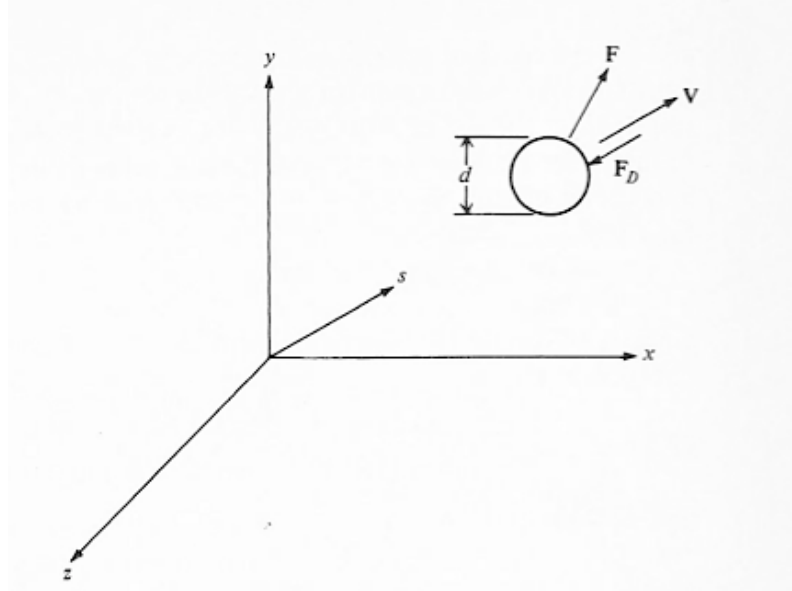


Figura 2: Aceleração de uma partícula num fluido.

Fonte: (CRAWFORD. 1976)

Seja a coordenada s a direção do movimento da partícula, considerando que mudanças no movimento da partícula não afetam a equação de movimento na direção s. Tem-se, para fluxo laminar em volta da esfera e Reynolds próximo de 2 ($C_D = \frac{24\mu}{\rho V d}$):

$$V_t = \frac{F}{3\pi d \mu} \quad (5)$$

$$t = -\frac{\rho_p d^2}{18\mu} \ln\left(1 - \frac{V}{V_t}\right) \quad (6)$$

$$s = -\left[\frac{\rho_p d^2 V}{18\mu} + \frac{\rho_p F d}{54\pi \mu^2} \ln\left(1 - \frac{V}{V_t}\right)\right] \quad (7)$$

Sendo t o tempo e s a distância percorrida pela partícula num tempo t e V_t a velocidade terminal da partícula.

Essas equações são válidas para $Re_t = \frac{V_t d \rho}{\mu} \leq 2$, sendo Re_t o numero de Reynolds baseado na velocidade terminal. Porém para partículas de diâmetros maiores, Reynolds aumenta e essas equações não mais atendem. Como no caso de lavadores, em que as gotas de água são relativamente grandes. (CRAWFORD, 1976)

Serão consideradas três faixas de valores de Reynolds para a velocidade terminal:

$$V_t = \frac{2\mu}{\rho d} \left(\sqrt{9 + \frac{\rho F}{\pi \mu^2}} - 3 \right) \quad Re_t \leq 10 \quad (8)$$

$$V_t = \frac{4.8\mu}{\rho d} \left(\sqrt{447 + \frac{\rho F}{\pi \mu^2}} - 20.4 \right) \quad 10 \leq Re_t \leq 700 \quad (9)$$

$$V_t = \frac{2.4}{d} \sqrt{\frac{F}{\rho}} \quad Re_t \geq 700 \quad (10)$$

2.1.1 Movimento sob influencia da gravidade

As equações listadas até o momento podem ser aplicáveis a partículas em queda livre em campo gravitacional, substituindo a força F por:

$$F = mg = \frac{\pi \rho_p d^3 g}{6} \quad (11)$$

Para o caso de fluxo em baixas velocidades, teremos:

$$V_t = \frac{\rho_p d^2 g}{18\mu} \quad (12)$$

$$t = -\frac{\rho_p d^2}{18\mu} \ln\left(1 - \frac{V}{V_t}\right) \quad (13)$$

$$s = -\left[\frac{\rho_p d^2 V}{18\mu} + \frac{\rho_p^2 d^4 g}{324\mu} \ln\left(1 - \frac{V}{V_t}\right)\right] \quad (14)$$

2.1.2 Movimento sob a influência da gravidade em ar padrão

$$F = 5,1348\rho_p d^3 \quad (15)$$

$$V_t = 29,609\rho_p d^2 \quad (16)$$

$$t = -3019\rho_p d^2 \ln\left(1 - \frac{V}{V_t}\right) \quad (17)$$

$$s = -\left[3019\rho_p d^2 V + 8,94 \times 10^7 \rho_p^2 d^4 \ln\left(1 - \frac{V}{V_t}\right)\right] \quad (18)$$

2.2 PROPRIEDADES DO MATERIAL PARTICULADO

As propriedades importantes para o controle de particulado poluente são as físicas: tamanho, densidade e forma. Através delas, obtêm-se as propriedades globais do particulado. Estas, no entanto, não dependem somente do somatório das propriedades de cada partícula, mas da maneira como estão distribuídos esses valores entre as partículas do material coletado. Por exemplo, uma amostra de particulado contendo muitas partículas grandes e poucas pequenas, poderá ter a mesma massa que outra amostra contendo poucas partículas grandes e tremendamente maior número de partículas pequenas. As duas amostras serão significativamente diferentes, a primeira sendo muito mais suscetível à separação por meios mecânicos. Normalmente a especificação de duas ou mais propriedades da amostra, cada uma determinada como a soma dos valores de propriedades individuais de cada partícula, será suficiente para a determinação de uma distribuição adequada das propriedades da amostra. Às vezes, porém, é necessário obter propriedades especiais para o propósito específico de tratar a natureza distributiva da amostra. (THEODORE, 1988)

Se as partículas são esféricas, então o diâmetro a ser utilizado é, obviamente, o diâmetro da esfera. Distribuições de particulado compostas por gotas formadas por condensação ou pela ação cisalhante de um corpo líquido são, normalmente, esféricas. Por outro lado, partículas formadas por fratura de um sólido e partículas formadas por cristalização geralmente não são esféricas. Nesse caso, o conceito de diâmetro precisa de modificação. Para facilitar a análise, é definido um diâmetro médio.

Existem diversas maneiras para se definir um diâmetro médio de uma partícula, ou de um conjunto delas. A escolha de um diâmetro médio particular é feita com base em que propriedades serão calculadas com essa medida. Os diâmetros medidos irão basear-se num grande número de partículas uma vez que haverá um número considerável de partículas de diferentes formas e volumes que têm aproximadamente o mesmo diâmetro médio.

As seis principais formas de se determinar um diâmetro médio são:

1. Mede-se o comprimento da partícula em uma direção particular;
2. Mede-se o comprimento da partícula em varias direções e toma-se a média dessas medidas como diâmetro médio;
3. Considera-se como diâmetro médio o diâmetro 'd' de uma esfera com a mesma área superficial da partícula;
4. Considera-se como diâmetro médio o diâmetro 'd' de uma esfera com a mesma área específica da partícula;
5. Considera-se como diâmetro médio o diâmetro 'd' de uma esfera com a mesmo volume da partícula;
6. Considera-se como diâmetro médio o diâmetro 'd' de uma esfera com a mesma velocidade final de queda livre no regime laminar que a partícula.

O diâmetro das partículas normalmente emitidas em processos reais varia de 0,1 a 1000 μm . (SPELLMAN, 2008)

Particulado maior que 5 ou 10 μm compõe as partículas grosseiras.

Particulado menor que 5 ou 10 μm compõe as partículas finas, que penetram o sistema respiratório humano, sendo de maior preocupação. Elas podem absorver gases poluentes e leva-los aos alvéolos pulmonares. De acordo com sua forma, elas podem causar diversos danos ao organismo, incluindo o câncer. (LISBOA, 2008)

A figura 3 mostra a variação do tamanho das partículas conforme seu mecanismo de formação.

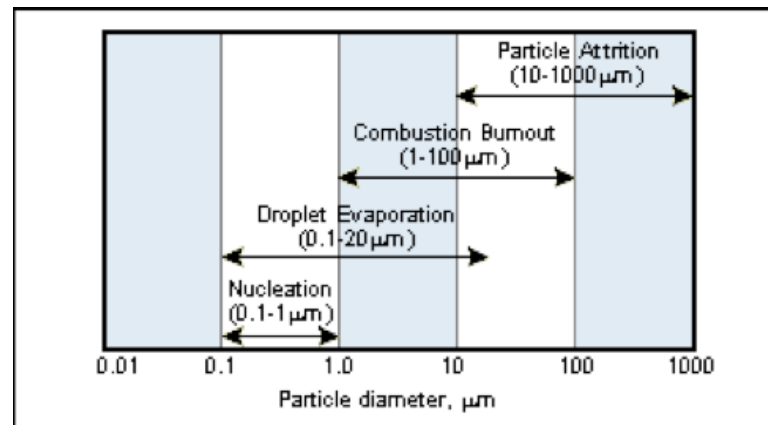


Figura 3: Faixas de tamanhos de partícula pelo mecanismo de formação.

Fonte: (SPELLMAN, 2008).

Normalmente caracteriza-se um diâmetro médio das partículas. Essa média pode ser aritmética ou geométrica. Pode ser também utilizado o valor da mediana dos diâmetros.

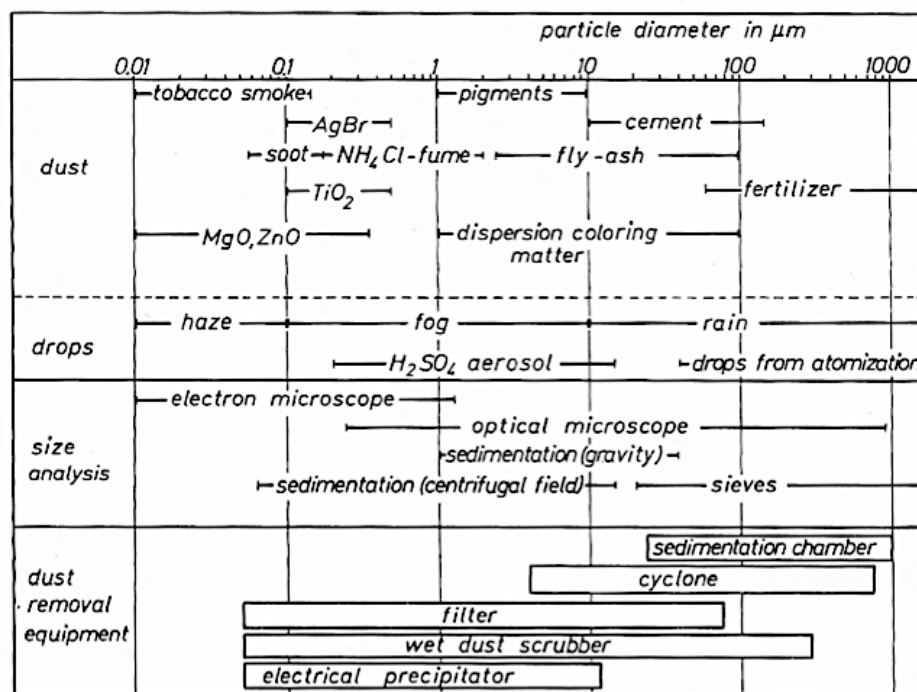


Figura 4: Diâmetro das partículas de acordo com a substância.

Fonte: (BRAUER, 1981)

A figura 4 mostra diversas substâncias que formam o material particulado e relaciona seus diâmetros com o equipamento mais adequado para coleta de partículas. Vê-se que os coletores úmidos de material particulado (wet dust scrubber) apresentam maior range de aplicação.

2.3 CURVAS DE DISTRIBUIÇÃO DOS DIÂMETROS DAS PARTÍCULAS

Existem 3 tipos: curva de distribuição do resíduo (Curva de distribuição da fração mássica grosseira), curva de distribuição da fração mássica fina e a curva de distribuição de frequência, sendo as duas primeiras curvas de distribuição acumulada.

$$M_p = M_{pR} + M_{pD} \quad (19)$$

onde,

- M_p = massa total;
- M_{pR} = massa de particulado grosseiro;
- M_{pD} = massa de particulado fino.

Sendo R e D as razões (em %) de particulado grosso e fino, respectivamente, temos:

$$R \equiv \frac{M_{pR}}{M_p} 100 \quad (20)$$

$$D \equiv \frac{M_{pD}}{M_p} 100 \quad (21)$$

$$R + D = 100 \quad (22)$$

R e D sendo determinados como:

$$R = \int_{d_p}^{d_{p,max}} dR = 100 - \int_{d_{p,min}}^{d_p} dD \quad (23)$$

$$D = \int_{d_{p,min}}^{d_p} dD \quad (24)$$

Exemplos de curvas:

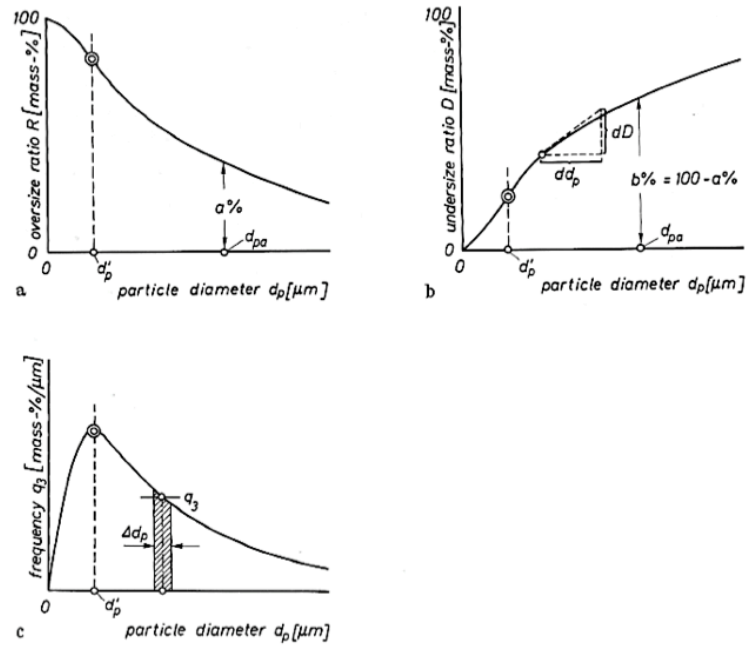


Figura 5: Curvas de distribuição de tamanho de partículas.

Fonte: (BRAUER, 1981)

Na figura 5, gráfico a, o valor $a\%$ representa a porcentagem do total em massa de particulado que possui um diâmetro d_p maior que d_{pa} . Por semelhança, no gráfico b temos $b\%$ representando a fração do total em massa de particulado que possui diâmetro d_p menor que d_{pa} . (BRAUER, 1981)

Na gráfico c é observada a variação da frequência mássica pelo diâmetro d_p da partícula. Diferenciando D pelo diâmetro d_p , a frequência mássica q_3 obtida é:

$$q_3 \equiv \frac{dD}{dd_p} \quad (25)$$

A área ($\Delta d_p q_3$) indica a fração da massa total de partículas contida na faixa de diâmetro Δd_p .

O formato das curvas pode variar amplamente, dependendo, principalmente, do processo de formação da partícula, e das propriedades do material desta. Sendo assim, não há equações gerais para essas curvas. Se necessário, equações empíricas podem ser estabelecidas, pelo menos para tipos bastante simples de curvas. Em outros casos, as curvas podem ser descritas por um conjunto de valores discretos.

As curvas de distribuição são de importância especial para abordagens do ponto de vista médico.

2.3.1 Propriedades Da Coleta

Seja N o número total de partículas coletadas. $N(d)$ é a função que determina o número de partículas de diâmetro menor ou igual a ' d '. Define-se $n(d)$ como:

$$n(d) = \frac{dN(d)}{d(d)} \quad (26)$$

Ou seja, a derivada de $N(d)$ em função do diâmetro ' d ', onde $d(d)$ é um diferencial de diâmetro. Essa quantidade $n(d)$ é útil para caracterizar a distribuição de particulado numa coleta. Sendo assim, o número de partículas cujo diâmetro é menor ou igual a ' d ' é dada pela equação (27):

$$N(d) = \int_0^d n(d) d(d) \quad (27)$$

E o número total de partículas:

$$N = \int_0^{\infty} n(d) d(d) \quad (28)$$

Uma curva típica de distribuição de partícula é mostrada na figura 6.

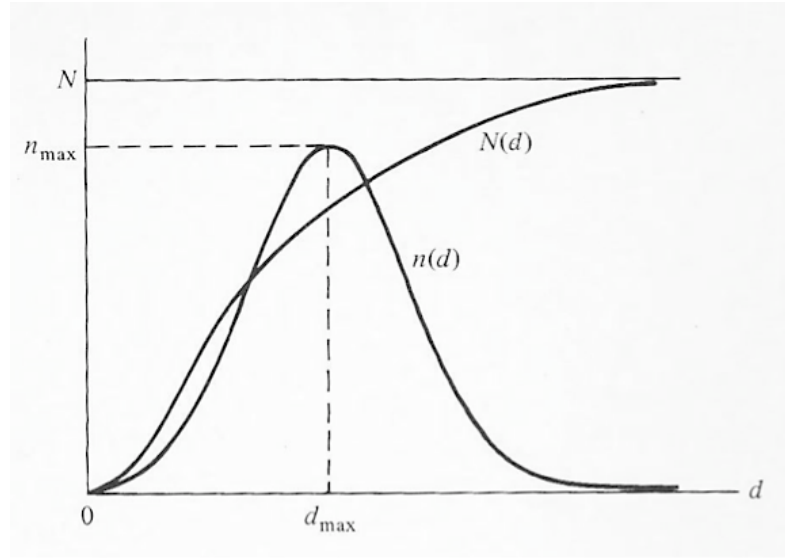


Figura 6: Distribuição Típica de Tamanho de particulado.

Fonte: (CRAWFORD. 1976)

Define-se, então, a propriedade generalizada P (nenhuma relação com pressão), cujo valor representa a propriedade em questão para uma única partícula ou para a amostra como um todo. A propriedade generalizada para uma única partícula é dada como $P(d)$, assumindo-se que todas as partículas de um determinado diâmetro ' d ' possuem o mesmo valor da propriedade. Assume-se, também, que a propriedade $P(d)$ é distribuída continuamente.

$$P = \int_0^{\infty} P(d)n(d) d(d) \quad (29)$$

Se o numero de partículas é a propriedade de interesse, então $P(d)=1$, já que cada partícula contribui com 1 para o numero total, e $P=N$, resultando na equação de N .

A massa total de particulado é obtida da equação (29), se $P(d)$ for a massa de uma única partícula:

$$m = \int_0^{\infty} m(d)n(d) d(d) \quad (30)$$

Para uma partícula esférica de densidade ρ_P , sua massa é dada por $\pi \rho_P d^3/6$. Então:

$$m = \frac{\pi \rho_P}{6} \int_0^{\infty} n(d)d^3 d(d) \quad (31)$$

A área da superfície total das partículas na amostra pode ser obtida da equação (29) se $P(d)$ for a área da superfície de cada partícula, dada por πd^2 para partículas esféricas:

$$A_s = \int_0^{\infty} A_s(d)n(d) d(d) \quad (32)$$

$$A_s = \pi \int_0^{\infty} n(d)d^2 d(d) \text{ (partículas esféricas)} \quad (33)$$

A área específica é definida como a área da superfície por unidade de massa de particulado. Para uma única partícula esférica seu valor é:

$$A_{ss} = \frac{6}{\rho_P d} \quad (34)$$

Para a amostra de forma geral, com particulado esférico, a área específica é dada por:

$$A_{ss} = \frac{6 \int_0^{\infty} n(d)d^2 d(d)}{\rho_P \int_0^{\infty} n(d)d^3 d(d)} \quad (35)$$

Valores de área específica variam de 5 a $10^5 \text{ m}^2/\text{kg}$. A área específica é de interesse nos processos envolvendo reação química ou adsorção. (CRAWFORD, 1976)

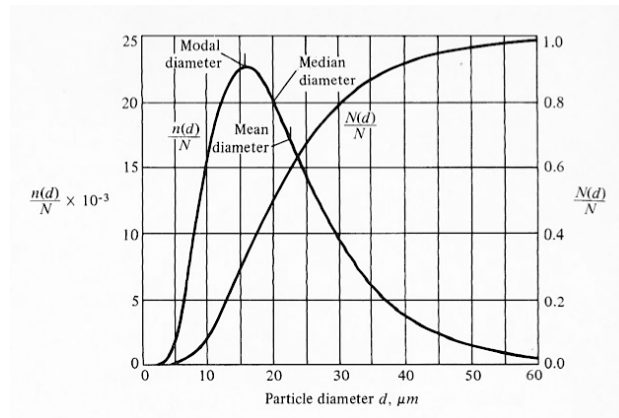


Figura 7: Distribuição Log-normal de partículas. Fonte: (CRAWFORD. 1976)

A figura 7 mostra uma distribuição log-normal de partículas. Tanto a função distribuição numérica, $n(d)$, quanto a cumulativa, $N(d)$, estão mostradas, cada uma normalizada pelo número total de partículas. Como mostrado, há três diâmetros médios mais comumente usados para descrever a distribuição.

O primeiro em importância ($\bar{d}$ mean diameter), no gráfico possui o valor de $22,7\mu\text{m}$, é definido por:

$$\bar{d} = \frac{\int_0^{\infty} n(d) d \, d(d)}{N} \quad (36)$$

Este diâmetro encontra-se sobre uma linha vertical que passa pelo centroide da área abaixo da curva $n(d)$. É o diâmetro mais utilizado para descrição da distribuição.

O segundo seria o diâmetro mediano, d_{me} (median diameter). Este definido como o diâmetro no qual a distribuição cumulativa tem valor 0,5. Ou seja:

$$N(d_{me}) = \frac{N}{2} \quad (37)$$

O terceiro seria o diâmetro modal, d_{mo} (modal diameter), definido como o diâmetro do maior número de partículas. Definido matematicamente por:

$$\frac{dn(d)}{d(d)} = 0 \quad (38)$$

A medida de dispersão usada é o desvio padrão ou seu quadrado, a variância, dada por:

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \int_0^{\infty} (d - \bar{d})^2 n(d) d(d) \quad (39)$$

A variância é feita sobre a média e é igual ao momento de inércia da área abaixo da curva $n(d)$ em relação a linha vertical que passa pelo centroide.

A assimetria é determinada nos termos do terceiro momento em relação ao centroide, dado por:

$$\beta^3 = \frac{1}{N} \int_0^{\infty} (d - \bar{d})^3 n(d) d(d) \quad (40)$$

2.3.2 Função De Distribuição Normal

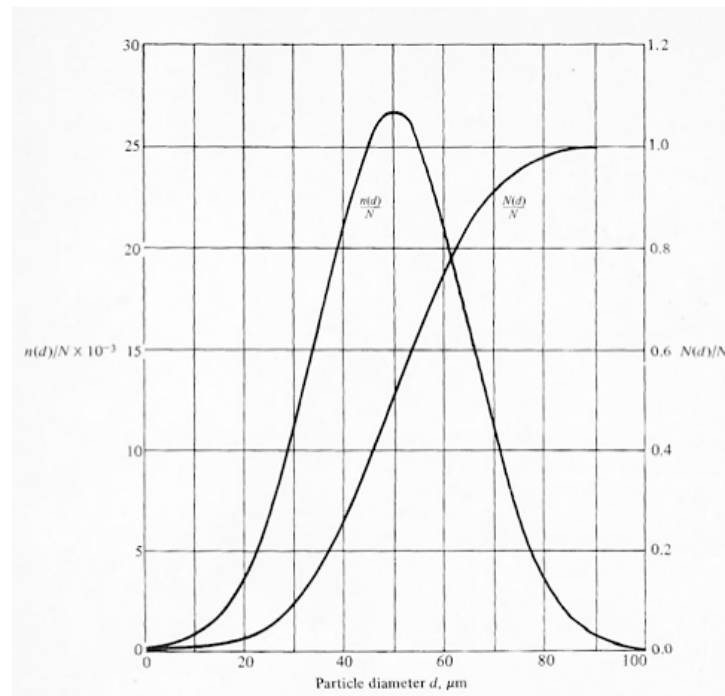


Figura 8: Função de distribuição normal típica. Fonte: (CRAWFORD. 1976)

A figura 8 mostra uma função de distribuição normal típica, em que o diâmetro médio vale 50μm, e, por ser uma curva coincidente com a normal, o diâmetro mediano e modal possuem o mesmo valor que o médio.

A equação de $n(d)$ é:

$$n(d) = \frac{N}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{\sigma} e^{-(d-\bar{d})^2/2\sigma^2} \quad (41)$$

A curva do diâmetro cumulativo $N(d)$ é obtida da integração da equação acima:

$$N(d) = \frac{N}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{\sigma} \int_0^d e^{-(d-\bar{d})^2/2\sigma^2} d(d) \quad (42)$$

Que, utilizando a função erro,

$$\operatorname{erf} z = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-z^2} dz \quad (43)$$

passa a ser escrita como:

$$N(d) = \frac{N}{2} + \frac{N}{2} \operatorname{erf} \frac{d - \bar{d}}{\sqrt{2}\sigma} \quad (44)$$

Raramente, porém, uma distribuição se aproxima assim da curva normal.

2.3.3 Função De Distribuição Log-Normal

Na distribuição log-normal define-se um parâmetro de diâmetro u , como o logaritmo do diâmetro:

$$u = \ln d \quad (45)$$

Se a função de distribuição numérica, agora $n(u)$, for plotada como uma função de u , a curva normal de probabilidade resulta na curva mostrada na figura abaixo.

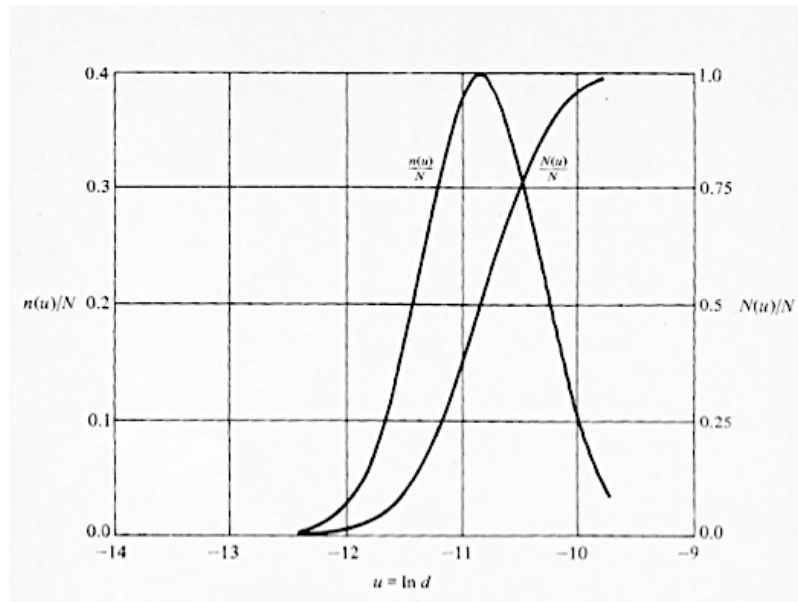


Figura 9: Função de distribuição log-normal típica. Fonte: (CRAWFORD. 1976)

A relação entre $n(d)$ e $n(u)$ é dada por:

$$n(u) = n(d)d \quad (46)$$

A figura 9 mostra, em distribuição log-normal, que a curva para $n(u)$ é uma curva normal de probabilidade em u , centralizada em torno de $\bar{u}$ e de desvio padrão σ_u . A equação desta curva é:

$$n(u) = \frac{N}{\sqrt{2\pi}\sigma_u} e^{-(u-\bar{u})^2/2\sigma_u^2} \quad (47)$$

A função de distribuição de tamanho acumulada $N(u)$ pode ser obtida de maneira análoga ao que foi feito na distribuição normal:

$$N(u) = \frac{N}{2} + \frac{N}{2} \text{ERF} \frac{u - \bar{u}}{\sqrt{2}\sigma_u} \quad (48)$$

Deve-se relacionar as equações $n(u)$ e $N(u)$ com o diâmetro d . Além disso, as propriedades da distribuição para o diâmetro d devem ser consideradas. Define-se então um novo diâmetro d_m e um novo desvio padrão s_m , que serão relacionados com a distribuição log-normal da seguinte maneira:

$$\bar{u} = \ln d_m \quad (49)$$

$$\sigma_u = \ln \sigma_m \quad (50)$$

Fazendo uso das definições acima citadas, as equações $n(u)$ e $N(u)$ ficam:

$$n(d) = \frac{N}{\sqrt{2\pi} d \ln \sigma_m} \exp \left[-\frac{(\ln d/d_m)^2}{2(\ln \sigma_m)^2} \right] \quad (51)$$

$$N(d) = \frac{N}{2} + \frac{N}{2} \operatorname{erf} \frac{\ln d/d_m}{\sqrt{2} \ln \sigma_m} \quad (52)$$

E o diâmetro médio:

$$\bar{d} = e^{\bar{u}} e^{\sigma_u^2/2} = d_m e^{(\ln \sigma_m)^2/2} \quad (53)$$

2.4 EFICIÊNCIAS DA COLETA

Poucos ou nenhum dispositivo são capazes de remover toda a carga de partículas ou gases presente num fluxo gasoso. Alguns dispositivos são mais eficientes que outros e, no caso de particulado, um dado dispositivo eliminará algumas das partículas de maneira mais eficiente que outras. A eficiência de coleta é definida como a razão entre a quantidade coletada e a quantidade total de particulado presente. Pode-se definir, por exemplo, a eficiência de coleta para um determinado diâmetro, para uma faixa de diâmetros específica, ou ainda para o total de particulado. A propriedade mais comumente utilizada para a quantidade de particulado é a massa, considerando-se a partícula como uma esfera de diâmetro 'd' com o mesmo volume da partícula. Utiliza-se, também, o número de partículas, nesse caso adotando como diâmetro da partícula a média das medidas em várias direções. Sendo P_c e P_p a quantidade de particulado coletado e o total presente no fluxo gasoso respectivamente, tem-se a eficiência η , expressa na equação (54). (THEODORE, 2008)

$$\eta = \frac{P_c}{P_p} \quad (54)$$

Ou para um diâmetro d :

$$\eta(d) = \frac{P_c(d)}{P_p(d)} \quad (55)$$

Em termos de massa e para um diâmetro ' d ' tem-se:

$$\eta(d) = \frac{m_c(d)}{m_p(d)} \quad (56)$$

E a eficiência total para distribuição log-normal ($u = \ln d$), tem-se:

$$\eta_m = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \eta(u) e^{3u} e^{-(u-\bar{u})^2/2\sigma_u^2} du}{\sqrt{2\pi}\sigma_u e^{3\bar{u}} e^{9\sigma_u^2/2}} \quad (57)$$

Se $\eta(u)$ é dada por uma expressão na forma $\eta(u) = 1 - \sum_{i=1}^{\infty} \alpha_i e^{-\beta_i u}$ para um diâmetro mínimo d_l .

A integral pode ser avaliada, resultando em:

$$\begin{aligned} \eta_m = & \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \frac{u_l - \bar{u} - 3\sigma_u^2}{\sqrt{2}\sigma_u} \\ & - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{\infty} \alpha_i e^{-i\bar{u}} e^{i(i-6)\sigma_u^2/2} \operatorname{erfc} \frac{u_l - \bar{u} - 3\sigma_u^2 + i\sigma_u^2}{\sqrt{2}\sigma_u} \end{aligned} \quad (58)$$

onde erfc substitui erf : $\operatorname{erfc}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x)$.

3 MECANISMOS DE COLETA

3.1 INTERCEPTAÇÃO E IMPACTAÇÃO INERCIAL EM GOTAS ESFÉRICAS

Lavadores úmidos operam formando gotas do líquido de lavagem e fazendo-as mover através da mistura gás-particulado. As gotas então varrem as partículas enquanto o ar passa por elas coletando algumas das partículas. (CRAWFORD, 1976)

Seja h_d a eficiência de coleta para uma única gota, definida como a razão entre o número de partículas coletadas pelo número de partículas inicialmente contidas no volume varrido pela gota.

Uma partícula irá atingir a gota se estiver a uma certa distância y_1 do eixo de movimento da gota, conforme figura 10.

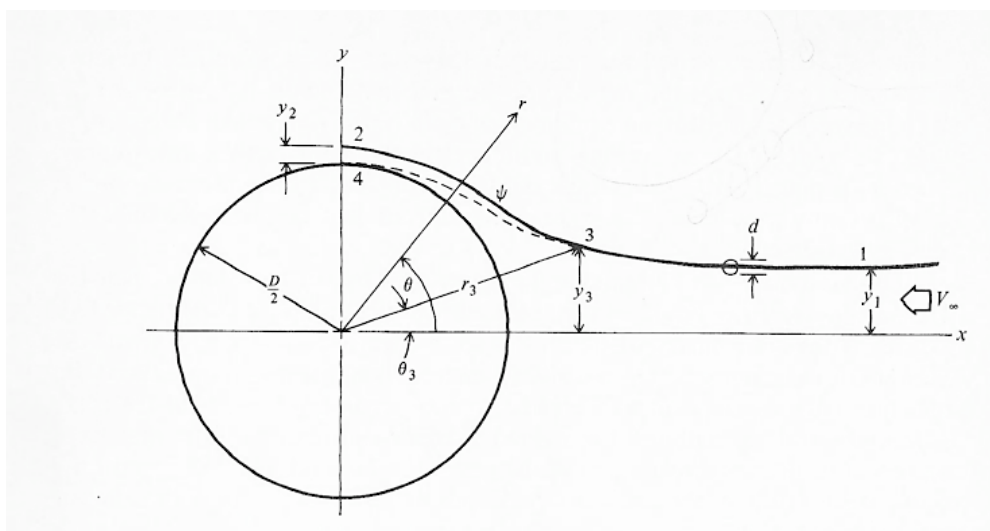


Figura 10: Escoamento ao redor de uma esfera. Fonte: (CRAWFORD, 1976)

A eficiência de coleta individual da gota devido a interceptação e impactação inercial combinados, η_{di} pode ser definida como a razão entre a área de um círculo com raio y_1 e a área projetada da gota. Essa relação é então modificada por um coeficiente de

fixação σ , devido ao fato de que algumas partículas devem atingir a gota e saltar, e outras que foi previsto atingirem a gota podem não atingi-la.

$$\eta_{di} = \frac{4\sigma y_1^2}{D^2} \quad (59)$$

A impactação é o mecanismo no qual a partícula atinge a gota, perdendo sua energia e se separando do fluxo gasoso que a transportava. A intercepção é um caso limite da impactação, pois representa o mecanismo de coleta para as partículas que ao atingir o coletor estejam a uma distancia igual ao seu diâmetro, ou seja, aquelas partículas que “raspam” o coletor. Os dois mecanismos são tratados como um único mecanismo.

3.1.1 Fluxo potencial ao redor de uma gota

Na Figura 10, y representa a linha de fluxo seguida pela partícula. Em 1, a partícula se move paralelamente ao eixo x , já em 3 o caminho da partícula começa a divergir da linha de fluxo do gás. A partícula atravessa o eixo y a uma distância $d/2$ acima da superfície da gota. O ponto 2 é onde a linha de fluxo do gás atravessa o eixo y , a uma distância y_2 da superfície da gota.

Assumindo que a linha de fluxo do gás pode ser descrita utilizando-se dos resultados da teoria do fluido não viscoso, também chamada de fluxo potencial, e ignorando o efeito da camada limite adjacente à superfície da gota, a equação da linha de fluxo, de Milne-Thomson, é dada por:

$$\psi = -\frac{1}{2}V_{\infty}\sin^2\theta\left(r^2 - \frac{D^3}{8r}\right) \quad (60)$$

onde ψ é a função da linha de fluxo. Os componentes da velocidade são dados por:

$$u_r = -V_{\infty}\cos\theta\left(1 - \frac{D^3}{8r^3}\right) \quad (61)$$

$$u_{\theta} = \frac{1}{2} \sin \theta \left(2 + \frac{D^3}{8r^3} \right) \quad (62)$$

Nessas equações, r e θ são as coordenadas esféricas de simetria axial. Na superfície da esfera, as velocidades são:

$$u_r = 0 \quad (63)$$

$$u_{\theta} = \frac{3}{2} V_{\infty} \sin \theta \quad (64)$$

A equação para a linha de fluxo passando pelo ponto 2 para um y_2 pequeno (comparado a $D/2$) é:

$$\psi = -\frac{3}{4} D y_2 V_{\infty} \quad (65)$$

Que combinada a equação inicial para y :

$$\sin^2 \theta \left(r^2 - \frac{D^3}{8r} \right) = \frac{3}{2} D y_2^2 \quad (66)$$

3.1.2 Aproximação do Movimento das partículas

A equação acima é a equação da linha de fluxo entre pontos 1 e 3 da figura. Do ponto 3 ao 4, a partícula possui uma velocidade média na direção x :

$$\bar{u}_x = \frac{5}{4} V_{\infty} \quad (67)$$

e o tempo para o deslocamento de 3 a 4:

$$t = \frac{4 r_3 \cos \theta_3}{5 V_{\infty}} \quad (68)$$

Logo, assumindo aceleração constante a_y e desprezando $d/2$, comparado a $D/2$,

$$a_y = \frac{D - 2y_3}{t^2} \quad (69)$$

A força atuando na partícula devido a essa aceleração:

$$F = \frac{\pi d^3 \rho_p a_y}{6} \quad (70)$$

Temos, então, a velocidade terminal:

$$V_t = \frac{\rho_p d^2 a_y C}{18\mu} \quad (71)$$

A distância y_2 :

$$y_2 = \frac{d}{2} + \frac{5}{72} \frac{\rho_p d^2 V_\infty C}{\mu r_3 \cos \theta_3} (D - 2y_3) \quad (72)$$

Sendo a distância y_3 expressa como uma fração do diâmetro da gota:

$$y_3 = \alpha D \quad (73)$$

Para r_3 temos:

$$r_3 = \frac{D}{(8 - 12 y_2 / \alpha^2 D)^{1/3}} \quad (74)$$

Dessas equações obtemos:

$$\frac{y_2}{D} - \frac{1}{2} \frac{d}{D} = \frac{\beta (8 - 12 y_2 / \alpha^2 D)^{1/3} (1 - 2\alpha)}{\sqrt{1 - \alpha^2 (8 - 12 y_2 / \alpha^2 D)^{2/3}}} \quad (75)$$

$$\text{onde } \beta = \frac{5}{72} \frac{\rho_p d^2 V_\infty C}{\mu D}.$$

A escolha de α é arbitrária e deve ser feita para valores entre 0 e 0.5, de forma a maximizar o valor de y_2 . Um α pequeno aumenta o tempo de deslocamento da partícula de y_3 para $D/2$. Já um α próximo de 0.5 faz com que o tempo no qual a partícula se distancia da linha de fluxo seja pequeno. Um caso em que a otimização é utilizada para se obter a melhor aproximação para o método.

A equação (76) é utilizada para a determinação de um α ideal, dado um β :

$$\beta = \frac{\alpha^3}{(1 + \alpha)^{2/3}(1 - 2\alpha)^{4/3}} \quad (76)$$

3.1.3 Efeitos da camada limite

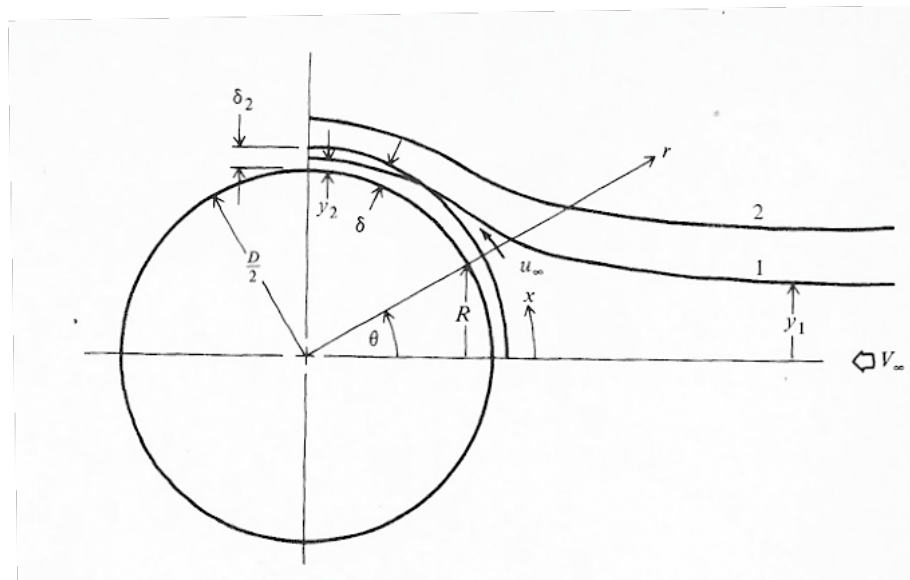


Figura 11: Camada limite da esfera. Fonte (CRAWFORD. 1976)

Devido a alta velocidade relativa entre a esfera e o ar e ao pequeno diâmetro da esfera, a camada limite será bem fina na metade frontal da esfera. Ainda assim, sua presença pode ter um grande efeito na eficiência de coleta da gota, especialmente para os casos de menor eficiência.

Equação para a espessura da camada limite:

$$\delta = \frac{5.02v^{1/2}}{Ru_{\infty}^3} \left(\int_0^x u_{\infty}^5 R^2 dx \right)^{1/2} \quad (77)$$

onde temos: $u_{\infty} = \frac{3}{2}V_{\infty} \sin \theta$, $R = \frac{D}{2} \sin \theta$ e $x = \frac{D}{2} \theta$.

Calcula-se δ_2 quando $\theta = \pi/2$:

$$\delta_2 = 1.958 \sqrt{\frac{vD}{V_{\infty}}} \quad (78)$$

O perfil de velocidade na camada limite pode ser aproximado por:

$$u = V_{\infty} \left[\frac{9}{4} \frac{y}{\delta} - \frac{3}{4} \left(\frac{y}{\delta} \right)^3 \right] \quad (79)$$

Tem-se, então, para a eficiência de coleta para uma única gota:

$$\eta_{di} = 8.811\sigma \sqrt{\frac{v}{V_{\infty}D}} \left[\left(\frac{y_2}{\delta_2} \right)^2 - \frac{1}{6} \left(\frac{y_2}{\delta_2} \right)^4 \right] \quad y_2 < \delta_2 \quad (80)$$

$$\eta_{di} = 7.342\sigma \sqrt{\frac{v}{V_{\infty}D}} + 2\sigma \frac{(y_2/D - \delta_2/D)[3 + 6y_2/D + 4(y_2/D)^2]}{1 + 2y_2/D} \quad (81)$$

$y_2 > \delta_2$

3.2 DIFUSÃO

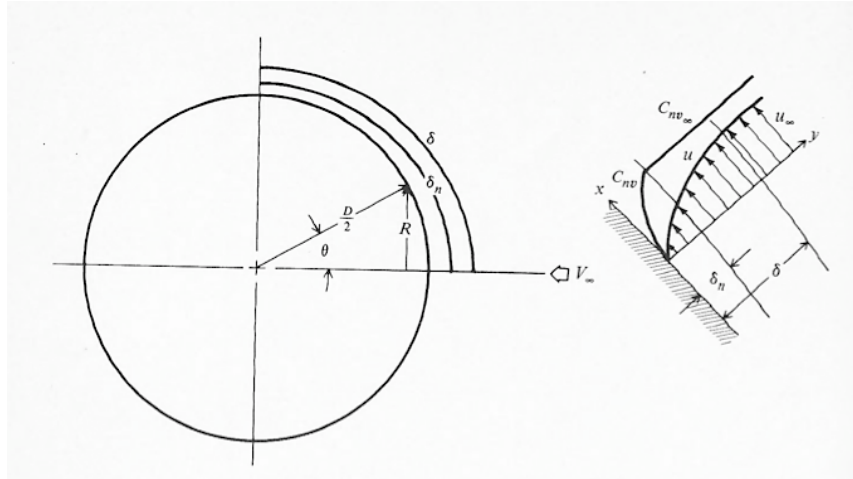


Figura 12: Camada limite da velocidade e difusão. Fonte: (CRAWFORD. 1976).

A difusão será tratada como o único mecanismo de coleta em ação a partir daqui. Eficiência de coleta para mecanismos combinados será vista posteriormente.

Na figura δ é a espessura da camada limite para velocidade e δ_n a espessura da camada limite para concentração calculada com base no número de partículas por unidade de volume C_{nv} .

$$\delta \sqrt{\frac{V_\infty}{vD}} = \frac{2.9}{\sin^4 \theta} [0.457 - (0.229 \sin^2 \theta + 0.171 \sin^4 \theta + 0.143 \sin^6 \theta) \cos \theta]^{1/2} \quad (82)$$

A deposição de partículas por difusão segue as leis do movimento browniano, sendo que a taxa de deposição de particulado por difusão segue a lei de Fick, podendo ser expressa como:

$$\frac{\dot{N}}{A} = D \left(\frac{\partial C_{nv}}{\partial y} \right)_{y=0} \quad (83)$$

Onde $\dot{N}$ representa a taxa na qual as partículas são depositadas numa superfície de área A para um dado valor do número de gradiente de concentração $(\partial C_{nv} / \partial y)_{y=0}$.

O coeficiente de difusão é dado pela equação (84):

$$\mathcal{D} = \frac{kTC}{3\pi d\mu} \quad (84)$$

Na qual k é a constante de Boltzmann e $\mathcal{C}$ o fator de correção de Cunningham.

A taxa $\dot{N}$ pode ser escrita como:

$$\dot{N} = 1.783 \frac{D^2 \mathcal{D} C_{nv\infty}}{\beta} \sqrt{\frac{V_\infty}{vD}} \quad (85)$$

E de outra forma:

$$\dot{N} = DC_{nv\infty} V_\infty \sqrt{\frac{vD}{V_\infty}} (1.384\beta^2 - 0.09886\beta^4) \quad (86)$$

Resolvendo para v/D , que por definição é o numero de Schmidt:

$$Sc = \frac{1.288}{\beta^3(1 - 0.07142\beta^2)} \quad (87)$$

Sendo β muito menor que uma unidade, a equação pode ser resolvida de forma aproximada para β :

$$\beta = \frac{1.088}{Sc^{1/3}} \quad (88)$$

Que substituindo na equação 85:

$$\dot{N} = 1.639 D^2 \mathcal{D} C_{nv\infty} Sc^{1/3} \sqrt{\frac{V_\infty}{vD}} \quad (89)$$

Esta taxa esta relacionada à metade frontal da gota. Considera-se, de forma simplificada, o coeficiente dobrado para a gota inteira, resultando em:

$$\dot{N} = 3.28 \frac{D^2 V_{\infty} C_{nv\infty}}{\sqrt{v D V_{\infty}}} \mathcal{D} S c^{1/3} \quad (90)$$

A eficiência da coleta é obtida dividindo o numero de partículas coletadas por unidade de tempo pela taxa na qual o fluxo de partículas atravessa uma secção circular de diâmetro igual ao da esfera. Essa taxa é:

$$\dot{N}_0 = \frac{\pi}{4} D^2 V_{\infty} C_{nv\infty} \quad (91)$$

Logo, a eficiência fica:

$$\eta_{ad} = \frac{4.18\sigma}{S c^{2/3} Re^{1/2}} \quad (92)$$

Sendo Sc , para o ar padrão:

$$Sc = 6.55 \times 10^{11} \frac{d}{C} \quad (93)$$

3.3 MODOS COMBINADOS DE COLETA

Impactação e intercepção predominam em partículas maiores, enquanto a difusão predomina em partículas menores. Há, porém, uma faixa de diâmetros na qual os dois fenômenos acontecem simultaneamente. Para essa faixa a eficiência da coleta é a razão da soma de partículas coletadas por cada fenômeno dividido pelo total de partículas N_0 :

Numero de partículas coletadas por impactação inercial:

$$N_{ci} = \eta_{di} \frac{1}{2} [N_0 + N_0(1 - \eta_{ad})] \quad (94)$$

Numero de partículas coletadas por difusão:

$$N_{cd} = \eta_{dd} \frac{1}{2} [N_0 + N_0(1 - \eta_{di})] \quad (95)$$

Logo, temos a eficiência da gota:

$$\eta_d = \frac{N_{ci} + N_{cd}}{N_0} = \eta_{di} + \eta_{dd} - \eta_{di}\eta_{dd} \quad (96)$$

Devido ao alto grau de dificuldade no uso das equações até aqui demonstradas, para a aplicação pratica várias fórmulas simplificadas ou empíricas para a eficiência foram induzidas. Slinn (1983) propôs uma aproximação semi-empirica para a eficiência de coleta usando análise dimensional juntamente a dados experimentais. Baseado em Slinn (1983), será utilizada a equação para eficiência que foi simplificada por Seinfeld e Pandis (2006):

$$\eta_d = \frac{4}{ReSc} \left[1 + 0,4Re^{\frac{1}{2}}Sc^{\frac{1}{3}} + 0,16Re^{\frac{1}{2}}Sc^{\frac{1}{2}} \right] + \frac{4d}{D} \left[\frac{\mu}{\mu_w} + \frac{\left(1 + 2Re^{\frac{1}{2}}\right)d}{D} \right] + \left(\frac{St - St^*}{St - St^* + \frac{2}{3}} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (97)$$

Onde:

$$Re = 64516V_t d \quad (98)$$

$$Sc = \frac{3\pi\mu_a^2 d_p}{\rho_a kTC} \quad (99)$$

$$St = \frac{\rho_p d^2 (V_{tg} - V_t)}{18\mu D} \quad (100)$$

$$St^* = \frac{1,2 + \frac{1}{12} \ln(1 + Re)}{1 + \ln(1 + Re)} \quad (101)$$

A equação (97) pode ser vista como três termos em uma soma, sendo o primeiro termo dessa equação a eficiência devido à difusão, o segundo termo referente à interceptação e o terceiro à impactação inercial. Nota-se que o terceiro termo só é válido para quando Stokes (St) é maior que o número de Stokes crítico da partícula (St^*). (FLAGAN, 1988)

4 ESTUDO DE CASO

A princípio foram determinadas as eficiências de maneira geral para a interação entre gotas e partículas de diferentes diâmetros. Em seguida foi simulada uma distribuição típica de gotas e outra de partículas a fim de determinar uma eficiência global de coleta.

Para os cálculos foram feitas considerações quanto à natureza do particulado, da água e do gás saindo pela chaminé. A tabela 1 relaciona as propriedades com seus respectivos valores adotados neste trabalho:

Tabela 1: Valores adotados para as propriedades

PROPRIEDADE	VALOR ADOTADO
Constante de Boltzmann (k)	$1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$
Fator de correção de Cunningham (C)	1
Densidade da gota (ρ_g)	1000 Kg/m^3
Densidade da partícula (ρ_p)	2000 Kg/m^3
Densidade do ar (ρ_a)	$1,2 \text{ Kg/m}^3$
Viscosidade do gás (μ_g)	$1,8 \times 10^{-5}$
Viscosidade da água (μ_a)	$1,003 \times 10^{-3}$
Temperatura do gás (T)	473 K

4.1 EFICIÊNCIA DAS INTERAÇÕES

Os cálculos foram todos feitos em planilhas no Microsoft Excel, conforme mostra a figura 13.

VALORES DE ENTRADA (m)		
DIAMETRO PARTICULA (d)	1,00E-05	1,00E-05
DIAMETRO GOTA (D)	4,00E-05	5,00E-05
CONSTANTES		
CONSTANTE DE BOLTZMANN (J/K)	1,38E-23	1,38E-23
FATOR DE CORRECAO DE CUNNINGHAM	1	1
DENSIDADE DA AGUA (kg/m ³)	1000	1000
DENSIDADE PARTICULA (kg/m ³)	2000	2000
DENSIDADE DO AR (kg/m ³)	1,2	1,2
VISCOSIDADE DO GAS (kg/ms)	1,80E-05	0,000018
VISCOSIDADE DA AGUA (kg/ms)	0,001003	0,001003
TEMPERATURA GASES (K)	473	473
CÁLCULOS INTERMEDIARIOS		
VELOCIDADE TERMINAL GOTA (m/s)	0,047918	0,074142
VELOCIDADE TERMINAL PARTICULA (m/s)	0,006052	0,006052
Re	0,063891	0,123571
Sc	3898474,2	3898474,2
St	1,29140	1,68025
St*	1,13488	1,08347
Eficiências		
DIFUSAO	0,00155	0,00111
INTERCEPTACAO	0,39433	0,28685
Impactação	0,05863	0,22955
TOTAL	45,45%	51,75%

Figura 13: Cálculo das eficiências no Excel.

Como visto acima, criou-se uma planilha para cada diâmetro de partícula, a começar com $10\mu m$ e variando de 5 em $5\mu m$ até o diâmetro de $60\mu m$, para uma faixa de diâmetros de gotas de 40 a $1500\mu m$. Os valores de entrada são os respectivos diâmetros.

O cálculo da eficiência é feito em duas etapas: primeiro os cálculos intermediários, aonde são determinadas as velocidades terminais de gota e partícula, e os números de Reynolds, Schmidt, Stokes e Stokes crítico; depois são determinadas as eficiências parciais (difusão, interceptação e impactação inercial) e global (soma das parciais), sendo sempre utilizada a equação (97).

4.2 EFICIÊNCIA GLOBAL

Para a eficiência global, foi gerada uma distribuição normal de partículas e outra de gotas, ambas aleatórias, no Excel. Ambas foram posteriormente ajustadas em um software de estatística que determinou os percentis de cada faixa de diâmetros para

ambos os casos. Dessa forma foi possível calcular o percentual de partículas coletadas na interação dessas duas distribuições.

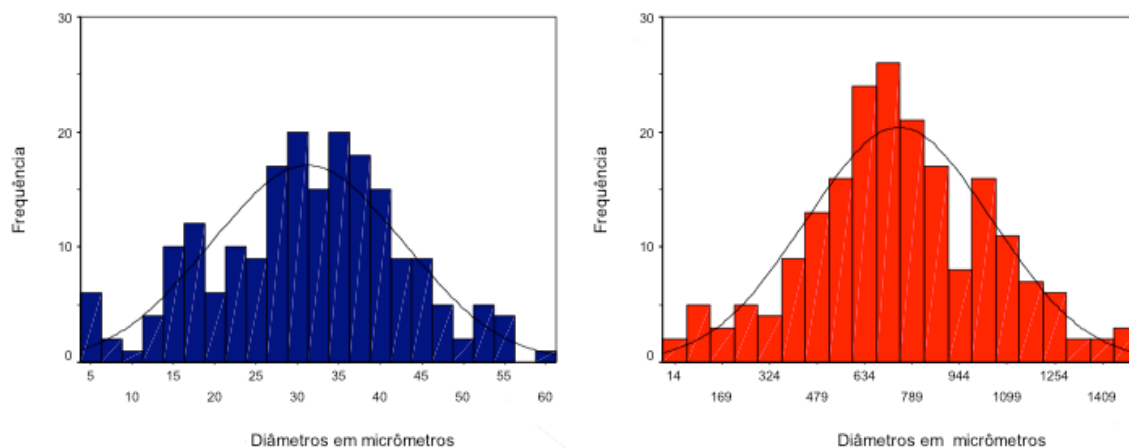


Figura 14: Curva de frequência para os diâmetros de partícula (azul) e gota (vermelho) na distribuição típica.

Tabela 2: Média ponderada para os percentis na distribuição típica.

Percentiles		5	10	25	50	75	90	95
Weighted Average	GOTAS	195.8283	373.1848	560.0166	731.4063	934.7387	1147.3863	1276.6490
	PARTIC	11.2927	14.9323	23.1813	32.1588	38.7568	46.0969	52.1941

Na tabela 2 podemos ver o diâmetro médio (media ponderada) para cada percentil mostrado. Com isso, foi feito o cálculo da eficiência global para a distribuição dada, da seguinte maneira:

- Primeiro calculou-se a eficiência da interação dos diâmetros médios entre partícula e gota para cada percentil (Eq. (97)) multiplicada pelo percentual referente a gota e pelo percentual referente a partícula;
- Por fim somou-se todas essas eficiências.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 EFICIÊNCIA DAS INTERAÇÕES

Os resultados estão apresentados em forma de tabelas no anexo A. Foi criada uma tabela para cada diâmetro de partícula avaliado. Com esses resultados, foi criado o gráfico abaixo:

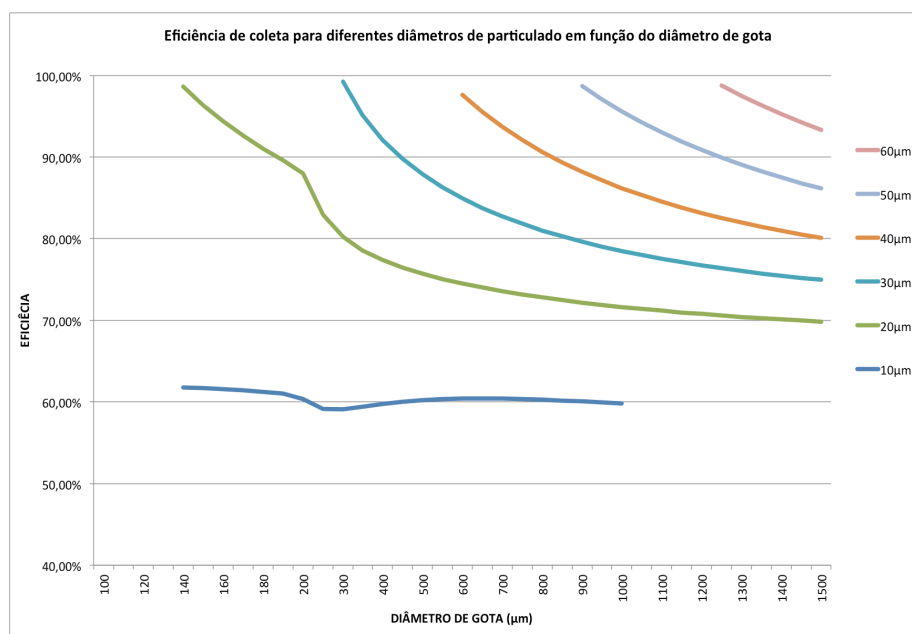


Figura 15: Eficiência de coleta para diferentes diâmetros de particulado em função do diâmetro de gota.

Como observado acima, exceto para partículas muito pequenas ($10\mu m$), a curva de eficiência de coleta de material particulado inicia-se num valor máximo e decresce com o aumento da gota. Dessa forma, torna-se evidente a importância no controle do tamanho da gota da distribuição quando da necessidade de coletar determinados diâmetros de partícula.

Além disso, vale notar que existe um diâmetro mínimo de gota para que a mesma interaja com um dado diâmetro de partícula. Pequenas variações no tamanho da partícula já exigem diâmetros de gota muito diferentes.

5.2 EFICIÊNCIA GLOBAL

Para a eficiência global foi calculada uma coleta de 41,52% de material particulado para as distribuições típicas, usando os valores discretos de diâmetros representativos dos percentís, conforme a tabela 2. Esta é uma eficiência para distribuições aleatórias de gotículas para uma situação também aleatória. Para uma situação com uma necessidade de coleta específica os dispersores podem ser projetados a fim de fornecerem um range desejado de diâmetro de gotas. Dessa maneira seria possível alcançar eficiências maiores.

6 CONCLUSÃO

O método permite o cálculo de eficiência com base em uma distribuição real de partículas presentes em um fluxo contaminado quando, amostralmente, for possível definir uma função densidade de probabilidade das partículas com o uso de equipamentos que estão disponíveis no mercado.

Analisando os números fica evidente o quão eficaz é o sistema de lavagem de gases na retirada de particulado. O controle do diâmetro da gota mostrou-se uma ferramenta valiosa na obtenção de melhores resultados.

O projetista pode também desenhar bicos injetores de spray de água, de modo a atingir uma distribuição de diâmetros adequada a cada situação, buscando a máxima eficiência sob restrições de custo de construção e operação.

Sugere-se como trabalhos futuros:

1. Uso de mais pontos de tomada de diâmetros representativos de gotas e partículas, usando várias funções densidade de probabilidade;
2. Projeto e construção de um lavador para um caso real objetivando minimizar a relação custo-benefício em termos do projeto e em termos de medições, comparando-os;

7 REFERÊNCIAS

1. THEODORE, L.; BUONICORE, A. J. *Air pollution control equipment*. Boca Raton: CRC, 1988.
2. CRAWFORD, M. *Air Pollution Control Theory*. New York: McGraw Hill, Inc., 1976.
3. THEODORE, L. *Air pollution control equipment calculations*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2008.
4. INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. *Fundamentos de transferência de calor e de massa*. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
5. GUNN, R.; KINZER, G. D. *The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air*. 1949, *J. Meteor*, 6, 243–248. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1175/1520-0469\(1949\)006<0243:TTVOFF>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0469(1949)006<0243:TTVOFF>2.0.CO;2)>. Acesso em: 30 out. 2014
6. WANG, X.; ZHANG, L.; MORAN, M. D. *Uncertainty assessment of current size-resolved parameterizations for below-cloud particle scavenging by rain*. *Atmos. Chem. Phys.* Disponível em: <<http://www.atmos-chem-phys.net/10/5685/2010/acp-10-5685-2010.html>>. Acesso em: 30 out. 2014.
7. FLAGAN, R. C.; SEINFELD, J. H. *Fundamentals of air pollution engineering*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, Inc., 1988. p
8. WOFFINDEN, G. J.; MARKOWSKI, G. R.; ENSOR, D. S. *Effects of Interfacial Properties on Collection of Fine Particles by Wet Scrubbers*. U.S. Environmental Protection Agency, North Carolina. 1978.
9. LISBOA, H. M.; SCHIRMER, W. N.; KAWANO, M.; QUADROS, M. *Controle da poluição atmosférica*. 01. ed. Florianópolis: Prefixo editorial na Biblioteca Nacional 913483, 2008. v. 01.
10. SPELLMAN, F. R. *The Science of Air: Concepts and Applications*. Boca Raton: CRC Press, 2008.
11. MOVAHEDNEJAD, E.; OMMI, F.; HOSSEINALIPOUR, S. M. *Prediction of Droplet Size and Velocity Distribution in Droplet Formation Region of Liquid Spray*. *Tehran: Entropy*, 2010, v. 12, 1484-1498. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1099-4300/12/6/1484/pdf>>. Acesso em: 7 nov. 2014.
12. MUGELE, R. A.; EVANS, H. D. *Droplet Size Distribution in Sprays*. *Ind. Eng. Chem.*, v. 43, n. 6, p. 1317-1324, 1951.

13. KIM, H. T.; JUNG, C. H.; OH, S. N.; LEE, K. W. *Particle Removal Efficiency of Gravitational Wet Scrubber Considering Diffusion, Interception, and Impaction*. Puk-Gu: Environmental Engineering Science, 2001, v. 18, n.2. Disponível em: <<http://online.liebertpub.com/doi/pdf/10.1089/10928750151132357>>. Acesso em: 7 nov. 2014.
14. BRAUER, H.; VARMA, Y. B. G. *Air Pollution Control Equipment*. Berlin: Springer-Verlag, 1981. 388p.

APÊNDICE A – EFICIÊNCIAS DE COLETA DE PARTICULADOS

Tabela 3: Eficiência na coleta de particulado de $10\mu m$.

GOTAS (μm)	EFICIÊNCIA
140	61,80%
150	61,70%
160	61,56%
170	61,40%
180	61,22%
190	61,03%
200	60,38%
250	59,12%
300	59,10%
350	59,41%
400	59,75%
450	60,03%
500	60,22%
550	60,34%
600	60,40%
650	60,41%
700	60,39%
750	60,33%
800	60,26%
850	60,17%
900	60,06%
950	59,95%
1000	59,83%

Tabela 4: Eficiência na coleta de particulado de 20 μm .

GOTAS (μm)	EFICIÊNCIA
140	98,62%
150	96,36%
160	94,37%
170	92,60%
180	91,02%
190	89,60%
200	87,98%
250	82,94%
300	80,26%
350	78,58%
400	77,39%
450	76,46%
550	75,06%
600	74,50%
650	74,00%
700	73,56%
750	73,16%
800	72,80%
850	72,47%
900	72,16%
950	71,88%
1000	71,63%
1050	71,39%
1100	71,17%
1150	70,96%
1200	70,77%
1250	70,58%
1300	70,41%
1350	70,25%
1400	70,10%
1450	69,95%
1500	69,82%

Tabela 5: Eficiência na coleta de particulado de $30\mu m$ de diâmetro.

GOTAS (μm)	EFICIÊNCIA
300	99,23%
350	95,10%
400	92,10%
450	89,78%
500	87,88%
550	86,30%
600	84,94%
650	83,76%
700	82,73%
750	81,81%
800	81,00%
850	80,27%
900	79,61%
950	79,02%
1000	78,47%
1050	77,98%
1100	77,53%
1150	77,11%
1200	76,73%
1250	76,38%
1300	76,05%
1350	75,74%
1400	75,46%
1500	74,94%

Tabela 6: Eficiência na coleta de particulado de $40\mu m$ de diâmetro.

GOTAS (μm)	EFICIÊNCIA
600	97,64%
650	95,54%
700	93,70%
750	92,07%
800	90,63%
850	89,34%
900	88,18%
950	87,14%
1000	86,19%
1050	85,33%
1100	84,54%
1150	83,82%
1200	83,16%
1250	82,55%
1300	81,98%
1350	81,46%
1400	80,97%
1450	80,52%
1500	80,10%

Tabela 7: Eficiência na coleta de particulado de $50\mu m$ de diâmetro.

GOTAS (μm)	EFICIÊNCIA
900	98,67%
950	97,04%
1000	95,57%
1050	94,23%
1100	93,01%
1150	91,90%
1200	90,87%
1250	89,93%
1300	89,05%
1350	88,25%
1400	87,50%
1450	86,80%
1500	86,15%

Tabela 8: Eficiências na coleta de particulado de $60\mu m$ de diâmetro.

GOTAS (μm)	EFICIÊNCIA
1250	98,73%
1300	97,48%
1350	96,32%
1400	95,24%
1450	94,25%
1500	93,31%

