

10– CICLONES

ENTRE OS EQUIPAMENTOS DE SEPARAÇÃO DE PARTÍCULAS SÓLIDAS OU DE GOTÍCULAS LÍQUIDAS, DO TIPO CENTRÍFUGO, O MAIS AMPLAMENTE USADO É O CICLONE.

10.1 VANTAGENS DO CICLONE

- a) Baixo custo.
- b) Não tem peças móveis (baixo custo de manutenção).
- c) Operam a seco ou a úmido tanto a baixas temperaturas e pressões como a temperaturas até 1.000°C e pressões altas como 500 atm.
- d) A eficiência é muito boa para partículas maiores que 10 microns.
- e) Tem melhor desempenho que os separadores do tipo câmaras gravitacionais e inerciais ou de impacto.

10.2 DESVANTAGENS DO CICLONE

- a) Apresentam menor eficiência na separação de partículas menores que 5 a 10 μ .
- b) Para partículas de tamanhos como esses, o ciclone teria de ser muito pequeno o que acarretaria alta perda de carga.
- c) Para partículas maiores que 200 μ são menos econômicos que as câmaras gravitacionais
- d) O custo de operação é maior devido a perda de carga que acrescenta.

IMPORTANTE:

1000 microns = 1 mm

100 microns = 0,1 mm

10 microns = 0,01 mm

10.3 APLICAÇÃO INDUSTRIAL:

RECUPERAR MATERIAL ARRASTADO

EFETUAR LIMPEZA DE GASES E VAPORES DE PROCESSO

EVITAR POLUIÇÃO

RAZÕES DE SEGURANÇA

O autor pode fazer uma comparação técnica-econômica entre os ciclones e outros meios de separação de partículas.

10.4 FUNCIONAMENTO:

NO CASO DOS SEPARADORES CENTRÍFUGOS COMO O CICLONE, AS PARTÍCULAS DE SÓLIDO SÃO SEPARADAS DA CORRENTE GASOSA SOB A AÇÃO DE UMA FORÇA CENTRÍFUGA QUE PODE VARIAR DE 5 A 2500 VEZES O PESO DA PARTICULA, O QUE PERMITE CAPTAR PARTÍCULAS MUITO PEQUENAS.

O GÁS CONTENDO PÓ É INTRODUZIDO TANGENCIALMENTE, PERTO DO TOPO, A VELOCIDADE (de 6 A 20m/s) PELO TUBO DE ENTRADA, QUE TEM GERALMENTE A FORMA RETANGULAR, DE ALTURA (H) E LARGURA (B).

APÓS ALGUMAS VOLTAS NO INTERIOR DO CORPO CILÍNDRICO DE DIÂMETRO (D_c) E COMPRIMENTO (L), ENTÃO:

A força centrífuga desenvolvida no vortex envia as partículas radialmente em direção as paredes do vaso (ciclone). Ao atingirem as paredes as partículas escorregam para baixo, onde são recolhidas na parte cônica do ciclone. O gás limpo sai pelo tubo vertical superior de diâmetro (D_s), deixando no ciclone o pó que foi recolhido na parte cônica (Z) e sai pelo tubo de diâmetro (J).

Existem relações tradicionais entre essas grandezas acima enumeradas e o diâmetro (D_c). Essas relações foram desenvolvidas por Stairmand para dois tipos de ciclones:

- a) Ciclones de alta eficiência
- b) Ciclones para altos fluxos de gás

D_c = diâmetro da parte cilíndrica do ciclone

D_s = diâmetro do tubo de saída de gases

J = diâmetro do tubo de saída dos sólidos

B = largura do duto de entrada no ciclone

H = altura do duto de entrada no ciclone

L = comprimento da parte cilíndrica do ciclone

Z = comprimento da parte cônica do ciclone

S = trecho do duto de saída para evitar curto circuito

Grandeza	Ciclone Alta Eficiência	Ciclone Alta Vazão
D_s	$0,5.D_c$	$0,75.D_c$
J	$0,375.D_c$	$0,375.D_c$
B	$0,2.D_c$	$0,375.D_c$
H	$0,5.D_c$	$0,75.D_c$
L	$1,5.D_c$	$1,5.D_c$

Z	2,5.Dc	2,5.Dc
S	0,5.Dc	0,875.Dc

Os principais procedimentos para projetos de ciclones foram desenvolvidos por Constantinescu (1984), Strauss (1975), Koch and Licht (1977) e Stairmand (1951).

GERALMENTE OS CICLONES TÊM DIÂMETROS DE 3 A 6 VEZES O DIÂMETRO DO DUTO DE ENTRADA E COLETAM BEM PARTÍCULAS DE DIÂMETROS MAIORES QUE 50 MICRONS.

NESSE CASO SÃO OS CHAMADOS DE PRIMEIRO ESTÁGIO, CAUSAM MENOR PERDA DE CARGA E TEM EFICIÊNCIA DE 80 A 90%.

OS CICLONES DE PEQUENO DIÂMETRO CONSEGUEM CAPTAR PARTÍCULAS MENORES, SENDO CLASSIFICADOS COMO DE SEGUNDO ESTÁGIO.

SUA EFICIÊNCIA DEPENDE DO TAMANHO DA PARTÍCULA E DO DIÂMETRO DO CORPO CILÍNDRICO.

10.5 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

A RAZÃO ENTRE A FORÇA CENTRÍFUGA A UM DETERMINADO RAIOS, E A FORÇA GRAVITACIONAL É CHAMADA DE FATOR DE SEPARAÇÃO:

Força centrífuga/Força gravitacional pode ser:

$$(m.v^2/r)/(m.g) = (v^2)/(g.r)$$

ASSIM, PARA UM CICLONE DE 30 cm DE DIÂMETRO COM VELOCIDADE TANGENCIAL DE 15 m/s PRÓXIMA A PAREDE, A RAZÃO ENTRE AS FORÇAS CENTRÍFUGA E GRAVITACIONAL É 153.

UM CICLONE DE GRANDE DIÂMETRO TEM UM FATOR DE SEPARAÇÃO MUITO MENOR, PARA A MESMA VELOCIDADE.

UM CICLONE DE PEQUENO DIÂMETRO PODE TER UM FATOR DE SEPARAÇÃO TÃO ALTO COMO 2500.

IMPORTANTE:

Velocidades de entrada no ciclone maiores que 20 m/s, normalmente são consideradas impraticáveis devido à abrasão provocada e a alta perda de carga.

Nas velocidades tangenciais elevadas, a força centrífuga é maior que a força gravitacional e os ciclones efetuam uma separação rápida e mais eficiente que as câmaras de poeira.

Para conseguir alta eficiência de separação a velocidade de entrada do gás deve ser a maior possível SEM CAUSAR A REENTRADA DAS PARTÍCULAS AO FLUXO DE GÁS E SEM EXCEDER A DENOMINADA “VELOCIDADE DE SALTO”, que é a velocidade mínima do gás que evita a decantação das partículas sólidas do fluxo de gás que as arrasta (Koch y Licht, 1977).

Kalen & Zens (1974) demonstraram que a MÁXIMA EFICIÊNCIA DO CICLONE corresponde a um valor da relação entre:

$$(\text{Velocidade de entrada do gás})/(\text{Velocidade de salto}) = 1,25$$

A reentrada das partículas ao fluxo de gás se dá quando a relação atinge o valor de 1,36.

PARA GRANDES FLUXOS DE GASES, PODEM SER AGRUPADOS VÁRIOS CICLONES DE PEQUENO DIÂMETRO, EM PARALELO, COLOCADOS NUM DISTRIBUIDOR COMUM, PARA ALIMENTAÇÃO E UM SILO COMUM PARA COLETAR AS PARTÍCULAS SÓLIDAS.

NO CICLONE O GÁS COM PARTICULAS SÓLIDAS PERCORRE DUAS TRAJETÓRIAS EM ESPIRAL:

UMA MAIS EXTERNA JUNTO ÀS PAREDES E DESCENDENTE.

OUTRA MAIS INTERNA E ASCENDENTE.

ENTÃO PODEMOS CONCLUIR QUE:

PARA UM DADO DIÂMETRO DE PARTÍCULA, A VELOCIDADE AUMENTA À MEDIDA QUE O RAIO DIMINUI, TORNANDO-SE MÁXIMA NA ESPIRAL INTERNA.

AS MENORES PARTÍCULAS QUE O CICLONE CONSEGUIE RETER SÃO SEPARADAS DO GÁS NA ESPIRAL INTERNA.

PARTÍCULAS MENORES DO QUE DETERMINADO DIÂMETRO NÃO TÊM TEMPO DE ATINGIR A PAREDE E SÃO RECAPTADAS PELO GÁS, SAINDO PELO TUBO SUPERIOR DE SAÍDA DO GÁS LIMPO.

A entrada de gás mais utilizada é a retangular por proporcionar maior área num espaço mais reduzido.

10.6 EFICIÊNCIA NA RETENÇÃO DE PARTÍCULAS SÓLIDAS

PARA PREVER A EFICIÊNCIA DE RETENÇÃO DE UM CICLONE, OS MÉTODOS EXPERIMENTAIS AINDA SÃO OS DE MAIOR CONFIANÇA.

GERALMENTE PERMITEM CALCULAR UM DIÂMETRO DE CORTE D' , QUE É O TAMANHO DA PARTÍCULA CUJA EFICIÊNCIA DE COLETA É DE 50% NO CICLONE CONSIDERADO.

PARA UM CICLONE CUJAS PROPORÇÕES DE SUAS MEDIDAS SÃO AS PROPORÇÕES JÁ APRESENTADAS, A EFICIÊNCIA DE RETENÇÃO DE UMA PARTÍCULA DE DIÂMETRO D PODE SER OBTIDA EM FUNÇÃO DA RELAÇÃO D/D' .

NA PRÁTICA O QUE SE ESPECIFICA NO PROJETO É A EFICIÊNCIA DE SEPARAÇÃO DESEJADA PARA PARTÍCULAS DE UM DIÂMETRO D .

FIXANDO O VALOR DA EFICIÊNCIA NO GRÁFICO ESPECÍFICO (ZENS, 1982), TIRA-SE O VALOR DA RELAÇÃO D/D' E CONHECENDO D OBTÉM-SE D', QUE É O PARÂMETRO USADO PARA DIMENSIONAR O CICLONE.

O DIÂMETRO DE CORTE (D') (cm) PODE SER CALCULADO PELA EXPRESSÃO DE ROSIN, RAMMLER E INTELTMANN:

$$D' = \{(9 \cdot \mu \cdot B) / [6,2832 \cdot N \cdot v \cdot (\rho_s - \rho_f)]\}^{1/2}$$

B = largura do duto de entrada do ciclone (cm)

μ = viscosidade do gás (poise)

N = n° de voltas feitas pelo gás no interior do ciclone (iguais a 5 para os ciclones de proporções já apresentadas).

v = velocidade de entrada do gás no ciclone (cm/s) baseada na área BH (recomenda-se adotar 15 m/s).

ρ_s = massa específica das partículas sólidas (g/cm³)

ρ_f = massa específica do gás (g/cm³)

O gráfico está na página 1067, Capítulo 29 do livro Unit Operations of Chemical Engineering de Warren L. McCabe, Julian C Smith e Peter Harriott, sétima edição.

O DIÂMETRO DA MENOR PARTÍCULA QUE É COMPLETAMENTE COLETADA PELO CICLONE É CALCULADO PELA SEGUINTE EXPRESSÃO:

$$D'_{\min} = \{(9 \cdot \mu \cdot B) / [3,1416 \cdot N \cdot v \cdot (\rho_s - \rho_f)]\}^{1/2}$$

ONDE SE OBSERVA QUE: $D'_{\min} = D' / (2)^{1/2}$

10.7 DIMENSIONAMENTO

O dimensionamento pode ser feito por diversos métodos e autores.

Apresentamos os seguintes como mais simples e considerados de bom desempenho industrial:

- a) Fixando a eficiência desejada e o diâmetro de corte mostrado no item 10.6. Depois usando as equações apropriadas, que apresentaremos, pode-se dimensionar o ciclone desejado.
- b) Usando o fator de escala de Stairmand, para condição de alta eficiência OU para a condição de alta vazão.
- c) Método de Constantinescu (1984).

MÉTODO (a)

AS EQUAÇÕES SERVEM PARA DIMENSIONAR OS CICLONES. COM

$$B = D_c/4 \text{ E } N=5,$$

UTILIZANDO v EM (m/s) PARA VALORES ESCOLHIDOS ENTRE 6 E 20 m/s, μ EM (cP), ρ_s e ρ_f EM (g/cm³), D' EM (microns), RESULTARÁ EM D_c = diâmetro da parte cilíndrica do ciclone (cm):

$$D_c = (1,396/1000) \times [v \cdot (\rho_s - \rho_f) \cdot (D')^2] / \mu$$

A ALTURA (H) DO DUTO DE ENTRADA É CALCULADA A PARTIR DA VELOCIDADE E DA VAZÃO DE PROJETO Q (m³/s)

$$H = (Q)/(B \cdot v)$$

SE H RESULTAR MUITO DIFERENTE DE $D_c/2$ RECOMENDA-SE REPROJETAR OU UTILIZAR CICLONES EM PARALELO.

MÉTODO (b)

Como visto em 10.4, Stairmand desenvolveu dois padrões de projeto de ciclones, um para alta eficiência e outro para altas vazões, conforme mostrados nas tabelas de dimensões apresentadas.

Estas curvas podem ser transformadas para outras condições de operação que conduzirão a outras dimensões de ciclones, seguindo a equação de escala abaixo, para uma dada eficiência de separação:

$$D_2 = D_1 \times [(D_{C2}/D_{C1})^3 \times (Q_1/Q_2) \times (\Delta\rho_1/\Delta\rho_2) \times (\mu_2/\mu_1)]^{1/2}$$

D_2 = diâmetro médio da partícula separada pelo ciclone projetado

D_1 = diâmetro médio da partícula separada pelo ciclone padrão

D_{C2} = diâmetro da parte cilíndrica do ciclone projetado

D_{C1} = diâmetro da parte cilíndrica do ciclone padrão = 8" = 203 mm

Q_1 = vazão padrão para projetos de alta eficiência = 223 m³/h e para projetos de alta vazão = 669 m³/h

Q_2 = vazão do ciclone que projetado

$\Delta\rho_1$ = diferença de massa específica (sólido – fluido) na condição padrão = 2.000 kg/m³

$\Delta\rho_2$ = diferença de massa específica no caso do projeto sendo feito

μ_2 = viscosidade do fluido do projeto sendo feito

μ_1 = viscosidade do fluido de teste (ar a 20°C e 1 atm) = 0,018 cp

O procedimento para um projeto é o seguinte:

- a) Dependendo do desempenho mais adequado, escolher entre ciclone de alta eficiência ou ciclone de alta vazão.
- b) Obtenha uma estimativa de distribuição de tamanho de partícula do sólido, que está presente na corrente a ser tratada.

- c) Estime o número de ciclones necessários em paralelo.
- d) Calcule o diâmetro da parte cilíndrica do ciclone com base numa velocidade de 15 m/s (50 ft/s) e encontre as outras dimensões do ciclone.
- e) Calcule o fator de escala de Stairmand.
- f) Calcule então a performance do ciclone e a eficiência geral (recuperação de sólidos). Caso não seja satisfatória, recalcule para um diâmetro menor.
- g) Calcule a perda de carga e calcule o soprador adequado.

MÉTODO (c)

O cálculo do diâmetro da parte cilíndrica do ciclone é feito pela equação abaixo:

$$D_c = \{[(1,085/f_3^4) + (0,32/f_1^2 \cdot f_2^2)] \times (\rho_F \cdot Q^2)/(g \cdot \Delta p)\}^{1/4}.$$

A massa específica do gás deve ser usada em (lbm/ft³), a vazão volumétrica do gás em (ft³/s), $g = 32,2 \text{ ft/s}^2$ e a perda de carga (Δp) em polegadas de água.

Os fatores ótimos escolhidos por Stairmand são:

$$f_1 = 0,5$$

$$f_2 = 0,2$$

$$f_3 = 0,5$$

A perda de carga pode ser fixada, como um valor limite, pelo menos inicialmente.

10.8 DADOS TÍPICOS DE CICLONES COMERCIAIS

DIÂMETRO EM (in)	VEL. ENTRADA (ft/s)	PERDA (polog. água)
14	59,3	6,4
32	60,0	6,7
72	59,3	6,6

10.9 PERDA DE CARGA

OS CICLONES CAUSAM PERDAS DE CARGA RELATIVAMENTE GRANDES E QUE AUMENTAM À MEDIDA QUE DIMINUI O DIÂMETRO.

O CÁLCULO DA PERDA DE CARGA É IMPORTANTE PARA PREVER E MINIMIZAR O CONSUMO DE ENERGIA.

AS CAUSAS DA PERDA DE CARGA NOS CICLONES SÃO:

ATRITO NO DUTO DE ENTRADA

CONTRAÇÃO E EXPANSÃO NA ENTRADA

ATRITO NAS PAREDES

PERDAS CINÉTICAS NO CICLONE

PERDA NA ENTRADA DO DUTO DE SAÍDA

PERDA DE PRESSÃO ENTRE A ENTRADA E A SAÍDA

A PERDA DE CARGA NOS CICLONES PODE VARIAR DE 1 A 20 ALTURAS DE VELOCIDADE NA ENTRADA.

OS AUTORES SHEPHERD E LAPPLE, E TAMBÉM TER LINDEN, CONSIDERAM QUE A PERDA DE ENERGIA CINÉTICA DOS GASES NO CICLONE SUPERA AS DEMAIS PERDAS E SÃO AS ÚNICAS QUE DEVEM SER CONSIDERADAS.

PERRY, MANUAL DO ENGENHEIRO QUÍMICO, CALCULA A PERDA DE CARGA EM ALTURAS DE VELOCIDADE DO GÁS NO DUTO DE ENTRADA, INDICANDO VALORES DE 1 A 20.

$$h = 51,18 \times \rho \times v^2$$

h = mm de coluna de água

ρ = massa específica do gás (g/cm^3)

v = velocidade de entrada (m/s)

Stairmand (1949) desenvolveu a seguinte equação empírica:

$$\Delta p = (\rho_F)/(203) \times \{v_1^2[1 + 2\Phi^2 (2r_t/r_e - 1)] + 2v_2^2\}$$

Δp = perda de carga no ciclone (milibar)

v_1 = velocidade no duto de entrada (m/s)

v_2 = velocidade do duto de saída do gás (m/s)

ρ_F = massa específica do fluido (kg/m^3)

r_t = raio do círculo que a linha de centro da entrada é tangencial (m)

r_e = raio do tubo de saída ($D_s/2$) (m)

Φ = fator desenvolvido por Stairmand retirado da figura anexa

Ψ = outro parâmetro dessa figura, definido por Stairmand

$$\Psi = f_c \times (A_s/A)$$

f_c = fator de atrito tomado para gases no valor de 0,005

A_s = área do ciclone exposta ao “spinning” do fluido (m^2). Para projeto pode ser tomada como a área lateral de um cilindro de mesmo diâmetro do da parte cilíndrica do ciclone (D_c) e comprimento igual a soma dos comprimentos da parte cilíndrica e da parte cônica ($L + Z$).

A = área do duto de entrada ($B \times H$) (m^2).

EXEMPLOS NUMÉRICOS DE CÁLCULOS SÃO FEITOS EM SALA DE AULA.

IMPORTANTE:

Esta equação de Stairmand considera a perda de carga só do gás, como se a corrente não tivesse sólido. Isto leva a valores menores de perda de carga.

Dependendo da quantidade e tipo de sólidos alguns autores falam em estimativas de até 30% abaixo da realidade. Por isso: Recomenda-se a equação apresentada acima (Perry et al). Ver Yang (1999) e Zenz (2001).

Os HIDROCICLONES podem operar até $17 \text{ m}^3/\text{min}$ e remover partículas na faixa de 300 a 5 microns, de suspensões diluídas. Um caso real é um hidrociclone de 0,50 m de diâmetro e capacidade de $3,8 \text{ m}^3/\text{min}$ com perda de carga de 0,35 atm, cortando partículas entre 50 e 150 microns.