

## 11 – PRECIPITADOR ELETROSTÁTICO

---

Quem nunca atraiu pedacinhos de papel com um bastão que se esfregou num pedaço de tecido ou com um pente que se passou nos cabelos? Este fenômeno indica a presença de cargas eletrostáticas. Sabemos que cargas opostas (sinais contrários) se atraem e cargas semelhantes (mesmo sinal) se repelem.

No precipitador eletrostático a força que atua na separação das partículas da corrente gasosa é a atração eletrostática. Ele pode ser usado para controle da emissão de material particulado desde usinas geradoras de energia (queima de combustíveis) até para dispositivos domésticos em sistemas de condicionamento de ar. Pode operar em altas temperaturas e pressões, e sua eficiência de coleta para partículas pequenas é alta.

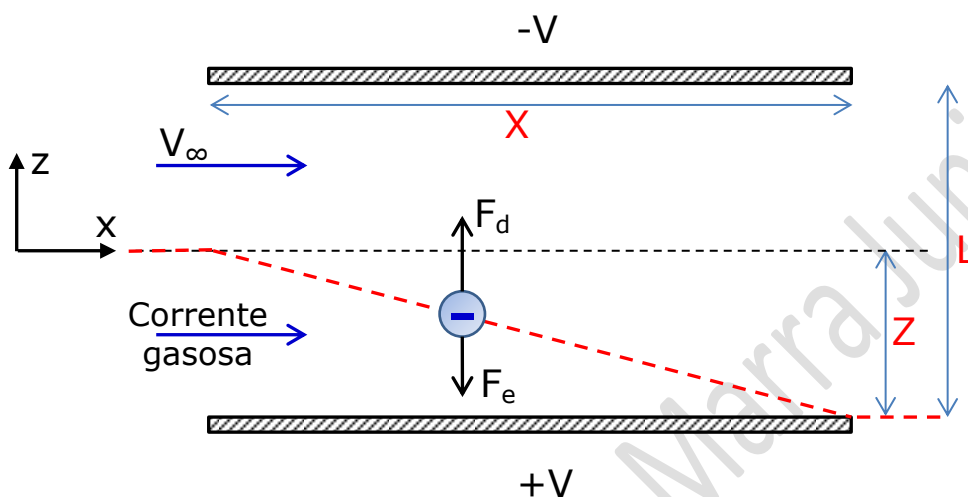
O processo de precipitação consiste de três etapas principais: (1) carregamento das partículas; (2) coleta das partículas; (3) remoção do pó coletado.

Existem vários mecanismos pelos quais partículas sólidas ou líquidas podem adquirir cargas elétricas e os mais comuns são: a eletrificação por contato ou atrito (triboeletrificação), a eletrificação por indução, por corrente corona e por ionização. No caso dos precipitadores eletrostáticos, o carregamento por corrente corona é o mais utilizado.

### Velocidade de Migração

Imagine uma corrente gasosa escoando no interior do espaço entre duas grandes placas planas verticais e paralelas. As partículas em suspensão na corrente gasosa estão carregadas eletricamente e, entre as placas, uma alta tensão (30 kV a 70 kV) é aplicada. Ao adentrar neste espaço, as partículas serão desviadas em direção à placa com sinal contrário ao da carga das partículas, onde serão coletadas, sendo, portanto, removidas da corrente gasosa.

Uma partícula com carga ( $q_p$ ) na presença de um campo elétrico com intensidade ( $E$ ) está sujeita a uma força elétrica:  $F_e = q_p E$ , paralela às “linhas de força” do campo elétrico. Esta força elétrica é capaz de alterar a trajetória da partícula.



A força de arraste pode ser escrita:

$$F_d = \frac{3\mu\pi d_p V_z}{C_s}$$

Assim:

$$\frac{3\mu\pi d_p V_z}{C_s} = q_p E \quad \rightarrow \quad V_z = \frac{q_p C_s}{3\mu\pi d_p} E = Z_p E$$

$V_z$  = velocidade de migração (m/s);

$d_p$  = diâmetro da partícula (m);

$q_p$  = carga elétrica da partícula [Coulomb(C)];

$E$  = intensidade de campo elétrico (Newton/C) ou (Volt/m);

$C_s$  = fator de escorregamento de Cunningham;

$\mu$  = viscosidade do gás (kg/m.s)

$Z_p$  = eletromobilidade da partícula (C.m/N.s).

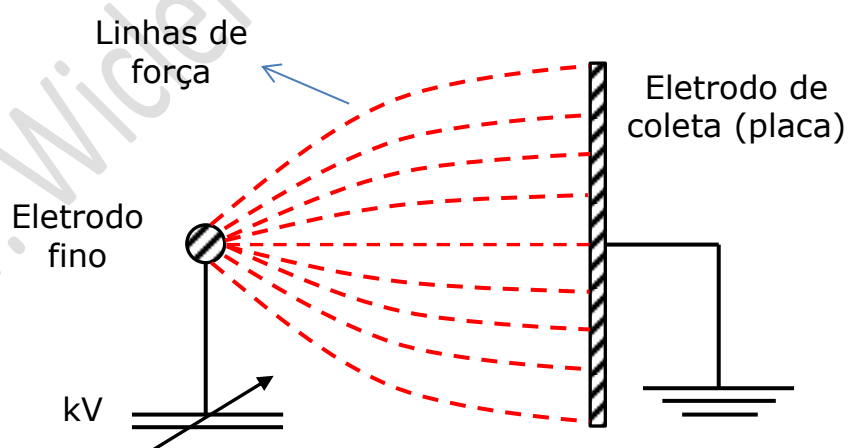
A velocidade adquirida pela partícula ao se deslocar em direção à placa é chamada de velocidade de migração e

tem a direção das linhas de força do campo elétrico. A velocidade de migração é semelhante à velocidade de sedimentação (velocidade terminal) de uma partícula sob o efeito do campo gravitacional.

## Carregamento de Partículas - Corrente Corona

Uma corrente ou descarga corona é produzida quando uma alta voltagem é aplicada entre dois eletrodos, sendo um deles, normalmente, um fio ou uma barra de diâmetro pequeno e o outro, uma placa plana, gerando, assim, um campo elétrico não uniforme.

O campo próximo ao eletrodo fino é muito alto e qualquer elétron que entre nesta região será acelerado e, eventualmente, colidirá com um átomo do gás circundante. O elétron possui energia suficiente para deslocar outro elétron, criando um íon positivo e um elétron adicional. Este elétron será também acelerado e produzirá o mesmo efeito, resultando em uma profusão de elétrons ("chuva" de elétrons), junto ao eletrodo fino. No ar, observa-se uma luz azulada, em forma de coroa, em torno do eletrodo fino, dando à descarga o nome de "corona".



O limite para o valor da carga superficial de uma partícula pode ser estimado pela relação:

$$q_p = \pi \epsilon_0 \left( \frac{3\epsilon_r}{\epsilon_r + 2} \right) d_p^2 E$$

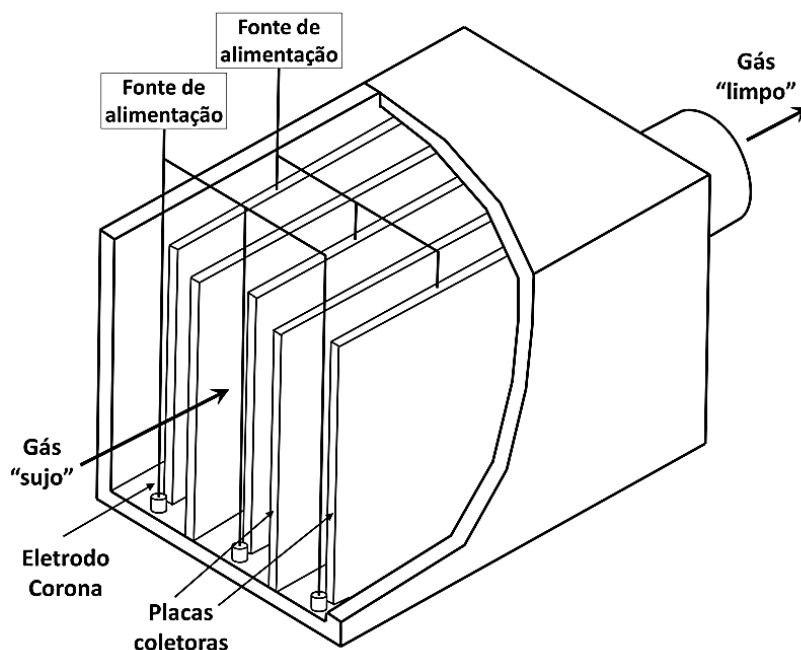
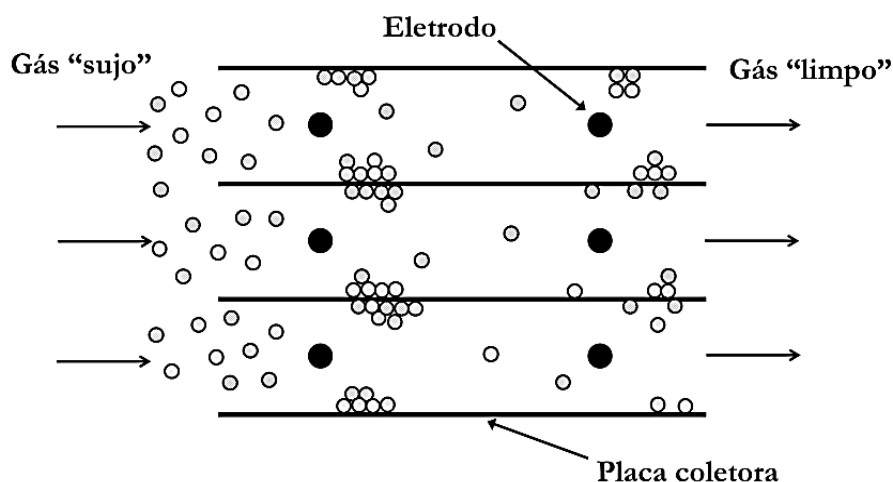
$q_p$  = carga elétrica da partícula [Coulomb(C)].

$E$  = intensidade de campo elétrico (Newton/C) ou (Volt/m);

$\epsilon_0$  = permissividade do vácuo =  $8,854 \times 10^{-12}$  C/m.V ou (Faraday/m);

$\epsilon_r$  = constante dielétrica da partícula (adimensional);

$d_p$  = diâmetro da partícula (m);



## Precipitador eletrostático de placas planas paralelas.

## Eficiência de Coleta

Usualmente, a eficiência de coleta pode ser estimada pela equação de Deutsch-Anderson:

$$E_i = 1 - \exp\left(-\frac{V_z A}{\dot{V}}\right)$$

$E_i$  = eficiência de coleta para um tamanho de partícula  $d_p$ ;  
 $V_z$  = velocidade de migração (m/s);  
 $A$  = área de coleta do precipitador (m<sup>2</sup>);  
 $\dot{V}$  = vazão volumétrica do gás (m<sup>3</sup>/s).

Uma modificação da equação de Deutsch-Anderson foi apresentada por Matts-Ohnfeldt:

$$E_i = 1 - \left[ \exp\left(-\frac{V_z A}{\dot{V}}\right) \right]^{0,5}$$

## Resistividade Elétrica

A resistividade elétrica da partícula é uma propriedade importante que pode afetar a eficiência de coleta do precipitador. Esta propriedade pode ser descrita como a resistência do material em transferir cargas. Quanto mais baixa a resistividade mais facilmente o material permite a passagem de uma carga elétrica. Os materiais podem ser simplifadamente classificados em três grupos:

Baixa resistividade:  $10^2$  a  $10^5 \Omega.m$

Média resistividade:  $10^5$  a  $10^8 \Omega.m$

Alta resistividade: acima de  $10^8 \Omega.m$

Partículas com baixa resistividade são difíceis para coleta, pois são facilmente carregadas, mas perdem sua carga rapidamente.

TABELA I: Valores da Resistividade na Temperatura Ambiente (20°C)

Substância		$\rho(\Omega \cdot m)$	Substância	$\rho(\Omega \cdot m)$
<i>Condutores</i>			<i>Semicondutores</i>	
Metais:	Prata	$1,47 \times 10^{-8}$	Carbono puro (grafita)	$3,5 \times 10^{-5}$
	Cobre	$1,72 \times 10^{-8}$	Germânio puro	0,60
	Ouro	$2,44 \times 10^{-8}$	Silício puro	2300
	Alumínio	$2,75 \times 10^{-8}$	<i>Isolantes</i>	
	Tungstênio	$5,25 \times 10^{-8}$	Âmbar	$5 \times 10^{14}$
	Chumbo	$22 \times 10^{-8}$	Lucita	$> 10^{19}$
	Mercurio	$95 \times 10^{-8}$	Mica	$10^{11} - 10^{15}$
Ligas:	Manganin (Cu 84%, Mn 12%, Ni 4%)	$44 \times 10^{-8}$	Quartzo (fundido)	$75 \times 10^{16}$
	Constantan (Cu 60%, Ni 40%)	$49 \times 10^{-8}$	Enxofre	$10^{15}$
	Nicromo	$100 \times 10^{-8}$	Teflon	$> 10^{19}$
	Aço	$20 \times 10^{-8}$	Vidro	$10^{10} - 10^{14}$
			Madeira	$10^8 - 10^{11}$

## Recomendações

### Área de Coleta Específica (SCA)

A SCA é definida como a razão entre a área superficial total de coleta do precipitador e a vazão volumétrica do gás:

$$SCA = \frac{\text{Superfície total de coleta (m}^2\text{)}}{\text{Vazão do gás (1.000 m}^3\text{/h)}}$$

Usualmente:  $11 \leq SCA \leq 45 \text{ m}^2/1.000\text{m}^3/\text{h}$

### Razão de Aspecto (AR)

AR é a razão entre o comprimento (L) e a altura (H) de uma placa de coleta do precipitador. Usualmente:

$$1,0 \leq AR = L/H \leq 2,0$$

Espaçamento entre as placas: 20 a 30 cm

Voltagem aplicada: 30 a 70 kV

**Ex.** - Dimensionar um precipitador eletrostático para remoção do material particulado em suspensão em uma corrente gasosa. Distribuição granulométrica do pó:

Faixa de diâmetros ( $\mu\text{m}$ )	$d_p$ médio( $\mu\text{m}$ )	$x_i$ (%)
0	1	0,5
1	2	1,5
2	4	3,0
4	6	5,0
6	10	8,0
10	16	13,0
16	22	19,0
22	32	27,0
32	60	46,0
		Total = 100

Vazão de gás =  $7.200 \text{ m}^3/\text{h} = 2,0 \text{ m}^3/\text{s}$

Temperatura =  $130 \text{ }^\circ\text{C}$

Pressão =  $1,0 \text{ atm}$

Densidade das partículas =  $2.500 \text{ kg}/\text{m}^3$

Constante dielétrica do pó =  $3,0$  (adimensional)

1 - Propriedades do gás(ar):

Densidade =  $0,873 \text{ kg}/\text{m}^3$

Viscosidade =  $2,283 \times 10^{-5} \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$

2 - Cálculo da área de coleta:

Adotar:  $\text{SCA} = 11 \text{ m}^2/1000 \text{ m}^3/\text{h}$

Área total de coleta =  $79,2 \text{ m}^2$

Cálculo das dimensões:

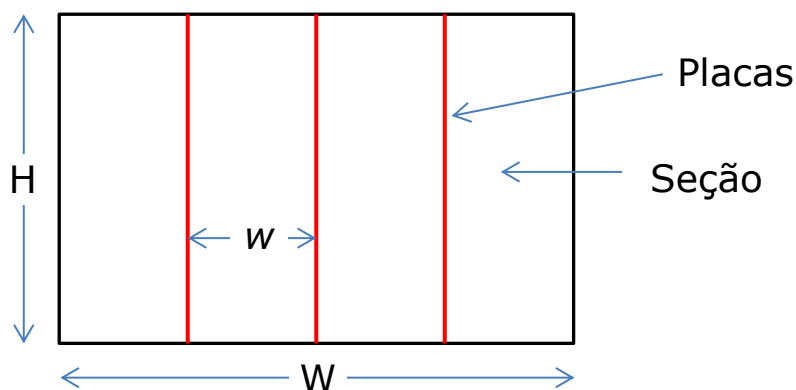
Adotar:  $H = 1,50 \text{ m}$  (altura da placa)

$L = 2,25 \text{ m}$  (comprimento da placa:  $L=1,5H$ )

Área de uma placa (ambos os lados):  $2(LH) = 6,75 \text{ m}^2$

Número de placas =  $79,2/6,75 = 11,7 = 12$  placas

Número de sessões = Número de placas + 1 = 13 sessões



Adotar:  $w = 0,25$  m (espaçamento entre placas)

$W = 3,25$  m (largura total do precipitador)

Área total de coleta corrigida =  $12 \times 6,75 = 81$  m<sup>2</sup>

3 - Cálculo das eficiências (equação de Deutsch-Anderson modificada):

$E_i = 1 - \left[ \exp\left(-\frac{V_z A}{\dot{V}}\right) \right]^{0,5}$	$V_z = \frac{q_p C_s}{3\mu\pi d_p} E$	$q_p = \pi\epsilon_0 \left( \frac{3\epsilon_r}{\epsilon_r + 2} \right) d_p^2 E$
--	---------------------------------------	---

Voltagem aplicada = 30.000 Volt

Intensidade de campo ( $E$ ) =  $\frac{\text{Voltagem aplicada}}{\text{Espaçamento entre placas } (w)/2}$

$$E = 30.000 / (0,25/2) = 240.000 \text{ Volt/m}$$

$d_p$ (m)	$\xi_i$ (%)	Carga [C]	$C_s$	$V_z$ (m/s)	$E_i$	$\xi_i * E_i$ (%)
$0,5 \times 10^{-6}$	5,0	$3,00 \times 10^{-18}$	1,33	$8,94 \times 10^{-3}$	0,166	0,83
$1,5 \times 10^{-6}$	6,0	$2,70 \times 10^{-17}$	1,11	$2,23 \times 10^{-2}$	0,364	2,18
$3,0 \times 10^{-6}$	12,0	$1,08 \times 10^{-16}$	1,06	$4,24 \times 10^{-2}$	0,577	6,92
$5,0 \times 10^{-6}$	11,0	$3,00 \times 10^{-16}$	1,03	$6,93 \times 10^{-2}$	0,754	8,29
$8,0 \times 10^{-6}$	12,0	$7,69 \times 10^{-16}$	1,02	0,109	0,891	10,69
$13,0 \times 10^{-6}$	11,0	$2,03 \times 10^{-15}$	1,01	0,176	0,972	10,69
$19,0 \times 10^{-6}$	13,0	$4,34 \times 10^{-15}$	1,01	0,257	0,994	12,93
$27,0 \times 10^{-6}$	17,0	$8,76 \times 10^{-15}$	1,01	0,364	0,999	16,99
$46,0 \times 10^{-6}$	13,0	$2,54 \times 10^{-14}$	1,00	0,619	1,000	13,00
Total =						82,53



Eficiência global = 82,5%

Se aumentarmos a voltagem aplicada para 50 kV, teremos:

$$E = 50.000/(0,25/2) = 400.000 \text{ Volt/m}$$

$d_p$ (m)	$x_i$ (%)	Carga [C]	$C_s$	$V_z$ (m/s)	$E_i$	$x_i \cdot E_i$ (%)
$0,5 \times 10^{-6}$	5,0	$5,01 \times 10^{-18}$	1,33	$2,48 \times 10^{-2}$	0,395	1,98
$1,5 \times 10^{-6}$	6,0	$4,51 \times 10^{-17}$	1,11	$6,20 \times 10^{-2}$	0,715	4,29
$3,0 \times 10^{-6}$	12,0	$1,80 \times 10^{-16}$	1,06	0,118	0,908	10,90
$5,0 \times 10^{-6}$	11,0	$5,01 \times 10^{-16}$	1,03	0,192	0,980	10,78
$8,0 \times 10^{-6}$	12,0	$1,28 \times 10^{-15}$	1,02	0,304	0,998	11,97
$13,0 \times 10^{-6}$	11,0	$3,38 \times 10^{-15}$	1,01	0,490	1,000	11,00
$19,0 \times 10^{-6}$	13,0	$7,23 \times 10^{-15}$	1,01	0,714	1,000	13,00
$27,0 \times 10^{-6}$	17,0	$1,46 \times 10^{-14}$	1,01	1,01	1,000	17,00
$46,0 \times 10^{-6}$	13,0	$4,24 \times 10^{-14}$	1,00	1,71	1,000	13,00
					Total =	93,92

Eficiência global = 94%