

SEPARAÇÃO DE SÓLIDOS E LÍQUIDOS

1. Introdução

A separação de partículas de um fluido nos processos de sedimentação e decantação ocorre pela ação da gravidade sobre as partículas. Aplicações dos processos de sedimentação incluem: a remoção de sólidos de resíduos líquidos, a decantação de cristais de magmas, a deposição de partículas sólidas de alimentos líquidos, na separação da borra em processos de extração sólido-líquido (extração de óleo), entre outros. As partículas podem ser: partículas sólidas ou líquidos em gotas. O fluido pode ser um líquido ou um gás que podem estar em repouso ou em movimento.

1.1 Lei de Stokes (velocidade terminal)

Sempre que uma partícula move-se em um fluido um número de forças irá atuar sobre ela. Considerando uma partícula rígida em movimento num fluido, existem três forças que irão atuar: a força da gravidade (F_g) atuando para baixo, a força de empuxo (F_b) atuando para cima e a força de arraste (F_D) na direção da velocidade relativa entre o fluido e a partícula.

Considerando a teoria do movimento dos corpos livres temos:

$$F = m \frac{dv}{dt}$$

e a força F resultante no corpo:

$$F = F_g - F_b - F_D$$

Podemos escrever então:

$$F = m \frac{dv}{dt} = F_g - F_b - F_D$$

A força da gravidade atuando sobre uma partícula pode ser expressa por:

$$F_g = mg$$

Onde m é a massa da partícula e g a aceleração da gravidade.

A força de empuxo pode ser escrita como:

$$F_b = \frac{m\rho g}{\rho_p} = V_p \rho g$$

Onde; m/ρ_p é o volume da partícula em m^3 e ρ a densidade do fluido. A força de arraste deriva da resistência de fricção sendo proporcional a $v^2/2$ e é definida pela relação:

$$F_D = C_D \frac{v^2}{2} \rho A$$

onde, v é a velocidade relativa entre o fluido e a partícula, A é a área projetada da partícula na direção de seu movimento, e C_D é o coeficiente de arraste. Substituindo na equação temos:

$$m \frac{dv}{dt} = mg - \frac{m\rho g}{\rho_p} - \frac{C_D v^2 \rho A}{2}$$

Caso a partícula seja liberada da posição de repouso podem ser observados dois períodos. Inicialmente um período de queda acelerada e seqüencialmente o período de queda a velocidade constante. A etapa de velocidade constante, que aqui nos interessa, é chamada de velocidade terminal v_t .

Para determinar a velocidade terminal faz-se $dv/dt=0$ e então temos:

$$v_t = \sqrt{\frac{2g(\rho_p - \rho)m}{A\rho_p C_D \rho}}$$

para partículas esféricas temos $m = \pi D_p^3 \rho_p / 6$ e $A = \pi D_p^2 / 4$. Substituindo na equação acima temos.

$$v_t = \sqrt{\frac{4g(\rho_p - \rho)D_p}{3C_D \rho}}$$

O coeficiente de arraste para esferas rígidas é uma função do número de Reynolds. Na região de fluxo laminar, chamada região da lei de Stokes ($N_{Re} < 10$) o coeficiente de arraste é:

$$C_D = \frac{24}{D_p v \rho / \mu} = \frac{24}{N_{Re}}$$

Substituindo na equação da velocidade terminal temos a lei de Stokes.

$$v_t = \frac{g D_p^2 (\rho_p - \rho)}{18 \mu}$$

para outras formas de partículas os coeficientes de arraste serão diferentes. Para a região turbulenta o coeficiente de arraste é aproximadamente constante $C_D = 0,44$.

Em muitos casos um grande número de partículas está presente. Nestes casos as partículas da vizinhança irão interferir na movimentação das partículas individuais e a velocidade calculada será corrigida por um fator ($\epsilon^2 \psi_p$) relacionado com a porosidade do meio.

2. Separação de sólidos e líquidos de gases

Os principais objetivos na separação de partículas sólidas ou líquidas de uma corrente gasosa estão associadas com:

- Limpeza de gases. Ex. gotículas em evaporadores, reatores e colunas de absorção.
- Controle da poluição. Ex. Poeira, fumaça.
- Segurança. Ex. Partículas inflamáveis ou explosivas (silos).
- Recuperação de material arrastado. Ex. Secagem em spray dryer.

2.1 Equipamentos

Usualmente os equipamentos utilizados para realizar a separação são: Câmaras gravitacionais e Ciclones. A escolha do equipamento depende do tamanho das partículas, da concentração, da densidade, da vazão, temperatura e características físico-químicas do gás.

2.1.1 Câmaras gravitacionais

As câmaras gravitacionais (Figura 1) são sedimentadores cujo objetivo é retirar poeiras de correntes gasosas. Sua utilização ocorre principalmente em indústrias que possuem gases muito sujos em termos de material particulado.

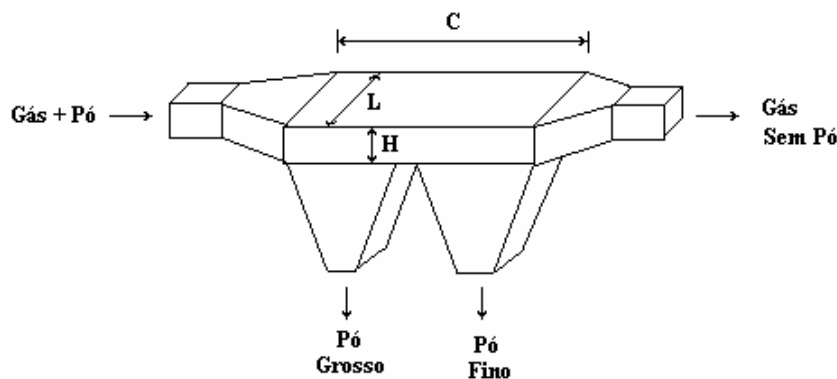


Figura 1: Câmara gravitacional para coleta e classificação de partículas

A câmara de sedimentação é um método baseado na sedimentação livre, considerando o próprio peso e a velocidade terminal das partículas.

Estas câmaras apresentam área transversal suficientemente grande através da qual, gases passam com baixa velocidade, dando tempo suficiente para que partículas possam sedimentar no fundo ou na base da câmara.

O funcionamento da câmara pode ser melhorado incluindo-se chicanas ou telas, permitindo o aumento da velocidade. O sólido é recolhido em funis do fundo da câmara.

A velocidade do gás na câmara deve ser pequena para evitar a redispersão das partículas deve ficar na faixa de 0,02-0,6 m/s até 1,5-3,0 m / s.

- Dimensionamento

Se não houver turbulência, as partículas decantarão com velocidade v_t .

O tempo de queda das partículas (t) em função da velocidade terminal (v_t) é dado por:

$$t = \frac{H}{v_t}$$

Se Q é a vazão volumétrica do gás, tem-se que a velocidade média na horizontal (\bar{v}) pode ser descrita por:

$$\bar{v} = \frac{Q}{LH}$$

Considere que a partícula entre na câmara a uma distância h acima do fundo ou da base da câmara. O tempo que uma porção de gás, que entra com a partícula, irá gastar para atravessar a câmara na direção do escoamento é o tempo necessário para partícula chegar ao fundo, o qual é calculado da seguinte forma:

$$t_{res} = \frac{C}{\bar{v}}$$

Se: $t_{res} > t \Rightarrow$ a partícula fica retida

Se $t_{res} < t \Rightarrow$ a partícula é arrastada pelo gás para fora da câmara de poeira.

A dimensão C da câmara é determinada igualando-se o tempo de queda da partícula com o tempo de residência.

$$C = H \cdot \frac{\bar{v}}{v_t}$$

A relação de dimensão L/H é definida pelo projetista, sendo usualmente igual a 1.

Considerando que todas as partículas têm mesmo tamanho (e densidade) e estão uniformemente distribuídas na seção transversal de entrada da câmara e não interagem umas com as outras, poderemos dizer que a eficiência de coleta fracional (η) será igual a:

$$\eta = \frac{C \cdot v_t}{H \cdot \bar{v}}$$

Utilizando a expressão de Stokes para velocidade terminal, temos:

$$\eta = \frac{C}{H \cdot \bar{V}} \frac{g \cdot (\rho_{part} - \rho_{gás})}{18\mu} D_p^2$$

e desprezando a densidade do gás, a equação torna-se:

$$\eta = \frac{C}{H \cdot \bar{v}} \frac{g \cdot \rho_{part}}{18\mu} D_p^2$$

Exercícios

- 1) Projetar uma câmara gravitacional para tratar 10000 m³ / h de ar contendo partículas com diâmetro de 50 μm (ρ_s = 2.65 g / cm³). Considere uma velocidade do ar na câmara de 0,4 m/s.
- 2) Calcular a eficiência de coleta de partículas em uma câmara de poeira com as seguintes dimensões: C = 10m e H = 2m, com velocidade de ar de $\bar{v}=1\text{m/s}$. Considere que o ar tem $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$ e sua viscosidade é $1,8 \times 10^{-5} \text{ kg/(m s)}$. Este ar transporta partículas com densidade 2000 kg/m³ e tamanhos: 1, 10, 20, 50, 80, 100 e 120 μm.

2.1.2 Ciclones

Os ciclones são equipamentos utilizados para a coleta de partículas (limpeza de gases) e do ponto de vista de investimento e operação é o meio mais barato para coleta de partículas. A Figura 2 apresenta um ciclone típico mostrando o padrão de fluxo no equipamento.

No ciclone, o gás carregado de pó entra tangencialmente na câmara cilíndrica ou cônica em alta velocidade (6-20 m/s), por um ou mais de um ponto e sai por uma abertura central. Dentro do ciclone as partículas experimentam na direção radial dois tipos de forças opostas: a força centrífuga e de arraste. A força centrífuga tende a empurrar partículas para as paredes do ciclone enquanto a força de arraste age no sentido de carregar as partículas junto com o gás na saída do ciclone. Essas forças são dependentes do raio de rotação e do tamanho das partículas; partículas com tamanhos diferentes giram em raios diferentes.

Nas condições de operação comumente empregadas, a força centrífuga de separação pode ir de 5 (nos ciclones de diâmetro muito grande e pequena resistência) a 2.500 vezes a força gravitacional (em unidades muito pequenas, de alta resistência).

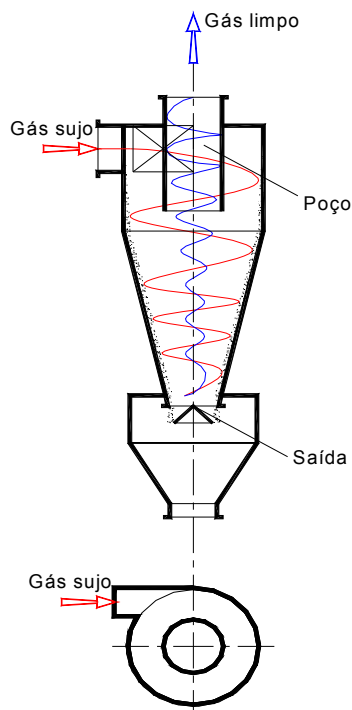


Figura 2 – Padrão de fluxo em um ciclone

O ciclone é de fácil construção, possui baixo custo de material e de operação e uma ampla faixa de condições de operação.

Os ciclones são normalmente empregados:

- na classificação de tamanhos de partículas;
- em operações onde a coleta extremamente alta de partículas não é crítica;
- na coleta de partículas grossas;
- para atuar como aparelhos que fazem uma limpeza prévia em linhas que tenham coletores que retêm a maioria das partículas finas.

Uma outra aplicação de ciclones é no controle de poluição. Atua também coletor de produtos após secadores de leito fluidizado, pneumáticos ou "spray dryer".

O uso de ciclones é favorável para aplicações onde o pó coletado possui um alto valor agregado; como é o caso de indústrias alimentícias onde o produto desejado é um pó e as contaminações com pequenas fibras de um filtro de tecido não podem ser toleradas.

Os ciclones podem ser utilizados em configurações em série ou paralelo. As configurações em série são recomendadas quando: i) a distribuição de partículas é muito ampla, com partículas de tamanhos

menores que 10 ou 15 μm até com partículas muito grandes e abrasivas (partículas menores removidas pelo ciclone de alta velocidade e partículas maiores removidas pelo ciclone de baixa velocidade) e ii) as partículas são finas, mas ocorre floculação em um equipamento precedente ou no próprio ciclone.

As configurações em paralelo são indicadas se a vazão de gás a tratar for muito grande, respeitando a queda de pressão.

Usualmente projeta-se uma unidade, mas se a eficiência requerida for alta, deve-se adotar ciclones em paralelo.

Geralmente, as dimensões geométricas dos ciclones são colocadas em formas de razões entre uma das dimensões (B, Z, L, H, D_s e J) e o diâmetro da parte cilíndrica do ciclone D_c , como mostra a Figura 3.

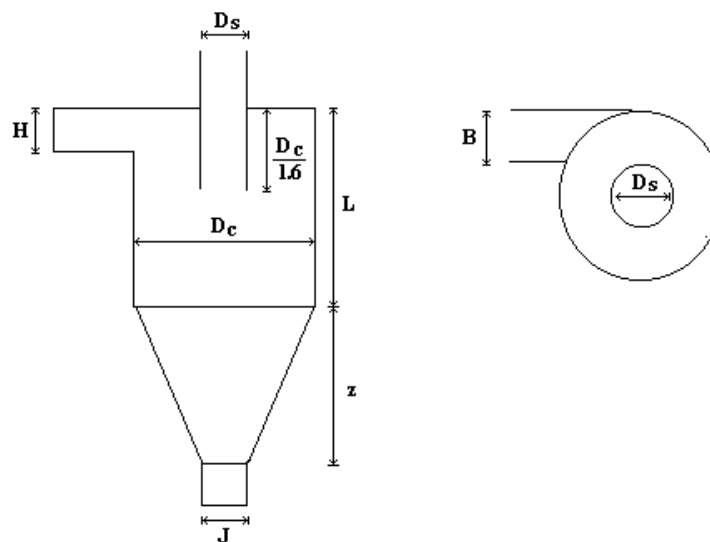


Figura 3: Relação de dimensões de um ciclone convencional

$$L = 2D_c ; z = 2D_c ; D_s = D_c / 2 ; J = D_c / 4 ; B = D_c / 4 ; H = D_c / 2$$

Quando o gás entra no ciclone, a sua velocidade sofre uma distribuição, de modo que a componente tangencial da velocidade (v_{tR}) aumenta com a diminuição do raio, de acordo com a equação:

$$v_{tR} = \frac{bD_p^2(\rho_p - \rho)}{18\mu \cdot r^n}$$

Onde b e n são constantes empíricas.

A queda de pressão num ciclone e também a perda de carga são expressas de forma mais conveniente em termos da pressão cinética nas vizinhanças da área de entrada do ciclone. As perdas estão associadas aos seguintes fatores:

- Atrito no duto de entrada;
- Contração / expansão na entrada;
- Atrito nas paredes;
- Perdas cinéticas no ciclone;
- Perdas na entrada do tudo de saída;
- Perdas de pressão estática entre a entrada e a saída.

- *Eficiência de Captação.*

Diversos autores investigaram a duração do movimento das partículas no ciclone e fizeram uma previsão teórica do desempenho do equipamento.

Várias expressões teóricas e semi-empíricas têm sido propostas para prever a eficiência de captação de um ciclone, mas ainda os métodos experimentais são de maior confiança.

Na prática, o que se especifica no projeto é a eficiência de separação desejada para partículas de um determinado tamanho. O diâmetro de corte de um ciclone depende das propriedades do sólido, das propriedades do gás, do tamanho do ciclone e das condições operacionais.

Em uma curva típica de eficiência para ciclones (Figura 4) observa-se que a eficiência aumenta rapidamente com o aumento do tamanho da partícula. O diâmetro de corte ($D' = D_{\text{corte}}$) especificado é o diâmetro no qual a metade da massa das partículas alimentadas é retida.

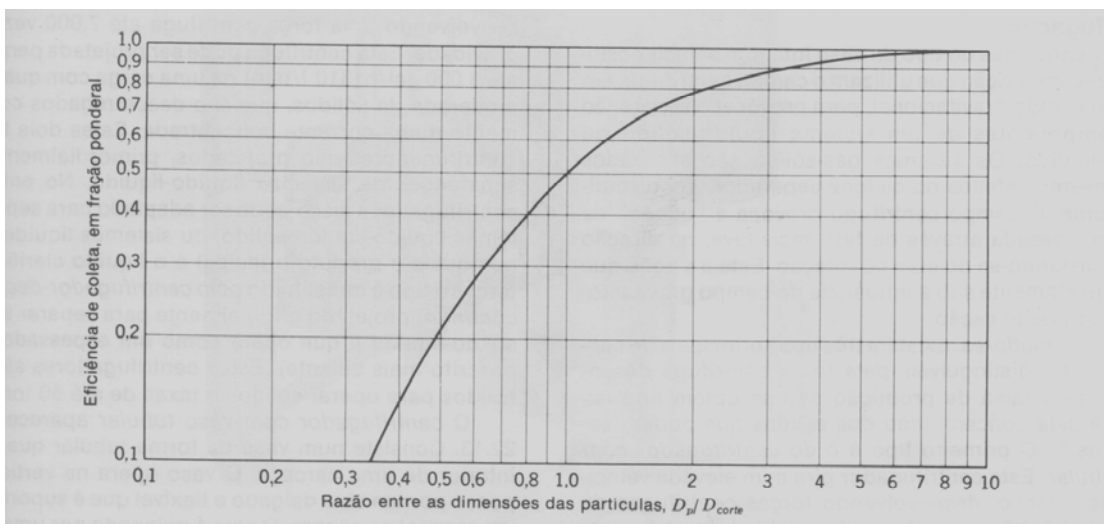


Figura 4 - Eficiência de coleta de um ciclone

Para dimensionar o ciclone podemos utilizar a relação empírica de Rosin, Rammler e Intelmann, na qual o diâmetro de corte é calculado pela relação:

$$D' = \sqrt{\frac{9 \cdot \mu \cdot B}{2 \cdot \pi \cdot N \cdot v \cdot (\rho_p - \rho)}}$$

B = Largura do duto de entrada do ciclone;

N = Número de voltas feitas pelo gás no interior do ciclone (igual a 5);

v = Velocidade de entrada do gás no ciclone baseada na área B.H
(recomenda-se usar 15 m / s);

μ = Viscosidade do gás;

ρ = Densidade do gás;

ρ_p = Densidade do sólido.

Para o dimensionamento do ciclone é considerada a relação entre o diâmetro igual a quatro vezes a largura da entrada ($B=D_c/4$) e um número de voltas da partícula (N) igual a 5.

Da equação proposta por Rosin e colaboradores, temos :

$$B = \frac{D_c}{4} = \frac{2 \cdot \pi \cdot N \cdot v \cdot (\rho_p - \rho) \cdot D^2}{9 \cdot \mu}$$

Se N = 5, podemos escrever:

$$D_c = 13,96 \cdot \frac{v \cdot (\rho_p - \rho) \cdot D^2}{\mu}$$

Depois de estabelecido o percentual da captação, para as partículas de diâmetro D especificado da curva de eficiência, tira-se o valor D/D' . A partir deste valor determina-se D' e pode-se calcular o diâmetro do ciclone (D_c). Sabendo-se D_c as demais dimensões podem ser especificadas pelas relações: $L = 2D_c$; $z = 2D_c$; $D_s = D_c / 2$; $J = D_c/4$; $B = D_c/4$ e $H = D_c/2$

A altura do duto na entrada pode ser calculada pela fórmula:

$$H = \frac{Q}{B \cdot v}$$

Onde Q = Vazão de projeto e v = Velocidade admitida no projeto.

Para que o dimensionamento esteja correto é considerada a relação entre as dimensões H e D_c . Caso H for diferente de $D_c/2$ será necessário reprojeter o ciclone.

Na figura 5 é mostrado um sistema para recuperação de partículas em um processo de produção de leite em pó.

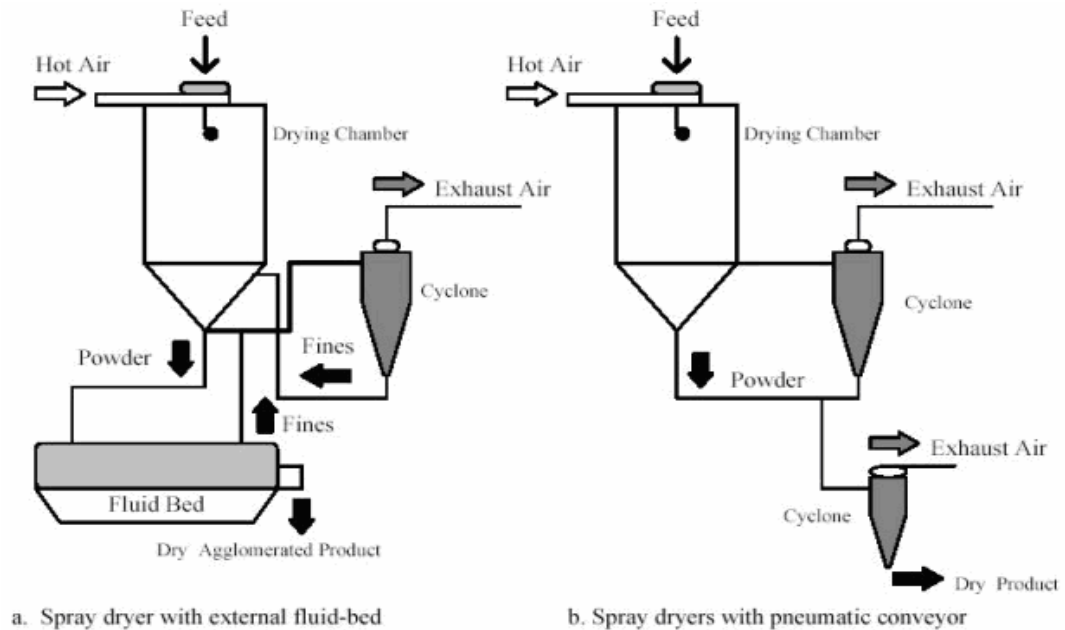


Figura 5: Sistemas de recuperação de partículas utilizando ciclones

Exemplo 3: Uma corrente de ar a 50 °C e 1 atm arrasta partículas sólidas de $\rho_s = 1.2 \text{ g/cm}^3$ à vazão de $180 \text{ m}^3 / \text{min}$. Deseja-se projetar um ciclone para coletar 87 % das partículas de $50 \text{ }\mu\text{m}$ em suspensão.

Solução :

Para 87 % de coleta temos que $D/D' = 3$

$$D' = 50 / 3 = 16.67 \text{ }\mu\text{m} = 16.67 \times 10^{-4} \text{ cm}$$

Cálculo de D_c e outros parâmetros:

$$D_c = 13.96 \cdot v \cdot (\rho_p - \rho) \cdot D'^2 / \mu$$

Supor : $v = 10 \text{ m / s} = 1000 \text{ cm / s}$

$$\rho_s = 1.2 \text{ g / cm}^3$$

$$\rho = \frac{P \cdot \overline{PM}}{R \cdot T} = \frac{1 \cdot 29}{82,05 \cdot 323} = 0,001094 \text{ g / cm}^3$$

$$\mu = 0,0196 \times 10^{-2} \text{ cp} = 1,96 \times 10^{-4} \text{ g / cms}$$

$$D_c = 13,96 \cdot \frac{1000 \cdot (1,2 - 1,094 \times 10^{-3}) \cdot (16,67 \times 10^{-4})^2}{1,96 \times 10^{-4}} = 237,3 \text{ cm}$$

Pode-se determinar as outras dimensões:

$$L_c = z_c = 2D_c = 474,6 \text{ cm}$$

$$D_s = D_c/2 = 118,65 \text{ cm}$$

$$J = D_c/4 = 59,3 \text{ cm}$$

$$B = D_c/4 = 59,3 \text{ cm}$$

Altura do duto de entrada :

$$Q = 180 \text{ m}^3 / \text{min} = 3 \times 10^6 \text{ cm}^3 / \text{s}$$

$$H = \frac{Q}{B \cdot v} = \frac{3 \times 10^6}{59,3 \times 1000} = 50,59 \text{ cm}$$

Como $H \neq D_c/2$ é necessário reprojeter o ciclone

Novo cálculo de D_c e das outras dimensões do ciclone:

$$\text{Supor : } v = 7.5 \text{ m / s} = 750 \text{ cm / s}$$

$$D_c = 178 \text{ cm}$$

$$L_c = z_c = 356 \text{ cm}$$

$$D_s = D_c / 2 = 89 \text{ cm}$$

$$J = B = D_c/4 = 44,5 \text{ cm}$$

Altura do duto de entrada :

$$H = \frac{3 \times 10^6}{44.5 \times 750} = 89,9 \text{ cm}$$

Como $H \approx D_c / 2$, as dimensões atendem as exigências do projeto.

Exemplo 4: Um ciclone tem 90cm de diâmetro e 3,6m de altura. A partir dos dados abaixo, calcule o diâmetro de corte de partículas para este ciclone. Considerando que as partículas a serem coletadas possuem um diâmetro de 25 μm qual é a eficiência de coleta do equipamento.

$$D_s = 45 \text{ cm};$$

$$H = 45 \text{ cm};$$

$$B = 21 \text{ cm};$$

$$Q = 1.4 \text{ m}^3/\text{s} \text{ de ar};$$

$$\rho_s = 2.5 \text{ g / cm}^3;$$

$$\mu = 1.96 \times 10^{-4} \text{ g / cm.s};$$

$$\rho = 1.2 \times 10^{-3} \text{ g / cm}^3.$$

Solução :

$$v = \frac{Q}{HB} = \frac{1,4 \times 10^6}{21 \times 45} = 1481 \text{ cm/s}$$

Substituindo os valores na equação

$$90 = 13,96 \cdot \frac{1481,48 \cdot (2,5 - 1,2 \times 10^{-3}) \cdot (D')^2}{1,96 \times 10^{-4}}$$

temos $D' = 5,8 \times 10^{-4} \text{ cm}$

3. Referências consultadas

Geankoplis, J. G. Transport Process and Unit Operations, 1993.

Gomide, R. Operações unitárias, 1980.

Mc Cabe. Unit operations, 1985.

Vega-Mercado, Humberto, SEPARATION, disponível em www.eolss.net