

# Filtrazione a secco avanzata

Riccardo Chirone

Massimo Urciuolo

Per filtrazione di una corrente gassosa si intende l'eliminazione di sostanze, gassose, liquide o solide, da correnti che per una serie di motivi occorre purificare.

Questi motivi possono essere così riassunti:

- rispetto di adempimenti normativi per evitare sanzioni penali e amministrative, blocco della produzione, danni di immagine;
- salvaguardia dell'ambiente e della salute umana;
- possibilità di ottenere un ritorno economico derivante da una serie di situazioni quali recupero di materiale pregiato, recupero di energia, pulizia di correnti in ingresso a una linea produttiva (per esempio nei processi di polimerizzazione)

- Con riferimento alla rimozione di particolato solido da corrente gassosa occorre conoscere ovviamente la **natura** del particolato da rimuovere e fissare il **grado di rimozione** che si vuole raggiungere con il processo di pulizia prescelto. I dati principali che bisogna avere a disposizione sono:
  - portata della corrente gassosa
  - temperatura e pressione della corrente gassosa
  - composizione della corrente gassosa
  - natura del materiale da rimuovere
  - concentrazione massima del particolato ammessa in uscita
- La conoscenza di questi dati consente di **definire il sistema di abbattimento ideale** per la particolare applicazione desiderata. In realtà un elenco più completo dei dati necessari per una definizione più corretta del dimensionamento del sistema di depolverizzazione deve comprendere: eventuali proprietà particolari della polvere, eventuali proprietà particolari del gas, ulteriori informazioni sulla temperatura della corrente gassosa (picchi di massimo o minimo, necessità di isolamento termico, recupero di calore, ecc.), perdite di carico, **limiti per l'emissione** (efficienza richiesta), possibilità di **recupero del prodotto dalla corrente**, dati sulla sicurezza.

# Caratterizzazione di particelle

Ai fini dell'abbattimento, le polveri vengono classificate principalmente sulla base della loro dimensione. Nelle norme di legge, invece, è di solito fissata solo la concentrazione massima di particolato nella corrente scaricata nell'atmosfera. Il livello di concentrazione di particolato in una corrente può essere classificato come riportato nella tabella

<b>Livello</b>	<b>Concentrazione, g/m<sup>3</sup></b>
<b>Basso</b>	<b>1 – 5</b>
<b>Medio</b>	<b>5 – 7</b>
<b>Moderato</b>	<b>7 – 11</b>
<b>Alto</b>	<b>Superiore a 11</b>

- Facendo riferimento alla dimensione, una prima grossolana classificazione delle polveri, basata sul diametro, le distingue in :
  - *Sedimentabili* (diametro medio maggiore di 100  $\mu\text{m}$ )
  - *Inalabili* (diametro medio compreso tra 5 e 100  $\mu\text{m}$  )
  - *Respirabili* (diametro medio inferiore a 5  $\mu\text{m}$ )
- Il particolato ha in genere forma molto irregolare anche se si possono riscontrare talvolta stati cristallini regolari. Le particelle, in tal senso, possono essere classificate come:
  - isometriche (granulari), in cui tutte le dimensioni sono dello stesso ordine di grandezza;
  - piatte (scaglie), in cui due dimensioni sono predominanti rispetto alla terza;
  - agugliate (fibre), in cui c'è una sola dimensione predominante come nei prismi o nelle fibre

Nel caso di particelle irregolari risulta difficile riferire tali particelle ad una dimensione ed è necessario definire relazioni che esprimano una dimensione media equivalente, le più diffuse sono:

- *diametro dello staccio*, è la larghezza della minima maglia (mesh) attraverso cui la particella riesce a passare
- *diametro di sedimentazione*, è il diametro di una sfera che ha la stessa densità e la stessa velocità terminale in un fluido specificato della particella reale, è noto anche come *diametro di Stokes*
- *diametro dell'area proiettata*, è il diametro di un cerchio che ha la stessa area dell'immagine della particella proiettata parallelamente al piano di vista del microscopio, utilizzato nella valutazione del *fattore di forma* che quantifica la diversità rispetto alla sfera
- *diametro di cut*, è il diametro di particella per il quale metà delle particelle della distribuzione sono raccolte dal separatore mentre l'altra metà resta in sospensione nella corrente. Quanto più è basso il diametro di cut di un sistema di separazione, tanto maggiore sarà la capacità del sistema di liberare il gas anche da polveri di piccole dimensioni

- *diametri di volume equivalente*,  $d_v$ , è definito come il diametro di una particella sferica che abbia lo stesso volume della particella considerata; per una particella generica di volume V:

$$d_v = \left( \frac{6 \cdot V}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}}$$

- *diametro di superficie equivalente*,  $d_s$ , è il diametro di una sfera che ha la stessa superficie laterale della particella irregolare. Per una particella singola sarà:

$$d_s = \left( \frac{S}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}}$$

dove S è la superficie laterale della particella reale

- *diametro di superficie/volume equivalente*, è definito come il diametro di una particella che ha lo stesso rapporto superficie/volume della particella in questione

- Il più utilizzato è il *diametro di Sauter* che è il diametro equivalente di superficie/volume, definito dalla relazione:

$$d_s = \frac{1}{\sum_i \frac{x_i}{d_i}}$$

- dove  $x_i$  è la frazione massica di particelle aventi diametri  $d_i$ ; il diametro medio di Sauter di una certa distribuzione di N particelle è il diametro di un insieme di N particelle sferiche, tutte uguali, che conservano lo stesso rapporto superficie esterna/volume della distribuzione reale di cui si vuole calcolare il diametro medio.

## **Sistemi filtranti tradizionali: caratterizzazione del mezzo filtrante**

Le caratteristiche di un buon mezzo filtrante di tipo tradizionale possono essere riassunte nei seguenti punti:

- deve trattenere il solido che si vuole separare dalla corrente gassosa
- non deve intasarsi facilmente cioè non deve determinare un aumento eccessivo delle perdite di carico che porterebbe alla impraticabilità del processo di filtrazione
- deve avere un'elevata resistenza dal punto di vista sia chimico sia meccanico
- deve essere facilmente rigenerabile
- non deve essere eccessivamente costoso

- La maggior parte dei mezzi filtranti è, però, utilizzabile in processi che non prevedano temperature molto elevate e concentrazioni di particolato molto alte.
- Con tali mezzi tradizionali, quando si debba trattare una corrente gassosa a temperatura superiore ai 300 °C, l'unica fibra utilizzabile è quella di vetro; è una fibra molto costosa poiché è di difficile manutenzione, affidata a personale specializzato.
- Dovendo trattare correnti gassose con temperature fino a 400 °C si potrebbero utilizzare filtri di materiale metallico anch'essi molto costosi oltre che poco efficaci dal punto di vista dell'efficienza di raccolta

<b>Tipo</b>	<b>Efficienza globale media %</b>	<b>Costo di installazione **</b>	<b>Costi operativi **</b>	<b>Perdita di carico media **</b>
<b>Camera di sedimentazione</b>	<b>60</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
<b>Ciclone</b>	<b>85</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>Jet scrubber</b>	<b>88</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
<b>Torre di lavaggio</b>	<b>95</b>	<b>6</b>	<b>6</b>	<b>1</b>
<b>Precipitatore elettrostatico</b>	<b>99</b>	<b>10</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
<b>Venturi</b>	<b>99</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>10</b>
<b>Filtri a manica (scuotimento)</b>	<b>99</b>	<b>8</b>	<b>5</b>	<b>2</b>
<b>Filtri a manica (getti inversi)</b>	<b>99</b>	<b>9</b>	<b>9</b>	<b>2</b>

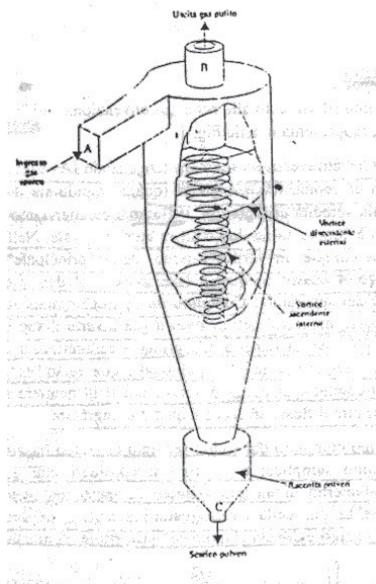
**Caratteristiche delle apparecchiature per la separazione solido-gas (\* Per un'unità che tratti 100000 m<sup>3</sup>/h di gas carico di polvere a 20°C; \*\* I costi sono forniti in scala da 1 a 10; \*\*\*Le perdite di carico sono fornite in scala da 1 a 10).**

<b>Tipo</b>	<b>Intervallo di dimensioni delle particelle catturabili, <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>Perdita di carico, atm</b>	<b>Efficienza di filtrazione</b>	<b>Temperatura massima di esercizio, <math>^{\circ}\text{C}</math></b>	<b>Condizione della corrente in uscita</b>	<b>Sensibilità al punto di rugiada</b>	<b>Effetto della densità delle particelle sulla efficienza</b>
<b>Camera di sedimentazione</b>	<b>&gt;150</b>	<b>&lt;0.25</b>	50% per particelle sotto i $50\mu\text{m}$ circa il 95% per particelle sopra i $300\mu\text{m}$	<b>500</b>	Secca o umida	Nessuna	L'efficienza cresce con la densità
<b>Ciclone</b>	<b>&gt;10</b>	<b>0.25-0.75</b>	80% per particelle sotto i $5\mu\text{m}$ , 50% per particelle sotto i $3\mu\text{m}$	<b>1000</b>	Secca	Critica	L'efficienza cresce con la densità
<b>Torre di lavaggio</b>	<b>&gt;8</b>	<b>0.5-1.75</b>	98% per particelle sopra i $5\mu\text{m}$ , 50% per quelle sotto i $3\mu\text{m}$	<b>200-500</b>	Umida	Può influenzare il materiale di costruzione	Effetto limitato
<b>Venturi</b>	<b>&gt;0.3-1.0</b>	<b>1.75-7.5</b>	90-99% per particelle sotto i $5\mu\text{m}$	<b>200-250</b>	Umida	Può influenzare il materiale di costruzione	Effetto limitato
<b>Filtri a manica</b>	<b>&gt;0.5-1.0</b>	<b>0.25-2.5</b>	95-99% per particelle sotto i $5\mu\text{m}$	<b>200-250</b>	Secca o umida	Molto critica	Nessun effetto
<b>Precipitatori elettrostatici</b>	<b>&gt;0.001</b>	<b>0.06-0.12</b>	Da 80 a oltre 99% per tutte le particelle	<b>500</b>	Secca o umida	Critica eccetto per precipitatori irrigati	Effetto limitato
<b>Filtri a carta ad alta efficienza</b>	<b>&gt;0.3-0.5</b>	<b>0.12-0.5</b>	Superiore a 99.9% per tutte le particelle sotto i $5\mu\text{m}$	<b>50</b>	Secca	Molto critica	Effetto limitato

**Caratteristiche di applicabilità di apparecchiature per la separazione solido-gas.**

# SISTEMI TRADIZIONALI DI RIMOZIONE DEL PARTICOLATO

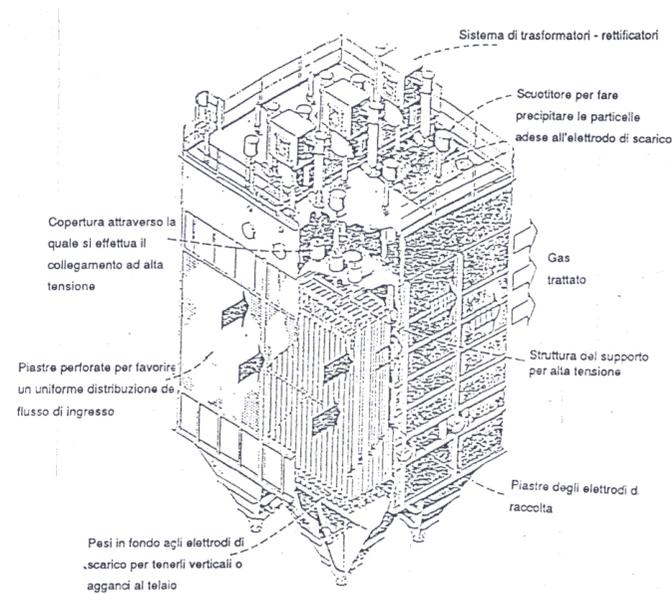
## Ciclone



$\eta=0,85$

$T=1000^{\circ}\text{C}$

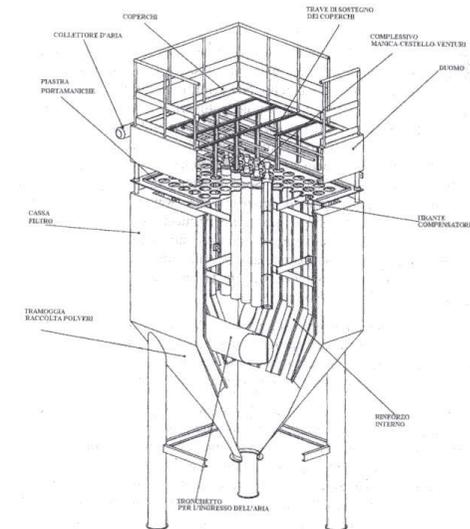
## Precipitatore elettrostatico



$\eta=0,99$

$T=500^{\circ}\text{C}$

## Filtro a manica



$\eta=0,99$

$T=250^{\circ}\text{C}$

# Separatori Elettrostatici

I separatori elettrostatici utilizzano forze elettriche per separare particelle solide o liquide da una corrente gassosa.

Il meccanismo prevede tre fasi:

- 1) Le particelle presenti nella corrente gassosa vengono caricate elettricamente
- 2) La corrente gassosa è immessa in un campo elettrico dove le particelle cariche subiscono forze in grado di deviarle dalla corrente verso un elettrodo di raccolta
- 3) Le particelle vengono rimosse dall'elettrodo per consentire la separazione di nuove particelle

# Separatori Elettrostatici

Nei sistemi a singolo stadio, adottati in larga prevalenza nel trattamento delle emissioni industriali, il processo di carica delle particelle avviene nello stesso campo elettrico che ne determina la separazione dal gas vettore.

La struttura elementare di un filtro elettrostatico è costituita da due elettrodi con raggi di curvatura molto differenti: in genere un elettrodo filiforme di scarica o di emissione ed uno a piastra o tubolare di raccolta.

# Separatori Elettrostatici

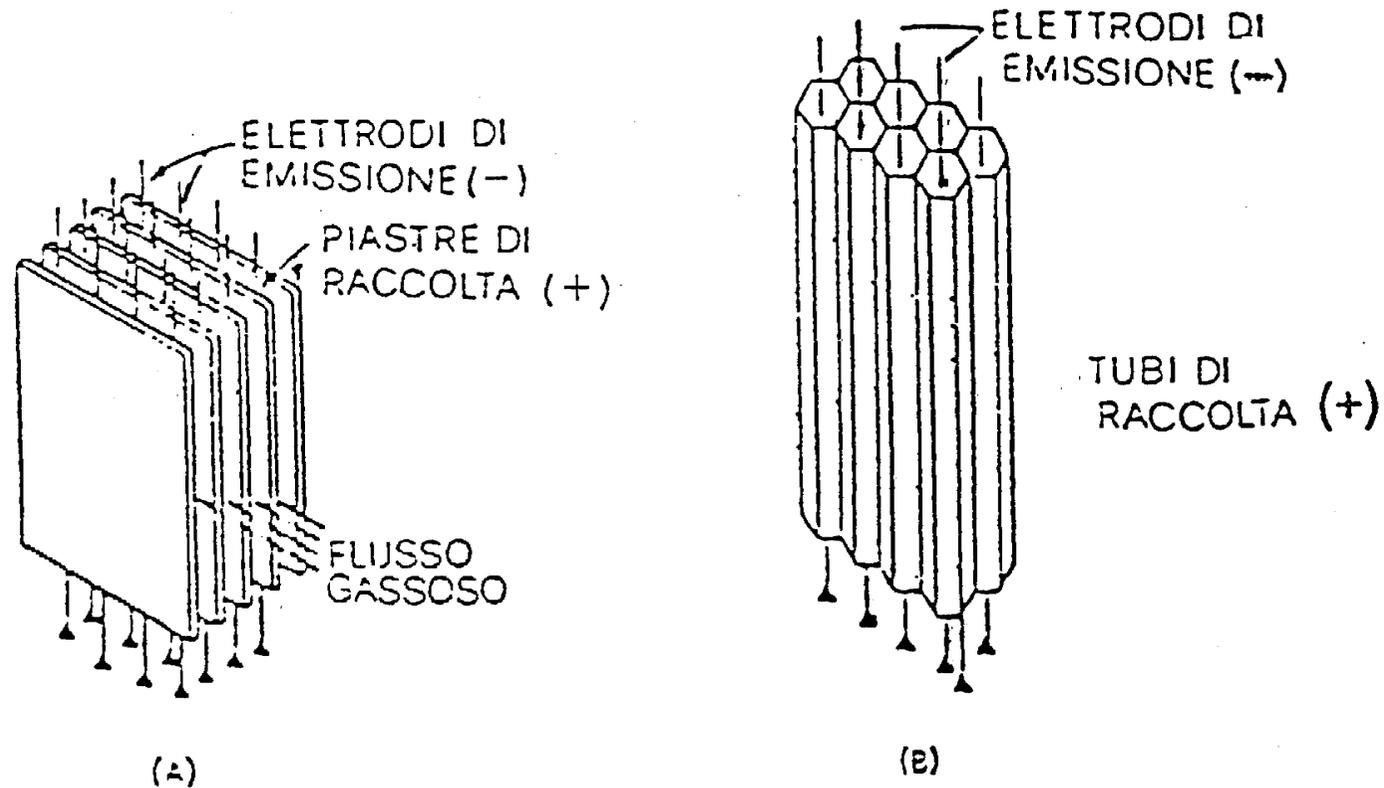


Fig. 3.1 - Tipi di precipitatori elettrostatici a stadio singolo: (A) superficie di raccolta piana, (B) superficie di raccolta tubolare.

# Separatori Elettrostatici

Quando ad elettrodi di così particolare geometria si applica una differenza di potenziale molto elevata, il valore del campo elettrico, non uniforme in prossimità dell'elettrodo di emissione, è sufficientemente alto perché gli elettroni accelerati del dielettrico (gas vettore del particolato) inneschino un processo di ionizzazione del dielettrico stesso (**effetto corona**).

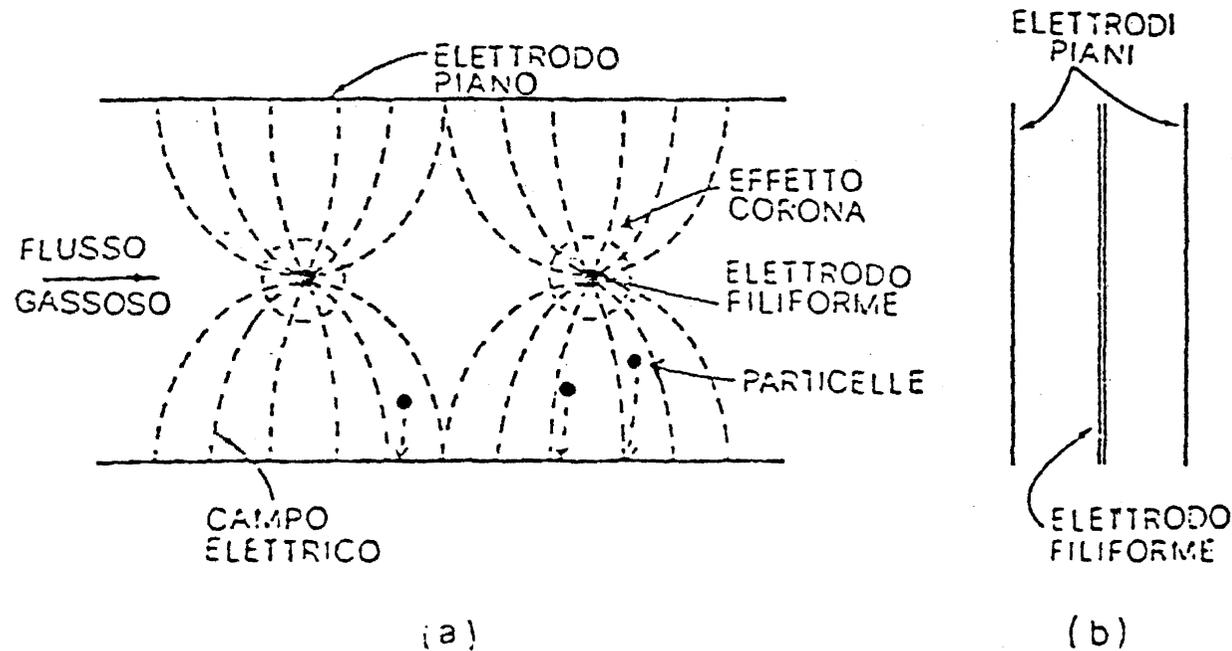


Fig. 3.2 - Sezione orizzontale (a) e trasversale (b) di un modulo di filtro elettrostatico.

# Separatori Elettrostatici

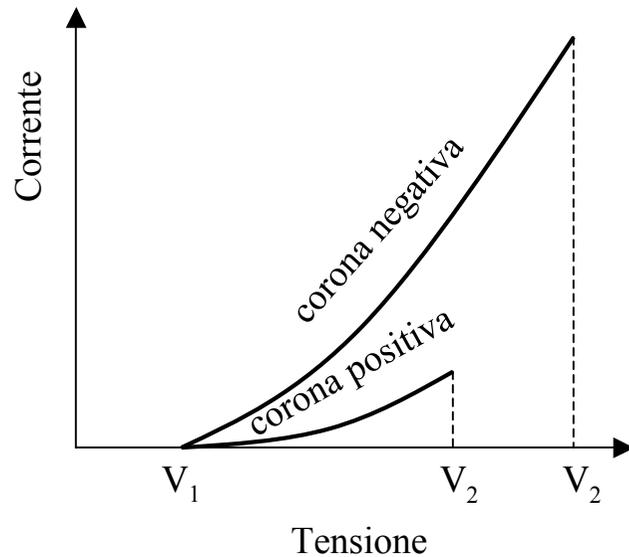
Gli ioni, prodotti dall'effetto corona, migrano verso gli elettrodi di segno opposto e, scontrandosi con le particelle di polvere che fluiscono parallelamente agli elettrodi, trasferiscono su di esse le cariche.

Per le particelle più piccole (  $< 0.5\mu\text{m}$  ) diventano importanti anche fenomeni di carica per diffusione, dovuti all'agitazione termica delle molecole gassose (moti Browniani). La carica elettrica assunta dalla particella dipende dall'entità dei fenomeni di carica oltre che dalla dimensione della particella stessa.

Sulle particelle cariche ed immesse nel campo elettrico viene così ad agire una forza elettrica prevalentemente diretta verso l'elettrodo di raccolta perché la quasi totalità delle particelle viene caricata dagli ioni che, generatisi in prossimità dell'elettrodo di emissione (zona dell'effetto corona) e diretti verso l'elettrodo di raccolta, attraversano tutta la sezione del filtro elettrostatico.

# Separatori Elettrostatici

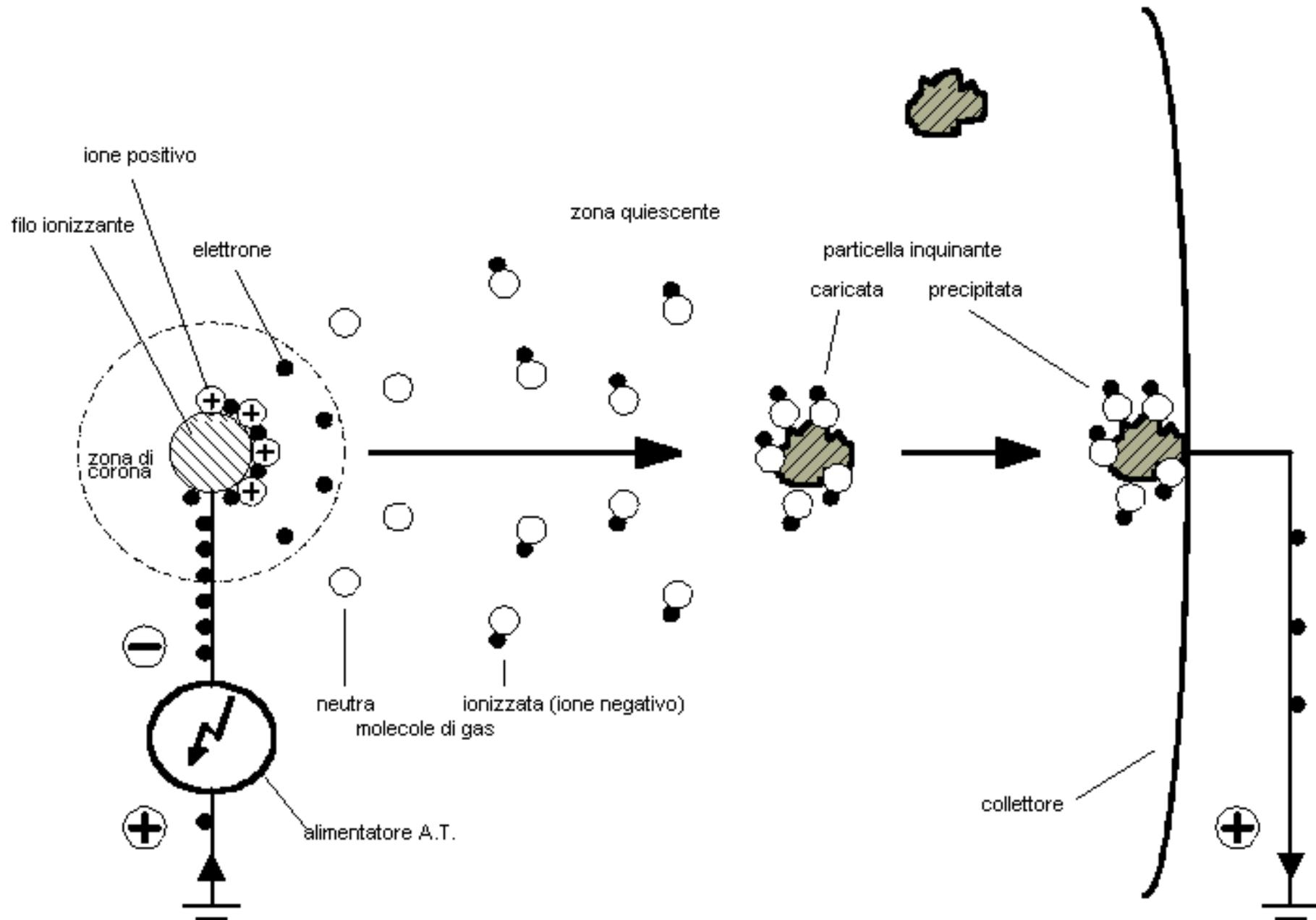
L'entità della forza elettrica è funzione della carica e dell'intensità del campo. Tale forza porta a depositare sull'elettrodo di raccolta le particelle che vengono ivi trattenute con una combinazione di forze meccaniche, elettriche e molecolari.



La corona negativa è più stabile di quella positiva (che tende ad essere sporadica e a causare scintilla a voltaggi inferiori) ed è quindi quella generalmente utilizzata per applicazioni industriali.

La configurazione con gli elettrodi di emissione collegati alla polarità negativa degli alimentatori consente infatti di ottenere, in modo stabile e con scariche contenute, i massimi valori di voltaggio e di intensità del campo elettrico.

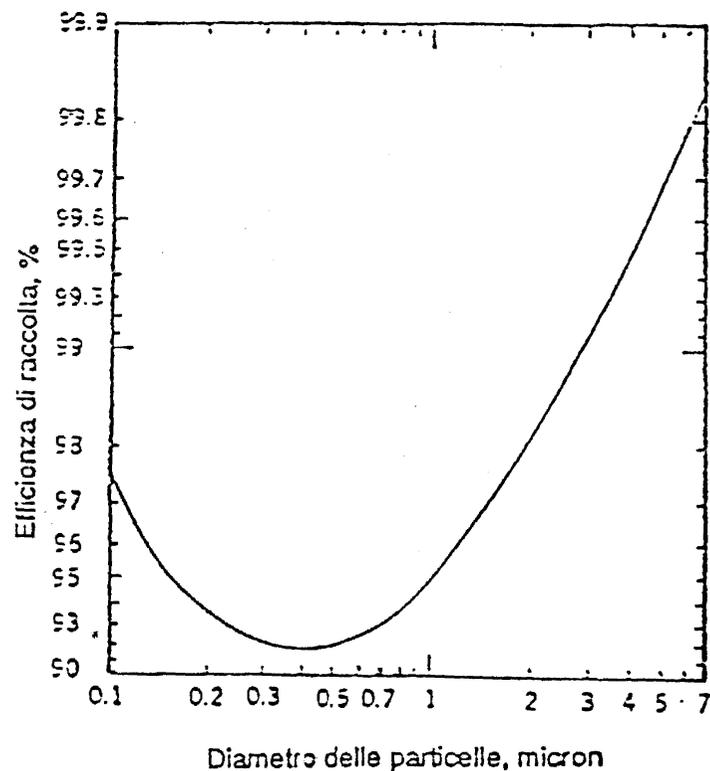
# Separatori Elettrostatici



# Separatori Elettrostatici

Le principali caratteristiche delle particelle che influenzano l'efficienza di rimozione sono la **granulometria** e la **resistività**.

La granulometria è coinvolta sia nel processo di carica controllato dagli urti fra ioni e particelle di dimensioni superiori ad  $1\mu\text{m}$ , sia in quello controllato dalla diffusione Browniana, significativo per particelle inferiori ad  $1\mu\text{m}$ .



La combinazione dei due processi determina un andamento dell'efficienza di rimozione in funzione della granulometria come si vede in figura.

Dispositivi adeguati possono comunque garantire, per molte emissioni industriali, efficienze globali di rimozione  $> 99\%$ .

# Separatori Elettrostatici

Qualche complicazione all'impiego del sistema può derivare dalla resistività delle polveri.  $\rho = R \cdot L/A$

La **resistività** di un materiale è la resistenza che un suo campione di lunghezza e sezione unitarie offre al passaggio della corrente.

La teoria e la pratica indicano che una resistività compatibile con un funzionamento regolare dell'elettrofiltro è compresa tra un valore di  $10^3 \text{ohm} \cdot \text{cm}$  e  $10^{10} \text{ohm} \cdot \text{cm}$ .

Per valori di resistività al di sotto di  $10^3 \text{ohm} \cdot \text{cm}$ , le particelle depositatesi sull'elettrodo di raccolta, acquistano facilmente dall'elettrodo stesso una carica dello stesso segno ed un'elevata probabilità di essere ritrascinate nel flusso gassoso.

# Separatori Elettrostatici

Valori di resistività al di sopra di  $10^{10}$  ohm·cm determinano, per l'elevata differenza di potenziale che si viene a creare tra le due facce dello strato di polvere trattenuto sull'elettrodo di raccolta, scariche elettriche che provocano gravi perturbazioni al voltaggio operativo dell'elettrofiltro e sensibile decadimento delle efficienze di rimozione (effetto di back-corona).

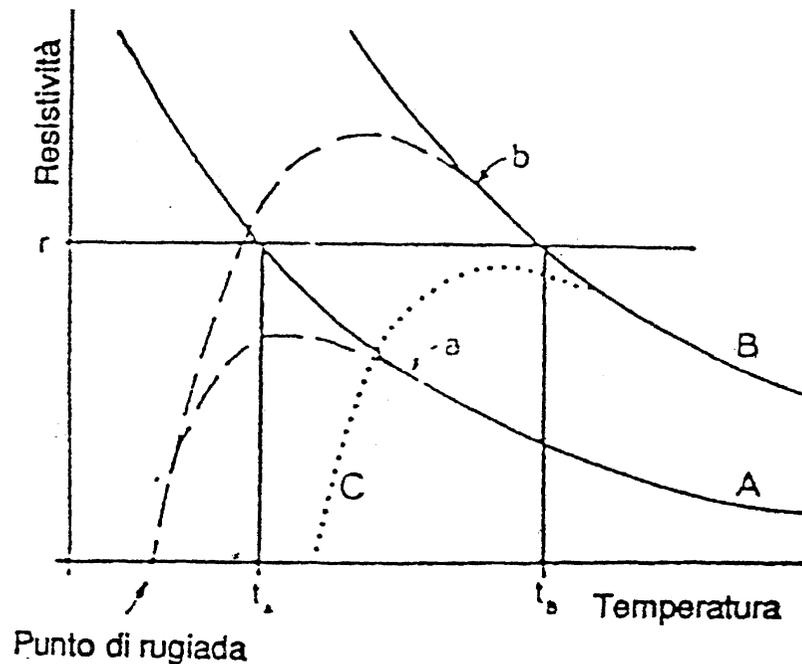


Fig. 3.4 - Variazione della resistività della polvere con la temperatura, a vario contenuto di umidità nel gas ( $a > b$ ).

A temperature crescenti la resistività diminuisce esponenzialmente, mentre a temperature decrescenti, invece dell'atteso incremento, si osserva una diminuzione dovuta a sostanze conduttrici (principalmente acqua ed  $SO_3$ , per i gas di combustione) adsorbite con maggiore efficienza dalle particelle di polveri.

# Separatori Elettrostatici

Di gran lunga più frequenti sono i problemi dovuti all'elevata resistività delle polveri. Per mantenere efficienze apprezzabili anche per polveri con resistività superiori a  $10^{11}$  ohm·cm possono essere necessari una serie di interventi con lo scopo di:

- a) Mantenere gli elettrodi sempre puliti
- b) Migliorare il rifornimento dell'energia del sistema con un'elevata sezionalizzazione degli alimentatori dell'alta tensione e con circuiti di controllo automatico delle scariche e di altri fenomeni correlati all'efficienza
- c) Attenuare la resistività delle particelle con l'aggiunta al gas vettore di piccole quantità di agenti chimici quali  $\text{SO}_3$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  oppure variandone opportunamente la temperatura e l'umidità.

# Separatori Elettrostatici

Per quanto riguarda la portata del flusso gassoso da trattare non c'è alcun limite superiore, data l'organizzazione modulare dell'impianto e la sperimentata applicazione alle più grandi tra le emissioni esistenti, quali quelle delle centrali termoelettriche.

Per le portate eccessivamente basse può essere limitante il costo d'installazione degli apparati elettrici per l'alta tensione e la gestione di un impianto relativamente sofisticato.

Per quanto riguarda le caratteristiche di temperatura, pressione ed umidità sono documentabili esercizi in intervalli amplissimi di questi parametri.

# Separatori Elettrostatici

Tab. 3.1 - Intervalli di valori praticabili per i principali parametri di progetto o di funzionamento dei filtri elettrostatici.

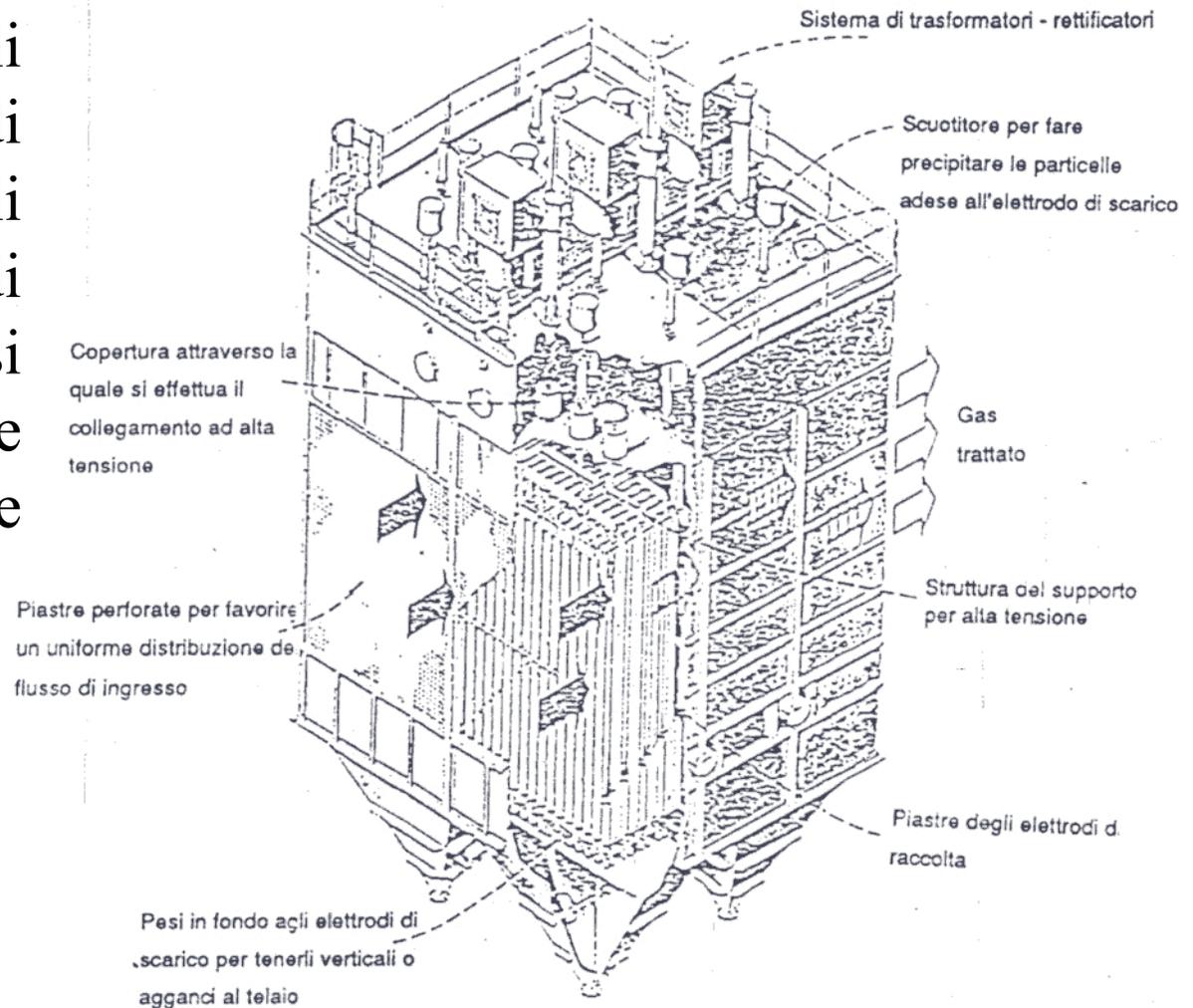
Parametri	Intervallo dei valori
Portata ( $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ )	$3 \cdot 10^3 - 2,5 \cdot 10^6$
Temperatura del gas ( $^{\circ}\text{C}$ )	fino a 500
Polvere in ingresso ( $\text{g m}^{-3}$ ) <sup>(1)</sup>	0,25 - 30
Resistività della polvere ( $\text{ohm}\cdot\text{cm}$ )	$10^3 - 10^{10}$
Efficienza (%)	80 - 99,99
Perdita di carico (kPa)	0,06 - 0,5
Velocità del flusso gassoso ( $\text{m s}^{-1}$ )	0,5 - 3
Rapporto superficie di raccolta/portata ( $\text{m}^2 / \text{m}^3 \text{h}^{-1}$ )	0,02 - 0,5
Tensioni di esercizio (kV)	20 - 120
Richiesta specifica di energia ( $\text{kWh} / 1000\text{m}^3$ ) <sup>(2)</sup>	0,1 - 3

(1) senza pretrattamento

(2) del solo sistema

# Separatori Elettrostatici

I principali elementi impiantistici di un filtro elettrostatico sono gli elettrodi, gli alimentatori dell'alta tensione con i sistemi di regolazione, l'apparato di pulizia degli elettrodi, le strutture di alloggiamento degli elettrodi con i sistemi di distribuzione dei flussi gassosi e le tramogge per la raccolta delle polveri.



# Separatori Elettrostatici

## Elettrodi

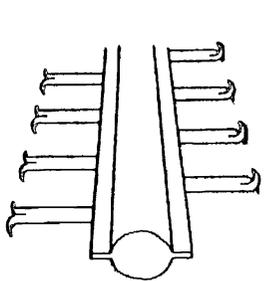
La superficie totale filtrante è suddivisa in elettrodi di raccolta di varie dimensioni e forma. Possono essere piastre parallele o strutture tubolari di sezione cilindrica o poligonale. Parallelamente alle superfici di raccolta (coassialmente con quelle cilindriche) sono collegati gli elettrodi filiformi di emissione che possono avere sezione circolare, quadrata, a stella tipo “filo spinato”.

Tali elettrodi possono essere sospesi e mantenuti in tensione da pesi attaccati all'estremo inferiore oppure, com'è più frequente nella tradizione europea, fissati alla struttura anche nella parte sottostante.

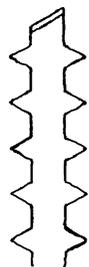
In genere, nelle applicazioni industriali, gli elettrodi di emissione sono collegati alla polarità negativa degli alimentatori. Questa configurazione consente di ottenere, in modo stabile e con fenomeni contenuti di scariche, i massimi valori di voltaggio e di intensità del campo elettrico.

# Separatori Elettrostatici

## Elettrodi



Tubatura con emettitori armati di punte



Punte parallele



Punte alternate



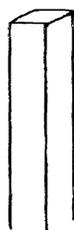
Sbarra ad arpione



Sbarra armata di punte



Barra piatta



Barra rettangolare



Barra cilindrica



Filo avvolto

# Separatori Elettrostatici

## Alimentazione dell'alta tensione

Il gruppo per l'alimentazione dell'alta tensione è costituito essenzialmente da un trasformatore elevatore di tensione e da un raddrizzatore, con il compito di elevare la tensione di rete a quella di esercizio (30 – 100kV). Compito principale di tale apparato è quello di mantenere, nella sezione o nelle sezioni collegate, la massima tensione compatibile con un livello ammissibile delle inevitabili perturbazioni derivanti da scariche elettriche e corti circuiti.

Un elemento di qualità che può caratterizzare l'impianto è il grado di sezionalizzazione, cioè il numero di sezioni in serie elettricamente e meccanicamente indipendenti, in cui viene suddiviso l'elettrofiltro.

La sezionalizzazione consente di trattare il flusso gassoso in ingresso, di elevato carico, con sezioni iniziali opportunamente potenziate, migliorando l'efficienza globale di captazione. Il numero ottimale delle sezioni è compreso tra 1 – 8 ed è il risultato dell'analisi costo/beneficio tra il miglioramento dell'efficienza di captazione ed il costo dell'intervento.

# Separatori Elettrostatici

## Sistemi di pulizia

Nei sistemi a secco, che sono la larga maggioranza, il distacco delle polveri fissate sugli elettrodi di raccolta si ottiene percuotendo o trasmettendo vibrazioni sistematiche all'elettrodo stesso.

La percussione si realizza in genere con masse metalliche sollevate con elettrocalamite e lasciate cadere su barre di collegamento, oppure con martelli rotanti.

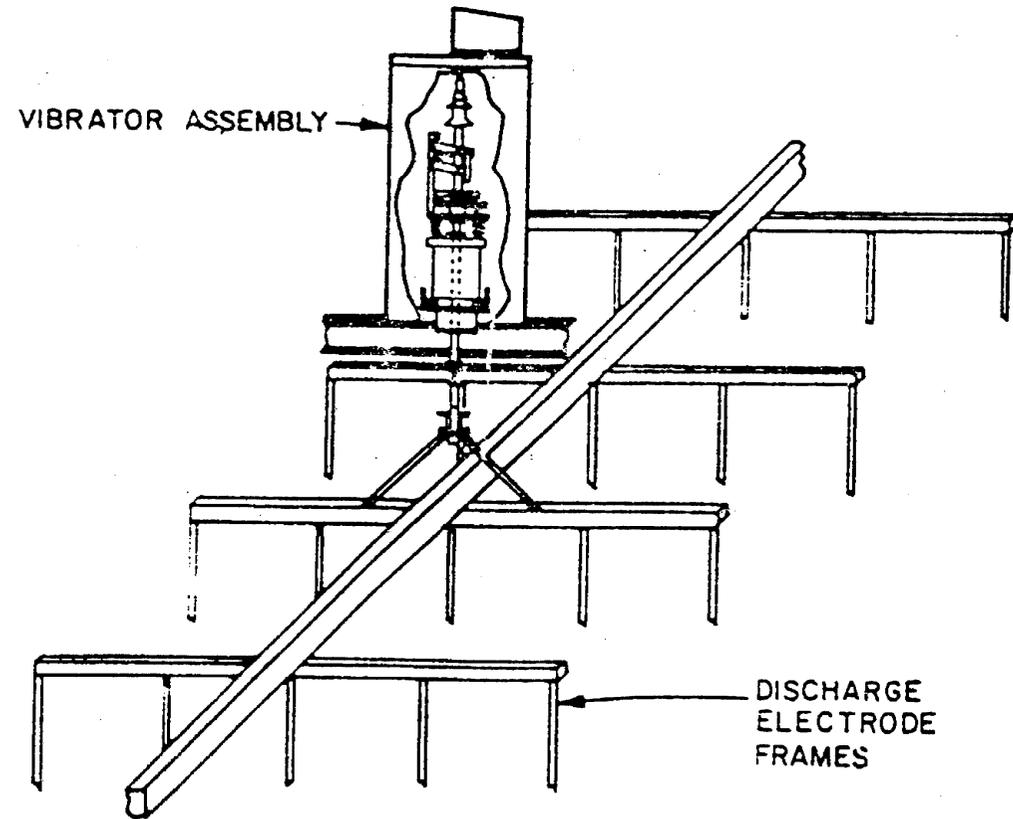
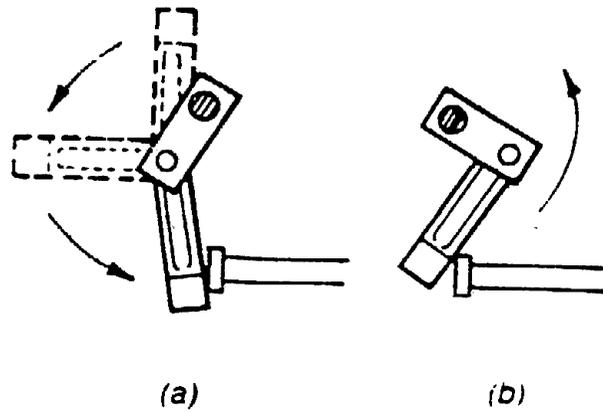
Lo scuotimento per vibrazione è realizzato con veri e propri vibratorii ad azione meccanica, pneumatica o elettromagnetica.

L'intensità, la durata e l'intervallo fra due interventi successivi sono importanti elementi di progettazione del sistema di pulizia.

Nel sistema ad umido la rimozione delle particelle è realizzata da veli liquidi correnti lungo le pareti degli elettrodi. Questo sistema può essere di un certo interesse per le polveri che, per elevati valori di resistività, risulta problematico distaccare dall'elettrodo di raccolta.

# Separatori Elettrostatici

## Sistemi di pulizia



# Separatori Elettrostatici

## Struttura di alloggiamento

La struttura che alloggia gli elettrodi è costituita, in genere, da un cassone a forma di parallelepipedo rettangolo dotato nella parte inferiore di tramogge per la raccolta del particolato.

Su due pareti opposte, attrezzate con appositi distributori di flussi, sono sistemate le aperture per l'ingresso e l'uscita del gas.

Questa struttura che, a seconda dei casi, per evitare soprattutto fenomeni di condense e corrosione, può essere coibentata, deve risultare sufficientemente solida per resistere alle escursioni termiche ed alle conseguenti espansioni dei gas e per garantire l'allineamento degli elettrodi.

Fanno parte della struttura i dispositivi di convogliamento e distribuzione del flusso gassoso nell'elettrofiltro. Essi, controllando di fatto la distribuzione delle velocità, rappresentano un elemento critico per l'efficienza del sistema.

# Separatori Elettrostatici

## Efficienza del sistema

La velocità a regime con cui la particella, sotto l'azione della forza elettrica, si dirige verso l'elettrodo di raccolta è determinata dall'equilibrio tra la forza elettrica e la forza resistente d'attrito dovuta alla viscosità del gas vettore.

Tale velocità, detta velocità di migrazione allo stato stazionario, è il parametro fondamentale di dimensionamento del sistema.

Dal bilancio a regime della forza elettrica con la forza di attrito e dall'espressione della carica assunta dalla particella si ricava la velocità di migrazione  $W_d$  di una particella con diametro  $d_p$ :

$$W_d = \frac{D \cdot K_0 \cdot E^2 \cdot d_p}{(2 + D) \cdot \mu} \quad (1)$$

$D$  = costante dielettrica del mezzo;

$K_0$  = costante dielettrica del vuoto;

$E$  = intensità del campo elettrico che carica e separa le particelle negli impianti a stadio singolo;

$\mu$  = viscosità del mezzo;

$d_p$  = diametro della particella.

# Separatori Elettrostatici

## Efficienza del sistema

Forza  $F_e$  che agisce su una particella di carica  $q$  in un campo elettrico di intensità  $E$  diretta verso l'elettrodo passivo:  $F_e = q \cdot E$

Nel'espressione di  $q$  sono incluse le cariche per diffusione e bombardamento.

Forza d'attrito :  $F_a = C_D \cdot A \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot W_d^2$

Sostituendo  $C_D = 24/Re$  (legge di Stokes):

$$F_a = \frac{24}{\rho \cdot W_d \cdot d_p} \cdot \mu \cdot \frac{\pi \cdot d_p^2}{4} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot W_d^2 = 3 \cdot \pi \cdot \mu \cdot d_p \cdot W_d$$

Combinando le espressioni di  $F_e$  e  $F_a$ , si ricava :

$$3 \cdot \pi \cdot \mu \cdot d_p \cdot W_d = q \cdot E \quad \Rightarrow \quad W_d = \left( \frac{q}{3 \cdot \pi \cdot \mu \cdot d_p} \right) \cdot E$$

# Separatori Elettrostatici

## Efficienza del sistema

Assumendo che nell'unità elementare del filtro (un elettrodo attivo filiforme ed un elettrodo di raccolta a piastra tubolare) si sviluppi un processo di separazione descrivibile con un modello a miscelazione laterale completa, cioè con una distribuzione uniforme della polvere in ogni sezione perpendicolare al flusso, si ricava per l'efficienza di rimozione la seguente espressione, detta di Deutsch-Anderson:

$$E_d = 1 - \exp\left(-\frac{W_d \cdot A}{Q}\right) \quad (2)$$

$E_d$  = efficienza con cui vengono rimosse le particelle di diametro  $d_p$ ;

$W_d$  = velocità di migrazione della stessa classe di particelle [m/min];

$A$  = superficie dell'elettrodo di raccolta, [m<sup>2</sup>];

$Q$  = portata del gas da trattare, [m<sup>3</sup>/min].

# Separatori Elettrostatici

## Efficienza del sistema

$E_d$  è l'efficienza con cui viene rimossa una classe granulometrica mentre l'efficienza totale  $E_T$  è il risultato dell'integrale:

$$E_T = \int_0^{\infty} E_d \cdot f(d_p) d(d_p) \quad (3)$$

$f(d_p)$  è la funzione di distribuzione in peso della polvere.

In realtà anche se si riesce ad integrare la (3), in generale con tecniche numeriche per determinate distribuzioni di particolato, il risultato della valutazione rimane di tipo qualitativo perché nel modello descritto con la (2) non sono stati considerati una serie di fenomeni che possono incidere sull'efficienza globale.

# Separatori Elettrostatici

## Efficienza del sistema

I fenomeni che possono incidere sull'efficienza globale sono:

- Le condizioni variabili di temperatura, concentrazione, granulometria, cariche delle particelle e voltaggio applicato lungo lo sviluppo del filtro;
- La non uniforme velocità di distribuzione del flusso gassoso ed i moti turbolenti indotti;
- Il by-pass delle zone di raccolta;
- Il ritrascinamento delle particelle depositate.

# Separatori Elettrostatici

## Efficienza del sistema

La descrizione dell'efficacia e quindi l'approccio al dimensionamento del sistema può comunque basarsi sull'integrazione della (3) introducendo correzioni al modello, che tengano conto dei comportamenti visti prima.

Una tecnica utilizzata dai modelli di calcolo è quella di suddividere tutto lo spazio del filtro in piccoli settori di filtrazioni in serie in cui si possano ritenere costanti tutti i parametri che influenzano la rimozione.

Un approccio empirico individua sperimentalmente con impianti pilota un parametro della velocità di migrazione  $W_e$  che, introdotto nel modello di Deutsch-Anderson, viene a rappresentare la **velocità di migrazione della polvere nel suo complesso**, con tutti gli effetti indotti dalle condizioni non ideali di funzionamento.

# Separatori Elettrostatici

## Efficienza del sistema

I valori di  $W_e$  per determinate emissioni e condizioni di trattamento costituiscono il “know-how” di molte industrie costruttrici. Introducendo il valore sperimentale di  $W_e$  nella (2) si ottiene l'espressione dell'efficienza totale:

$$E_T = 1 - \exp\left(-\frac{W_e \cdot A}{Q}\right) \quad (4)$$

*Tab. 3.2 - Velocità di migrazione caratteristiche di inquinanti particolati.*

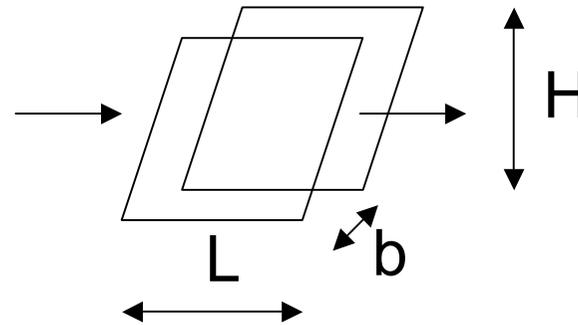
Tipo di polvere	Velocità di migrazione $W_e$ ( $m\ s^{-1}$ )
Ossido di zinco	0,02 - 0,03
Nebbia di acido solforico	0,08 - 0,16
Ossidi di metallo da forni di arrostitimento	0,02 - 0,03
Carbonato di calcio	0,04 - 0,05
Cloruro di alluminio	0,05 - 0,06
Ossido di piombo da forno	0,08 - 0,09
Ceneri volanti da carbone di miniera	0,02 - 0,11
Ceneri volanti da lignite	0,18 - 0,25
Polveri da convertitori	0,07 - 0,09
Polveri di altoforno	0,05 - 0,10

# Separatori Elettrostatici

## Efficienza del sistema

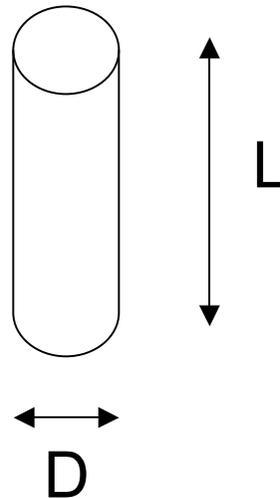
Tenendo conto dei due tipi di configurazioni degli elettrofiltri, si ottiene rispettivamente per il tipo a piastra ed il tipo tubolare:

$$E_T = 1 - \exp\left(-\frac{W_e \cdot L}{V_0 \cdot b}\right) \quad (5)$$



$$A = H L$$
$$S = b H$$

$$E_T = 1 - \exp\left(-4 \frac{W_e \cdot L}{V_0 \cdot D}\right) \quad (6)$$



$$A = \pi D L$$
$$S = \pi D^2/4$$

$V_0$  = velocità del flusso gassoso

# Separatori Elettrostatici

## Efficienza del sistema

Il rapporto  $A/Q$  è noto come area specifica di raccolta ed è un importante parametro di dimensionamento.

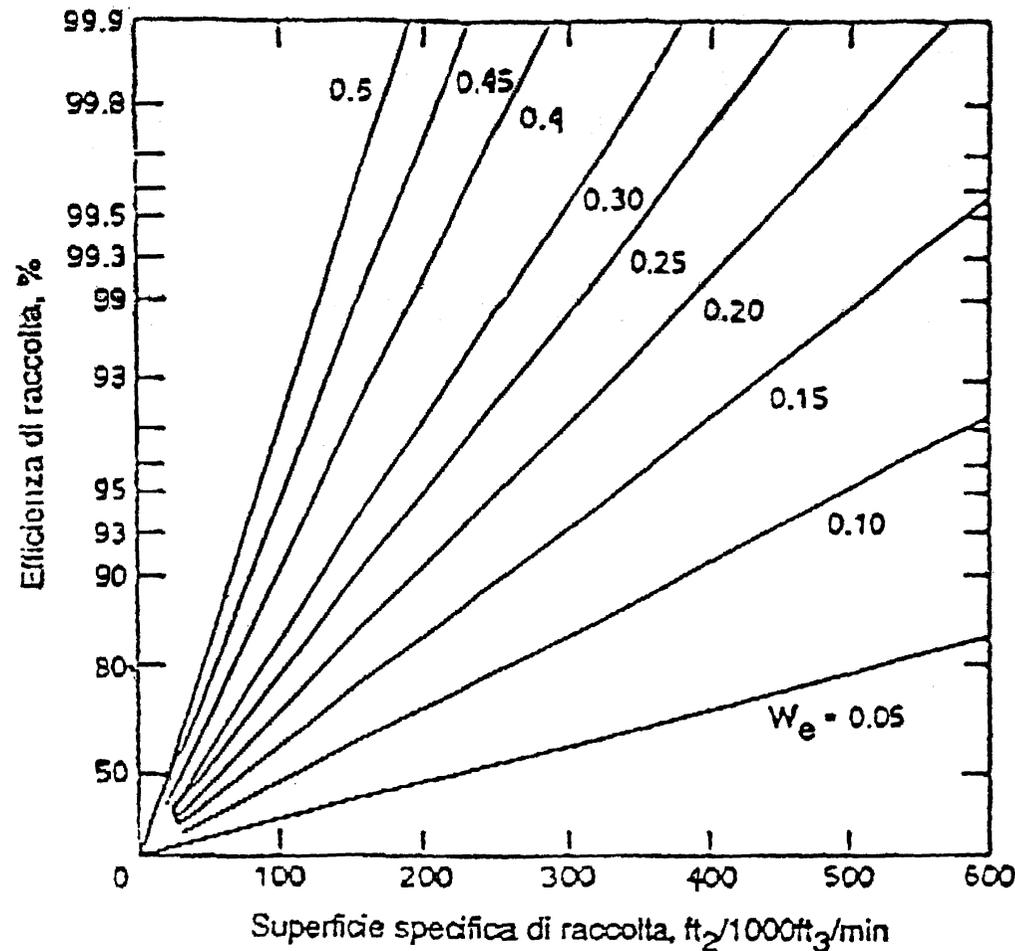


Fig. 3.6 - Efficienza in funzione della superficie specifica di raccolta al variare di  $W_e$ .

# Separatori Elettrostatici

## Efficienza del sistema

Un approccio semiempirico, basato sull'**ipotesi di distribuzione log-normale** oltre che della granulometria del particolato, anche dei valori di velocità del flusso, d'intensità del campo elettrico e di ogni altro parametro che influenza l'efficienza, assume che una soluzione generalizzata della (3) possa essere:

$$E_T = 1 - \exp\left(-\frac{W_k \cdot A}{Q}\right)^k \quad (7)$$

$W_k$  = velocità di migrazione rappresentativa della situazione ipotizzata;

$k$  = misura di dispersione caratteristica delle distribuzioni dei parametri coinvolti.

Per molti tipi di ceneri volanti risulta dalla sperimentazione sufficientemente rappresentativo un valore di  $k = 0.5$ .

$W_k$  tende ad essere meno dipendente da  $A/Q$ .

# Separatori Elettrostatici

**Efficienza del sistema**

$$E_T = 1 - \exp\left(-\frac{W_e \cdot A}{Q}\right) \quad (4)$$

Infatti si vede che:

$$E_T = 1 - \exp\left(-\frac{W_k \cdot A}{Q}\right)^k \quad (7)$$

$$\left(-\frac{W_e \cdot A}{Q}\right) = \left(-\frac{W_k \cdot A}{Q}\right)^k \quad \Rightarrow \quad W_e = \frac{Q}{A} \cdot \left(\frac{W_k \cdot A}{Q}\right)^k$$

# Separatori Elettrostatici

## Efficienza del sistema

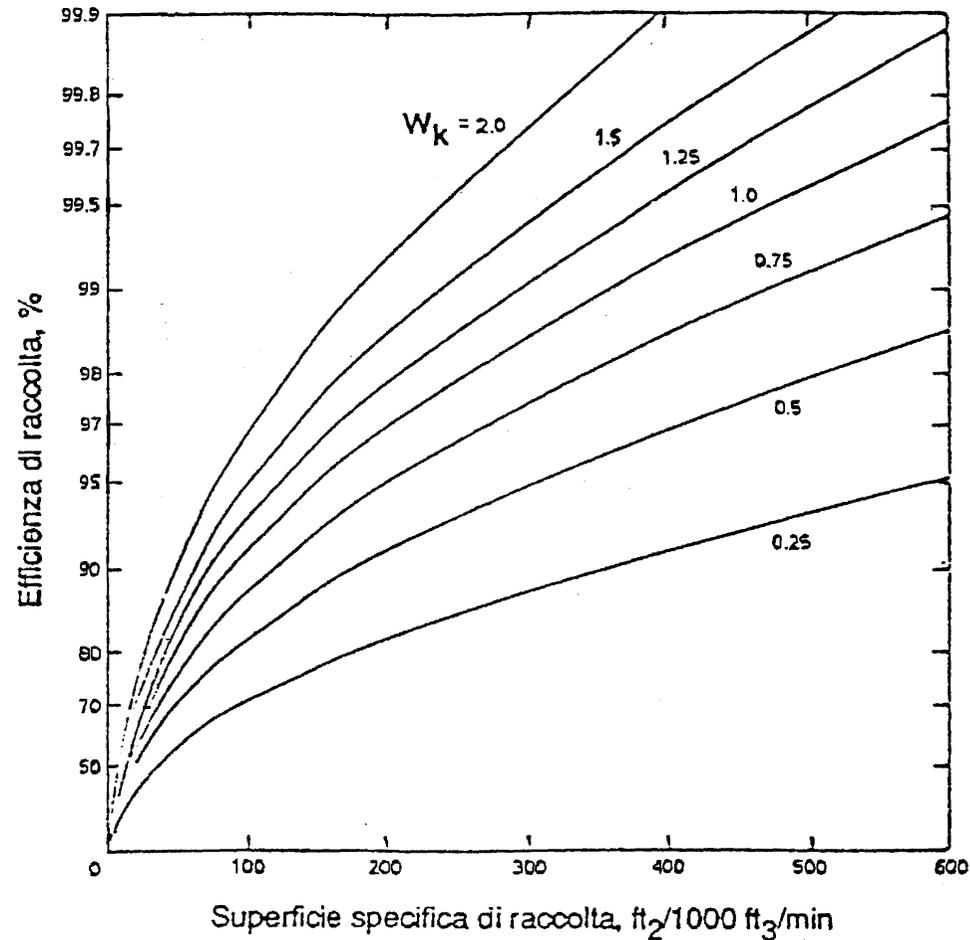


Fig. 3.7 - Efficienza in funzione della superficie specifica di raccolta al variare di  $W_k$ .

# Separatori Elettrostatici

## Vantaggi

1. è possibile ottenere alte efficienze di filtrazione. Sono infatti frequenti rendimenti superiori al 99%,;
2. si possono abbattere particelle di diametro molto ridotto, non esistendo un limite teorico inferiore per la ionizzazione dei corpuscoli; un limite pratico è intorno ai 0,01  $\mu\text{m}$ , ma esistono accorgimenti progettuali che consentono l'abbattimento fino a diametri intorno a 0,001  $\mu\text{m}$ ;
3. si ottiene il recupero del particolato senza modificarlo, allo stato secco; ciò rende possibile, in molti processi produttivi, il reimpiego di materie prime costose;
4. le perdite di pressione attraverso il filtro sono modeste; raramente si hanno perdite superiori ai 15 mm H<sub>2</sub>O;
5. in genere gli elettrofiltri sono progettati per una vita operativa molto lunga e con ridotte esigenze di manutenzione;
6. possiedono poche o nessuna parte in movimento, il che ne aumenta l'affidabilità;
7. sono possibili temperature di esercizio molto elevate; temperature di 300°-500°C sono usuali;
8. i precipitatori elettrostatici possono essere usati anche per abbattere nebbie fortemente corrosive, assai difficili, se non impossibili, da filtrare con metodi alternativi;
9. l'efficacia di abbattimento può essere incrementata a seconda dell'applicazione, semplicemente aumentando la grandezza del filtro (o diminuendo la velocità dell'aria);
10. si possono trattare flussi di ampiezza molto rilevante;
11. la potenza installata rispetto al flusso trattato è modesta. Ad esempio è sufficiente 1 kW per un elettrofiltro da circa 10.000 m<sup>3</sup>/h.

# Separatori Elettrostatici

## Svantaggi

1. il costo iniziale è alto; in molti casi il più alto fra tutte le alternative disponibili;
2. gli elettrofiltri mal si adattano a condizioni variabili. Alimentatori particolarmente sofisticati possono migliorare la situazione, ma ad ogni modo il massimo rendimento si ottiene in condizioni operative costanti;
3. alcuni materiali sono estremamente difficili da abbattere elettrostaticamente a causa della loro resistività elettrica troppo alta o troppo bassa; in certi casi questo fattore può rendere antieconomico od impossibile l'impiego degli elettrofiltri;
4. l'ingombro del filtro a volte può diventare eccessivo, ma questo in genere accade quando si tratta di abbattere sostanze poco idonee;
5. non è possibile, se non in alcuni casi particolari, filtrare sostanze in fase gassosa;
6. in genere è indispensabile ricorrere ad una prefiltrazione per non sovraccaricare il filtro;
7. è necessario impiegare particolari cautele, visto l'impiego di tensioni molto elevate.

Impiegare o meno un filtro elettrostatico è una decisione da prendere considerando attentamente i seguenti fattori:

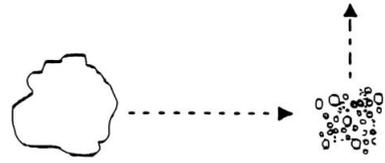
- investimento iniziale;
- costi di manutenzione e di esercizio;
- limiti di ingombro;
- efficienza di abbattimento, tenendo conto delle caratteristiche chimico-fisiche degli inquinanti e dei limiti di emissione da soddisfare; è necessario tenere presente che aumentare l'efficienza dall'80% al 96% comporta un raddoppio dell'investimento iniziale, mentre un aumento fino al 99% può costare anche più del triplo.

# Combustori a letto fluidizzato

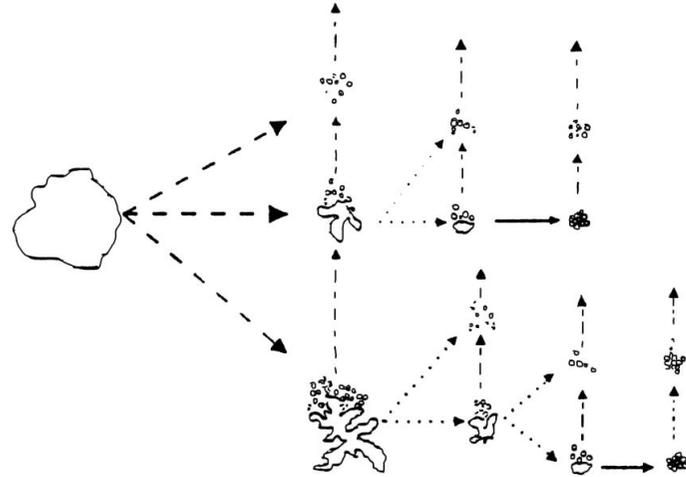
- Negli ultimi anni i combustori a letto fluido si sono imposti come una tecnologia di altissimo interesse per la combustione di combustibili solidi, divenendo in molte situazioni una tra le soluzioni impiantistiche più vantaggiose
- Tra le ragioni dell'affermazione dei combustori a letto fluido vi è sicuramente la capacità di bruciare una vasta gamma di combustibili realizzando elevate efficienze di combustione e contenute emissioni inquinanti
- Le caldaie a letto fluido, infatti, conseguono un efficace controllo delle emissioni di ossidi di azoto e di zolfo grazie, rispettivamente, alle basse temperature di esercizio (800 – 900 °C) e all'utilizzo di sorbenti con capacità desolforanti (calcare o dolomite) direttamente all'interno della camera di reazione

- La tecnologia a letto fluido è stata estesa al caso di combustibili non convenzionali quali combustibile derivato dai rifiuti o R.D.F. (Refuse Derived Fuel), biomasse, residui industriali e/o civili con finalità che di volta in volta possono privilegiare il recupero energetico, il contenimento dei volumi di rifiuti da trattare e stoccare in discarica, l’impatto ambientale
- In tempi recenti il trattamento in letti fluidizzati di tali materiali, e in generale di combustibili alto-volatili, ha evidenziato la formazione in corso di reazione di un quantitativo molto elevato di particelle fini che, in alcuni casi limite, rappresentano la quasi totalità del materiale presente nel letto, sebbene il reattore venga alimentato con materiale in pezzatura grossolana
- Il grado di efficienza di un combustore di carbone riveste, tra i parametri che ne caratterizzano le prestazioni, un ruolo primario nel definire la economicità e la convenienza del processo rispetto ad altri alternativi, nonché nel determinare il “costo” ecologico dell’operazione, qualora si abbia presenza cospicua, nelle correnti in uscita dall’apparecchiatura, di incombusti

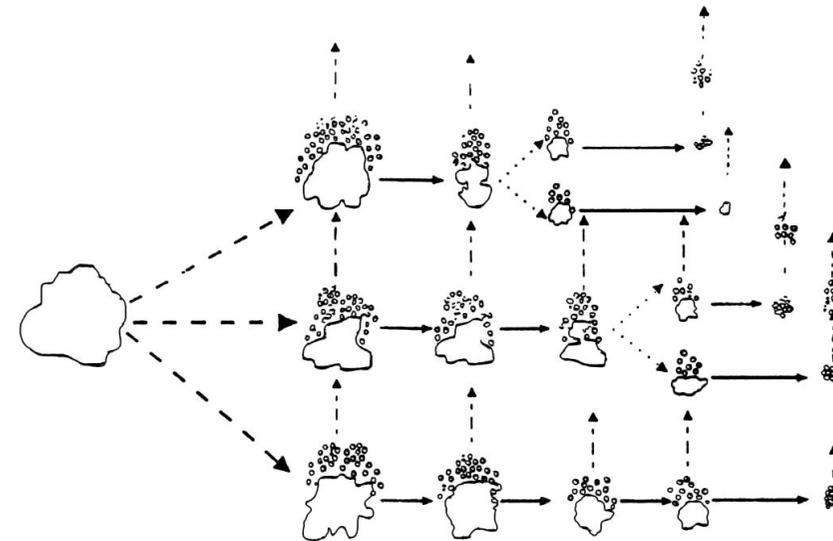
- Il contributo alla perdita di efficienza legato alla presenza nei fumi di monossido di carbonio, intermedi di combustione ed idrocarburi incombusti è generalmente meno rilevante di quello dovuto alla perdita di carbonio solido per elutriazione
- La perdita di carbonio per effetto dell'elutriazione è dovuta essenzialmente a due fenomeni:
  - fini carboniosi, generati dall'abrasione del carbone nel letto, i quali si allontanano dal combustore prima di aver potuto subire una completa conversione
  - residui incombusti di particelle originariamente alimentate e trascinate fuori dal reattore dalla corrente



*C*  
T.D.F.



*B*  
R.D.F.



*A*  
COAL

# Filtro a Letto Fluidizzato

Il trattamento di correnti gassose ha da sempre rappresentato un aspetto cruciale sia nella fase di progettazione, sia in quella di gestione di un processo industriale. Attualmente questo aspetto è sempre più sentito in processi che prevedono la depolverizzazione di correnti gassose ad alta temperatura.

Un esempio sono i processi di combustione per la produzione di energia inseriti in cicli combinati laddove è richiesto l'abbattimento del particolato fine.

Molte tecniche di rimozione di particolato utilizzabili offrono di fatto efficienze anche molto elevate ma hanno il limite di non poter raggiungere temperature elevate.

Di contro è possibile operare con il sistema di abbattimento che può lavorare a temperature elevate ma in questo caso le efficienze di rimozione sono relativamente basse.

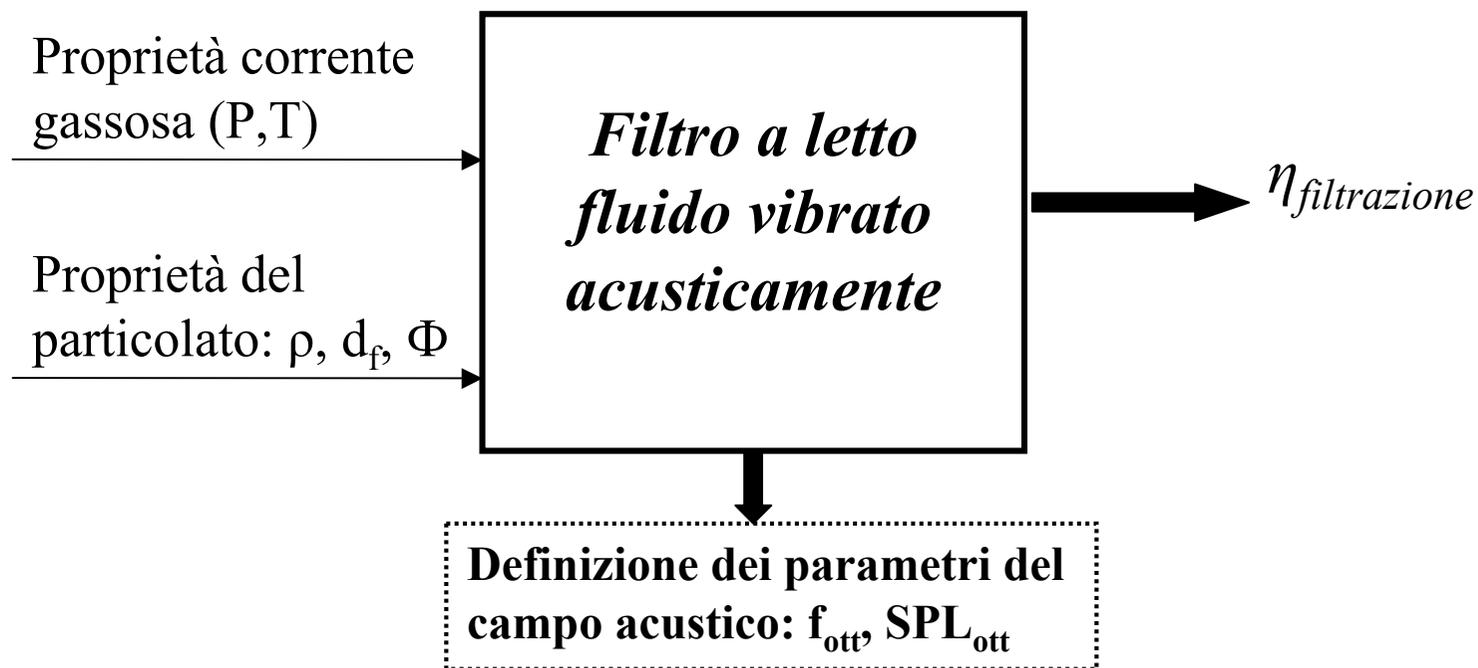
# Filtro a Letto Fluidizzato

Una tecnica possibile, ma ancora non esplorata in modo sistematico, è rappresentata dall'utilizzo delle proprietà filtranti di un letto di apparecchiature a letto fluido.

Ancora più recentemente è stata immaginata la possibilità di utilizzare letti fluidizzati vibrati acusticamente che, per le proprie caratteristiche, possono rappresentare un mezzo alternativo ai classici sistemi di depolverizzazione, specie nel caso di temperature elevate.

Un ulteriore interesse è dato dal fatto che, nel caso dell'utilizzo dei letti fluidi, si potrebbe pensare di accoppiare al processo di filtrazione quello del recupero energetico, quando le polveri trattenute nel letto possono essere in maniera contestuale convertite direttamente nel reattore.

➤ **Messa a punto di un “filtro a letto fluido” vibrato acusticamente.**



➤ **Modellazione teorica dell'interazione tra particelle di diversa dimensione e densità.**

## Modellazione Teorica:

- Sviluppo di un modello fisico semplificato che dia indicazione del comportamento di due particelle di diversa dimensione e densità in un sistema fluidizzato vibrato acusticamente.
- Compilazione di un codice per il calcolo e la visualizzazione dei risultati del modello.

## Sperimentale:

- Prove di filtrazione in reattore a letto fluido vibrato acusticamente, di dimensione da laboratorio

# MODELLO DELLE DUE SFERE

## Ipotesi semplificative:

- Particelle di forma sferica
- I baricentri delle particelle si muovono sulla stessa verticale
- I baricentri si trovano alla distanza media  $L_0$
- Il campo acustico induce una componente oscillatoria alla velocità del gas:  $u = U \sin(2\pi ft)$
- Intensità del campo acustico costante
- Le particelle sospese nello spazio

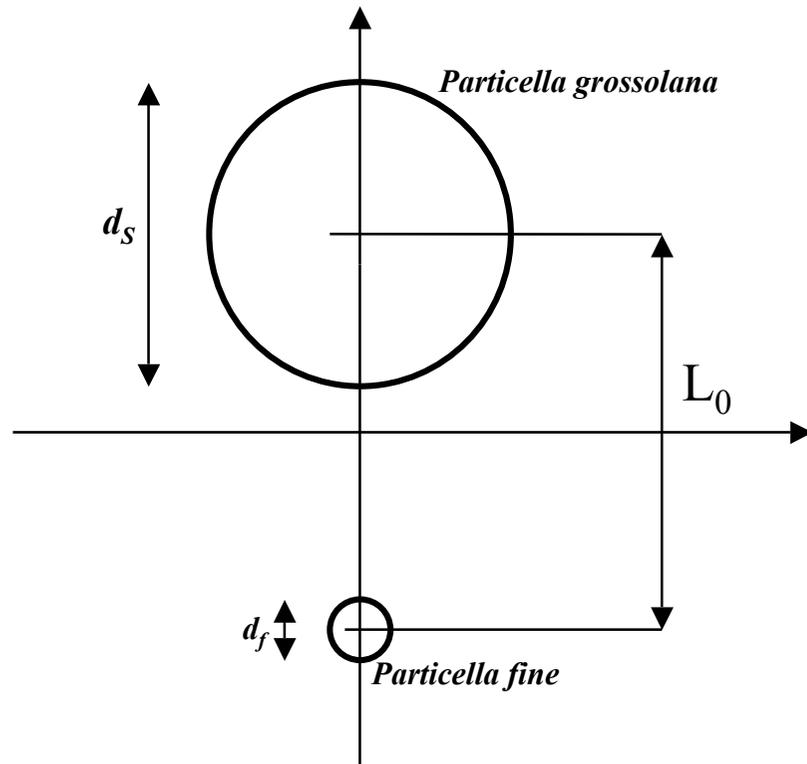
Dal bilancio della quantità di moto:

$$\begin{cases} \frac{\pi}{6} d_s^3 \rho_{d_s} \frac{dW_{d_s}}{dt} = 3\pi\nu\rho_g (U_{rif} \sin(2\pi ft) - W_{d_s}) d_s \\ \frac{\pi}{6} d_f^3 \rho_{d_f} \frac{dW_{d_f}}{dt} = 3\pi\nu\rho_g (U_{rif} \sin(2\pi ft) - W_{d_f}) d_f \end{cases}$$

Integrale generale:

$$\begin{cases} X_{d_f} = \frac{U/(2\pi f)}{\sqrt{1 + (2\pi f \alpha_{d_f})^2}} \cos(2\pi ft + \phi_{d_f}) + C_{d_s} = A_s(f, SPL) \cos(2\pi ft + \phi_s) + C_{d_s} \\ X_{d_s} = \frac{A_g}{\sqrt{1 + (2\pi f \alpha_{d_s})^2}} \cos(2\pi ft + \phi_{d_s}) + C_{d_f} = A_f(f, SPL) \cos(2\pi ft + \phi_f) + C_{d_f} \end{cases}$$

Posizione iniziale delle due particelle:



SI HA IMPATTO  
QUANDO:

$$|X_s - X_f| \geq \left( l_0 - \frac{d_s + d_f}{2} \right)$$

$$[X_s - X_f] = \frac{U}{(2\pi f)} \sqrt{\frac{1}{1 + (2\pi f \alpha_s)^2} + \frac{1}{1 + (2\pi f \alpha_f)^2} + \frac{2 \cos(\phi_f - \phi_s)}{\sqrt{(1 + (2\pi f \alpha_f)^2)(1 + (2\pi f \alpha_s)^2)}}} \sin(2\pi f t + \psi) =$$

$$= A_{s,f}(f, SPL) \sin(2\pi f t + \psi)$$

$$A_{s,f}(f, SPL) \geq l_0 - \frac{d_s + d_f}{2}$$

# Forze in gioco

## Forze di tipo coesivo:

➤ Forza di van der Waals: 
$$F_{cw} = \frac{h\omega}{8\pi z_0^2} \left( 1 + \frac{h\omega}{8\pi z_0^2 H} \right) R$$

*Con:*

- $h\omega$ , costante di Lifshitz-van der Waals
- $H$ , durezza del materiale
- $z_0$ , distanza
- $R = R_1 \cdot R_2 / (R_1 + R_2)$ , raggio equivalente delle asperità

## Forze di tipo repulsivo:

➤ Forza peso:

$$F_p = mg$$

➤ Forza elastica:

$$F_{el} = \pi a^2 E_{eq} \frac{d}{R_f}$$

*Con:*

- $a$ , raggio della superficie di contatto
- $E_{eq}$ , modulo di Young equivalente
- $R_{eq}$ , raggio equivalente delle particelle
- $d$ , deformazione

$$a = \left( \frac{3FR_{eq}}{4E_{eq}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad E_{eq} = \frac{E_{1eff} E_{2eff}}{E_{1eff} + E_{2eff}} \quad E_{eff} = \frac{E}{(1-\nu^2)} \quad d = (R_{eq})^{\frac{1}{3}} \cdot \left( \frac{3F}{4E_{eq}} \right)^{\frac{2}{3}}$$

# Degradazione granulometrica delle particelle

Energie elevate possono portare alla frattura delle  
particelle all'impatto

Si è tenuto in conto di questa fenomenologia mediante  
l'equazione (*Detta*, 1999):

$$X = A \cdot \ln E + B$$

con:

- $X$ , frazione di massa frantumata
- $E$ , energia cinetica della particella fine legata all'intensità del campo acustico, SPL
- $A$  e  $B$ , costanti che dipendono dalle dimensioni della particella fine

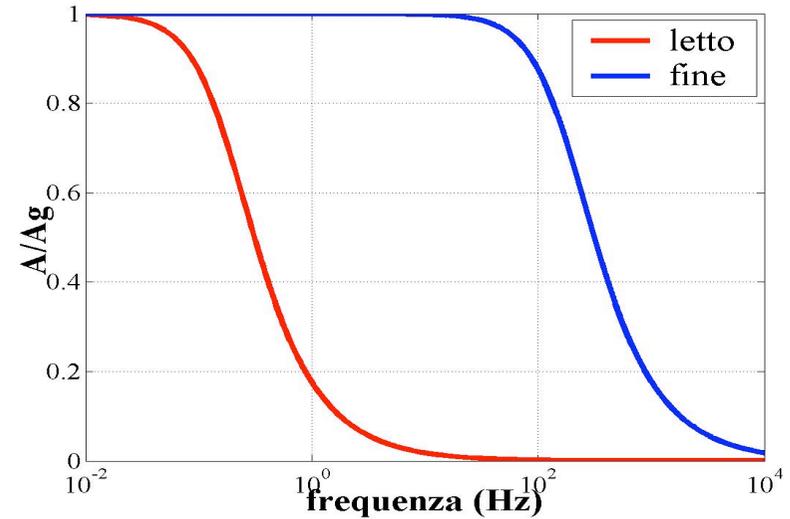
Il complemento a 1 della  $X$  fornisce la frazione di massa aderita

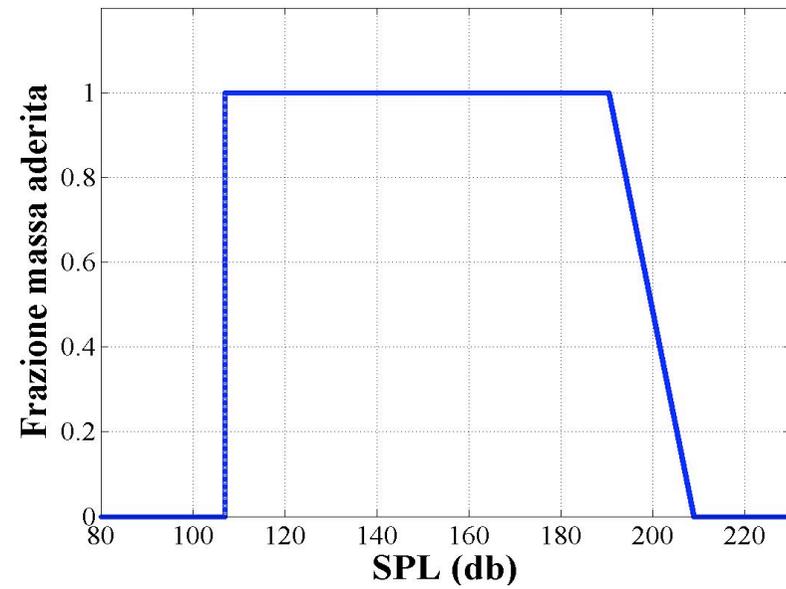
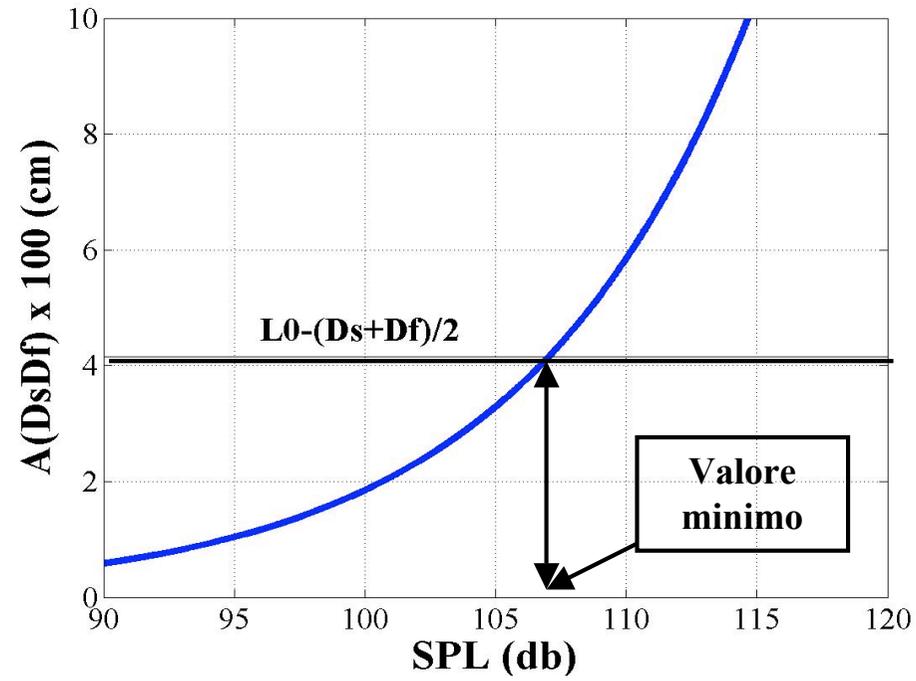
# Risultati della modellazione

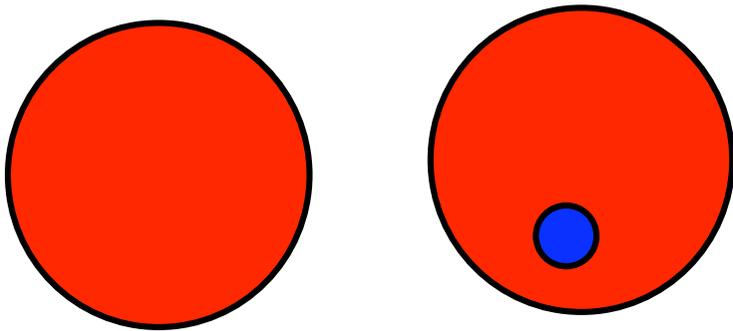
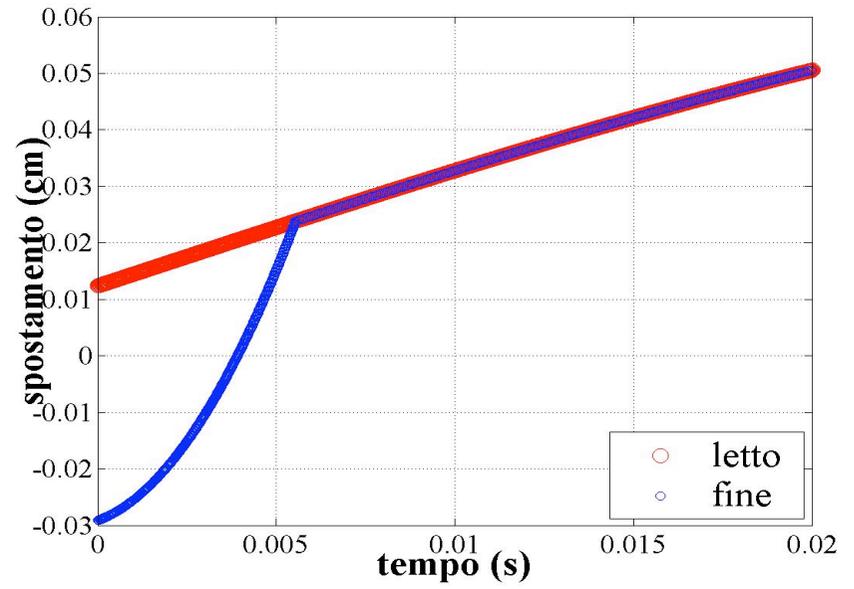
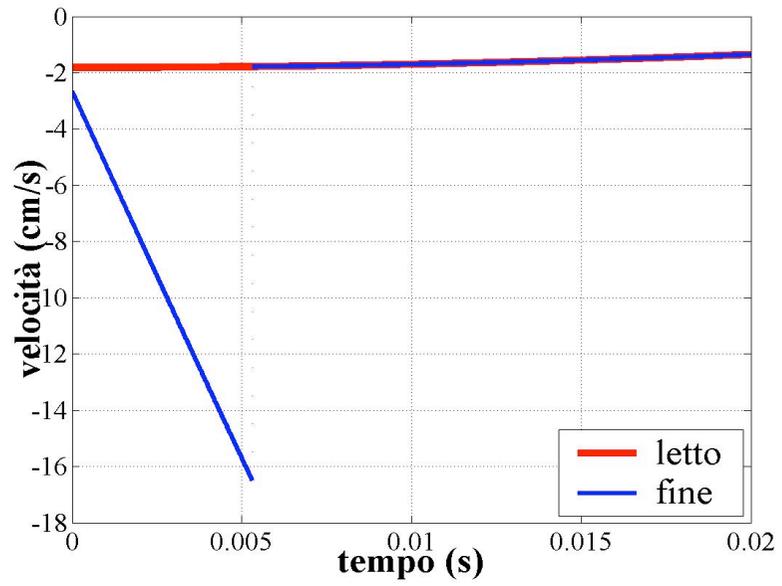
## Parametri utilizzati:

(\* valori calcolati all'interno del programma)

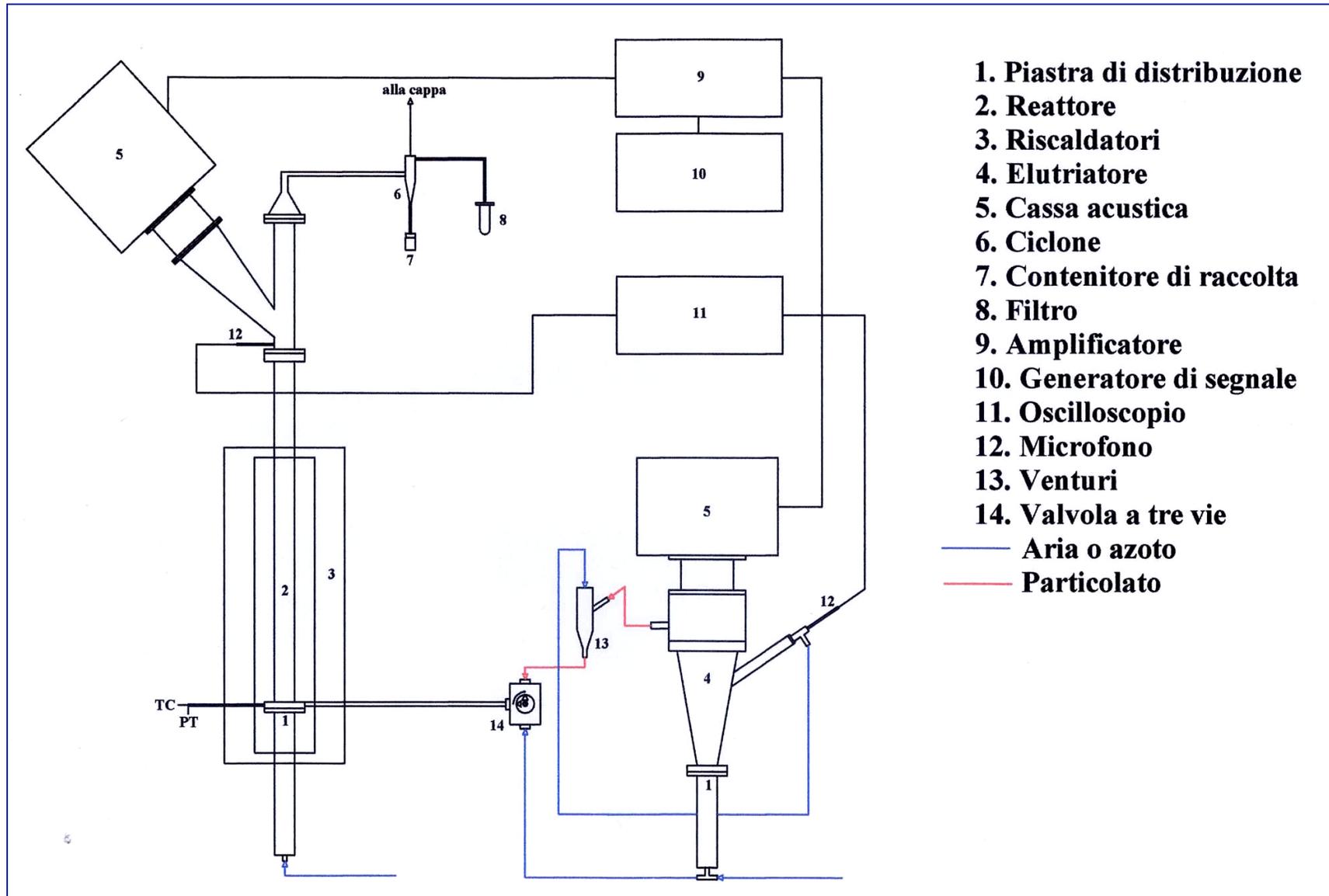
<b>Materiale fine</b>	Carbone
<b>Diametro medio</b>	15 $\mu\text{m}$
<b>Densità</b>	1,4 $\text{g}/\text{cm}^3$
<b>Intensità di soglia</b>	107 db *
<b>Distanza</b>	0.06 cm *
<b>Materiale del letto</b>	Quarzite
<b>Diametro medio</b>	350 $\mu\text{m}$
<b>Densità</b>	2,6 $\text{g}/\text{cm}^3$
<b>Gas di fluidizzazione</b>	aria
<b>Temperatura</b>	27 °C
<b>Densità</b>	0,0012 $\text{g}/\text{cm}^3$ *
<b>Viscosità cinematica</b>	0,147 $\text{cm}^2/\text{s}$
<b>Velocità di riferimento</b>	34800 $\text{cm}/\text{s}$ *







# PROVE DI FILTRAZIONE



# Caratterizzazione dei materiali impiegati:

<b>Ceneri di carbone <math>d_s = 15\mu\text{m}</math></b>	
<b>Analisi immediata, %</b>	
Umidità	3,4
Materie volatili	1,8
Carbonio fisso	77,2
Ceneri	17,6
<b>Analisi elementare, %</b>	
Carbonio	77,5
Idrogeno	0,4
Azoto	0,7
Ossigeno	0,3
Zolfo	0,1
Ceneri	17,6
Densità, $\text{kg/m}^3$	1400
P.C.S., $\text{kJ/kg}$	26934
P.C.I., $\text{kJ/kg}$	26911

<b>Materiale inerte del letto</b>	<b>Quarzite</b>
Taglio granulometrico, $\mu\text{m}$	300 ÷ 400
Densità, $\text{kg/m}^3$	2600

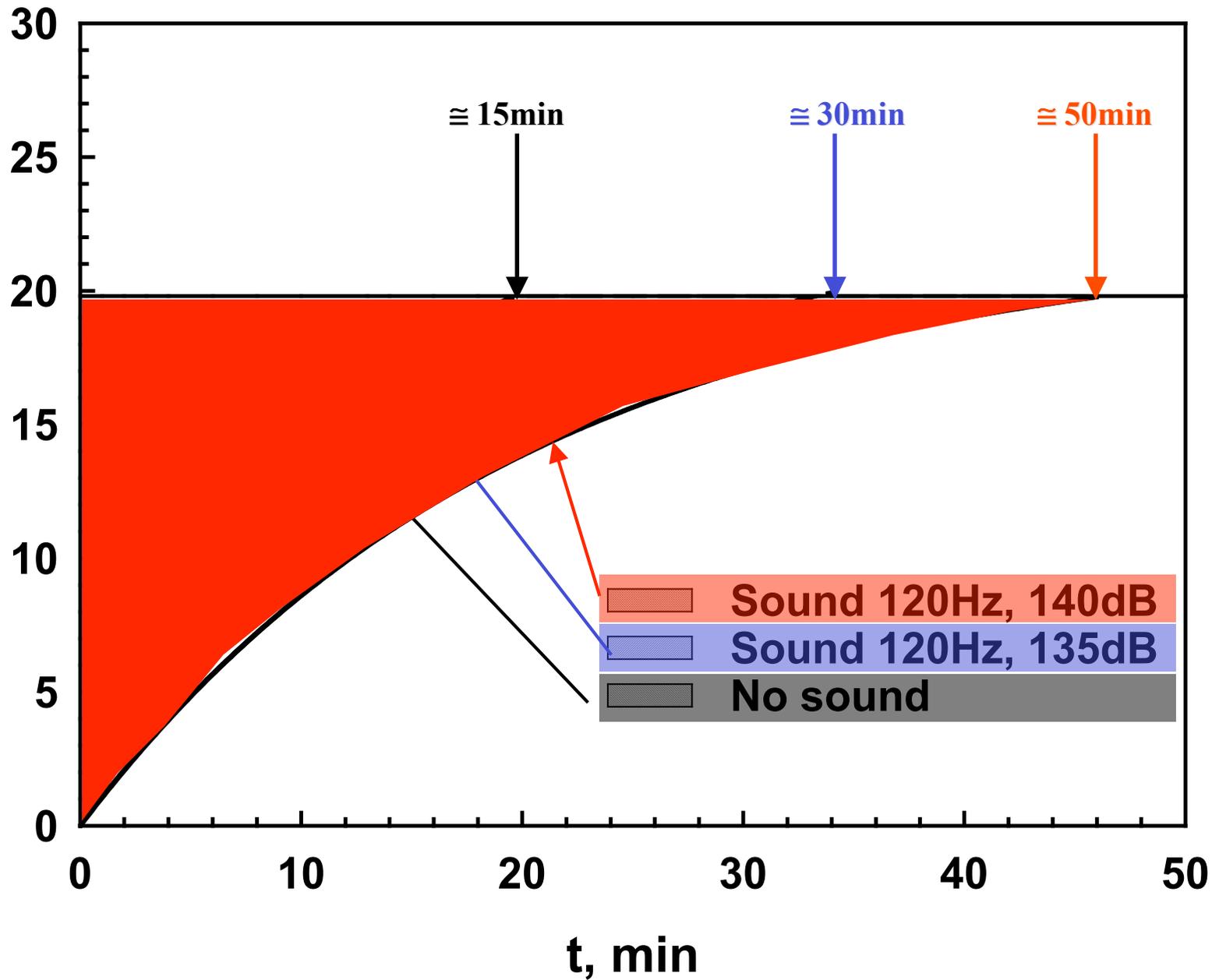
Condizioni operative:

$$U = 0.2 \text{ m/s}$$

$$T = 850^\circ\text{C}$$

Azoto

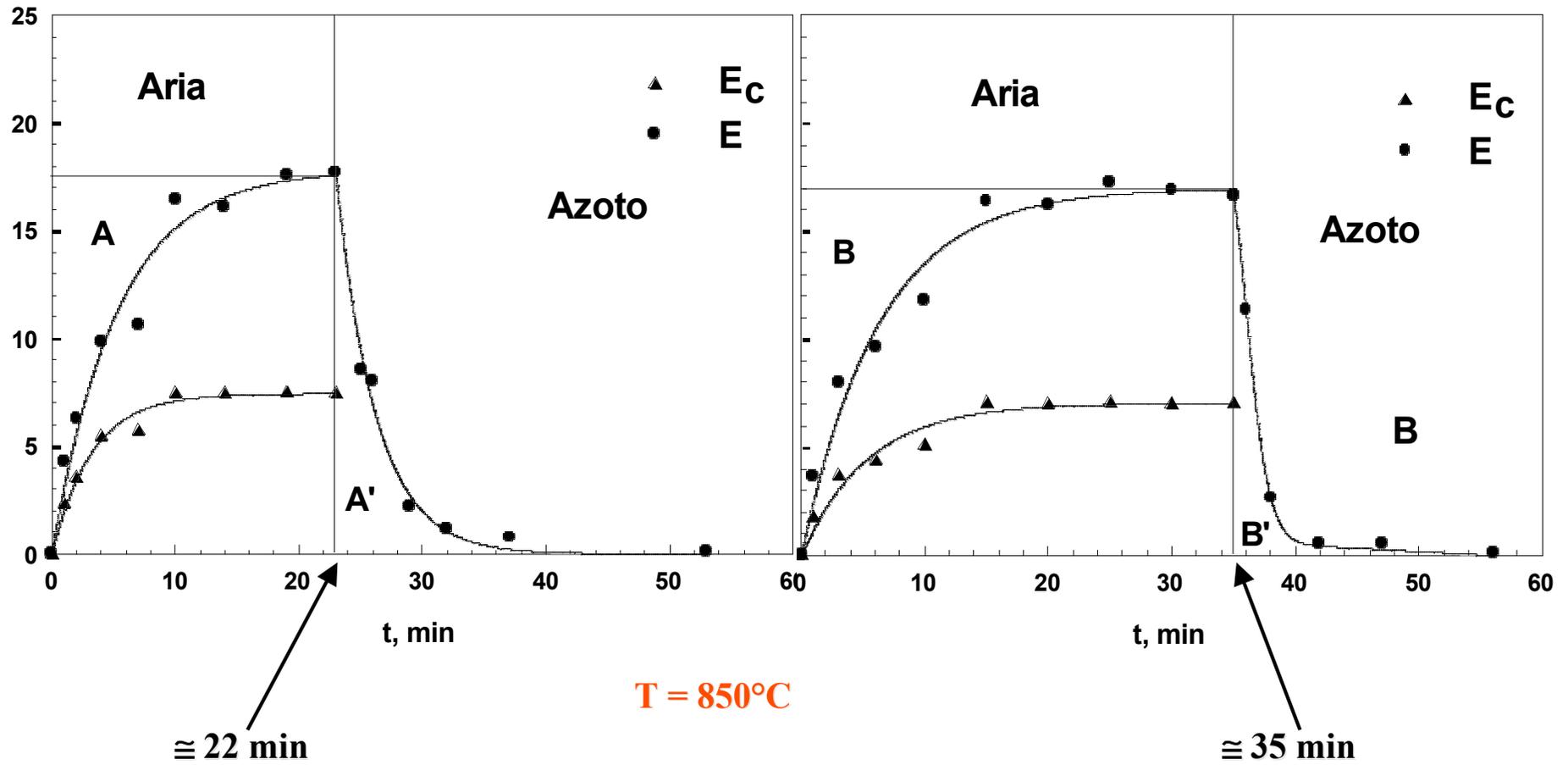
# Filtrazione in letto fluido a temperatura ambiente



# Filtrazione in letto fluido a 850°C

Senza campo acustico

Campo acustico : 120Hz, 140dB



- **Per una coppia di particelle, fissata la temperatura e l'intensità dell'onda sonora, esiste un intervallo di frequenza nel quale si può ottenere:**
  - **il massimo sfasamento tra le oscillazioni delle particelle di diversa dimensione**
  - **l'uguaglianza tra l'ampiezza dell'oscillazione relativa e l'oscillazione del gas per lo stesso valore della frequenza per il quale si ha la massima probabilità di impatto tra le particelle**
- **Questa frequenza tende ad assumere valori più alti al diminuire della dimensione delle particelle fini e delle particelle del letto, ed assume valori più alti all'aumentare della temperatura**
- **Noto il valore della frequenza che fornisce la massima probabilità d'urto, esiste un valore minimo dell'intensità del campo acustico al di sotto del quale non ci sarà nessuna possibilità di impatto tra le particelle. Questo valore tende ad diminuire con la dimensione delle particelle fini e ad aumentare con la temperatura**

- **Esiste un intervallo piuttosto ampio di intensità nel quale le forze coesive prevalgono su quelle repulsive; in questo intervallo tutte le particelle fini aderiscono alle particelle del letto. L'ampiezza di questo intervallo rimane invariato con la dimensione dei fini ma gli estremi assumono valori più bassi per dimensioni minori e diventano più vicini all'aumentare della temperatura**
- **Esiste un valore molto elevato dell'intensità a partire dal quale le particelle che urtano tendono a rompersi in frammenti più piccoli che non aderiscono. La quantità di questi frammenti aumenta con l'intensità fino ad un valore per il quale questi costituiscono la totalità del materiale risultante dall'impatto**
- **Le proprietà captive del letto in condizione di fluidizzazione, quando si operi in presenza di opportuni campi acustici, aumentano in modo sensibile**
- **L'efficienza di filtrazione risulta, nel caso di applicazione del suono, incrementata di circa un fattore 2 sia in termini di quantità di materiale trattenuto dal letto che in termini di saturazione del filtro**

# Effetto della temperatura di esercizio

