

## 10 – CICLONES

---

Também chamados de separadores centrífugos, os ciclones são muito utilizados para o controle de particulado (partículas com diâmetro acima de 10  $\mu\text{m}$ ). Em geral, são mais eficientes que as câmaras gravitacionais, mas também podem ser instalados como pré-coletores de dispositivos mais eficientes ou utilizados para a proteção de equipamentos, como por exemplo, para se evitar a abrasão causada pelo pó em sistemas de exaustão.

Apresentam baixo custo de instalação e manutenção, não possuem partes móveis, podem ser confeccionados em diversos materiais e ocupam espaço reduzido. Podem se apresentar em muitas formas e tamanhos, mas o princípio básico da separação é sempre o mesmo: atuação da força centrífuga sobre as partículas.

Como na câmara de sedimentação, a força gravitacional atua sobre a partícula, porém, no ciclone, devido à sua configuração, uma "colaboração" adicional da força centrífuga ajuda na remoção das partículas da corrente gasosa.

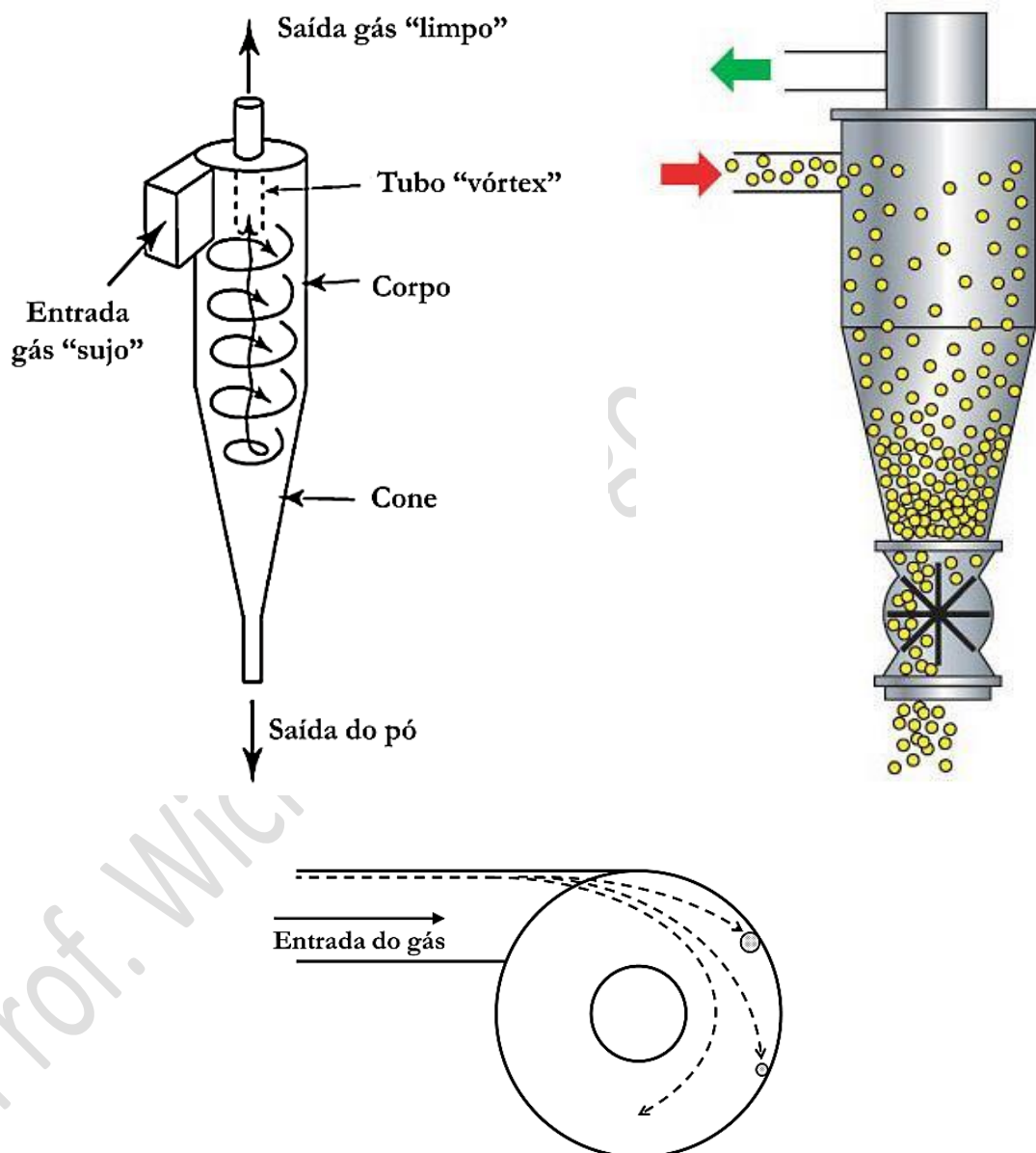
Ao entrar no ciclone, a corrente gasosa é forçada a girar no interior do equipamento. As partículas maiores que não acompanham o movimento do gás colidem com as paredes do ciclone e são direcionadas para a parte inferior do equipamento, pela ação da força gravitacional, onde são coletadas. As partículas menores giram com o gás e adquirem velocidade angular. Em virtude da rotação em torno do eixo do equipamento e de sua massa, pela ação da força centrífuga, elas são direcionadas para as paredes do equipamento e, posteriormente, seguem o mesmo caminho das partículas maiores.

O material particulado "capturado" sai pela parte inferior do ciclone e o gás "limpo" sai pela parte superior do equipamento.

Pode ocorrer ressuspensão das partículas coletadas no interior do ciclone, com seu retorno à corrente gasosa e

saída do equipamento juntamente com o gás "limpo". Neste caso, deve-se reduzir a velocidade de entrada do gás no equipamento.

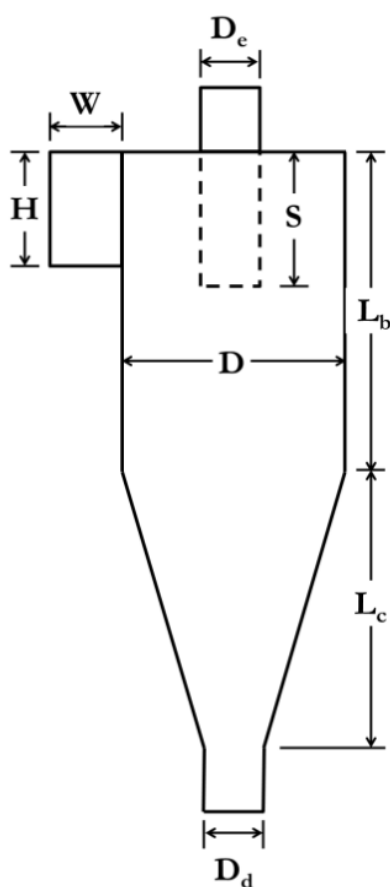
As quatro principais partes do ciclone são: entrada, corpo e cone, descarga do pó, e saída do gás. Os ciclones podem operar individualmente ou em arranjos de vários ciclones, em série ou em paralelo.



## Equações de Projeto e Desempenho

O projeto do ciclone consiste em determinar todas as dimensões do equipamento a partir de uma dimensão

básica: o diâmetro do corpo cilíndrico ( $D$ ). Uma vez calculado o diâmetro, calculam-se as demais dimensões em função de relações com o diâmetro.



$D$  = diâmetro do cilindro (corpo)

$L_b$  = comprimento do cilindro (corpo)

$L_c$  = comprimento do cone

$S$  = comprimento do tubo "vórtex" no interior do ciclone

$H$  = altura da entrada

$W$  = largura da entrada

$D_e$  = diâmetro do tubo de saída do gás

$D_d$  = diâmetro do tubo de saída do pó

Três configurações usuais:

	<b>Lapple</b>	<b>Stairmand</b>	<b>Swift</b>
$H/D$	0,5	0,5	0,44
$W/D$	0,25	0,2	0,21
$D_e/D$	0,5	0,5	0,4
$L_b/D$	2,0	1,5	1,4
$L_c/D$	2,0	2,5	2,5
$S/D$	0,625	0,5	0,5
$D_d/D$	0,25	0,375	0,4
$K$	402,9	551,3	699,2
$N_H$	8,0	6,4	9,24
	<b>Baixa eficiência</b>	<b>Média eficiência</b>	<b>Alta eficiência</b>

$K$  = parâmetro de configuração geométrica (adimensional);  
 $N_H$  = parâmetro de perda de carga (adimensional).

Existem várias expressões propostas para o cálculo da eficiência de coleta do ciclone, as mais usuais são as de Leith-Licht (1972) e Lapple (1984).

### Equação de Leith-Licht:

$$E = 1 - \exp(-\psi d_p^n)$$

$n = 1/(m+1)$	$\psi = 2 \left[ \frac{K \dot{V} \rho_p (m+1) C_s}{18 \mu D^3} \right]^{n/2}$
$m = 1 - \left[ (1 - 0,67 D^{0,14}) \left( \frac{T}{283} \right)^{0,3} \right]$	

$d_p$  = diâmetro da partícula (m);

$D$  = diâmetro do ciclone (m);

$T$  = temperatura do gás (K);

$K$  = parâmetro de configuração geométrica;

$\dot{V}$  = vazão volumétrica do gás ( $m^3/s$ );

$\rho_p$  = densidade da partícula ( $kg/m^3$ );

$C_s$  = fator de escorregamento de Cunningham;

$\mu$  = viscosidade do gás ( $kg/m.s$ ).

O parâmetro  $K$  é estimado de acordo com a configuração do ciclone utilizada.

### Equação de Lapple:

$$E = \frac{1}{\left[ 1 + \left( \frac{d_c}{d_p} \right)^2 \right]}$$

$d_p$  = diâmetro da partícula (m);

$d_c$  = diâmetro de corte do ciclone (m);

$$d_c = \sqrt{\frac{9 \mu W}{2 \pi N V (\rho_p - \rho_g)}}$$

$\mu$  = viscosidade do gás (kg/m.s);  
 $W$  = largura da entrada do ciclone (m);  
 $N$  = número de voltas do gás (adimensional);  
 $V$  = velocidade de entrada do gás (m/s);  
 $\rho_p$  = densidade da partícula (kg/m<sup>3</sup>);  
 $\rho_g$  = densidade do gás (kg/m<sup>3</sup>).

$$N = \frac{1}{H} \left( L_b + \frac{L_c}{2} \right)$$

$H$ : altura da entrada do ciclone (m);  
 $L_b$ : comprimento do corpo do ciclone (m);  
 $L_c$ : comprimento do cone (m).

O diâmetro de corte é definido como o diâmetro das partículas que podem ser coletadas pelo ciclone com eficiência de 50%. O  $d_c$  é uma característica de controle do ciclone e não do material particulado suspenso no gás. Não deve ser confundido com o diâmetro médio da distribuição granulométrica das partículas.

Ele pode servir de parâmetro para caracterizar o desempenho do ciclone.

## Recomendações para Dimensionamento

Usualmente, a velocidade de entrada do gás deve estar entre 15 e 30 m/s. Contudo, um limite máximo sugerido é o critério da "velocidade de salto" (saltation velocity),  $V_s$ :

$$V_s = 4,91 D^{1/15} V^{2/3} \left[ \frac{4g\mu(\rho_p - \rho_g)}{3\rho_g^2} \right]^{1/3} \left[ \frac{\left(\frac{W}{D}\right)^{2/5}}{1 - \left(\frac{W}{D}\right)^{1/3}} \right]$$

$V_s$  = velocidade de salto (m/s);  
 $D$  = diâmetro do ciclone (m);  
 $V$  = velocidade de entrada do gás (m/s);

$\mu$  = viscosidade do gás (kg/m.s);  
 $\rho_p$  = densidade da partícula (kg/m<sup>3</sup>);  
 $\rho_g$  = densidade do gás (kg/m<sup>3</sup>).  
 $W$  = largura da entrada do ciclone (m);  
 $g$  = aceleração da gravidade (9,8 m/s<sup>2</sup>).

Geralmente:  $V < 1,25 V_s$

Se a velocidade máxima encontrada for superior ao limite de 30 m/s, não se deve adotar o critério da velocidade de salto.

## Queda de Pressão

Para estimativa da queda de pressão do ciclone:

$$\Delta P = \frac{\rho_g}{2} V^2 N_H$$

$\Delta P$  = queda de pressão (N/m<sup>2</sup>);  
 $\rho_g$  = densidade do gás (kg/m<sup>3</sup>).  
 $V$  = velocidade de entrada do gás (m/s);  
 $N_H$  = parâmetro de perda de carga (adimensional).

$$N_H = 16 \left( \frac{WH}{D_e^2} \right)$$

$H$  = altura da entrada do ciclone (m);  
 $W$  = largura da entrada ciclone (m);  
 $D_e$  = diâmetro do tubo de saída do gás (m).

Recomendações:

<b>Lapple</b>	<b>Stairmand</b>	<b>Swift</b>
<b>Baixa eficiência</b>	<b>Média eficiência</b>	<b>Alta eficiência</b>
5 < $\Delta P$ < 10 cmH <sub>2</sub> O	10 < $\Delta P$ < 20 cmH <sub>2</sub> O	20 < $\Delta P$ < 30 cmH <sub>2</sub> O

**Ex.** - Dimensionar e calcular a eficiência global de um ciclone do tipo Lapple para remoção do particulado em suspensão em uma corrente gasosa. Dados:  
 Vazão de gás (ar) =  $6.000 \text{ m}^3/\text{h} = 1,67 \text{ m}^3/\text{s}$ ;  
 Temperatura =  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $P = 1 \text{ atm}$ ;  
 Densidade das partículas =  $2.500 \text{ kg}/\text{m}^3$ .

Distribuição granulométrica do pó:

Faixa de diâmetros ( $\mu\text{m}$ )	$x_i$ (%)
0 - 2	10
2 - 5	20
5 - 8	20
8 - 15	20
15 - 20	17
20 - 50	13
Total = 100	

Densidade do ar =  $1,132 \text{ kg}/\text{m}^3$   
 Viscosidade do ar =  $1,897 \times 10^{-5} \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$

	Ciclone do tipo Lapple (baixa eficiência)
H/D	0,5
W/D	0,25
$D_e/D$	0,5
$L_b/D$	2,0
$L_c/D$	2,0
S/D	0,625
$D_d/D$	0,25

$$HW = \frac{\dot{V}}{V} \rightarrow (0,5D)(0,25D) = \frac{\dot{V}}{V} \rightarrow 0,125D^2 = \frac{\dot{V}}{V} \rightarrow D = \sqrt{\frac{\dot{V}}{0,125V}}$$

Assumir:  $V = 15 \text{ m}/\text{s}$

$$D = \sqrt{\frac{1,67}{0,125 \times 15}} = 0,94 \text{ m} \rightarrow D = 0,94 \text{ m}$$

$$\begin{aligned}
 H &= 0,47 \text{ m;} \\
 W &= 0,24 \text{ m;} \\
 D_e &= 0,47 \text{ m;} \\
 L_b &= 1,89 \text{ m;} \\
 L_c &= 1,89 \text{ m;} \\
 S &= 0,59 \text{ m;} \\
 D_d &= 0,24 \text{ m.}
 \end{aligned}$$

Vamos calcular a velocidade máxima permitida:

$$V_s = 4,91 D^{1/15} V^{2/3} \left[ \frac{4g\mu(\rho_p - \rho_g)}{3\rho_g^2} \right]^{1/3} \left[ \frac{\left(\frac{W}{D}\right)^{2/5}}{1 - \left(\frac{W}{D}\right)^{1/3}} \right]$$

$$\begin{aligned}
 D &= 0,90 \text{ m} \\
 W &= 0,22 \text{ m} \\
 V &= 15 \text{ m/s} \\
 g &= 9,8 \text{ m/s}^2 \\
 \rho_p &= 2.500 \text{ kg/m}^3 \\
 \rho_g &= 1,132 \text{ kg/m}^3 \\
 \mu &= 1,897 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}
 \end{aligned}$$

$$V_s = 29,65 \times 0,78 \times 1,55 = 35,8 \text{ m/s}$$

$$V < 1,25V_s < 44,7 \text{ m/s}$$

A velocidade de entrada máxima ultrapassa o limite máximo recomendado de 30 m/s.

Vamos calcular a queda de pressão:

$$\Delta P = \frac{\rho_g}{2} V^2 N_H = \frac{1,132}{2} 15^2 8,0 = 1.019 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

$$101.325 \text{ N/m}^2 = 10,33 \text{ mH}_2\text{O}$$

$$\Delta P = 1.019 \text{ N/m}^2 = 10,4 \text{ cmH}_2\text{O}$$



Estamos no limite superior da queda de pressão recomendada para esta configuração de ciclone, portanto, não vamos aumentar a velocidade de entrada do gás.

Cálculo das eficiências:

Equação de Lapple:

$E = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_c}{d_p}\right)^2}$	$d_c = \sqrt{\frac{9\mu W}{2\pi N V (\rho_p - \rho_g)}}$	$N = \frac{1}{H} \left( L_b + \frac{L_c}{2} \right)$
--	--	--

$$N = \frac{1}{0,45} \left( 1,8 + \frac{1,8}{2} \right) = 6 \text{ voltas}$$

$$d_c = \sqrt{\frac{9 \times 1,897 \times 10^{-5} \times 0,22}{2\pi \times 6 \times 15(2500 - 1,132)}} = 5,2 \times 10^{-6} \text{ m} = 5,2 \text{ } \mu\text{m}$$

Faixa de diâmetros ( $\mu\text{m}$ )		$x_i$ (%)	$d_p$ ( $\mu\text{m}$ )	$E_i$	$E_i x_i$ (%)
0	2	10	1,0	0,0356	0,36
2	5	20	3,5	0,3118	6,23
5	8	20	6,5	0,6098	12,20
8	15	20	11,5	0,8302	16,60
15	20	17	17,5	0,9189	15,62
20	50	13	35,0	0,9784	12,72
Total =		100		E =	63,7

Eficiência global (E) = 63,7%

Equação de Leith-Licht:

$$E = 1 - \exp(-\psi d_p^n)$$

$n = 1/(m+1)$	$\psi = 2 \left[ \frac{KV \rho_p (m+1) C_s}{18 \mu D^3} \right]^{n/2}$
$m = 1 - \left[ (1 - 0,67D^{0,14}) \left( \frac{T}{283} \right)^{0,3} \right]$	

$$C_s = 1 + \frac{2}{Pd_p} [6,32 + 2,01 \exp(-0,1095Pd_p)]$$

P = pressão (cmHg);

$d_p$  = diâmetro da partícula ( $\mu\text{m}$ ).

P = 1 atm = 76 cmHg; T = 40 °C = 313 K

$$m = 0,650 \rightarrow n = 0,606$$

$d_p$ ( $\mu\text{m}$ )	$x_i$ (%)	$C_s$	$\psi$	$E_i$	$E_i x_i$ (%)
1,0	10	1,166	2185,82	0,403	4,0
3,5	20	1,048	2115,97	0,655	13,1
6,5	20	1,026	2102,48	0,785	15,7
11,5	20	1,014	2095,56	0,885	17,7
17,5	17	1,010	2092,46	0,938	15,9
35,0	13	1,007	2091,14	0,961	12,5
	100			E=	78,9

Eficiência global (E) = 78,9%

Vamos assumir sempre a eficiência menor!!!