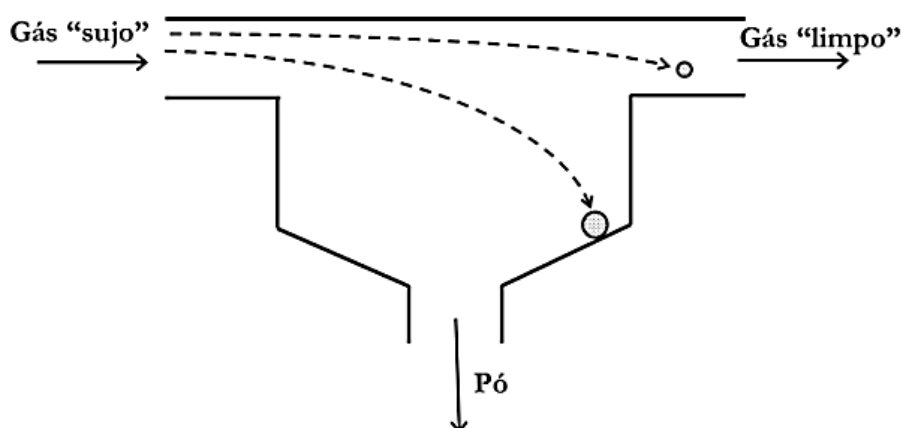


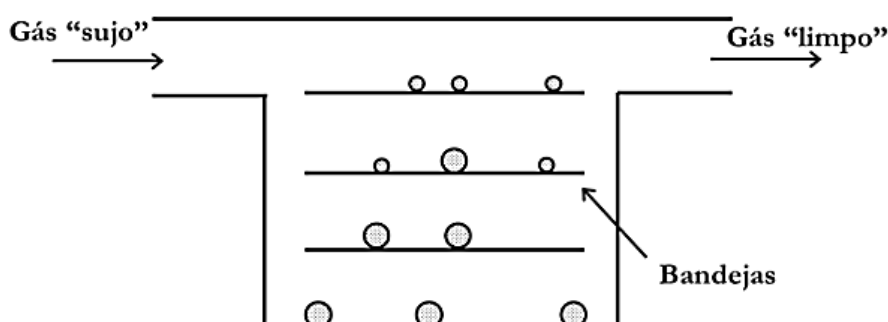
## 9 – CÂMARAS GRAVITACIONAIS

Um dos mais simples (e mais antigos) dispositivos de controle da poluição do ar é a câmara gravitacional ou câmara de sedimentação. O equipamento consiste, basicamente, em uma câmara de expansão, na qual ocorre a redução da velocidade do gás até um ponto em que as partículas nele em suspensão são "capturadas" pela ação da gravidade (sedimentação). Em geral, quanto maior a partícula, maior a taxa de sedimentação.

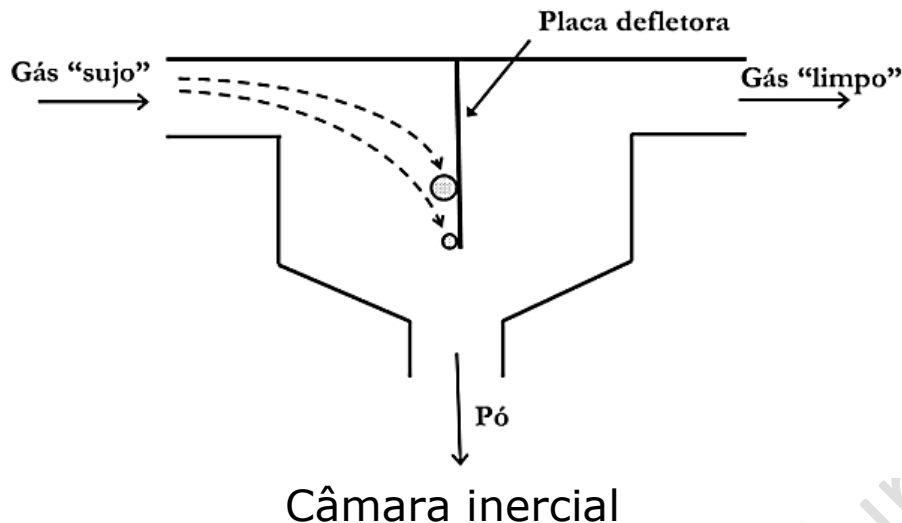
Existem diversas configurações para as câmaras gravitacionais, os tipos mais comuns são: câmara de expansão simples, câmara de múltiplos pratos (ou bandejas) e câmara inercial.



Câmara de expansão simples



Câmara com bandejas



Habitualmente, as câmaras são usadas para a remoção da fração mais grossa da massa de partículas em suspensão, antes de dispositivos de controle de particulados mais eficientes, contribuindo para o funcionamento e para a diminuição da frequência de limpeza dos outros equipamentos. Ela é poucas vezes usada como dispositivo final de limpeza do gás, estando, geralmente, limitada à remoção de partículas com diâmetro entre 50 e 100  $\mu\text{m}$ .

### Equações de Projeto e Desempenho

O dimensionamento da câmara gravitacional deve promover condições para que a partícula de um diâmetro desejado tenha um tempo de residência no interior do equipamento suficiente para a sua "captura", ou seja, o tempo de queda da partícula deve ser menor que o seu tempo de residência na câmara. As variáveis de projeto consistem, basicamente, em comprimento, largura e altura.

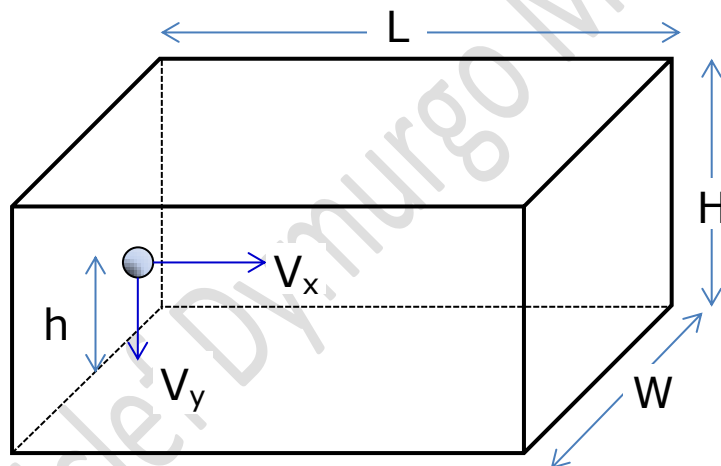
A velocidade de sedimentação ou velocidade terminal, é dada pela lei de Stokes ( $Re_p < 2$ ):

$$V_t = \frac{gd_p^2(\rho_p - \rho_g)}{18\mu}$$

$d_p$ : diâmetro da partícula (m);  
 $\rho_p$ : densidade da partícula ( $\text{kg/m}^3$ );  
 $\rho_g$ : densidade do gás ( $\text{kg/m}^3$ );  
 $\mu$ : viscosidade do gás ( $\text{kg/m.s}$ ).

Vamos assumir que o perfil de velocidades do gás no interior da câmara seja laminar e uniforme ao longo do equipamento, e que a partícula tenha a mesma velocidade da corrente gasosa.

Supondo que a partícula entre na câmara a uma altura  $h$ , ela deve "cair" esta altura, antes de atravessar o comprimento  $L$  da câmara para que possa ser coletada, ou seja, o tempo de queda da partícula deverá ser menor que o seu tempo de residência no equipamento.



A eficiência de coleta teórica para uma partícula de diâmetro  $d_p$ ,  $E$ , é dada por:

$$E = \frac{V_t L}{V_x H}$$

$V_t$  = velocidade terminal da partícula;

$V_x$  = velocidade horizontal do gás;

$L$  = comprimento da câmara;

$H$  = altura da câmara (a maior distância que uma partícula deve cair para ser coletada).

Podemos escrever:

$$V_x = \frac{\dot{V}}{WH}$$

Assim:

$$E = \frac{V_t LW}{\dot{V}}$$

	Velocidade terminal	Unidades
$2 < Re_p < 500$	$V_t = \frac{0,153 d_p^{1,14} (g \rho_p)^{0,71}}{\rho_g^{0,29} \mu^{0,43}}$	$g \equiv [\text{ft}/\text{s}^2]$ $\rho_p \equiv [\text{lb}/\text{ft}^3]$ $\rho_g \equiv [\text{lb}/\text{ft}^3]$
$Re_p > 500$	$V_t = \frac{1,74 g d_p \rho_p}{\rho_g}$	$d_p \equiv [\text{ft}]$ $\mu \equiv [\text{lb}/\text{ft}\cdot\text{s}]$

Para câmaras com bandejas:

$$E = \frac{V_t L W N_c}{\dot{V}}$$

$N_c$  = número de câmaras paralelas.

$N_c = 1$  (câmara simples);

$N_c = N + 1$  ( $N$  = número de bandejas).

Frequentemente, usa-se um fator de correção para a eficiência:

$$E = 0,5 \left( \frac{V_t L W N_c}{\dot{V}} \right)$$

Quando o escoamento no interior da câmara é turbulento ( $Re > 4.000$ ):

$$E = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{V_t L N_c}{H V_x} \right) \right]$$

O número de Reynolds pode ser calculado:

$$Re = \frac{2\rho\dot{V}}{\mu(WN_c + H)}$$

## Recomendações para Dimensionamento

A velocidade máxima de escoamento no interior da câmara deve ser menor que a velocidade de ressuspensão das partículas (*pickup velocity*),  $V_p$ :

$$V_p = \left[ \frac{4gd_p(\rho_p - \rho_g)}{3\rho_g} \right]^{0,5}$$

Portanto:  $V_x \leq V_p$ .

Assim:

$$WH \geq \frac{\dot{V}}{V_p} \quad e \quad \frac{L}{H} \leq \frac{V_p}{V_t} \quad e \quad W \geq 2H.$$

As recomendações para dimensionamento são apenas sugestões baseadas, muitas vezes, na experiência prática obtida com o uso do equipamento. Não são regras rígidas que devem ser obedecidas de maneira inquestionável.

A eficiência de coleta é, usualmente, calculada assumindo-se que o diâmetro representativo da distribuição granulométrica é o diâmetro relativo à massa acumulada de 50% ( $d_{p50}$ ). A partir desse valor, calculam-se as relações iniciais para L, W e H (com cálculo de  $V_t$  e  $V_p$ ).

Com os valores iniciais de L, W e H, calculam-se as eficiências individuais,  $E_i$ , para cada faixa de diâmetro da distribuição granulométrica.

A eficiência global de coleta será:

$$E = \sum_{i=1}^n E_i x_i$$

$x_i$  = fração mássica da partícula som  $d_{pi}$ .

## Queda de Pressão

Uma das principais vantagens das câmaras gravitacionais é sua baixa perda de carga. Na prática não há restrições para a queda de pressão ou para a temperatura de operação. A queda de pressão na câmara, incluindo a expansão de entrada, o corpo principal e a redução de saída, pode ser estimada por:

$$\Delta P = \frac{\rho_g V_x^2}{2} \left( \frac{L}{R_H} f + K_i + K_e \right)$$

$\rho_g$  = densidade do gás ( $\text{kg/m}^3$ );

$V_x$  = velocidade do gás no interior da câmara (m/s);

$L$  = comprimento da câmara (m);

$R_H$  = raio hidráulico da câmara (m);

$f$  = fator de atrito de Fanning (adimensional);

$K_i$  = coeficiente perda de carga da entrada (adimensional);

$K_e$  = coeficiente perda de carga da saída (adimensional).

Para dutos retangulares o raio hidráulico:

$$R_H = \frac{WH}{2(W+H)}$$

Os coeficientes perda de carga:

$$K_i = \left( \frac{WH}{A_c} - 1 \right)^2 \quad K_e = 0,45 \left( 1 - \frac{A_c}{WH} \right)$$

$A_c$  = área de seção do conduto de entrada e de saída

Para o cálculo da área de seção do conduto, pode-se adotar a velocidade mínima recomendada.

O fator de atrito pode ser calculado:

$f = 0,00135 + 0,099\text{Re}^{-0,3}$	$4 \times 10^3 < \text{Re} < 2 \times 10^6$
---------------------------------------	---

**Ex.** - Uma câmara gravitacional, com  $W=1,5$  m,  $H=1,5$  m e com oito bandejas, é usada para a coleta de partículas em suspensão em uma corrente de ar ( $25$  °C,  $1$  atm), com vazão de  $10$  m<sup>3</sup>/s. Qual o comprimento da câmara para 99% de eficiência de coleta para partículas com diâmetro de  $50$  μm e densidade de  $2.000$  kg/m<sup>3</sup>? Qual a eficiência para partículas de  $25$  μm?  $g = 9,81$  m/s<sup>2</sup>.

Ar	25 °C 1 atm	$\rho = 1,187$ kg/m <sup>3</sup> $\mu = 1,831 \times 10^{-5}$ N.s/m <sup>2</sup>
----	----------------	---

Assumir  $\text{Re}_p < 2$ :

$$V_t = \frac{gd_p^2(\rho_p - \rho_g)}{18\mu}$$

$$V_t = \frac{9,81(50 \times 10^{-6})^2(2000 - 1,187)}{18 \times 1,831 \times 10^{-5}} = 0,149 \text{ m/s}$$

$$\text{Re}_p = \frac{\rho V_t d_p}{\mu} = \frac{1,187 \times 0,149 \times 50 \times 10^{-6}}{1,831 \times 10^{-5}} = 0,48 < 2 \text{ Ok!}$$

Número de Reynolds na câmara:

$$V_x = \frac{\dot{V}}{WH} = \frac{10}{1,5 \times 1,5} = 4,4 \text{ m/s}$$

$\text{Re} = \frac{2\rho\dot{V}}{\mu(WN_c + H)}$	$N_c = N + 1 = 8 + 1 = 9$
--	---------------------------

$$Re = \frac{2 \times 1,187 \times 10}{1,831 \times 10^{-5} (9 \times 1,5 + 1,5)} = 86.400 \quad (\text{turbulento})$$

$$E = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{V_t L N_c}{H V_x} \right) \right] \quad \rightarrow \quad L = \frac{-\ln(1-E) H V_x}{V_t N_c}$$

$$L = \frac{-\ln(1-0,99) 1,5 \times 4,4}{0,149 \times 9} = 22,6 \text{ m}$$

Para  $d_p = 25 \mu\text{m}$ :

$$V_t = \frac{9,81 (25 \times 10^{-6})^2 (2000 - 1,187)}{18 \times 1,831 \times 10^{-5}} = 0,0372 \text{ m/s}$$

$$E = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{0,0372 \times 22,6 \times 9}{1,5 \times 4,4} \right) \right] = 0,68 \quad \rightarrow \quad E = 68\%$$

**Ex.** - Dimensionar uma câmara gravitacional e calcular sua eficiência global para remoção do material particulado com a distribuição granulométrica dada abaixo. Dados: vazão do ar =  $1.500 \text{ m}^3/\text{h}$ ; densidade do material particulado =  $2.500 \text{ kg/m}^3$ ; temperatura =  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ; pressão =  $1 \text{ atm}$ .

Diâmetro ( $\mu\text{m}$ )		Fração mássica (%)
0	2,5	12,0
2,5	5	8,0
5	7,5	6,0
7,5	10	4,0
10	15	8,0
15	20	7,0
20	30	10,0
30	40	10,0
40	60	15,0
60	75	10,0
75	110	10,0
		100,0



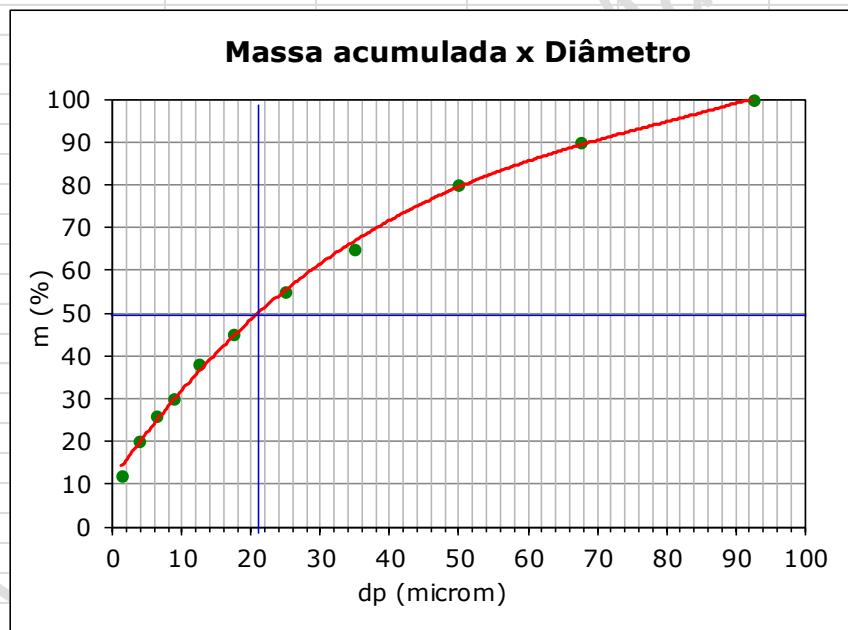
### Dimensionamento de camaras gravitacionais

Dados do problema:

Vazão de gás=	1.500,0	m <sup>3</sup> /h	0,42	m <sup>3</sup> /s
Temperatura=	50,0	oC		
Densidade das partículas=	2.500,0	kg/m <sup>3</sup>		

Distribuição granulométrica do pó:

diâmetros (micro)	dp(m)	dp (micro)	m (%)	m acum.
0	2,5	1,25E-06	12,0	12,0
2,5	5	3,75E-06	8,0	20,0
5	7,5	6,25E-06	6,0	26,0
7,5	10	8,75E-06	4,0	30,0
10	15	1,25E-05	8,0	38,0
15	20	1,75E-05	7,0	45,0
20	30	2,50E-05	10,0	55,0
30	40	3,50E-05	10,0	65,0
40	60	5,00E-05	15,0	80,0
60	75	6,75E-05	10,0	90,0
75	110	9,25E-05	10,0	100,0
Total =			100,0	



dp(50) = 21,0 microm

Propriedades do gás(ar):

Densidade=	1,097	kg/m <sup>3</sup>
Viscosidade=	1,941E-05	N.s/m <sup>2</sup>

Vazão volumétrica para cálculos=	0,42	m <sup>3</sup> /s		
Diâmetro 50% (dp50) =	2,10E-05	m		
Velocidade terminal p/ dp50 (Vt50)=	3,09E-02	m/s	3,1	cm/s
Número de Reynolds da partícula=	0,04	(Re < 2 laminar)		
Velocidade de ressuspensão p/ dp50 (Vp)=	0,79	m/s		

Cálculo da relação W x H e L/H (relação das dimensões iniciais):

$$W \times H > 0,53 \text{ m}^2 \quad L/H < 25,6$$

$$W > 2H$$

Estimativa inicial (W = H):

$$W = 0,73 \text{ m}$$

$$H = 0,73 \text{ m}$$

$$L = 18,57 \text{ m}$$

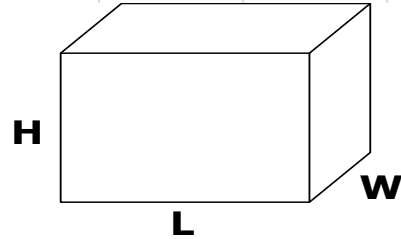
$$\text{Adotar valor } W = 1,60 \text{ m} \quad (W = 2H)$$

$$\text{Adotar valor } H = 0,80 \text{ m}$$

$$W \times H = 1,28 \text{ m}^2 \quad (\text{ver recomendação})$$

$$\text{Cálculo de } L = 8,42 \text{ m}$$

$$L/H = 10,5 \quad (\text{ver recomendação})$$



Cálculo velocidade no interior da câmara:

$$V_x = 0,33 \text{ m/s} \quad (\text{deve ser menor que } V_p = 0,79 \text{ m/s})$$

Número de Reynolds no interior da câmara (Re < 2300 laminar):

$$Re = 19.621 \quad \text{Turbulento}$$

Cálculo das eficiências: (usar expressão adequada para cálculo de E)

dp(m)	m (%)	Vt (m/s)	pó coletado		residual			
			E	m*E	P = 1-E	m*P	m (%)	
1,25E-06	12,0	1,10E-04	0,004	0,000	0,996	11,96	29,33	
3,75E-06	8,0	9,86E-04	0,031	0,003	0,969	7,75	19,01	
6,25E-06	6,0	2,74E-03	0,085	0,005	0,915	5,49	13,47	
8,75E-06	4,0	5,37E-03	0,159	0,006	0,841	3,36	8,25	
1,25E-05	8,0	1,10E-02	0,298	0,024	0,702	5,61	13,77	
1,75E-05	7,0	2,15E-02	0,501	0,035	0,499	3,50	8,57	
2,50E-05	10,0	4,38E-02	0,758	0,076	0,242	2,42	5,95	
3,50E-05	10,0	8,59E-02	0,938	0,094	0,062	0,62	1,53	
5,00E-05	15,0	1,75E-01	0,997	0,149	0,003	0,05	0,13	
6,75E-05	10,0	3,19E-01	1,000	0,100	0,000	0,00	0,00	
9,25E-05	10,0	6,00E-01	1,000	0,100	0,000	0,00	0,00	
	100,0					40,8	100,0	
			Total=	59,2%				

<u>Camara com bandejas:</u>							
			n=	3	bandejas		
			Nc=	4	camaras		
		Altura da sub-camaras (h) =		0,20	m		20,0 cm
Cálculo velocidade no interior da camara:							
	Vx =	0,33	m/s	(deve ser menor que Vp=	0,79	m/s)	
Número de Reynolds no interior da camara (Re<2300 laminar):							
	Re =	6.540	Turbulento				
Cálculo das eficiências considerando n bandejas:							
			pó coletado		residual		
dp(m)	m (%)	Vt (m/s)	E	m*E	P = 1-E	m*P	m (%)
1,25E-06	12,0	1,10E-04	0,014	0,002	0,986	11,83	43,04
3,75E-06	8,0	9,86E-04	0,120	0,010	0,880	7,04	25,62
6,25E-06	6,0	2,74E-03	0,298	0,018	0,702	4,21	15,31
8,75E-06	4,0	5,37E-03	0,501	0,020	0,499	2,00	7,27
1,25E-05	8,0	1,10E-02	0,758	0,061	0,242	1,94	7,05
1,75E-05	7,0	2,15E-02	0,938	0,066	0,062	0,44	1,58
2,50E-05	10,0	4,38E-02	0,997	0,100	0,003	0,03	0,13
3,50E-05	10,0	8,59E-02	1,000	0,100	0,000	0,00	0,00
5,00E-05	15,0	1,75E-01	1,000	0,150	0,000	0,00	0,00
6,75E-05	10,0	3,19E-01	1,000	0,100	0,000	0,00	0,00
9,25E-05	10,0	6,00E-01	1,000	0,100	0,000	0,00	0,00
	100,0					27,5	100,0
			Total=	72,5%			
Cálculo da queda de pressão para camara sem bandejas:							
L =	8,4	m	Vx =	0,33	m/s		
W =	1,6	m	RH=	0,27	m		
H =	0,8	m	f =	0,006	(fator de atrito Fanning, f < 0,1)		
Cálculo das entradas e saídas:							
	Velocidade de entrada =	10,0	m/s				
	Área das seções de entrada e saída=	0,04	m <sup>2</sup>				
	ki=	883,28		ke=	0,44		
	Delta P=	51,36	N/m <sup>2</sup>		0,52	cmH <sub>2</sub> O	
Cálculo da queda de pressão com bandejas:							
h =	0,20	m	f =	0,008	(fator de atrito Fanning, f < 0,1)		
RH=	0,09	m					
	Delta P=	51,39	N/m <sup>2</sup>		0,52	cmH <sub>2</sub> O	

Propriedades do ar (P = 1 atm)

Densidade:

$$\rho_{Ar} = -9,389 \times 10^{-9} T^3 + 9,751 \times 10^{-6} T^2 - 4,312 \times 10^{-3} T + 1,289$$

$$T = [^{\circ}\text{C}]$$

$$\rho = [\text{kg}/\text{m}^3]$$

Viscosidade:

$$\mu_{Ar} = -1,193 \times 10^{-11} T^2 + 4,492 \times 10^{-8} T + 1,719 \times 10^{-5}$$

$$T = [^{\circ}\text{C}]$$

$$\mu = [\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2]$$

Prof. Wicief Dymurgo Marra Junior