

## Operazioni unitarie e sistemi di separazione

### Introduzione

In generale, la finalità di un impianto chimico è la trasformazione della materia attraverso una o più reazioni chimiche e per questo motivo si tende a considerare il reattore come il cuore dell'impianto. Questo però non toglie che in quello stesso impianto debbano essere condotte moltissime altre operazioni, come ad esempio la movimentazione della materia e gli scambi di materia ed energia. Possiamo quindi pensare all'impianto come ad una sequenza di operazioni fisiche, oltre alla parte prettamente chimica, che possiamo classificare in un ristretto numero di **operazioni unitarie**, classificabili in base alla loro funzione ed alle quali saranno associate delle specifiche apparecchiature. Una prima classificazione molto grossolana, distingue le operazioni unitarie in tre gruppi:

1. Movimentazione di fluidi e/o solidi (pompe, turbine, compressori, valvole, tubi, nastri trasportatori, etc.
2. Trasferimento di calore (scambiatori di calore, fornaci, essiccatori, etc.)
3. Separazione dei componenti di una miscela eterogenea o omogenea.

Il terzo di questi punti è quello di interesse per questo corso ed è importante sottolineare che le operazioni di separazione sono di grande importanza in quanto presenti in praticamente tutti i tipi di impianti. Basti pensare alla purificazione dei reagenti da alimentare al reattore, oppure alla separazione e purificazione dei suoi effluenti per isolare il prodotto finale ed eventualmente riciclare i componenti non reagiti. In generale, quindi, il processo di separazione è necessario tanto prima che dopo il reattore e in molti casi viene condotto attraverso diversi passaggi. Come anticipato, la separazione può riguardare sistemi eterogenei oppure sistemi omogenei. Nel primo caso, avremo la presenza di due fasi distinte, per cui le possibilità sono:

- Gas/liquido o vapore/liquido
- Gas/solido o vapore/solido
- Liquido/liquido
- Liquido/solido
- Solido/solido

Oltre che naturalmente sistemi ternari gas/liquido/solido o sistemi contenenti un numero di fasi distinte maggiore di due. Naturalmente, ciascuna delle suddette fasi non necessariamente è costituita da un composto puro, ma in generale sarà a sua volta una miscela omogenea di due o più composti. Un normale schema di separazione prevede quindi una serie di operazioni, che di solito iniziano dalla separazione delle fasi per passare da un sistema eterogeneo a due o più sistemi omogenei, i quali

verranno poi ulteriormente trattati per ottenere i singoli composti. Le operazioni unitarie tipicamente coinvolte nei sistemi eterogenei sono:

- Sedimentazione e caduta
- Separazione inerziale e centrifugazione
- Filtrazione
- Precipitazione elettrostatica
- Separazione ad umido
- Flottazione
- Essiccamento
- Etc.

La scelta e relativa messa in opera di una di queste operazioni è piuttosto semplice e si basa sulle caratteristiche della miscela eterogenea che si deve trattare. Al contrario, per la fase successiva, ossia il trattamento delle miscele omogenee, la scelta della migliore strategia può essere molto complessa. Resta comunque il fatto che, qualsiasi sia la strada che si decide di perseguire, questa deve in qualche modo portare un passo indietro, ovvero ricreare una situazione di bifasicità. In altri termini, l'operazione da fare è dividere la miscela omogenea in un sistema bifasico, le cui due fasi abbiano diversa composizione. Occorre cioè creare un'altra fase nel sistema, o fornendo energia o per aggiunta di un agente di separazione esterno. Per esempio se dal reattore esce una fase vapore, la seconda fase si può ottenere molto semplicemente per condensazione parziale. Il vapore rimanente sarà più ricco nei componenti più volatili e la fase liquida in quelli meno volatili. Ma la volatilità relativa non è ovviamente l'unica opzione e si può invece scegliere di fare uso di un agente di separazione costituito da un solvente liquido che disciolga preferenzialmente uno dei componenti. Questo, di nuovo, comporta la creazione di un sistema a due fasi di diversa composizione. La fase contenente il liquido estrattore andrà poi a sua volta trattata per recuperare il solvente e riciclarlo nel processo. I sistemi a disposizione per la separazione di miscele omogenee sono molti ed alcuni di questi verranno discussi in dettaglio nel seguito. Una lista delle principali operazioni unitarie connesse alla separazione di miscele omogenee include:

- **Distillazione** – i composti vengono separati grazie alla loro diversa volatilità.
- **Absorbimento/stripping** – rimozione selettiva di un componente da un gas mediante contatto con un liquido e viceversa.
- **Estrazione liquido/liquido** – rimozione selettiva di un soluto mediante contatto con un solvente immiscibile o parzialmente miscibile con quello originario.
- **Leaching liquido/solido** – rimozione selettiva di un composto da un solido mediante solubilizzazione in un liquido.

- **Cristallizzazione** – rimozione selettiva di un componente da una soluzione in base alla sua minore solubilità.
- **Adsorbimento** – separazione selettiva di un composto da una fase fluida (gas, vapore o liquida) mediante contatto con un adsorbente solido.
- **Separazione con membrane** – separazione selettiva di un composto di una miscela mediante permeazione attraverso una membrana.
- **Separazione con resine a scambio ionico** – separazione selettiva di specie anioniche o cationiche mediante scambio delle stesse con altri ioni.

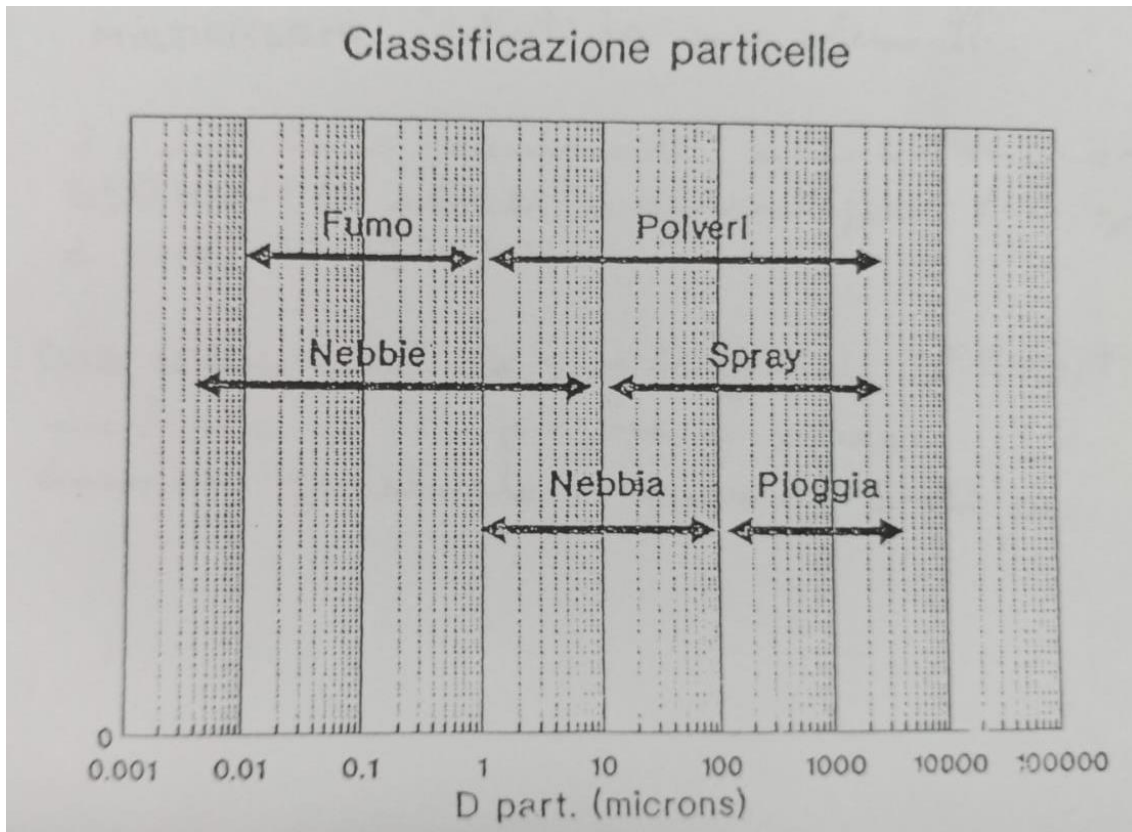
Nel caso di assorbimento/desorbimento, evaporazione, condensazione e distillazione, le due fasi sono una liquida ed una vapore. Nel caso di estrazione con solventi, sono due fasi liquide. Nel caso di cristallizzazione, adsorbimento, essiccazione e leaching, ci sono una fase liquida ed una solida.

### Sistemi eterogenei

È quindi chiaro che, anche se si parte da un sistema omogeneo, per arrivare ad isolare i componenti di una miscela, è comunque necessario passare dalla gestione di un sistema eterogeneo. Di seguito vedremo una breve descrizione delle operazioni unitarie adatte alla separazione delle fasi.

Per quanto riguarda la separazione da una fase gas o vapore, si può fare la seguente classificazione delle particelle da separare:

- **Polveri** – provengono dalla frantumazione di materiali solidi ed hanno dimensioni comprese fra 1 e 500  $\mu\text{m}$ .
- **Fumi** – si formano nei processi di combustione di sostanze organiche, dalla sublimazione, dalla ossidazione di metalli ed hanno dimensioni comprese fra 0.01 ed 1  $\mu\text{m}$ .
- **Nebbie** – goccioline di acqua o altri liquidi presenti in correnti gassose, con dimensioni fra 0.003 e 10  $\mu\text{m}$ .
- **Spray** – goccioline di acqua o di altri liquidi, con dimensioni superiori ai 10  $\mu\text{m}$ .

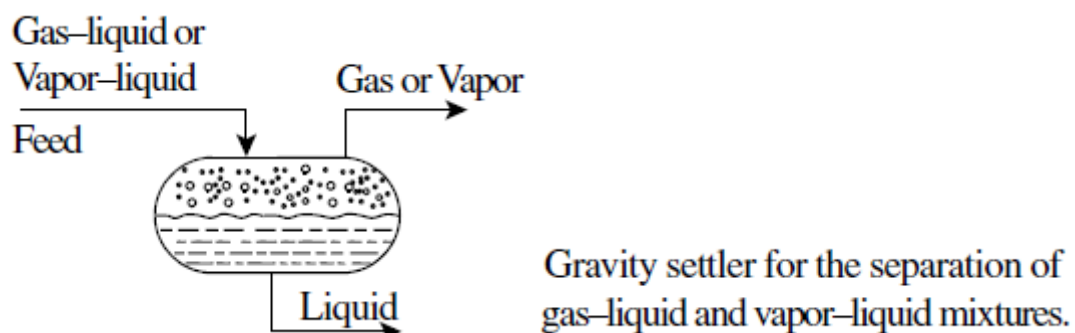


### Sedimentazione e caduta

Nel caso più semplice, le particelle di solido o liquido sono separate sfruttando le **forze gravitazionali** agenti sulle particelle stesse. Il fluido può essere un gas, un vapore o un liquido.

### Gas-liquido

La figura seguente mostra una semplice apparecchiatura usata per separare per gravità delle gocce di liquido da una fase gassosa. La velocità del gas o del vapore o del liquido di trasporto attraverso il contenitore deve essere minore della velocità di caduta delle particelle di liquido. In questo modo il tempo di permanenza delle particelle da separare è maggiore del tempo necessario perché queste si depositino sul fondo.



Quando una particella di liquido cade sotto l'effetto della gravità, subisce un'accelerazione verso il basso sino a che la forza gravitazionale non è bilanciata dagli attriti e dalle forze di galleggiamento determinate dal mezzo in cui sono immerse. Nel caso in cui la particella sia assunta essere una sfera rigida, nelle condizioni di accelerazione nulla, il bilanciamento delle forze gravitazionale e di attrito fornisce la seguente relazione:

$$\rho_P \frac{\pi d^3}{6} g = \rho_F \frac{\pi d^3}{6} g + c_D \frac{\pi d^2}{4} \frac{\rho_F v_T^2}{2}$$

Dove:

$\rho_P$  = densità della particella

$\rho_F$  = densità del fluido disperdente

$d$  = diametro della particella

$g$  = accelerazione di gravità

$c_D$  = coefficiente di attrito

$v_T$  = velocità terminale (o limite)

Se si ricava la velocità di caduta dalla espressione precedente, si ottiene:

$$v_T = \sqrt{\left(\frac{4gd}{3c_D}\right) \left(\frac{\rho_P - \rho_F}{\rho_F}\right)}$$

Che in genere viene scritta come:

$$v_T = K_T \sqrt{\frac{\rho_P - \rho_F}{\rho_F}}$$

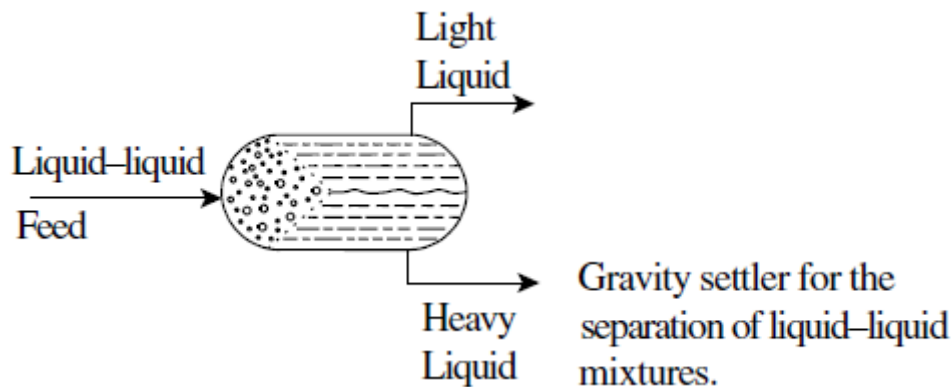
Dove  $K_T$  è un parametro per la velocità terminale o velocità limite ( $\text{ms}^{-1}$ ):

$$K_T = \sqrt{\left(\frac{4gd}{3c_D}\right)}$$

Naturalmente, per la stima della velocità limite esistono molte altre espressioni che prendono in considerazione condizioni operative differenti come p. es, particelle non rigide, o con diversa geometria, sistemi in flusso laminare piuttosto che turbolento etc. In ogni caso, il punto è arrivare ad una stima ragionevole della velocità di caduta delle particelle per dimensionare il sistema in modo che il flusso del fluido di trasporto non sia troppo rapido, ovvero consenta il deposito delle particelle. Quale

che sia la espressione usata, in genere il dato indispensabile per il dimensionamento della apparecchiatura è il diametro della particella che, ovviamente, nel caso di sistemi reali non sono mai tutte delle stesse dimensioni. Il dimensionamento dovrà quindi tener conto della distribuzione dei diametri delle particelle, in modo da trattenerne la maggior parte possibile. Al tempo stesso, però, è intuitivo che particelle molto piccole potrebbero richiedere tempi di permanenza molto elevati, che a loro volta porterebbero a dimensioni eccessive del serbatoio. In linea di massima, non conviene separare particelle con diametri inferiori ai 100  $\mu\text{m}$  in questo tipo di apparecchiature.

### Liquido-liquido



La figura qui sopra mostra un decantatore, usato per rimuovere una fase liquida dispersa in un'altra fase liquida. Supponendo che la fase dispersa sia quella leggera, la velocità orizzontale deve essere bassa abbastanza da permettere alle gocce di liquido di salire dal fondo del serbatoio fino all'interfaccia fra le due fasi e coalescere. Il dimensionamento si fa quindi in modo che la velocità della fase continua sia inferiore alla velocità terminale delle gocce di fase dispersa. La velocità della fase continua può essere stimata dall'area dell'interfaccia fra le due fasi:

$$v_{CP} = \frac{F_{CP}}{A_I}$$

dove:

$v_{CP}$  = velocità della fase continua

$F_{CP}$  = portata volumetrica della fase continua

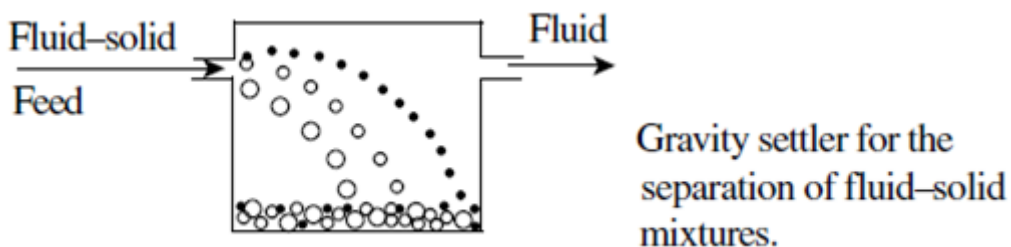
$A_I$  = area dell'interfaccia nel decantatore

Per la velocità terminale delle particelle, valgono le considerazioni fatte per il caso precedente. Questi decantatori sono generalmente dimensionati per gocce dell'ordine dei 150  $\mu\text{m}$ , ma possono arrivare anche a separare gocce di dimensioni inferiori ai 100  $\mu\text{m}$ . Dispersioni di gocce con diametri inferiori ai 20  $\mu\text{m}$  tendono ad essere

troppo stabili e richiedono sistemi differenti. Il serbatoio usato per questa separazione può anche essere un semplice serbatoio vuoto, ma in genere si fa uso di *buffles* orizzontali per ridurre la turbolenza e anche per aiutare la coalescenza se la superficie del baffle è più affine alla fase che deve coalescere. Altre tecniche più elaborate per migliorare l'efficienza del sistema prevedono l'uso di reti nel serbatoio, o di campi elettrici oppure di additivi, sempre aventi lo scopo di favorire e velocizzare la coalescenza delle particelle.

### Gas-solido e solido-liquido

Per un sistema gas-solido, la cosa più semplice che si può pensare è un sistema come quello raffigurato di seguito, per il quale valgono considerazioni del tutto analoghe a quelle fatte per i precedenti sistemi.



Anche se il sistema è costituito da particelle di solido disperse in una fase liquida, l'apparecchiatura di separazione può consistere semplicemente in una grande camera. Le particelle di solido si depositano sul fondo secondo lo stesso meccanismo e la velocità terminale è ancora il parametro fondamentale per il dimensionamento. Per quanto riguarda l'efficienza con cui vengono raccolte le particelle di una data dimensione, si può ricavare la seguente semplice espressione:

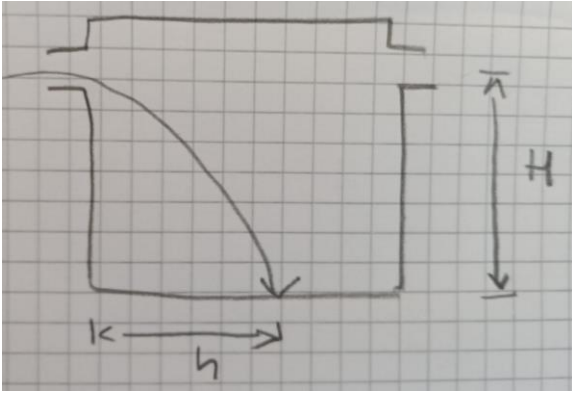
$$\eta = \frac{h}{H}$$

dove:

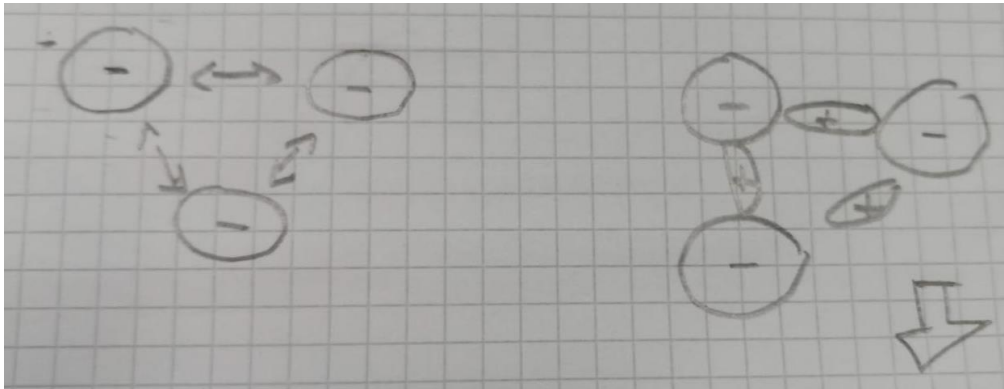
$\eta$  = efficienza del separatore

$h$  = distanza di caduta (vedi figura)

$H$  = altezza della zona di caduta delle particelle (vedi figura)

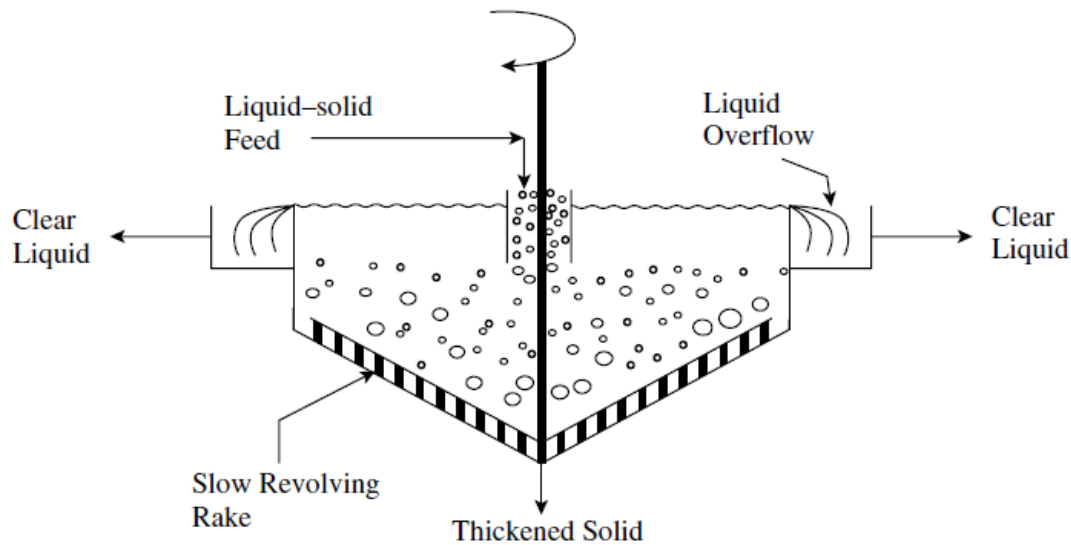


Quando il sistema contiene una elevata concentrazione di particelle, queste interferiscono fra di loro e la cosa è particolarmente importante per il caso di solido disperso in una fase liquida. Per esempio, quando si separano particelle solide da una fase acquosa in un separatore del tipo mostrato nella figura precedente, spesso si aggiunge un agente **flocculante** per facilitare il processo. Lo scopo dell'agente flocculante è quello di neutralizzare le eventuali cariche elettriche, presenti sulle particelle, che possono causare repulsione e favorire così la condizione dispersa. Ne risulta la formazione di aggregati o fiocchi che sono di dimensioni maggiori rispetto alle singole particelle e quindi scendono sul fondo più rapidamente.

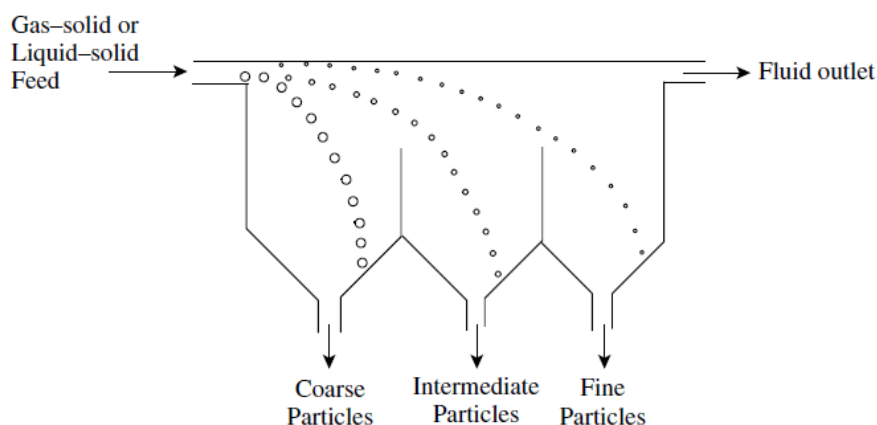


La separazione per effetto della gravità di particelle solide, per ottenere un liquido chiaro ed un fango con elevato contenuto di solido è detta **sedimentazione**. La figura seguente mostra un sedimentatore noto anche come *ispessitore*, la cui funzione primaria è quella di produrre un fango, quasi sempre acquoso, più concentrato rispetto al liquido di partenza. Il fango può essere poi alimentato a successivi sistemi di separazione se dovesse essere necessario ridurre ulteriormente il contenuto di acqua che lo bagna.





Il fango si alimenta nella parte centrale della vasca, sotto la superficie del liquido. Il liquido chiaro esce per troppo pieno dalla parte esterna della vasca. Un'ancora centrale ruota molto lentamente per rimuovere il fango depositato sul fondo e convogliarlo verso il centro del fondo, da dove viene rimosso. Anche in questi sistemi, di solito si aggiungono agenti flocculanti. Nel caso in cui lo scopo principale della apparecchiatura sia di produrre fanghi più concentrati, si parla di *ispessimento* dei fanghi, nel caso in cui lo scopo principale sia quello di avere un liquido senza solidi, si parla di *chiarificazione* del liquido e quindi la stessa apparecchiatura è definita ispessitore o chiarificatore a seconda della corrente di maggiore interesse.

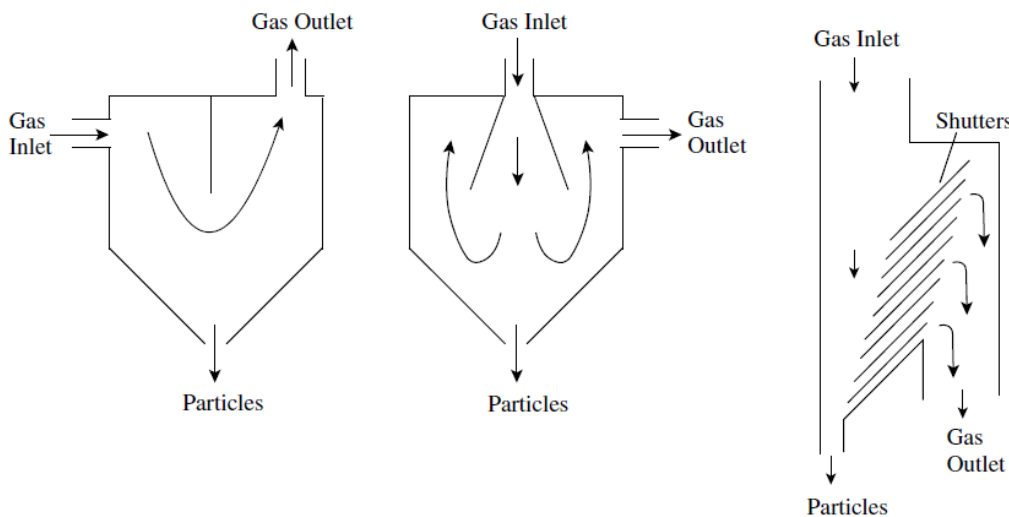


La figura qui sopra mostra un semplice tipo di *classificatore*. In questo caso un grosso serbatoio è suddiviso in diverse sezioni. Le particelle solide più grandi sono le prime a scendere sul fondo mentre quelle più piccole ci vanno per ultime. La suddivisione in settori permette quindi di ottenere la fase solida direttamente frazionata in base alle sue dimensioni. Questo tipo di apparecchiatura si può usare anche per separazioni di sistemi contenenti diversi tipi di solidi. La miscela di particelle è prima sospesa in un liquido o gas e poi passata in un sistema di questo

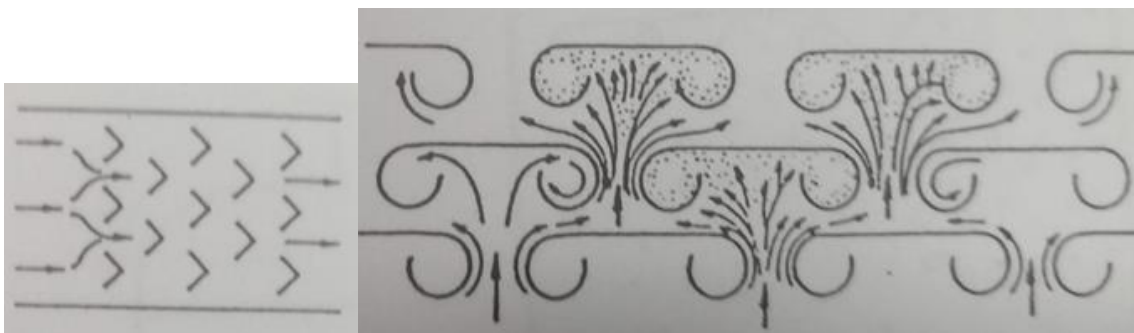
tipo. È una soluzione adottata, per esempio, per separare (previa riduzione in “chips”) diversi tipi di materie plastiche raccolte in una campana della raccolta differenziata.

### Separazione inerziale e centrifuga

Nel caso precedente, la separazione avveniva unicamente grazie alle forze gravitazionali, che però in certi casi possono portare a cinetiche troppo lente se, per esempio, le densità di particelle e fluido disperdente sono molto simili oppure se in un sistema liquido-liquido si è formata un'emulsione stabile. Il caso più semplice di separatore inerziale è quello in cui si aumenta l'efficienza della separazione impartendo alle particelle una quantità di moto verso il basso, in aggiunta al termine gravitazionale. La figura seguente mostra tre esempi di separatori di questo tipo.

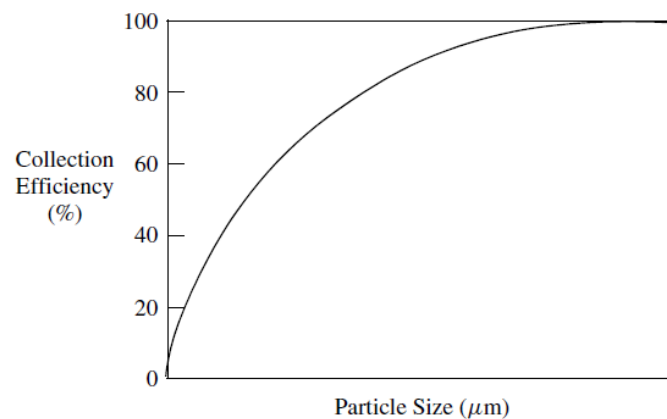


In generale, l'efficienza di separazione si può migliorare imprimendo al gas delle continue deviazioni nel flusso. In questo modo, le particelle in sospensione, che hanno inerzia maggiore di quella delle molecole di gas, urtano contro l'ostacolo che ha provocato la deviazione e cadono o vi si fermano sopra. Le apparecchiature più semplici che sfruttano questo principio sono costituite da un pacco di reti metalliche a maglie opportunamente sfalsate oppure da un pacco di lamiere forate, a fori sfalsati. Altre possibili soluzioni sono quelle della figura seguente:



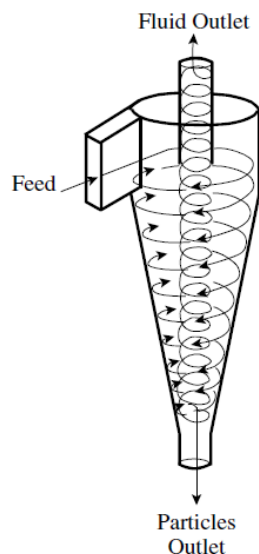
Naturalmente, in questi casi il prezzo da pagare per una maggiore efficienza di separazione consiste nella complessità della apparecchiatura, il che può comportare maggiori costi di investimento o difficoltà nella raccolta del solido, nonché maggiori perdite di carico e quindi costi di esercizio.

La progettazione di separatori inerziali per sistemi gas-solido in genere si basa su curve di natura sperimentale, del tipo illustrato nella figura seguente. Ovviamente, tanto più la dimensione delle particelle aumenta, tanto migliore è la efficienza di separazione.

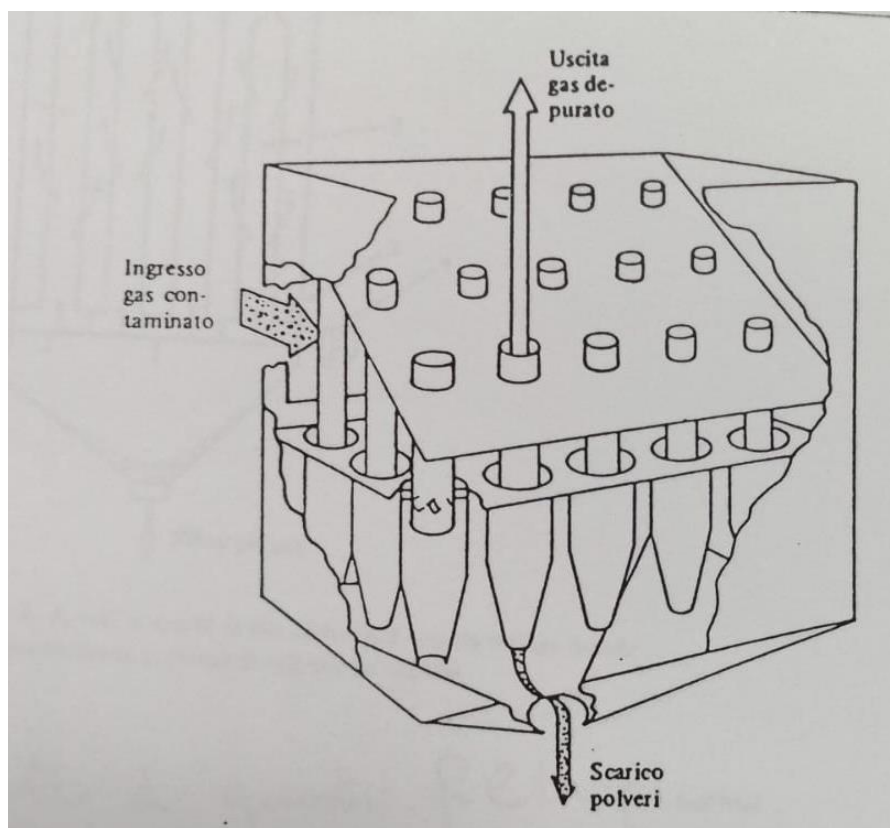


*Curva di efficienza della separazione. L'ordinata rappresenta la percentuale di particelle di una data dimensione che vengono raccolte nella apparecchiatura.*

I separatori centrifughi portano un passo avanti la stessa idea del separatore inerziale e sfruttano il principio secondo il quale un oggetto in rotazione attorno ad un asse è soggetto ad una forza centrifuga. Sfruttare questa forza è utile in quei casi in cui la separazione inerziale non basta. Il tipo più semplice di separatore centrifugo è il **ciclone**, usato per particelle solide o per gocce di liquido sospese in un gas o vapore.



Il ciclone consiste in un cilindro verticale con un fondo conico, la forza centrifuga è generata dal moto stesso del fluido. Il miscuglio è veicolato nel cilindro in maniera tangenziale nella parte alta ed il flusso circolare che ne deriva genera una forza centrifuga che spara le particelle radialmente verso le pareti. Il fluido segue un percorso a spirale e quando raggiunge il fondo del cono risale verso l'alto nella parte centrale del cilindro, che ancora percorre in senso spirale e nello stesso verso. Le particelle di solido, invece, escono dal fondo del cono. Il dimensionamento di un ciclone si fa con curve del tipo visto prima. In generale, il diametro della particella più piccola captabile e quindi l'efficienza della captazione, dipendono dal diametro del ciclone. A parità degli altri parametri, il ciclone di piccolo diametro è più efficace rispetto a quello di diametro maggiore. Per questa ragione, ***se si devono trattare grosse portate di fluido, non va bene aumentare la dimensione del ciclone***, ma si deve ricorrere all'uso di diversi cicloni disposti in parallelo (multicicloni).



multiciclone

I cicloni hanno generalmente diametro inferiore ai 650 mm e la velocità di alimentazione del gas è di circa 10-25 m/s. Data la loro semplicità, i cicloni sono largamente utilizzati su scala industriale per la separazione di polveri di dimensioni maggiori di 5-10  $\mu\text{m}$ .

Nel caso in cui, anziché avere un solido “secco”, si debba separare un solido da un liquido, si può ricorrere agli **idrocicloni**. Il principio è lo stesso, ma la geometria cambia rispetto al caso di gas o vapore. Gli idrocicloni si possono usare anche per la

separazione di liquidi immiscibili, come p. es, olio e acqua. Quest'ultima è più densa dell'olio e quindi viene spinta contro le pareti dalla forza centrifuga ed esce dalla base conica. L'olio invece esce dalla parte alta.

La figura seguente mostra una centrifuga, nella quale una tazza a simmetria cilindrica viene messa in rotazione per produrre una forza centrifuga. In questo caso la alimentazione è fatta nella parte centrale e tutto il contenitore è messo in rotazione, con successiva raccolta delle particelle di solido nella zona centrale e periferica del contenitore.

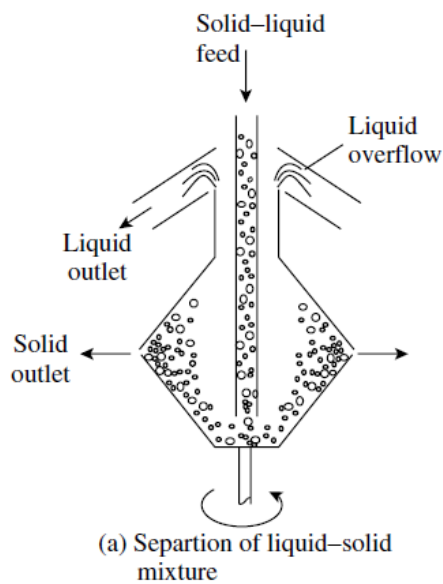


figura 8.7 a

Nel caso seguente, invece, si separano due liquidi aventi diverse densità.

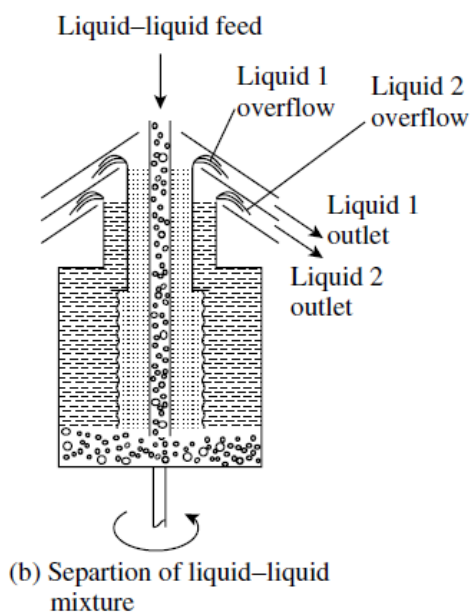
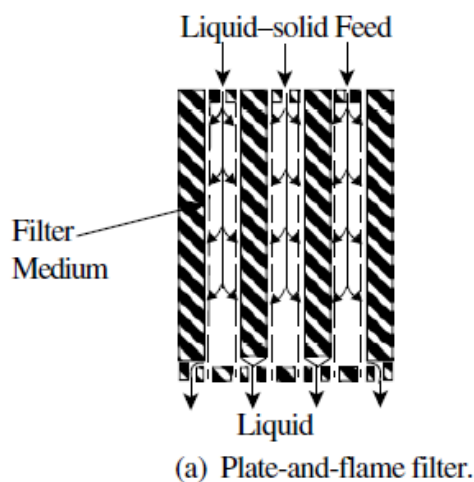


figura 8.7 b

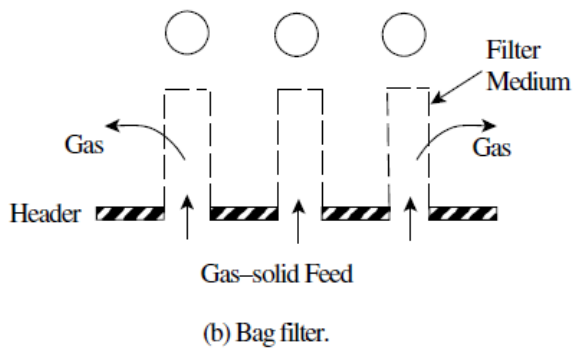
Il liquido più denso occupa la parte esterna perché è quello per il quale la forza centrifuga è maggiore.

## Filtrazione

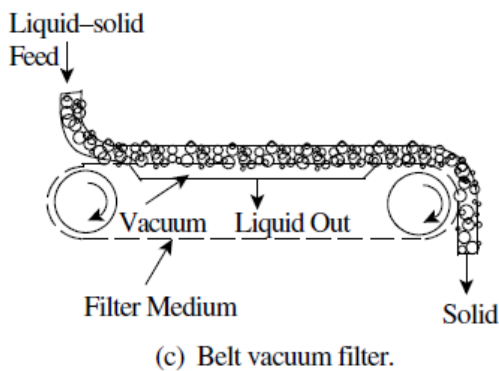
Nella filtrazione, particelle di solido sospese in un gas, vapore o liquido vengono rimosse passando il miscuglio attraverso un mezzo poroso in grado di trattenere la parte solida, lasciando passare quella fluida. Se il solido è trattenuto sulla superficie del filtro, si parla di “*cake filtration*”, mentre se è trattenuto all’interno del mezzo filtrante si parla di “*depth filtration*”. L’allestimento di un sistema di filtrazione può essere fatto in diverse maniere. Le figure seguenti mostrano 4 esempi di cake filtration nei quali il mezzo filtrante è un tessuto fatto di fibre naturali o artificiali. In altri casi, il filtro può essere ceramico o metallico. La figura (a) mostra un filtro a piastre nel quale c’è un elevato numero di piastre poste in parallelo. Periodicamente le piastre vengono allontanate per rimuovere il solido accumulato sui tessuti.



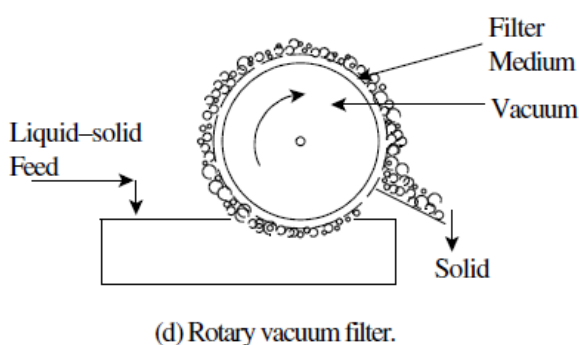
La figura (b) mostra un filtro a maniche. Anche in questo caso, occorre una pulitura periodica del filtro, cosa che si fa invertendo il flusso di gas per far cadere le particelle. I tessuti si possono usare per temperature sino a circa 250 °C, poi per valori superiori si deve ricorrere a filtri ceramici o metallici che possono arrivare sino a 1000 °C e oltre. Per la pulizia si deve mettere il sistema off-line e mandare dei colpi di pressione in controcorrente per far cadere la parte solida.



La figura (c) mostra un filtro a nastro che sfrutta il vuoto per far passare il liquido attraverso il mezzo poroso.



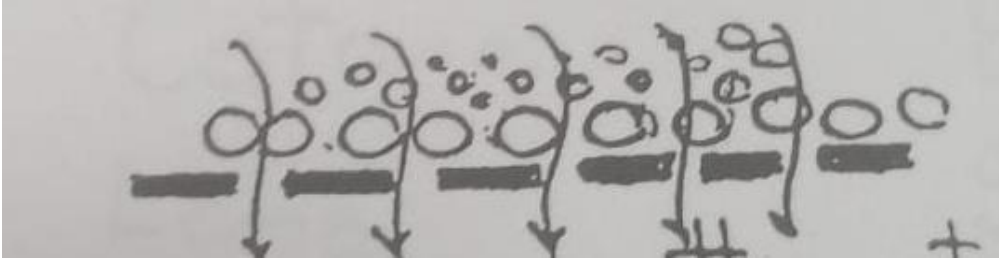
Infine, la figura (d) è un filtro nel quale un tamburo rotante passa attraverso lo slurry, mentre il liquido viene richiamato attraverso il filtro grazie all'applicazione del vuoto dentro il tamburo.



In alternativa all'uso di un tessuto, si può anche ricorrere ad un letto di particolato solido supportato da una griglia. Il flusso verso il basso della fase liquida porta le particelle di solido a rimanere intrappolate nel letto fisso (quindi è una depth filtration). Questo tipo di filtrazione si usa di solito per rimuovere piccole quantità di solido da grandi portate di liquido. Per rilasciare le particelle catturate nel letto, si deve periodicamente invertire il flusso di liquido. Questo causa un'espansione del letto stesso che quindi favorisce il rilascio delle particelle catturate. In realtà, il

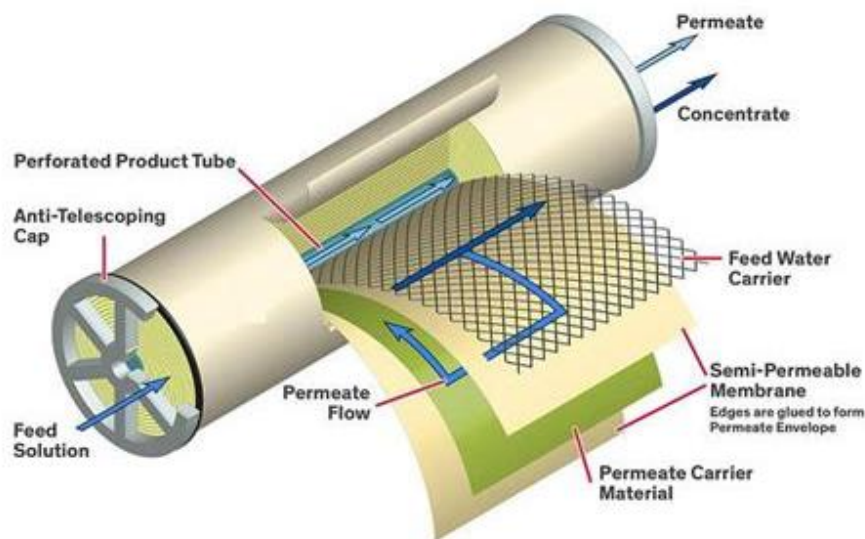


meccanismo di funzionamento di questi filtri è tale per cui lo strato di particelle più grosse che vengono trattenute dalle maglie del tessuto, costituisce lo strato filtrante per particelle più piccole e così via. In altri termini, le particelle stesse diventano il materiale filtrante.



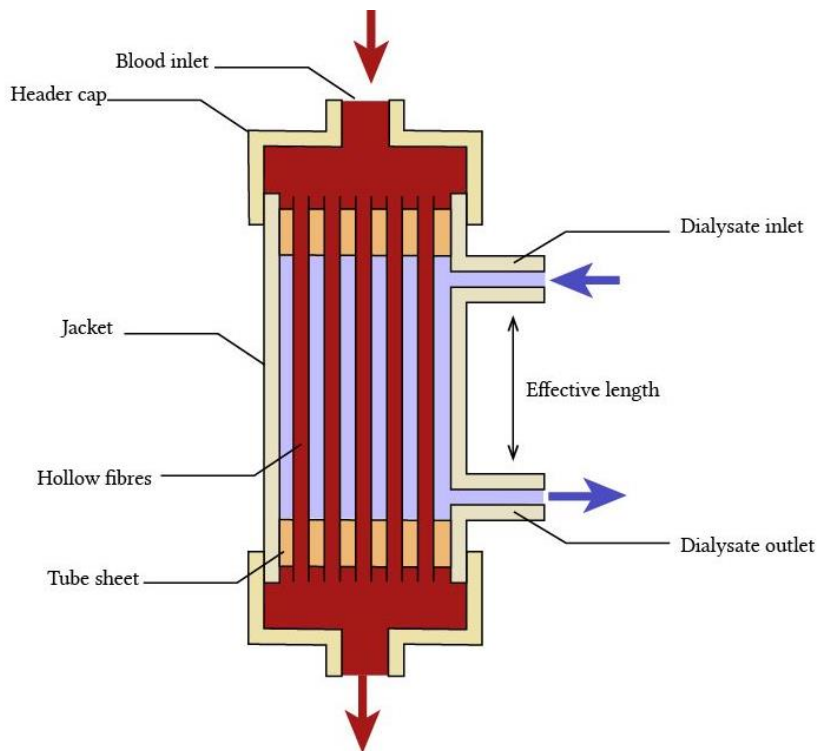
Per questo motivo di solito l'efficacia di cattura è bassa all'inizio, quando non si è formato lo strato aggiuntivo. Ovviamente, col tempo lo strato tende a crescere, sino a quando finisce per ostacolare anche il flusso del fluido e quindi occorre intervenire con la fase di pulizia.

I sistemi liquido-solido descritti sin qui possono separare particelle di dimensioni fino ai 10  $\mu\text{m}$ . Per particelle più piccole si può ricorrere ad una membrana polimerica porosa. Questo processo prende il nome di **microfiltrazione** e può trattenere particelle sino a circa 0.05  $\mu\text{m}$ . La dimensione dei pori così piccoli causa elevate perdite di carico e quindi occorre applicare una pressione di transmembrana (0.5-4 bar). I due allestimenti più comuni sono di tessuto raccolto a spirale oppure l'impiego di fibre cave (es dialisi).



*Filtro a spirale*





*Filtro a tubi cavi*

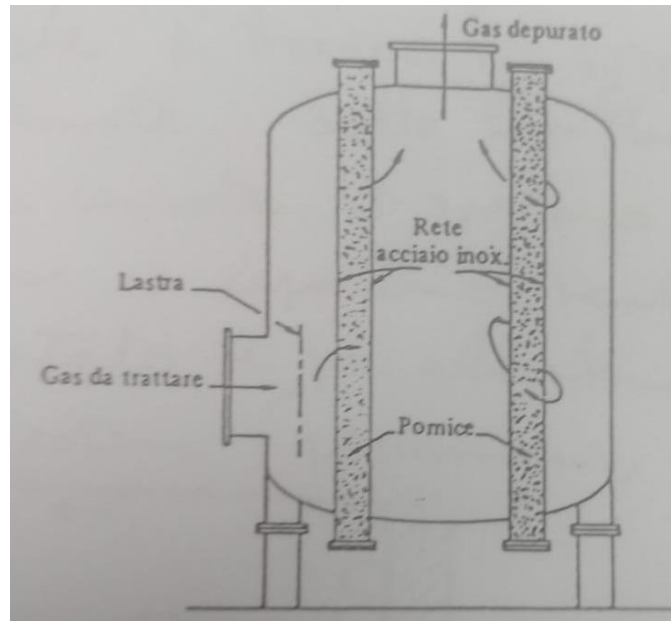
Nel caso a spirale, il filtro è planare e viene avvolto intorno ad una spirale insieme a dei separatori per il flusso del liquido e poi il tutto inserito in un recipiente portato in pressione. Nel caso delle fibre cave, si ha una serie di fibre disposte in parallelo dentro un cilindro (tipo scambiatore di calore a fascio tubiero). La alimentazione entra dalla parte esterna e poi il liquido passa dentro alle fibre cave.

In entrambi i casi, l'accumulo di solido sulla superficie filtrante è causa di una importante riduzione del flusso. Per ridurre questo inconveniente, si può fare in modo che il flusso della alimentazione sia parallelo alla superficie della membrana in modo che il flusso stesso faccia anche da pulizia della superficie (ovviamente questo è il caso in cui ad interessare come prodotto è il liquido pulito). Questa cosa migliora il flusso e rende meno frequente la fase di pulizia del filtro che comunque deve essere fatta periodicamente.

La scelta del materiale che costituisce il tessuto dipende da vari fattori, uno dei quali è la temperatura operativa:

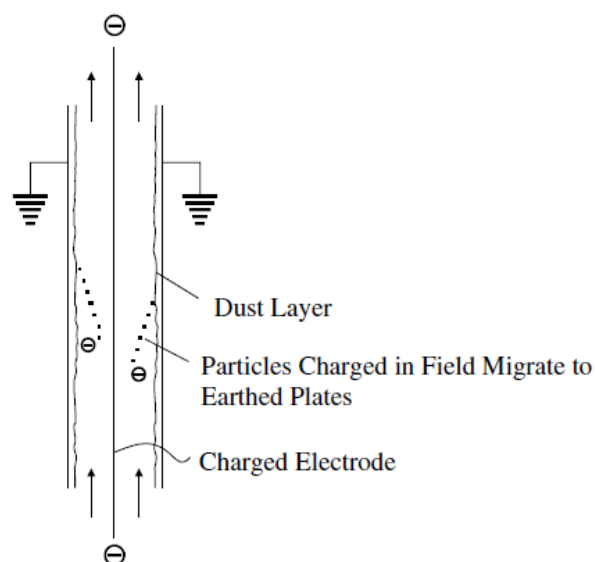
<b>materiale</b>	<b>T<sub>max</sub> (°C)</b>
Cotone	80
Lana	93
Poliestere	130
Poliammidi	130-150
PTFE	290
Fibra di vetro	300

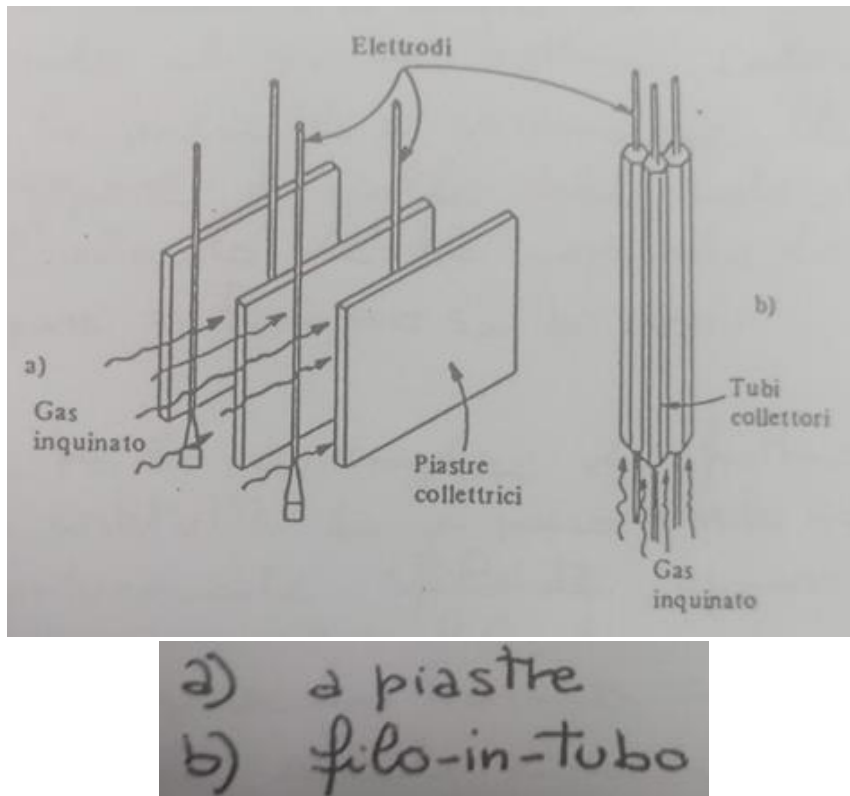
Qualora occorressero temperature ancora maggiori, la filtrazione si può operare con filtri costituiti da materiale ceramico poroso. Nel caso di particolati di origine organica, i filtri possono essere rigenerati mediante combustione delle particelle trattenute.



### Precipitazione elettrostatica

I precipitatori elettrostatici si usano in genere per separare particolati che sono facilmente ionizzabili in una corrente gassosa. Questo si ottiene producendo un campo elettrico mediante applicazione di una elevata differenza di potenziale fra filamenti o griglie e piastre di raccolta.



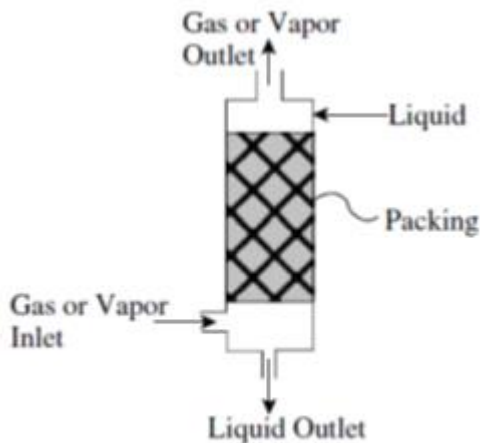


### *Precipitatori elettrostatici*

Mentre il gas passa nel campo elettrostatico attorno al polo negativo, questo ionizza molecole tipo ossigeno ed anidride carbonica, le quali a loro volta si attaccano al particolato caricandolo. A questo punto, le piastre cariche di segno opposto attirano le particelle che vi si attaccano per poi essere rimosse periodicamente per via meccanica, mediante vibrazione delle piastre. Alla fine, le particelle vengono raccolte sul fondo. Questa tecnica è più efficiente se le particelle hanno elevata resistività. Il voltaggio operativo tipicamente varia fra i 25 e 45 kV e oltre. L'impiego di questa tecnica è solitamente ristretto alla separazione di particelle fini di solido o liquido disperse in un grande volume di gas. L'efficacia della separazione è compresa fra 80 e 99% e la temperatura di utilizzo arriva fino a 900 °C circa. Un vantaggio di questi precipitatori è che, non essendoci passaggi in materiale filtrante, le perdite di carico sono molto basse.

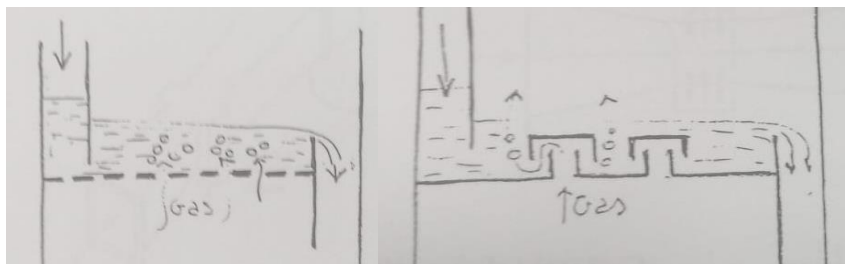
### Separazione ad umido (scrubbing)

Si intende che le particelle vengono catturate da goccioline o da un film di liquido. Quindi si usa un liquido, in genere acqua, di supporto per questa separazione di particolato solido da una corrente gassosa. Le figure seguenti mostrano tre possibili soluzioni.



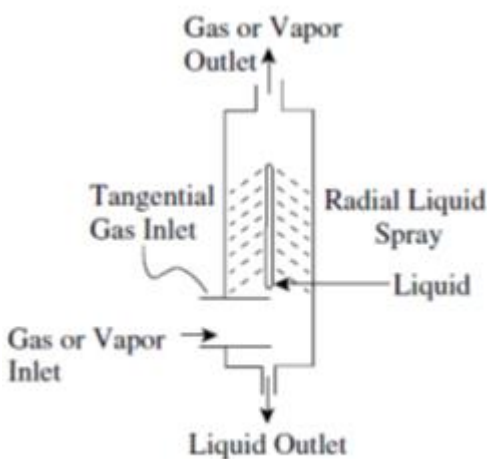
(a) Packed bed scrubber.

Questa è una colonna a riempimento, simile ad una torre di assorbimento. Si tratta di una soluzione che può funzionare bene come abbattimento delle polveri, ma che può soffrire di problemi di impaccamento per il deposito delle particelle sul riempimento. Si possono anche usare torri con piatti forati o a campanelle, tipo quelli della distillazione, ma di nuovo c'è il rischio dell'intasamento.



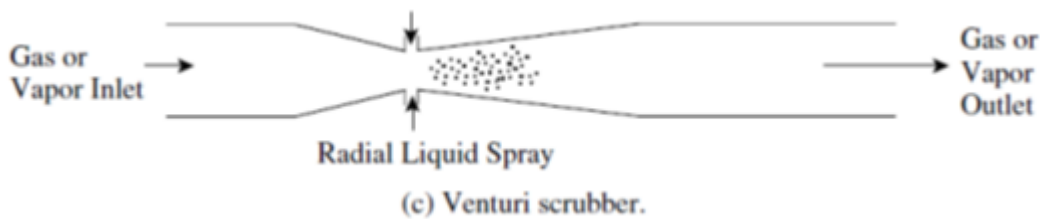
*Torre a piatti forati o a campanelle*

Il seguente, è un sistema a spray che è meno soggetto a questo tipo di problematica. La alimentazione è tangenziale per creare un percorso più favorevole alla separazione.



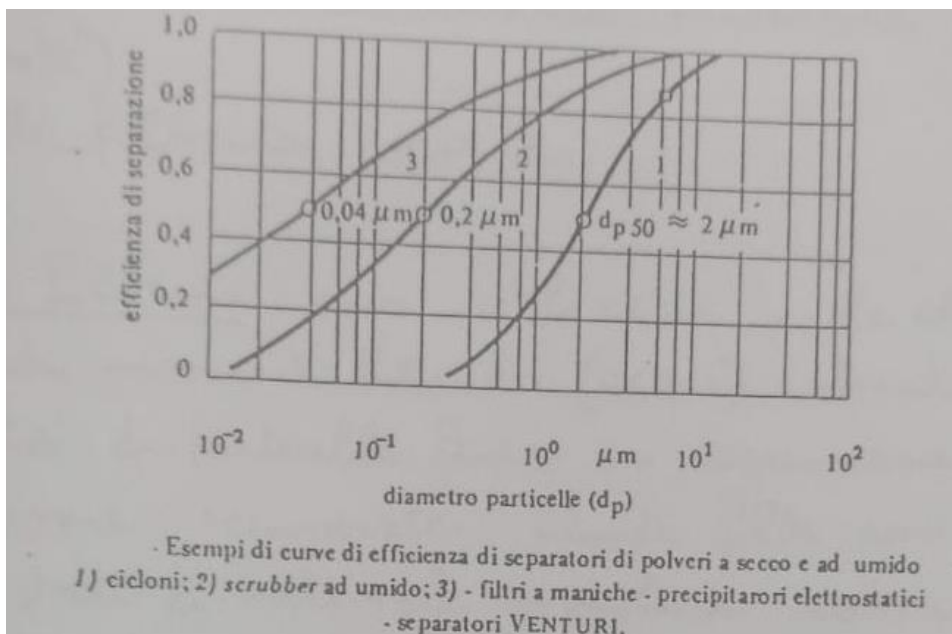
(b) Spray scrubber.

Infine, il caso (c) usa un Venturi.

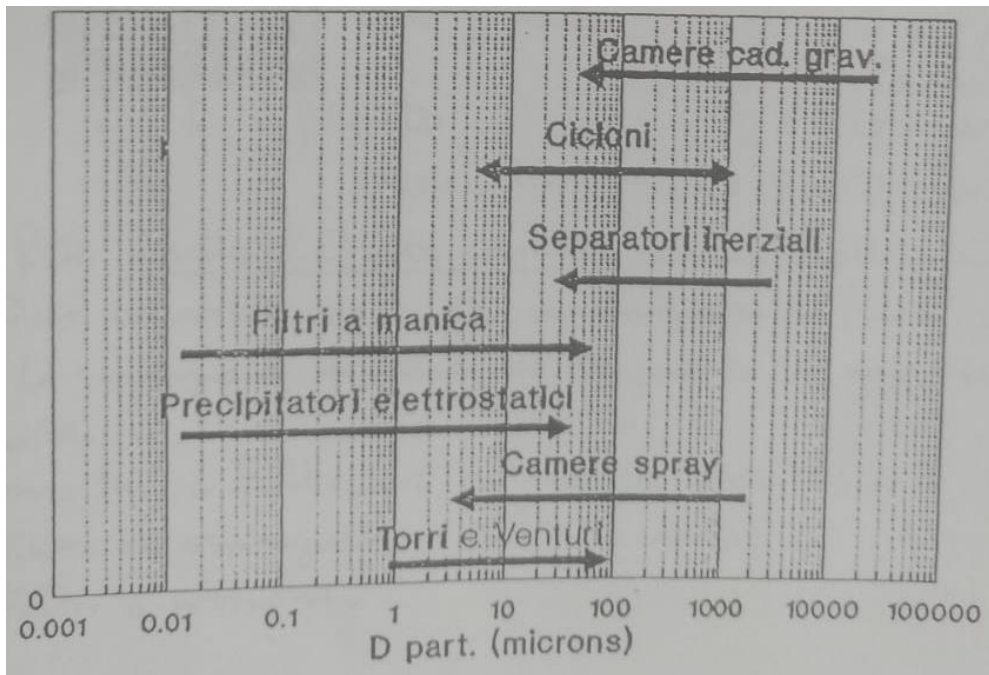


Il liquido è iniettato nel punto dove il canale è ristretto e quindi il fluido ha la massima velocità. Il gas accelera l'acqua iniettata portandola alla sua velocità e questo rompe le gocce disperdendole in forma di spray piuttosto fine che cattura le particelle di solido. Con questi Venturi si possono avere efficienze di separazione veramente buone, ma lo svantaggio è rappresentato dalle perdite di carico molto elevate.

Un'idea della differenza nelle efficienze di separazione di tre diverse tecniche per il trattamento di correnti gassose si può ricavare dalla seguente immagine che confronta cicloni (curva 1), scrubber ad umido (curva 2) e precipitatori elettrostatici, filtri a maniche e Venturi (curva 3).



Il seguente grafico fornisce invece un'indicazione per la scelta della tecnica (sempre per il caso di correnti gassose) in base alle dimensioni del particolato.



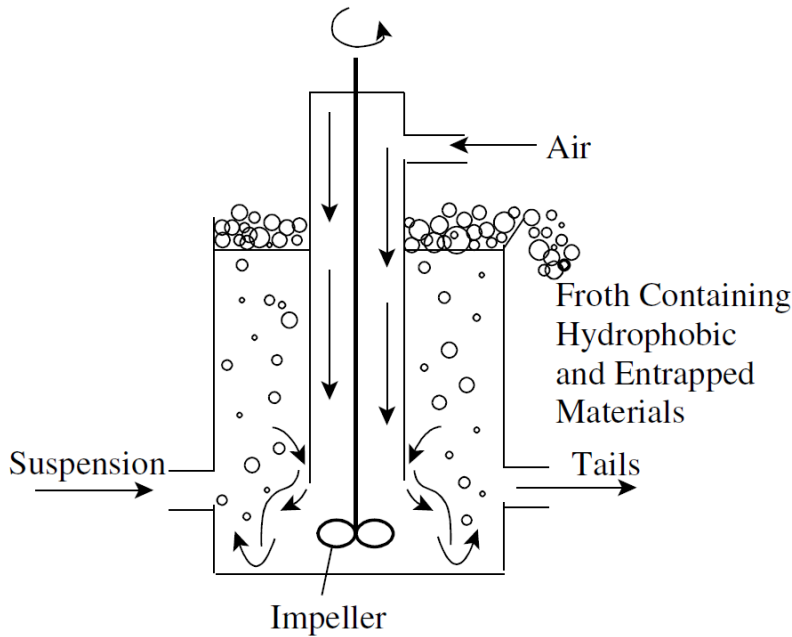
## Flottazione

La flottazione è un processo di separazione per gravità che sfrutta differenze nelle proprietà superficiali delle particelle. Si generano delle bolle di gas in un liquido e queste si attaccano alle particelle solide causandone il galleggiamento e risalita verso la superficie. La flottazione si usa per separare miscele di particelle solido-solido dopo averle disperse in un liquido, che di solito è acqua. Se le particelle sono idrofobiche, allora si attaccano prevalentemente alle bolle di aria come può essere il caso di una dispersione di olio in acqua.

Le bolle di gas si possono generare in tre maniere differenti:

- Dispersione, le bolle sono iniettate direttamente con qualche forma di dispersione;
- Dissoluzione, nel liquido in pressione e successivo rilascio in forma gassosa nella cella di flottazione dove si riduce la pressione (es. apertura bottiglia di acqua gassata);
- Elettrolisi del liquido.

La flottazione è una tecnica importante nella lavorazione dei minerali, dove è usata per separare diversi tipi di minerali fra di loro oppure i minerali dalla loro ganga. Quando usata per separare miscugli solido-solido, si parte con una macinazione per arrivare ad una pezzatura piccola abbastanza da liberare le particelle della specie chimica desiderata. Poi il miscuglio è alimentato nel mezzo di flottazione, che di solito è acqua e infine passa nella cella di flottazione. Un esempio è mostrato nella figura seguente.



(a) A typical flotation cell for solid separation.

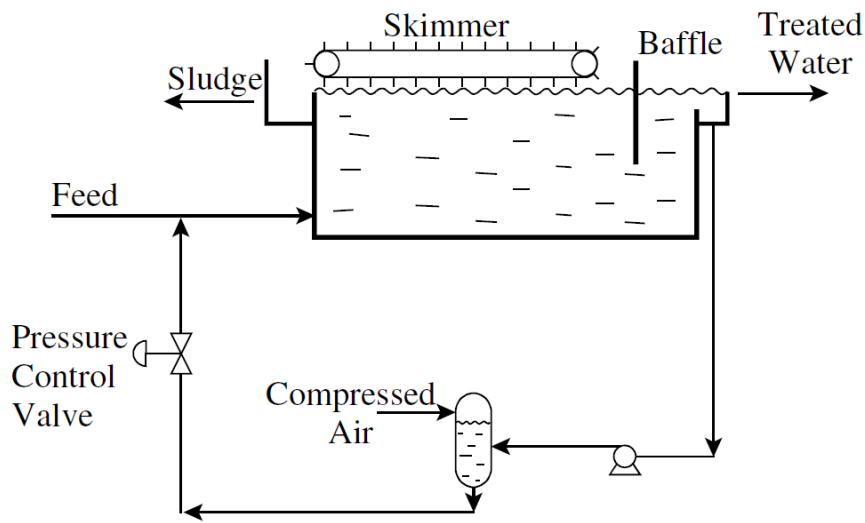
Il gas è alimentato alla cella dove si disperde in bolle che si attaccano alle particelle solide rendendole quindi in grado di arrivare in superficie e galleggiare. Le particelle solide vengono quindi rimosse con un troppo pieno o con un raccogliatore meccanico. La separazione delle particelle solide dipende dal fatto che diverse specie hanno diverse proprietà superficiali e quindi una specie in particolare sarà preferenzialmente attaccata alle bolle. Al sistema possono venire aggiunti vari tipi di composti chimici per riuscire a soddisfare i requisiti richiesti ad un sistema di flottazione:

- a) Modificanti, usati per controllare il pH della soluzione
- b) Collettori, cioè agenti idrorepellenti in grado di adsorbirsi prevalentemente sulla superficie del solido che si vuole rimuovere con l'aria
- c) Attivatori, che facilitano l'attacco del collettore
- d) Agenti idrofilici, che hanno lo scopo opposto, cioè rendono meno facile l'attacco alle bolle di aria
- e) Agenti schiumogeni, per rendere più stabile la schiuma e facilitare il processo.

La flottazione si usa anche in applicazioni come la separazione di particelle solide di bassa densità o di olio dall'acqua. In questo ultimo caso le particelle sono naturalmente idrofobiche e quindi non occorre aggiunta di agenti particolari.

Quando si fa la separazione di particelle di bassa densità, in genere si sceglie la soluzione (b) schematizzata di seguito, ovvero la flottazione con aria disciolta. Una parte dell'acqua in uscita dal sistema viene riciclata con dentro disciolta dell'aria grazie all'uso di alta pressione. Quando l'acqua rientra nel sistema, la pressione viene ridotta e si formano bolle di aria (vedi legge di Henry). Il materiale di bassa densità si porta in superficie con l'assistenza delle bolle e viene recuperato. In superficie ci

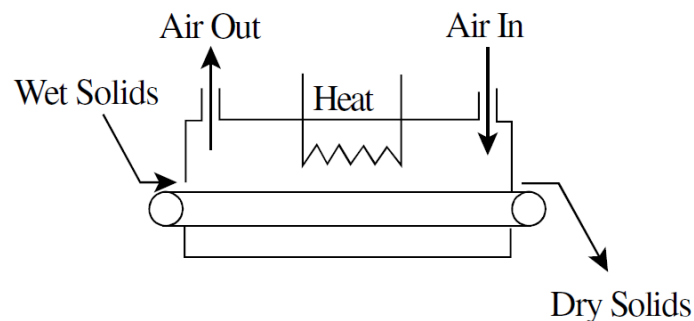
andrebbe comunque perché ha densità minore di quella dell'acqua, ma le bolle accelerano il processo.



(b) Dissolved air flotation (DAF).

### Essiccamento

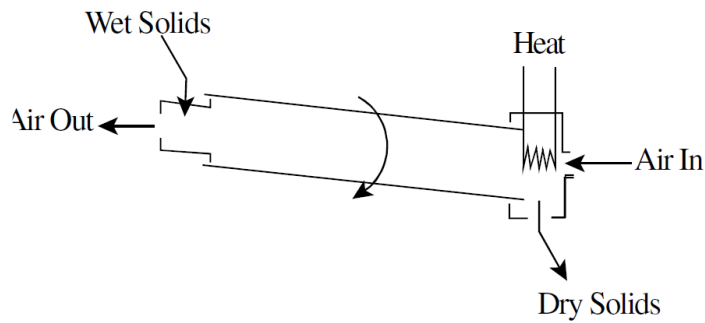
Per essiccamento si intende la rimozione di acqua da una sostanza attraverso un qualsiasi tipo di processo, inclusa la distillazione, l'evaporazione ed anche processi puramente meccanici come la centrifugazione. Adesso però col termine essiccamento intendiamo la rimozione di umidità da solidi, per spostarla in un flusso di gas (di solito aria), facendo uso di calore. Qualche tipo di apparecchiatura per l'essiccamento è riportato di seguito.



*Essiccatore a tunnel.*

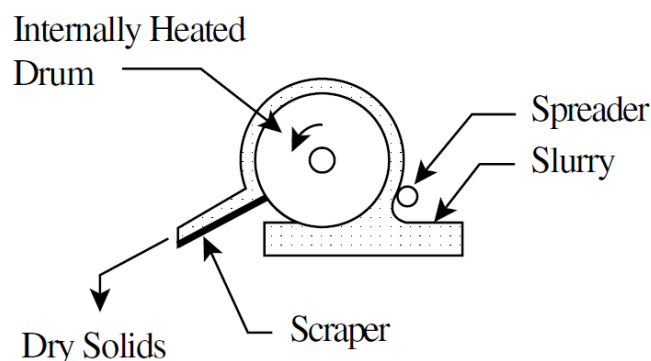
Il materiale umido è passato su un tappeto mobile attraverso un tunnel dove incontra aria calda che lo essicca. Il flusso di aria può essere equi o contro-corrente.





### *Essiccatori rotanti.*

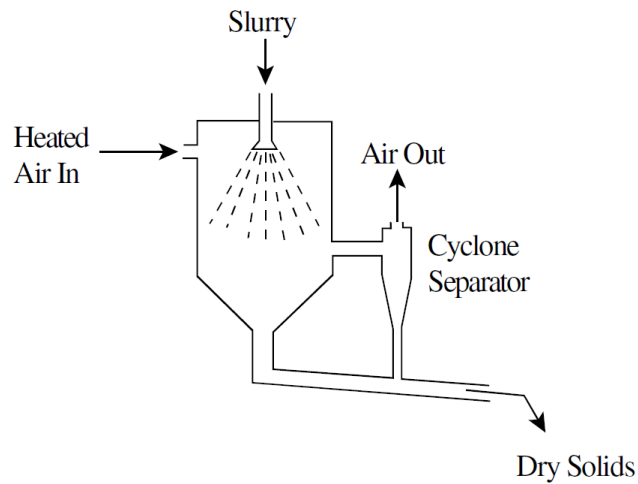
Gli essiccatori rotanti sono dei grandi cilindri messi in lenta rotazione attorno ad un asse leggermente inclinato per favorire il flusso del solido attraverso il cilindro. Anche in questo caso il calore per la rimozione dell'acqua è fornito da aria calda in equi o contro-corrente. Quindi, rispetto al caso precedente, l'unica differenza sta nella movimentazione del solido. Si sceglie questo tipo, rispetto al precedente, se il materiale è in grado di scorrere con la sola rotazione ed inclinazione del cilindro. Nel caso in cui si debba evitare il contatto diretto del solido con l'aria, il calore può anche essere fornito attraverso le pareti del forno. Questo metodo non è adatto per materiali soggetti ad instabilità termica perché i tempi di residenza nel forno sono molto lunghi.



### *Sistema senza contatto diretto*

Una possibile soluzione che limita l'insulto termico è quella di progettare l'essiccatore in modo che non vi sia contatto diretto con il fluido riscaldante.

Negli essiccatori a spray, un liquido o una soluzione vengono spruzzati sotto forma di piccole gocce in un flusso di gas caldo. La formazione delle gocce garantisce un'elevata superficie ed il processo è rapido e quindi adatto per sistemi termicamente instabili come per esempio i prodotti alimentari (anche perché l'evaporazione dalla goccia tende a raffreddare la goccia stessa).



(d)

*Essiccatori a spray.*

Un'altra importante classe, è quella degli essiccatori a letto fluido.

La scelta del tipo di essiccatore dipende da vari fattori, come la maneggiabilità del materiale, la sua forma fisica etc., oppure l'efficienza dell'essiccatore, che può essere definita come:

$$efficienza = \frac{\{calore\ di\ vaporizzazione\}}{\{calore\ totale\ consumato\}}$$

se il calore consumato proviene da un'unità esterna, allora è desiderabile avere una elevata efficienza, anche magari a scapito di elevati costi di investimento. Se invece il calore utilizzato è recuperato da qualche parte del processo stesso, allora non necessariamente l'efficienza è un decisivo criterio di selezione.