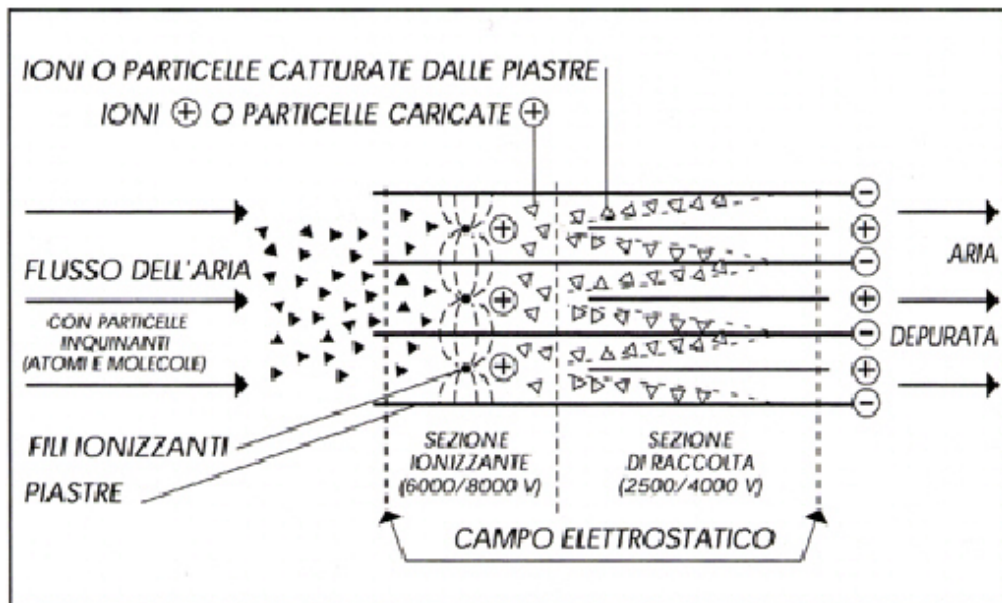


Precipitatori elettrostatici

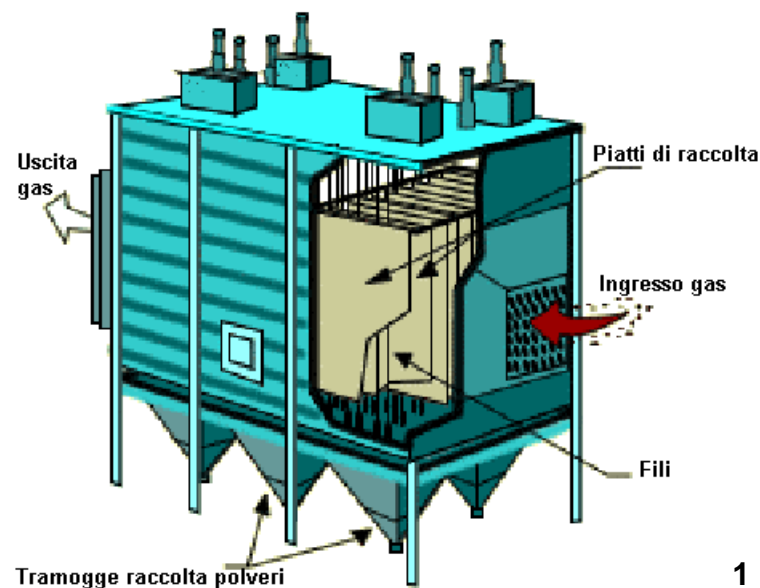
Un precipitatore elettrostatico (Electrostatic Precipitator ESP) è costituito da fili ad alta tensione (30-60 kV) sospesi nel canale di scarico dei gas, tra piatte metalliche parallele poste a massa.



Dall'elettrodo passivo il deposito è rimosso, per mezzo di un raschiatore metallico, con frequenza prefissata e raccolto nella tramoggia di fondo.

Il sistema presenta un'elevata efficienza di raccolta anche su particelle fini ($e_p > 99\%$).

Nel processo di elettrofiltrazione le particelle di polvere vengono dapprima caricate elettricamente (positive) per collisione da ioni prodotti da un elettrodo ad alta tensione (filo sospeso) e successivamente attratte dall'elettrodo passivo (negativo) sul quale si depositano (piatto).



Precipitatori elettrostatici

VANTAGGI:

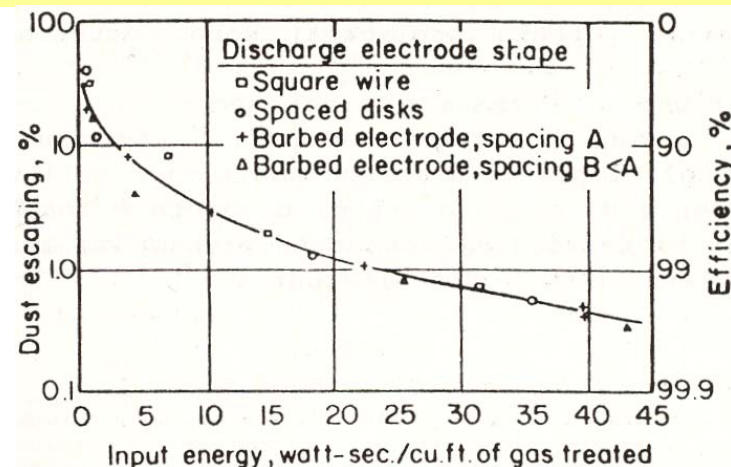
- elevata efficienza di rimozione anche su particelle fini ($> 99\%$)
- ridotta perdita di carico del gas: la velocità di attraversamento del gas nel precipitatore è infatti molto ridotta (sempre < 5 m/s) e le perdite di carico aggiuntive sono trascurabili.
- passaggio di corrente (quindi l'energia spesa nel trattamento) è circa proporzionale al flusso di solido separato e non alla portata di gas: quindi è un sistema adatto al trattamento di grosse portate di gas
- possibilità di operare con temperature relativamente elevate (fino a circa 650 °C)

PROBLEMI:

- necessità assoluta di prevenzione della possibilità di presenza nei fumi di composti incombusti (archi elettrici si verificano normalmente nei precipitatori)
- scarsa efficienza se usati con combustibili a basso tenore di zolfo, che producono ceneri ad alta resistività elettrica ($>10^{10}$ ohm-cm.). Iniezione SO_3 ($10 \div 20$ ppm) nei gas di scarico, con recupero quasi totale nell'ESP.
- costo elevato

La velocità di migrazione delle particelle verso i piatti raccolta aumenta proporzionalmente alla potenza elettrica applicata, perciò l'efficienza aumenta come mostrati in figura.

Anche l'incremento della differenza di potenziale (DDP) agli elettrodi porta ad un incremento dell'efficienza di rimozione.



Precipitatori elettrostatici – Elementi di dimensionamento

$$\eta = 1 - e^{(-wA/Q)}$$

η = efficienza di cattura dimensionale

A = area di cattura complessiva [m^2]

Q = portata volumetrica di gas [m^3 / min]

w = velocità di drift (velocità terminale in direzione y) [m/min]

VELOCITA' DI DRIFT

La velocità di drift può essere calcolata in modo simile alla velocità di deposizione in un campo gravitazionale.

Comunque si possono ottenere espressioni per la velocità di drift che sono accurate per casi di particelle sferiche, soggette a portate di gas costanti e campo elettrico costante.

L'effetto di particelle con forme diverse, le variazioni nel campo elettrico, la non uniformità di distribuzione della portata di gas, e la risospensione fanno sì che la velocità di drift calcolata teoricamente non sia affidabile per il dimensionamento degli ESP.

Nella pratica quindi la velocità di drift viene valutata per mezzo di studi pilota o da precedenti esperienze.

L'espressione della efficienza di rimozione riportata può essere utilizzata per un primo dimensionamento, anche se i produttori di ESP hanno modelli proprietari più dettagliati per il dimensionamento finale.



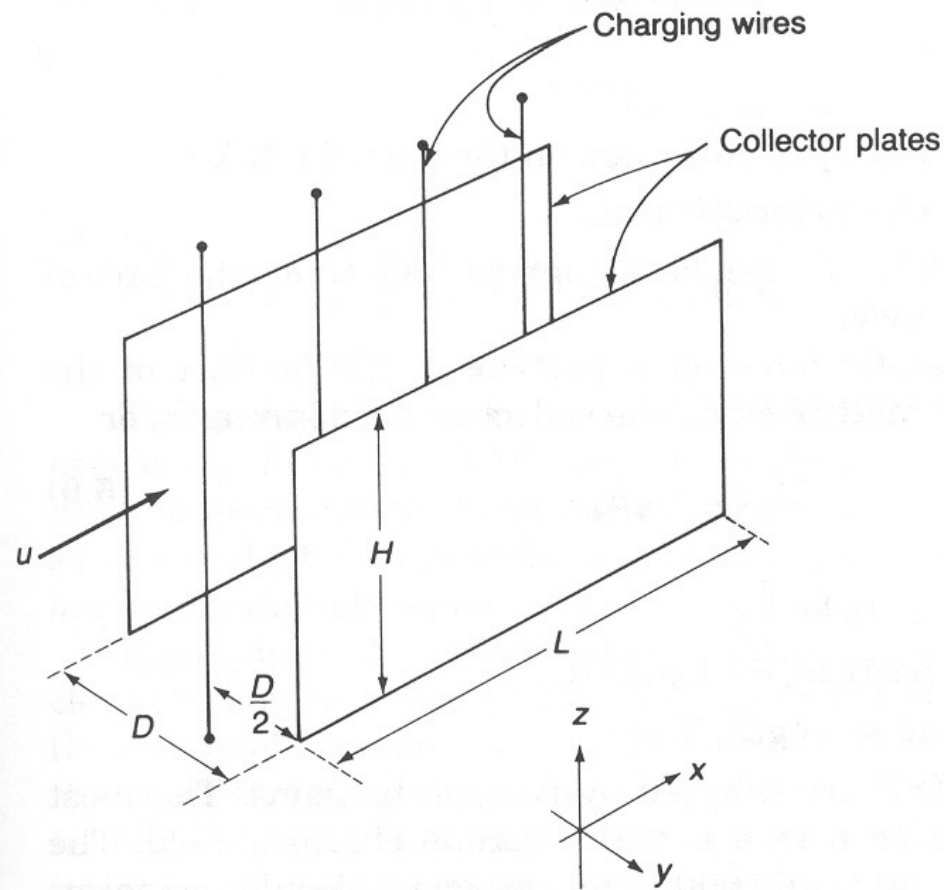
Precipitatori elettrostatici – Elementi di dimensionamento

$$A = A_p (n - 1) N_s = A_p (N - N_s)$$

A_p = area del piatto sui due lati (= $2HL_p$) N = numero totale di piatti nell'ESP

n = numero di piatti in parallelo

N_s = numero di sezioni nella direzione del flusso

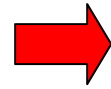


Precipitatori elettrostatici – Elementi di dimensionamento

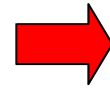
ESEMPIO

Calcolare l'area totale di un ESP con efficienza di rimozione complessiva 98% che tratta una portata di aria di 10.000 m³/min. La velocità di drift effettiva è 6 m/min. Considerando piatti alti 6 m, lunghi 3 m e due sezioni nelle direzione del flusso, calcolare il numero di piatti richiesti.

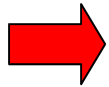
$$\eta = 1 - e^{(-wA/Q)}$$



$$\ln(1 - \eta) = \frac{-wA}{Q}$$

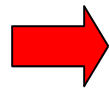


$$A = \frac{-Q}{w} \ln(1 - \eta)$$

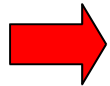


$$A = \frac{-10.000 \frac{m^3}{min}}{6 \frac{m}{min}} \ln(1 - 0,98) = 6520 m^2$$

$$A = A_p (N - N_s)$$



$$A = A_p (N - 2)$$



$$N = \frac{A}{A_p} + 2 = \frac{6520}{3 \times 6 \times 2} + 2 = 183.1 = 184 \text{ piatti}$$



Precipitatori elettrostatici – Resistività delle particelle

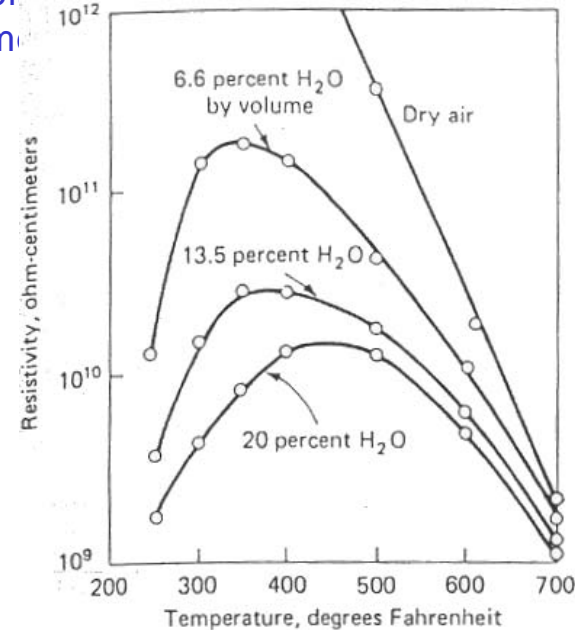
Le particelle che arrivano sulla superficie dei piatti vi rimangono grazie alle forze adesiva, coesiva ed elettrica, che devono essere tali da prevenire la risospensione delle particelle nella corrente gassosa.

La proprietà che risulta estremamente importante per il funzionamento del precipitatore elettrostatico è la resistività elettrica dello strato di polvere depositato sui piatti, proprio al fine di evitare la risospensione delle particelle.

La resistività delle polveri comunemente rimosse in processi industriali può variare, a causa della varietà dei processi stessi, da 10^{-3} a 10^{14} ohm-cm. Quando la resistività è inferiore a 10^4 ohm-cm si ha un rapido movimento di carica dalla polvere al piatto di raccolta lasciando le particelle depositate sul piatto con una bassa carica, insufficiente a mantenerle insieme. Questo può portare ad una sensibile riduzione dell'efficienza di rimozione.

Dall'altro lato, una resistività superiore a 10^{10} ohm-cm, può creare problemi legati all'effetto di isolamento che lo strato di polvere ad alta resistività sul piatto di raccolta può provocare, riducendo la differenza di potenziale che si instaura e quindi l'efficienza di rimozione.

Il range di resistività per le polveri che possono essere efficacemente raccolte da un ESP si trova quindi fra 10^4 a 10^{10} ohm-cm, quindi è spesso necessario modificare la resistività delle particelle a monte del trattamento. Temperatura ed umidità possono influenzare largamente la resistività. Un altro modo per modificare la resistività è l'aggiunta di agenti esterni, come SO_3 o NH_3 , che adsorbiti sulle particelle, ne riducono la resistività.



Effetto di temperatura ed umidità sulla resistività di polveri dell'industria del cemento: in generale ad aumentare dell'umidità la resistività diminuisce, mostrando un valore massimo rispetto alla temperatura



Precipitatori elettrostatici – Resistività delle particelle

ESEMPIO

Calcolare l'area totale necessaria per due ESP con un'efficienza di rimozione del 99% che trattano 8.000 m³/min. Le resistività delle ceneri sono:

- a) 1,6 10¹⁰ ohm-cm b) 2,5 10¹¹ ohm-cm

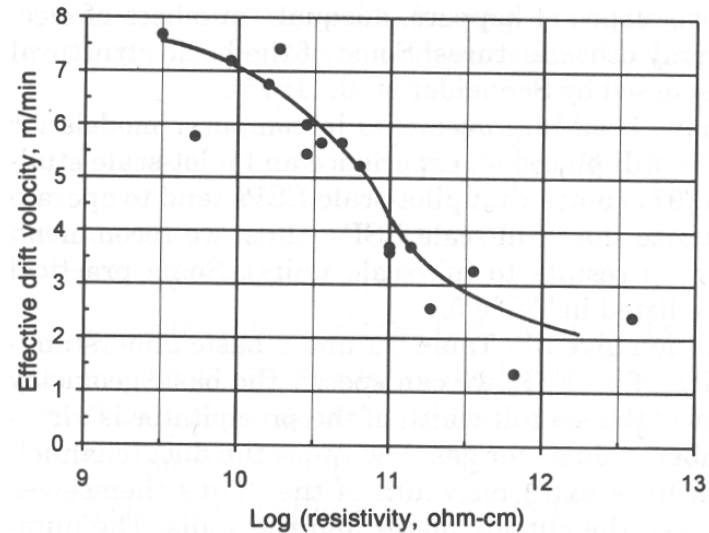
Dalla figura si ricava la velocità di drift in funzione della resistività delle ceneri:

- a) $\log(1,6 \cdot 10^{10}) = 10,2 \text{ ohm-cm} \rightarrow w = 6,8 \text{ m/min}$

$$A = \frac{-Q}{w} \ln(1 - \eta) = \frac{-8.000}{6,8} \ln(1 - 0.99) = 5.418 \text{ m}^2$$

- b) $\log(2,5 \cdot 10^{11}) = 11,4 \text{ ohm-cm} \rightarrow w = 3 \text{ m/min}$

$$A = \frac{-Q}{w} \ln(1 - \eta) = \frac{-8.000}{3} \ln(1 - 0.99) = 12.280 \text{ m}^2$$



Precipitatori elettrostatici – Tipici parametri di progetto

Selected Design Parameters for Fly-Ash ESPs and Typical Values

Parameter	Range of Values														
Drift Velocity w_e	1.0–10 m/min														
Channel (Duct) Width D	15–40 cm														
Specific Collection Area SCA (Plate Area/Gas Flow)	0.25–2.1 m ² /(m ³ /min)														
Gas Velocity u	1.2–2.5 m/s (70–150 m/min)														
Aspect Ratio R (Duct Length/Plate Height)	0.5-1.5 (not less than 1.0 for $\eta > 99\%$)														
Corona Power Ratio P_c/Q (Corona Power/Gas Flow)	1.75–17.5 W/(m ³ /min)														
Corona Current Ratio I_c/A (Corona Current/Plate Area)	50–750 $\mu\text{A}/\text{m}^2$														
Power Density versus Resistivity															
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Ash Resistivity, ohm-cm</th> <th>Power Density, W/m²</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>$10^4 - 10^7$</td> <td>43</td> </tr> <tr> <td>$10^7 - 10^8$</td> <td>32</td> </tr> <tr> <td>$10^9 - 10^{10}$</td> <td>27</td> </tr> <tr> <td>10^{11}</td> <td>22</td> </tr> <tr> <td>10^{12}</td> <td>16</td> </tr> <tr> <td>10^{13}</td> <td>10.8</td> </tr> </tbody> </table>	Ash Resistivity, ohm-cm	Power Density, W/m ²	$10^4 - 10^7$	43	$10^7 - 10^8$	32	$10^9 - 10^{10}$	27	10^{11}	22	10^{12}	16	10^{13}	10.8
Ash Resistivity, ohm-cm	Power Density, W/m ²														
$10^4 - 10^7$	43														
$10^7 - 10^8$	32														
$10^9 - 10^{10}$	27														
10^{11}	22														
10^{12}	16														
10^{13}	10.8														
Plate Area per Electrical Set A_s	460–7400 m ²														
Number of Electrical Sections															
a. In the Direction of Gas Flow, N_s	2–8														
b. Total, N_t	1–10 sections/(1000 m ³ /min)														



Precipitatori elettrostatici – Geometria

Definizione del numero totale di condotti, altezza e larghezza dei piatti, lunghezza dell'ESP, etc.

$$N_d = \frac{Q}{uDH}$$

N_d = numero di condotti

Q = portata volumetrica totale m³/min

u = velocità del gas m/min

D = larghezza del canale (distanza piatti) m

H = altezza dei piatti

La lunghezza complessiva dell'ESP L_0 è data da:

$$L_0 = N_s L_p + (N_s - 1)L_s + L_{en} + L_{ex}$$

N_s = numero delle sezioni elettriche in direzione del flusso m

L_p = lunghezza dei piatti m

L_s = spazio fra le sezioni m

L_{en} = lunghezza della sezione di entrata m

L_{ex} = lunghezza della sezione di uscita m

Lo spazio fra le sezioni può essere 0,5-1,5 m, mentre le sezioni di ingresso ed uscita possono essere di alcuni metri.

I piatti per ESP molto grandi possono essere **alti 6-12 m** e **lungi 1-4 m** (nella direzione del flusso)

L'altezza complessiva dell'ESP può arrivare a 1,5-3 volte quella dei piatti a causa della presenza delle tramogge e di altre strutture.

Il numero delle sezioni elettriche può variare da 2 a 8, in funzione delle dimensioni dei piatti

$$N_s = RH / L_p$$

R = aspect ratio (lunghezza totale piatti/altezza piatti)



Precipitatori elettrostatici – Geometria

L'area totale in funzione del numero di sezioni e di condotti risulta:

$$A_a = 2HL_p N_s N_d$$

Durante il processo di dimensionamento, più combinazioni di dimensioni di piatti e numero di condotti possono essere provate fino a quando si si trova un valore di A_a uguale (o leggermente superiore) a quello valutato con i calcoli relativi all'efficienza.

Le prestazioni di un ESP aumentano con il numero delle sezioni (allineamento degli elettrodi, etc..operatività anche se una sezione è ferma, etc.) anche se questo aumenta i costi di investimento.



Precipitatori elettrostatici – Geometria

ESEMPIO

Per un ESP con 99% di efficienze che tratta 20.000 m³/min di gas è richiesta un'area totale di 14.000 m². Si stimino la larghezza, lunghezza e altezza complessiva dell'ESP. Si usino i tipici valori per l'altezza dei piatti, la larghezza del condotto, la velocità del gas e aspect ratio (R). Le dimensioni dei piatti disponibili sono altezza 6-12 m e lunghezza 3 m.

Valori tipici:

$$H = 12 \text{ m}$$

$$R = 1$$

$$D = 25 \text{ cm}$$

$$u = 100 \text{ m/min}$$

Calcolo il numero di condotti

$$N_d = \frac{Q}{uDH} = \frac{20.000 \text{ m}^3 / \text{min}}{(100 \text{ m} / \text{min})(0,25 \text{ m})(12 \text{ m})} = 67 \text{ condotti}$$

Calcolo il numero di sezioni

$$N_s = RH / L_p = \frac{(1)(12)}{3} = 4 \text{ sezioni}$$

Calcolo l'area totale

$$A_a = 2HL_p N_s N_d = 2(12)(3)(4)(67) = 19.296 \text{ m}^2$$

← >> 14.000 m²



Precipitatori elettrostatici – Geometria

Proviamo a cambiare le dimensioni dei piatti: $H=10$ m

Ricalcolo il numero di condotti

$$N_d = \frac{Q}{uDH} = \frac{20.000m^3 / \text{min}}{(100m / \text{min})(0,25m)(10m)} = 80 \text{condotti}$$

Calcolo il numero di sezioni

$$N_s = RH / L_p = \frac{(1)(10)}{3} = 3,3 \approx 4 \text{sezioni}$$

Calcolo l'area totale

$$A_a = 2HL_p N_s N_d = 2(10)(3)(4)(80) = 19.200m^2 \quad \leftarrow \gg 14.000 m^2$$



Precipitatori elettrostatici – Geometria

Proviamo a cambiare le dimensioni dei piatti: $H=8$ m

Ricalcolo il numero di condotti

$$N_d = \frac{Q}{uDH} = \frac{20.000m^3 / \text{min}}{(100m / \text{min})(0,25m)(8m)} = 100 \text{ condotti}$$

Calcolo il numero di sezioni

$$N_s = RH / L_p = \frac{(1)(8)}{3} = 3 \text{ sezioni}$$

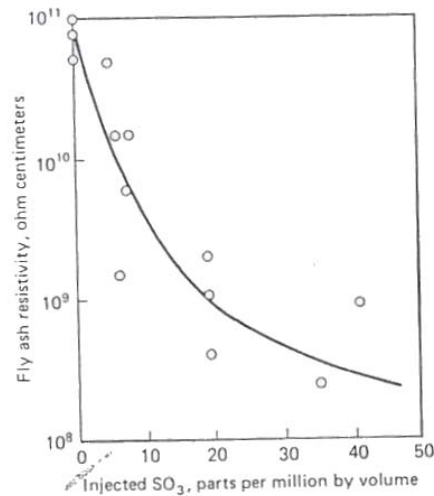
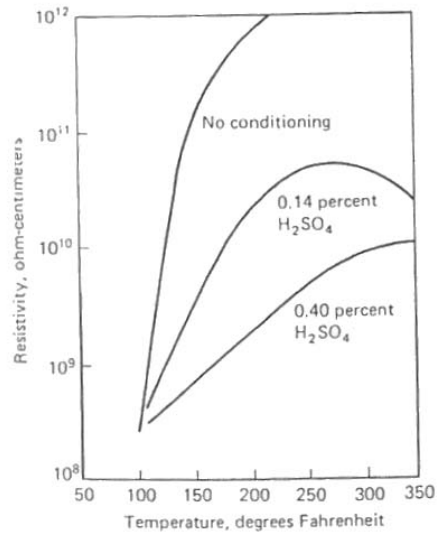
Calcolo l'area totale

$$A_a = 2HL_p N_s N_d = 2(8)(3)(4)(100) = 14.400m^2 \quad \leftarrow R=1,1$$

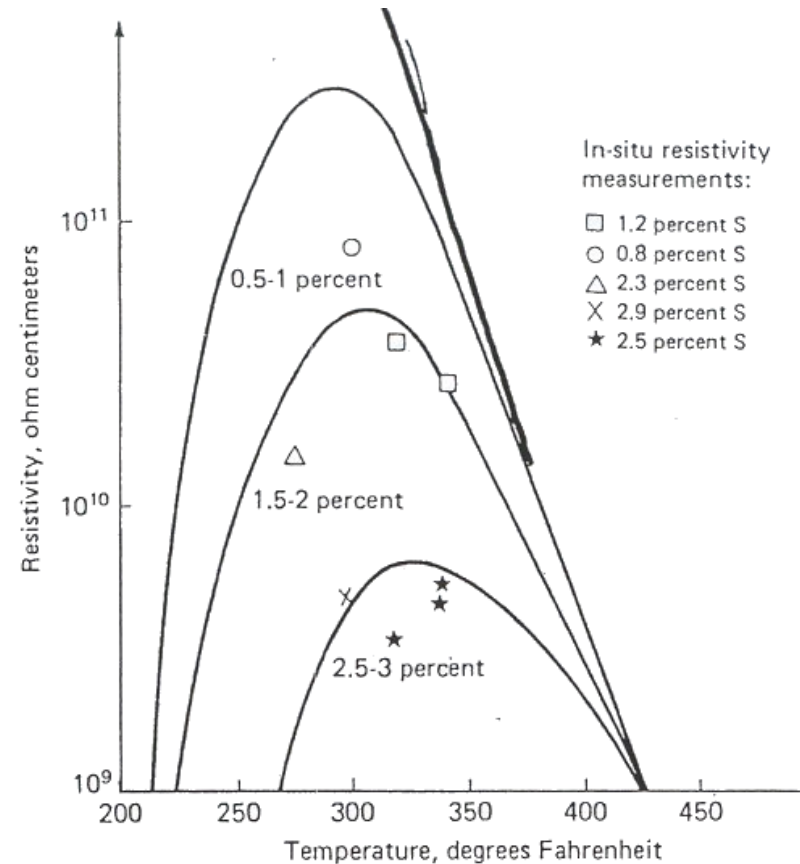
$$\text{Specific collection area} = \frac{14.400m^2}{20.000m^3 / \text{min}} = 0,72 \frac{m^2}{m^3 / \text{min}}$$



Precipitatori elettrostatici – Resistività delle particelle



Effetto del condizionamento di fly ash per iniezione di H_2SO_4 (a) e SO_3 (b) nei gas di scarico.



Variazione della resistività di fly ash rispetto al contenuto di zolfo del carbone.

L'aggiunta o la presenza di zolfo riduce effettivamente la resistività delle particelle.

E' pratica comune quindi aggiungere SO_3 per ridurre la resistività di certe polveri ed aumentarne l'efficienza di rimozione.

Le emissioni di SO_x non ne risentono, in quanto l' SO_3 viene adsorbito sulle particelle solide e con esse rimosso.



Precipitatori elettrostatici – Consumi elettrici/efficienza

$$P_c = I_c V_{avg}$$

P_c = potenza [W]

I_c = corrente [A]

V_{avg} = differenza di potenziale media [V]

Anche se la differenza di potenziale negli ESP è solitamente elevata, la corrente dovuta alla migrazione degli ioni del gas è bassa, quindi il consumo è ragionevole.

Esistono espressioni sperimentali che permettono di mettere in relazione la velocità effettiva di drift con la potenza richiesta, come quella riportata (White, 1977):

$$w_e = \frac{kP_c}{A}$$

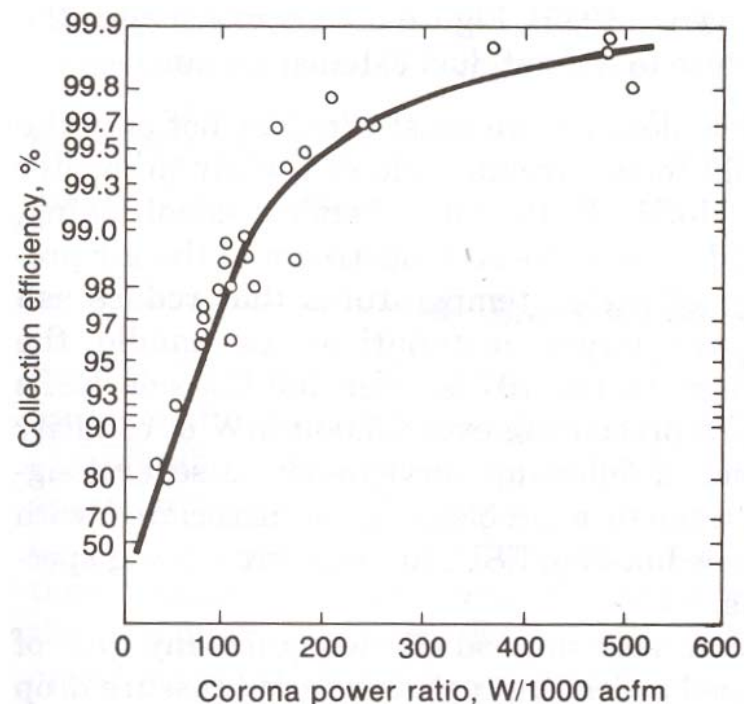
k è una costante. Per ESP ben realizzati k è nel range 0,5-0,7 per set di unità di w_e in ft/sec e P_c/A in W/ft²

$$\eta = 1 - e^{(-kP_c/Q)}$$

$k=0,55 P_c/Q$ in W/cfs

Accurata per $\eta < 98,5\%$

Per $\eta > 98,5\%$ la potenza aumenta molto velocemente

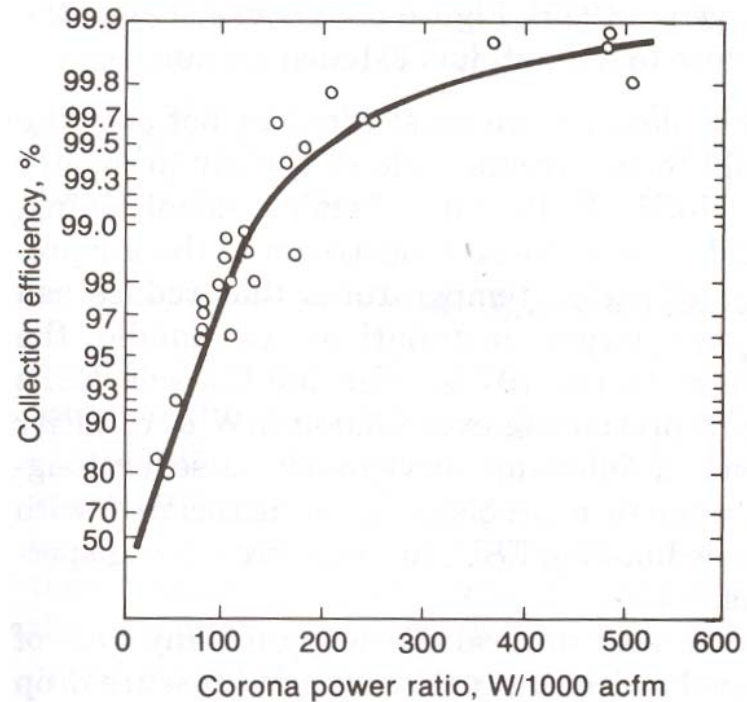


Precipitatori elettrostatici – Consumi elettrici/efficienza

ESEMPIO

Un ESP deve trattare 9.000 m³/min di gas da cui è necessario rimuovere particelle solide con a) il 98% di efficienza, o b) il 99,8 di efficienza. Usando i dati in figura si stimi la potenza richiesta in kW.

Dalla figura:



$$\eta = 98\% \rightarrow P_c = \frac{100W}{1000acfm} \times 9.000 \frac{m^3}{min} \times \frac{35,3 ft^3}{1m^3} \times \frac{1kW}{1000W} = 31,8kW$$

$$\eta = 99,8\% \rightarrow P_c = \frac{330W}{1000acfm} \times 9.000 \frac{m^3}{min} \times \frac{35,3 ft^3}{1m^3} \times \frac{1kW}{1000W} = 105kW$$

L'incremento di 1,8% nell'efficienza di rimozione richiede una potenza pari a circa tre volte. Si verifichi che anche altri parametri importanti, come l'area totale dei piatti, cambiano significativamente.



Precipitatori elettrostatici

Attualmente si tende ad adottare soluzioni con ampie distanze tra i piatti (dai 20-30 iniziali ai 50-60 cm odierni) e basse velocità di attraversamento (< 1-2 m/s).

Parametro fondamentale è la SCA (Specific Collection Area), che vale circa $130 \text{ m}^2/(\text{m}^3/\text{s})$ per contenuti di ceneri di circa $80 \text{ mg}/\text{Nm}^3$.

Metodi di alimentazione impulsiva, sovrapposta alla tensione continua, al fine di migliorare la ionizzazione delle particelle. Sistemi per ionizzare le ceneri a monte del precipitatore.

Sistemi a film di liquido discendente per gravità sulle piastre per migliorare la rimozione delle particelle.

Tecnicamente sono possibili due soluzioni per la disposizione dei fili:

- fili sospesi con contrappesi: problema rottura per fatica (diametro circa 2,5 mm, lunghezza max circa 15 m)

- fili tesi su telai rigidi: più diffusa

La figura mostra la misura dell'efficienza di rimozione nel caso di un ESP, sui fumi di scarico di una caldaia a carbone, operato a diverse SCA, evidenziando come l'efficienza di rimozione aumenti per particelle submicroniche.

Per particelle $>1 \mu\text{m}$, si ha una saturazione della carica, che porta ad una diminuzione dell'efficienza di rimozione.

Per particelle $<0,4 \mu\text{m}$ la carica aumenta (si instaurano diversi fenomeni di carica al decrescere delle dimensioni delle particelle), portando un incremento dell'efficienza di rimozione.

ESP adatti a rimuovere particelle molto fini.

