

## 15.2 ADSORBIMENTO

Con questo termine si indica quel processo tale per cui le molecole di una sostanza, presente in fase gassosa in un aeriforme, vengono attratte e tendono ad accumularsi sulla superficie di un solido, che viene considerato "attivo" nei loro confronti. Per inciso va specificato che lo stesso processo può verificarsi anche qualora la sostanza si trovi in fase liquida all'interno di un liquido di trasporto: è, ad esempio, il caso della depurazione delle acque reflue.

Il legame tra "adsorbato" (la fase gassosa) e "adsorbente" (la fase solida) è normalmente di tipo fisico, caratterizzato da forze di debole intensità. Più raramente, e per casi particolari, il legame è di tipo chimico (chemiadsorbimento), cioè caratterizzato da processi di diversa natura ed intensità, di gran lunga superiore.

In linea di principio tutti i solidi possono essere soggetti a tale processo; se però il solido è poroso e dotato di grande sviluppo superficiale interno a struttura microscopica, cioè se possiede elevate superfici per unità di peso (tipicamente superiori a 500 m<sup>2</sup>/g), allora il quantitativo di sostanza in grado di legarsi assume proporzioni considerevoli.

Esistono numerosi tipi di materiali microporosi che possono essere utilizzati come adsorbenti nella purificazione dell'aria. I più importanti commercialmente sono il gel di silice, l'allumina attivata, le zeoliti ed il carbone attivo.

Nel campo di nostro interesse, il materiale più comunemente utilizzato è il carbone attivo, ma vi sono anche diversi casi di applicazione di zeoliti, in particolare negli impianti di rotoconcentrazione.

La depurazione di un flusso di effluente aeriforme contenente VOC può essere effettuata mediante l'utilizzo di filtri a carboni attivi, soprattutto quando è richiesto il recupero delle sostanze inquinanti o quando il loro trattamento con altre tecnologie di abbattimento risulta economicamente più oneroso, a parità di prestazioni.

I carboni attivi sono materiali microporosi di origine vegetale o minerale, caratterizzati da una elevata superficie specifica (fino a 1700 m<sup>2</sup>/g), in grado di trattenere nei propri siti attivi, in modo selettivo, una vasta tipologia di molecole, con efficienze più o meno elevate (vedere Tabella 1, non esaustiva). Il carbone attivo può essere preparato a partire da numerose materie prime quali torba, legno, gusci di noce, ecc. e si può presentare sotto diverse forme: in polvere, granulare, estruso. Il carbone in polvere è usato soprattutto nel trattamento di liquidi, il carbone granulare viene usato sia per liquidi che per gas, mentre la forma estrusa è maggiormente utilizzata nel trattamento di aeriformi, grazie alle ridotte perdite di carico ed all'elevata resistenza all'abrasione.

Ogni tipo di carbone attivo può essere caratterizzato da una serie di parametri, generalmente riportati sulle schede tecniche, che ne individuano alcune proprietà:

- la densità apparente rappresenta il quantitativo di carbone presente nell'unità di volume considerata

- l'indice di iodio rappresenta indirettamente la superficie attiva
- il contenuto di ceneri rappresenta la percentuale di materia non attiva
- il contenuto di umidità rappresenta la percentuale di acqua in esso presente
- l'indice di benzene rappresenta indirettamente il comportamento del carbone nei confronti di determinate sostanze, fungendo da parametro di riferimento.

Il processo fisico su cui si basa tale capacità di trattenimento è l'adsorbimento, termine con il quale si indica la proprietà di talune sostanze solide di legare con forze deboli (Van der Waals) molecole in fase gassosa o liquida.

Il processo di adsorbimento è esotermico: si ha rilascio di energia (calore di adsorbimento) la cui entità equivale approssimativamente al calore di condensazione della sostanza trattata.

### TABELLA 1

Si può avere un'indicazione di massima del potere adsorbente di un carbone attivo nei confronti di vapori o gas industriali consultando le liste sottoindicate nelle quali le sostanze sono state classificate in 4 categorie a seconda della loro adsorbibilità.

Questa classificazione ha solo valore indicativo in quanto la capacità d'adsorbimento dei carboni varia con la concentrazione del prodotto nell'effluente aeriforme trattato, con il grado di umidità, la temperatura e la velocità di attraversamento.

#### Sostanze nei confronti delle quali i carboni attivi dimostrano un'elevata capacità di adsorbimento

Acetato di amile	Alcool butilico	Cloruro di butile
Acetato di butile	Alcool etilico	Cloruro di metilene
Acetato di cellosolve	Alcool isopropilico	Cloruro di propile
Acetato di etile	Alcool propilico	Composti solforati
Acetato di isopropile	Anidride acetica	Creosoto
Acetato di metilcellosolve	Anilina	Creosolo
Acetato di propile	Benzolo	Crotonaldeide
Acido acetico	Bromo	Cicloesano
Acido acrilico	Butilcellosolve	Cicloesanolo
Acido butirrico	Canfora	Cicloesanone
Acido lattico	Cellosolve	Decano
Acido propionico	Clorobenzolo	Dibromoetano
Acido solforico	Clorobutadiene	Diclorobenzolo
Acrilato di etile	Cloroformio	Dicloreetano
Acrilato di metile	Cloronitropropano	Benzina
Acrilonitrile	Cloropicrina	Dicloretilene
Alcool amilico		

Dicloretilere  
 Dicloronitroetano  
 Dicloronitroetano  
 Dicloropropano  
 Dietilcetone  
 Dimetilsolfato  
 Diossano  
 Dipropilcetone  
 Etere amilico  
 Etere butilico  
 Etereisopropilico  
 Etere propilico  
 Etilbenzolo  
 Etilmercaptano  
 Eptano  
 Eptilene Indolo  
 Iodio  
 Iodoformio  
 Cherosene  
 Mentolo  
 Mercaptani  
 Metilbulchetone  
 Metilcellosolve  
 Metilcloroformio  
 Metiletilchetone  
 Metilisobutilchetone  
 Metilcicloesano  
 Metilcicloesano  
 Metilcicloesano  
 Metilmercaptano  
 Monocloridrina di glicole  
 Monoclorobenzolo  
 Naftalina  
 Nicotina  
 Nitrobenzolo  
 Nitroetano  
 Nitrometano  
 Nitropopano  
 Nitrotoluolo  
 Nonano  
 Octano  
 Ozono  
 Ossido di mesitile  
 Pentanone  
 Percloroetilene

Fenolo  
 Propilmercaptano  
 Silicato di etile  
 Stirol monomero  
 Trementina  
 Tetracloretano  
 Tetracloretilene  
 Tetracloruro di carbonio  
 Toluolo  
 Toluidina  
 Toluidina  
 Tricloretilene  
 Xilolo

**Sostanze nei confronti delle quali i carboni attivi dimostrano una buona capacità di adsorbimento**

Acetone  
 Acetato di metile  
 Acido cianidrico  
 Acido formico  
 Acido iodidrico  
 Acido nitrico  
 Acroleina  
 Alcool metilico  
 Aldeide propionica  
 Anidride solforica  
 Bromuro di etile  
 Bromuro di metile  
 Butadiene Cloro  
 Cloruro di etile  
 Cloruro di metile  
 Cloruro di vinile  
 Diclorodifluorometano  
 Dicloromonofluorometano  
 Dicrorotetrafluoroetano  
 Dietilamina  
 Etere etilico  
 Etere metilico  
 Fluorotriclorometano  
 Formiato di etile  
 Formiato di metile  
 Freon  
 Gas tossici  
 Esano

Idrogeno solforato	Ammine
Isoprene	Ammoniaca
Monofluorotriclorometano	Biossido d'azoto
Ossido di etilene	Butano
Pentano	Butene
Pentene	Formaldeide
Fosgene	Gas solforosi
Solventi diversi	Propano
Solfuro di carbonio	
Etilamina	
<b>Sostanze poco adsorbite dai carboni attivi in condizioni normali</b>	<b>Sostanze praticamente non adsorbite in condizioni normali</b>
Acetaldeide	Acetilene
Acido bromidrico	Acido carbonico
Acido cloridrico	Etano
Acido fluoridrico	Etilene
	Idrogeno
	Metano

Il processo di adsorbimento, ai fini della depurazione di un effluente aeriforme, può essere caratterizzato da due distinti parametri:

**l'efficienza di adsorbimento**, definita dalla relazione

$$E_a = 100 \times (\text{VOC}_{in} - \text{VOC}_{out}) / \text{VOC}_{in}$$

e la **capacità operativa**, definita dalla relazione

$$K = (Q_e / W_c) \times \int (\text{VOC}_{in} - \text{VOC}_{out}) dt$$

dove:

$E_a$  = efficienza di adsorbimento [%]

$K$  = capacità operativa [%]

$Q_e$  = portata volumetrica dell'effluente aeriforme [ $\text{Nm}^3/\text{h}$ ]

$\text{VOC}_{in}$  = concentrazione VOC in ingresso al corpo adsorbitore [ $\text{mg}/\text{Nm}^3$ ]

$\text{VOC}_{out}$  = concentrazione VOC in uscita dal corpo adsorbitore [ $\text{mg}/\text{Nm}^3$ ]

$W_c$  = quantità di carbone attivo presente in fase di adsorbimento [kg]

*Nota:* l'integrale per il calcolo della capacità operativa si intende esteso a tutta la durata del ciclo di adsorbimento; quest'ultimo termina quando il valore di  $\text{VOC}_{out}$  è prossimo al limite di emissione.

La capacità operativa non deve essere confusa con la **capacità di adsorbimento**: mentre la prima viene determinata sulla base del limite di emissione definito dalla legislazione vigente in materia di inquinamento atmosferico, la seconda viene

determinata da quella particolare condizione di equilibrio tale per cui la concentrazione di sostanza in uscita dal letto di carboni è pari alla concentrazione in ingresso; questa condizione di equilibrio è detta «saturazione» (Nota: in condizioni di saturazione, l'efficienza di adsorbimento è nulla).

Facendo riferimento al grafico riportato in Figura 15.1, si può intuitivamente comprendere la differenza tra i due parametri. La curva sul grafico rappresenta un possibile andamento della concentrazione di VOC in uscita dal letto di carboni. Il punto T1 rappresenta la durata del ciclo di adsorbimento, legato al raggiungimento del limite di emissione C1; il punto T2 rappresenta la durata del ciclo di adsorbimento quando viene raggiunta la condizione di saturazione (C2 è la concentrazione di VOC in ingresso).

La capacità operativa è proporzionale all'area tratteggiata (che rappresenta l'integrale della formula), tramite il rapporto  $Q_e/W_c$ ; la capacità di adsorbimento è proporzionale, sempre tramite il rapporto  $Q_e/W_c$ , alla somma dell'area tratteggiata e dell'area punteggiata.

La capacità operativa non è un parametro fisso: essa può variare in funzione dello «stato di salute» dei carboni, che a sua volta dipende da numerosi fattori, quali la presenza di acqua al loro interno, la presenza di sostanze altobollenti o avvelenanti, il tipo e la concentrazione di inquinanti da abbattere, ecc. Facendo sempre riferimento al grafico, se il processo di adsorbimento viene svolto in condizioni non ottimali, ciò che varia, a parità di concentrazione C1 in uscita e C2 in ingresso, è

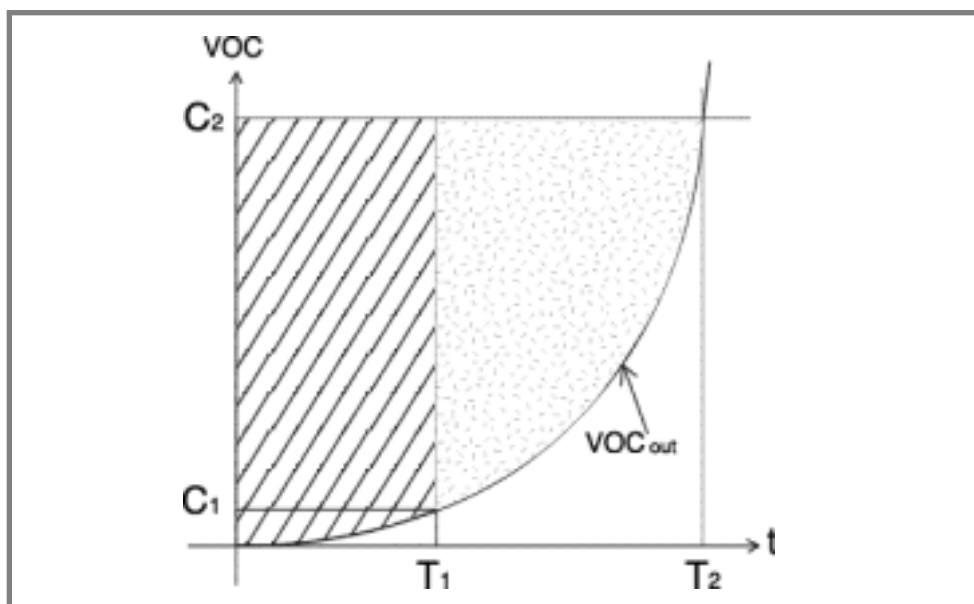


Figura 15.1 – Differenza tra capacità operativa e capacità di adsorbimento

l'andamento della curva  $VOC_{out}$  che incontrerà la retta C1 in un punto T minore di T1, dando luogo ad una durata minore del ciclo di adsorbimento, con una conseguente riduzione dell'area tratteggiata e, quindi, della capacità operativa.

Per una fissata condizione di temperatura e pressione dell'effluente aeriforme e per una determinata sostanza, la capacità di adsorbimento di uno specifico carbone attivo è funzione della concentrazione di sostanza in ingresso al letto adsorbente. Variando la concentrazione in ingresso, è possibile ottenere una curva (detta **isoterma di adsorbimento**), che caratterizza in modo univoco il processo di adsorbimento per quella sostanza su quel particolare tipo di carbone attivo.

In Figura 15.2 è dato un esempio di isoterme di adsorbimento.

Sulle ordinate, la capacità di adsorbimento è espressa in termini percentuali come quantità di sostanza adsorbita per unità di massa di carbone attivo; sulle ascisse, la concentrazione è espressa come pressione parziale relativa  $[p/p_0]$  oppure come concentrazione  $[g/m^3]$ .

Generalmente, la capacità di adsorbimento aumenta all'aumentare della concentrazione di VOC e diminuisce all'aumentare della temperatura dell'effluente aeriforme.

In condizioni di saturazione, ogni strato del letto di carboni contiene la stessa quantità di adsorbato; nella pratica operativa invece, poiché la concentrazione in uscita deve essere la più bassa possibile (definita, caso per caso, dalla legislazione vigente), la condizione di equilibrio non viene mai raggiunta e di conseguenza la

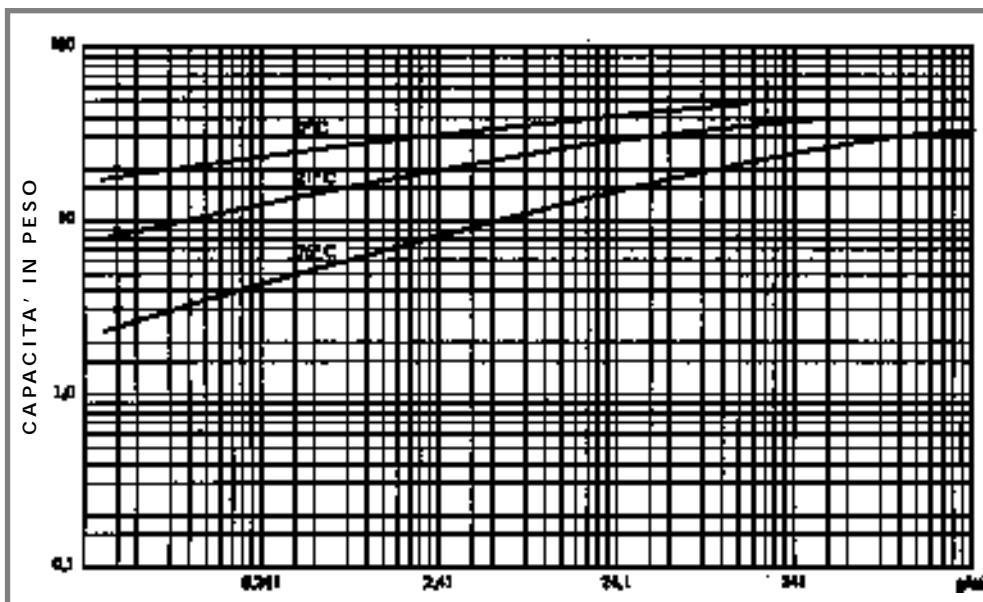


Figura 15.2 – Isoterme di adsorbimento

distribuzione dell'adsorbato all'interno del letto di carboni non è uniforme, ma varia da un massimo (saturazione) negli strati più vicini all'ingresso dell'effluente aeriforme, ad un minimo negli strati più vicini all'uscita. In un letto di carboni attivi infatti, il processo di adsorbimento procede per strati: prima vengono «riempiti» gli strati più vicini all'ingresso dell'effluente aeriforme da trattare e poi, via via, quelli più lontani. E' allora possibile individuare tre zone all'interno del letto, differenti per comportamento: una zona di equilibrio, in cui si ha una effettiva saturazione dei carboni; una zona di riempimento (Zona di Trasferimento di Massa o MTZ); una zona non utilizzata, più prossima allo scarico.

E' all'interno della MTZ che l'adsorbato viene trasferito dalla corrente gassosa al carbone attivo ed è al suo interno che viene instaurato quel gradiente di concentrazione sopra descritto; ciò significa che percorrendo la MTZ dagli strati di carbone iniziali a quelli più vicini all'uscita, il riempimento dei singoli strati diminuisce nella direzione del flusso, così come diminuisce la concentrazione di inquinanti presente nell'effluente aeriforme.

Questa condizione è ben illustrata in Figura 15.3, dove la zona tratteggiata rappresenta gli strati di carbone che hanno già raggiunto la condizione di saturazione, il grafico in mezzo rappresenta l'andamento della concentrazione di inquinanti in uscita, mentre nei tre grafici inferiori è visualizzato lo spostamento della MTZ all'interno del corpo adsorbitore (la direzione del flusso è in questo caso da sinistra a destra). Quando gli strati di carbone della MTZ più vicini all'uscita raggiungono la fine del letto di carboni, si ha l'emissione degli inquinanti in atmosfera. Il ciclo di adsorbimento termina quando la loro concentrazione è prossima al limite di emissione. La lunghezza della MTZ (nella direzione del flusso di effluente aeriforme) è funzione di tutti i parametri operativi che caratterizzano il processo di adsorbimento (temperatura, umidità, pressione, concentrazione di inquinanti, presenza di sostanze avvelenanti, velocità di attraversamento, ecc.) ed è di fatto il parametro che determina la capacità operativa del letto di carboni: quanto maggiore è questa lunghezza e tanto minore è la capacità operativa del carbone, poiché diminuisce la durata del ciclo di adsorbimento. In modo equivalente, quanto minore è la lunghezza della MTZ tanto maggiore risulta la durata del ciclo di adsorbimento. La lunghezza della MTZ è direttamente proporzionale alla dimensione dei granuli, al contenuto di umidità, alla temperatura ed alla concentrazione di VOC presente nell'effluente aeriforme, nonché alla velocità di quest'ultimo. Relativamente alla velocità però, al di sotto di certi limiti (circa 0,05 m/s) si ha prevalenza di moto laminare con conseguente allungamento della MTZ.

Nella pratica operativa, il processo di adsorbimento è influenzato da numerosi fattori, suddivisibili in tre gruppi, di seguito analizzati in dettaglio:

- tipo di sostanza da adsorbire
- tipo di carbone attivo
- condizioni di processo.

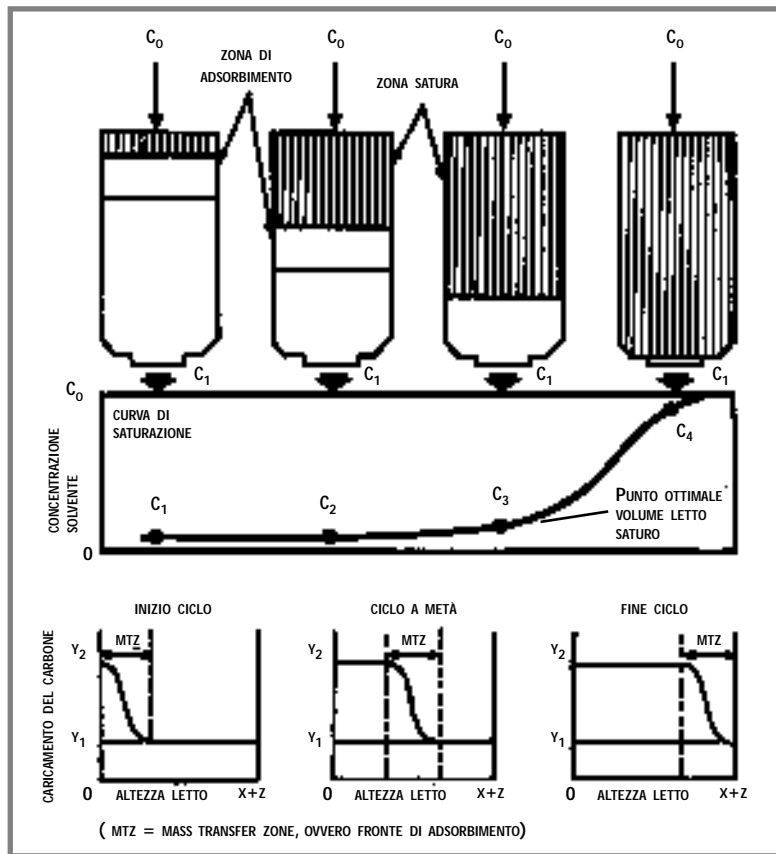


Figura 15.3 – In alto viene schematizzato l'andamento del letto di carbone al procedere della saturazione; in basso l'andamento del fronte di adsorbimento rispetto al tempo di esercizio

■ *Influenza del tipo di sostanza*

In linea generale, composti poco polari presentano fattori di affinità generalmente molto elevati. Per classi omogenee di composti, sono soprattutto due i fattori che influenzano il processo di adsorbimento: la temperatura di ebollizione e la densità. In generale, quanto più elevati sono tali parametri, tanto maggiormente adsorbiti risultano i relativi composti.

Nel caso di trattamento di miscele di composti organici, occorre tenere in considerazione il fatto che generalmente i VOC a più bassa pressione parziale tendono a spostare (cioè a rimuovere dal sito attivo) quelli a pressione parziale più elevata; in questo caso, durante il ciclo di adsorbimento, la capacità operativa del carbone nei confronti dei VOC a pressione parziale più elevata risulta minore rispetto a quella che si avrebbe se la sostanza non facesse parte di una miscela di VOC.



■ *Influenza del tipo di carbone attivo*

Il carbone attivo si può presentare sotto diverse forme: in polvere, granulare, estruso. Differenti tipi di carbone attivo derivanti da un certo processo di attivazione differiscono principalmente nel grado di attivazione e nella distribuzione dimensionale dei pori. La distribuzione di micro, meso e macro pori, ed il loro rapporto, influenzano sia la capacità di adsorbimento che quella di desorbimento. In genere si può dire che il carbone più attivato ha una capacità di adsorbimento minore, rispetto a quello meno attivato, a basse concentrazioni di adsorbato, mentre la sua capacità è maggiore a concentrazioni di adsorbato elevate.

Nella scelta del carbone attivo più adatto ad una specifica esigenza è dunque opportuno prendere in considerazione l'isoterma nella sua globalità e non un solo punto di essa (Figura 15.4).

■ *Influenza delle condizioni di processo*

Numerosi fattori legati alle reali condizioni di processo influenzano in modo significativo le prestazioni di un filtro a carboni attivi. I principali fattori esterni che influenzano l'adsorbimento, determinando la lunghezza effettiva della zona di trasferimento di massa, sono:

- velocità di attraversamento; l'efficienza di adsorbimento è maggiore per basse velocità, tuttavia, al di sotto di certi limiti, si ha prevalenza di moto laminare con conseguente perdita di efficienza. I limiti pratici sono compresi tra 0,05 m/s - 0,4 m/s

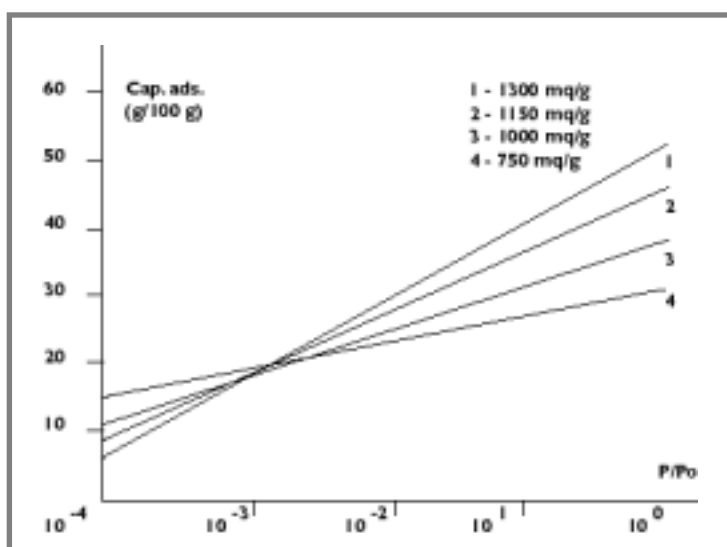


Figura 15.4 – Isoterme di adsorbimento del benzene, per carboni attivi a differenti livelli di attivazione

- tempo di contatto; maggiore è il valore assunto da questo parametro e maggiore è l'efficienza di adsorbimento
- umidità; per quanto il carbone attivo sia un classico mezzo adsorbente per sostanze poco polari, la presenza di eccessiva umidità nell'effluente aeriforme e la relativa condensazione dell'acqua (sostanza polare) all'interno del letto adsorbente, possono provocare un fenomeno di competizione nei confronti dell'adsorbimento di VOC, con conseguente perdita di efficienza e riduzione della capacità operativa. Nella pratica operativa è consigliabile garantire un livello di umidità nell'effluente aeriforme non maggiore del 70%; è comunque importante tenere conto di questo fattore in sede di dimensionamento del letto adsorbente
- temperatura; poiché l'adsorbimento è un processo dinamico (tra molecole adsorbite e molecole desorbite), l'effetto di un incremento di temperatura nell'effluente aeriforme è quello di incrementare la componente di desorbimento, riducendo quindi l'efficienza di adsorbimento. Generalmente si consiglia di non superare i 40°C; temperature di esercizio minori possono essere richieste nel caso si trattino sostanze estremamente volatili
- presenza di sostanze avvelenanti ed impaccanti; possono essere di diversa natura (polveri, sostanze altobollenti che non riescono ad essere desorbite, ossidi, sostanze che possono polimerizzare in determinate condizioni operative, ecc.). Il loro accumulo nei carboni ne provoca l'inevitabile perdita di efficienza.

Il processo di adsorbimento è inoltre caratterizzato da una elevata reversibilità (desorbimento), che permette di recuperare (per poi inviare allo smaltimento o al riutilizzo) la sostanza precedentemente adsorbita.

Dal punto di vista impiantistico, i dispositivi a carboni attivi per la depurazione dell'aria si dividono in due categorie principali:

- a perdere
- con rigenerazione annessa.

La "**rigenerazione**" è quel processo per cui il solvente precedentemente adsorbito viene estratto dal carbone e, se possibile, recuperato per essere riutilizzato.

La rigenerazione serve per ripristinare le condizioni operative ottimali del carbone una volta raggiunto il grado di riempimento prestabilito.

Gli **impianti a perdere** non recuperano in loco le sostanze adsorbite ma, una volta esausti, vengono inviati allo smaltimento o alla riattivazione esterna; per questo motivo vengono applicati a correnti con bassa concentrazione di inquinanti (<100 ppm). Tale tipologia di impianti prevede unità dalle forme più svariate: cilindri orizzontali o verticali, canestri a flusso radiale, pannelli plissettati, cassoni sovrapposti, cassette, eccetera (Figura 15.5).

Gli **impianti con rigenerazione annessa** possono essere di diverso tipo, a seconda delle particolari modalità con cui si svolge il ciclo adsorbimento-rigenerazione. Si possono così distinguere, per ciò che concerne la caratterizzazione del

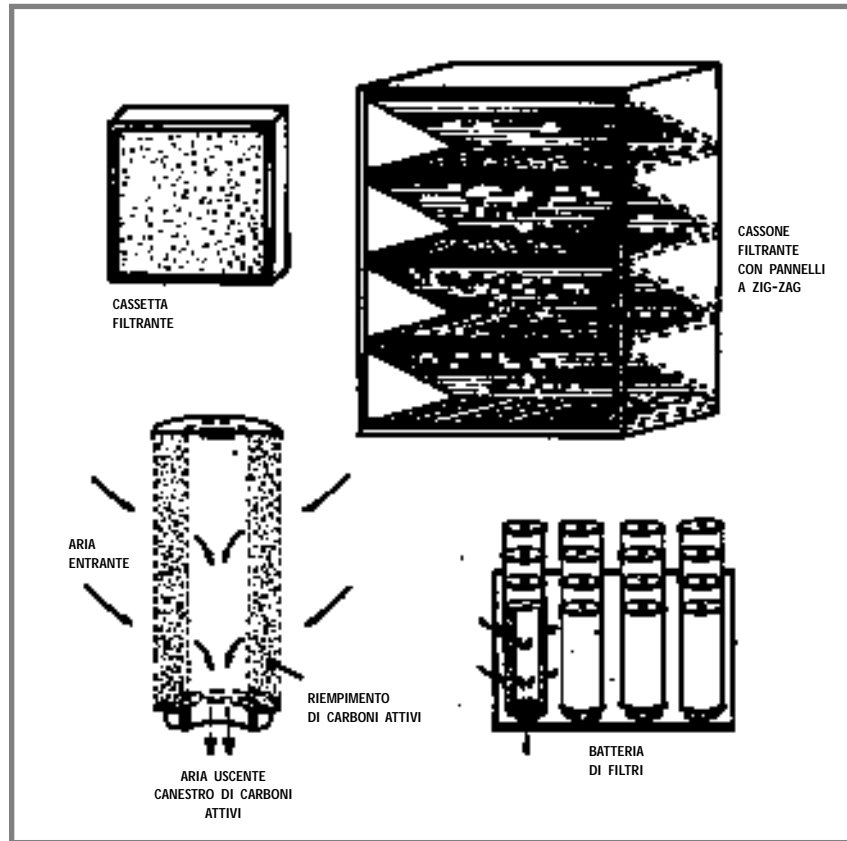


Figura 15.5 – Vari esempi di elementi filtranti

ciclo di adsorbimento, unità che lavorano a pressione atmosferica oppure in pressione, mentre per ciò che concerne la caratterizzazione del ciclo di rigenerazione, unità con desorbimento a mezzo vapore, gas inerte, vacuum o sistemi misti.

Relativamente alla rigenerazione, è fondamentale tener presente che il desorbimento (cioè l'estrazione della sostanza adsorbita) è legato alla modalità di erogazione dell'energia necessaria per la separazione della molecola dal sito attivo ed il suo successivo trasferimento all'esterno del letto di carboni. L'apporto energetico può essere di tipo meccanico o termodinamico.

L'energia meccanica viene fornita mediante circolazione continua di un fluido di servizio (aria, gas inerte, vapore), o mediante la formazione di un'elevata differenza di pressione tra letto di carboni ed ambiente esterno.

L'energia termica viene fornita per scambio indiretto (riscaldamento del letto per mezzo di scambiatori interni), o per cessione diretta da parte del fluido di servizio (aria, gas inerte caldo, vapore).

Generalmente si preferisce fornire entrambe, per velocizzare ed ottimizzare il processo.

A seconda della combinazione di queste differenti tecniche, le tipologie impiantistiche risultanti possono essere più o meno complesse e sofisticate e, di conseguenza, più o meno onerose dal punto di vista dell'investimento. L'economicità dell'impianto è anche legata all'efficienza della tecnica rigenerativa; studi comparati tra tecniche diverse danno i seguenti valori per l'efficienza di rigenerazione (rapporto tra la quantità di sostanza recuperata e quella adsorbita): sottovuoto a temperatura ambiente = 25%; con circolazione di aria calda a 130°C = 45%; in corrente di vapore a 100°C = 98%. Ciò significa che, a parità di sostanza da adsorbire, la quantità di carbone attivo da utilizzare è inversamente proporzionale all'efficienza di rigenerazione; per esempio utilizzando il vuoto a temperatura ambiente, la quantità di carboni da impiegare dovrà essere quattro volte superiore rispetto a quella che si avrebbe utilizzando il vapore.

Si possono individuare tre tipologie impiantistiche principali, relativamente al processo di rigenerazione dei carboni:

- rigenerazione in corrente di vapore diretto
- rigenerazione con gas inerte o aria calda
- rigenerazione per differenza di pressione.

La scelta impiantistica dipende in gran parte dal tipo di sostanza (o di miscela) da trattare e dalle prestazioni richieste (relativamente al contenimento delle emissioni): per sostanze solubili in acqua è sconsigliabile la rigenerazione in corrente di vapore, mentre per sostanze infiammabili è da escludersi quella con aria calda; per sostanze altobollenti e/o poco volatili è preferibile sfruttare differenze di pressione elevate, mentre per sostanze volatili è sufficiente l'azione meccanica data dalla circolazione del fluido di servizio. L'utilizzo di gas inerte è in ogni caso preferibile in presenza di sostanze infiammabili.

### **15.2.1 Rigenerazione in corrente di vapore diretto (Figura 15.6)**

È di gran lunga la più utilizzata per il suo rendimento e per l'economicità dell'impianto. Il principio operativo si basa sullo strippaggio del solvente adsorbito effettuato da un flusso di vapore diretto (in controcorrente rispetto alla direzione di adsorbimento) e sulla sua successiva condensazione mediante opportuno scambiatore di calore. L'energia termica trasferibile nell'unità di tempo con questa tecnica, è di gran lunga maggiore rispetto a tutte le altre tecniche, poiché, oltre alla cessione di calore sensibile, si ha la contemporanea cessione del calore latente di condensazione del vapore. L'energia meccanica è fornita dal flusso del vapore stesso ed è tanto maggiore quanto maggiore è la sua portata e la sua pressione d'ingresso. Quest'ultima influenza enormemente la tipologia costruttiva dell'impianto in quanto, al di sopra di un certo valore, il contenitore del letto di carboni deve essere soggetto a controlli ed autorizzazioni (ISPESL).

Per contro, il contatto diretto tra vapor d'acqua e solvente provoca, nel caso di sostanze poco solubili, la formazione di discreti quantitativi di "acque di contatto" che devono essere successivamente trattate o smaltite oppure, nel caso di sostanze solubili, la necessità di disporre di un sistema di distillazione per il recupero di solventi e/o di smaltire grandi quantitativi di liquidi classificati come "Pericolosi" dalla vigente normativa sui rifiuti, qualora il recupero non fosse conveniente.

Inoltre, dopo la vaporizzazione, il letto di carboni deve essere sottoposto ad un ciclo di asciugatura, al fine di eliminare il vapor d'acqua residuo e ripristinare le condizioni ottimali per il successivo ciclo di adsorbimento.

Da ultimo, ma non meno importante, è da prendere in considerazione il problema dell'eventuale acidificazione (idrolisi del solvente) e della conseguente possibilità di corrosione delle parti metalliche dell'impianto.

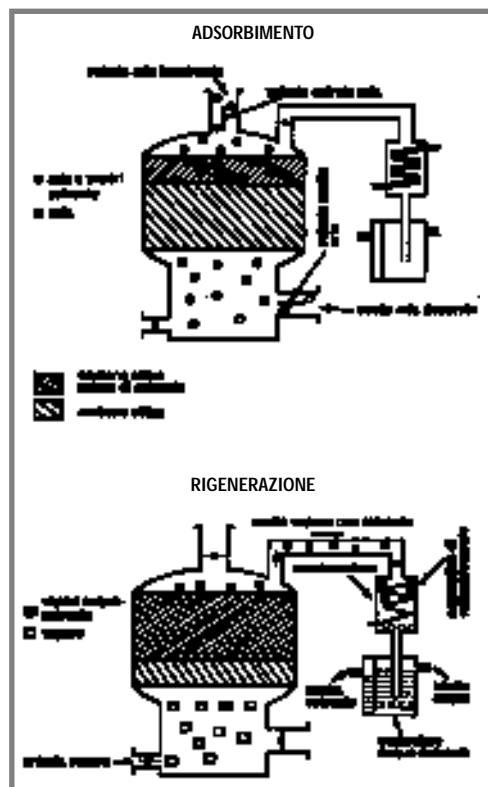


Figura 15.6 – Filtro a carboni attivi con rigenerazione a vapore

### 15.2.2 Rigenerazione con gas inerte o con aria calda (Figura 15.7)

Si basano entrambe sullo stesso principio operativo anche se, nel primo caso, l'impianto risulta più sofisticato e costoso, dovendosi provvedere alla fornitura ed erogazione del gas inerte.

Il principio operativo prevede la circolazione in circuito chiuso, (ed in controcorrente) attraverso il letto di carboni, di un flusso gassoso precedentemente riscaldato alla più alta temperatura compatibile con il solvente da desorbire e la successiva condensazione del solvente stesso a mezzo di un gruppo frigorifero opportuno. In questo caso, al vantaggio di ottenere un condensato praticamente anidro (la completa disidratazione del fluido rigenerante può essere ottenuta mediante adsorbimento con gel di silice o altro materiale equivalente) e riutilizzabile pressoché immediatamente, si contrappone, oltre ad una modesta efficienza di rigenerazione, anche una "omogeneizzazione" della distribuzione del solvente residuo all'interno del letto; a causa di quest'ultimo fenomeno, gli strati di carbone che

dovrebbero essere più "puliti" vengono contaminati dal solvente presente nel flusso di ritorno (la cui concentrazione è data dal valore di saturazione alla temperatura a cui si opera la condensazione del solvente); ciò dà luogo a valori di concentrazione al camino, nel successivo ciclo di adsorbimento, più elevati rispetto ad una rigenerazione senza circuito chiuso.

Il gas inerte come fluido rigenerante viene utilizzato laddove le sostanze da recuperare sono infiammabili od ossidabili, parzialmente o totalmente solubili in acqua.

### 15.2.3 Rigenerazione per differenza di pressione (Figura 15.8)

Sotto questa voce rientrano sia i principi operativi che prevedono l'adsorbimento ad alta pressione con relativa rigenerazione a bassa pressione, sia quelli che prevedono l'adsorbimento a pressione atmosferica con relativa rigenerazione sottovuoto.

In entrambi i casi, tutta la componentistica costituente l'impianto deve essere in grado di sopportare discrete differenze di pressione e devono inoltre essere adottati opportuni dispositivi per la formazione di tali differenze di pressione (pompe per vuoto, compressori, ecc.).

La rigenerazione è solitamente supportata da un riscaldamento indiretto del letto di carboni, mediante scambiatore di calore inserito all'interno dello stesso. Nel caso di rigenerazione sottovuoto, l'impiantistica prevede anche una circolazione di aria ambiente per completare lo stripping del solvente; in questo caso, il motore del flusso d'aria non è un ventilatore, ma la pompa per vuoto.

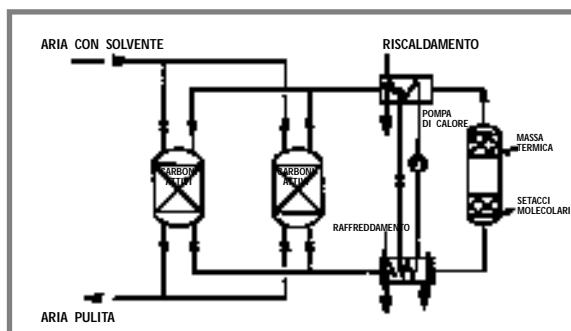


Figura 15.7 - Impianto di adsorbimento a carboni attivi a letto fisso e rigenerazione con azoto, con annessa sezione di disidratazione

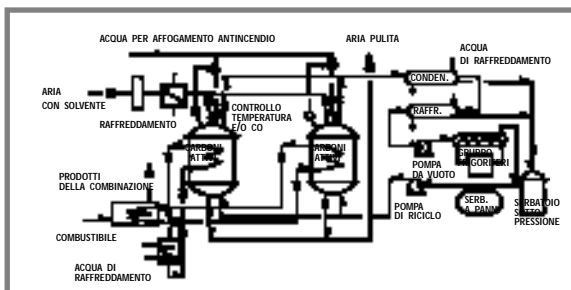


Figura 15.8 - Impianto di adsorbimento a carboni attivi a letto fisso e rigenerazione sotto vuoto con riscaldamento del letto

Dal punto di vista dei pregi e dei difetti può essere valido quanto detto per il caso precedente (condensato anidro, modesta efficienza di desorbimento) salvo il fatto che, in questo caso, manca l'omogeneizzazione del solvente nel letto di carboni, in quanto la rigenerazione non è a circuito chiuso.

Per la condensazione del solvente è necessario un gruppo frigorifero.

Indipendentemente dalla tecnica utilizzata per la rigenerazione del carbone, il processo di desorbimento deve sempre concludersi con una fase di raffreddamento dei carboni atta a ripristinarne le ottimali condizioni operative per il successivo ciclo di adsorbimento.