

## ROTOCONCENTRAZIONE

La rotoconcentrazione è una tecnica di abbattimento che, nella sua versione più comunemente diffusa, unisce in un unico sistema l'applicazione di due differenti principi chimico-fisici: l'adsorbimento e l'ossidazione termica di sostanze organiche in forma gassosa.

Tecnologicamente parlando, il rotoconcentratore nasce dall'esigenza di ridurre i costi di gestione e di investimento per la depurazione di effluenti aeriformi a portata elevata (a partire da 5.000 Nm<sup>3</sup>/h), contenenti basse concentrazioni di VOC (generalmente comprese tra 0,1 e 1 g/m<sup>3</sup>).

La rotoconcentrazione trova la sua migliore applicazione nell'abbattimento di sostanze idrocarburiche, in quanto facilmente degradabili per ossidazione termica. Il concetto di "concentrazione" è relativo al processo nel suo insieme. Quest'ultimo si svolge in due fasi: la prima è relativa all'adsorbimento dei VOC mediante appositi materiali adsorbenti, all'interno dei quali le sostanze si accumulano; la seconda è la termodistruzione dei VOC mediante estrazione (desorbimento) con flusso d'aria ridotto rispetto alla portata di processo. E' questa riduzione della portata d'aria nella seconda fase (con rapporti compresi tra 1:5 e 1:15) che opera la "concentrazione" dei VOC verso il combustore, ottimizzando il processo termico sia in termini di dimensioni dell'impianto che di consumi energetici.

In linea di principio, il termine "concentrazione" è indipendente dal tipo di abbattimento supplementare che segue la fase di desorbimento; il successivo trattamento della portata ridotta infatti, può essere effettuato mediante ossidazione termica, condensazione, biofiltrazione o altro. Tuttavia, le particolari condizioni operative a cui viene applicata e le reali condizioni di processo alle quali operano i rotoconcentratori, hanno selezionato la combustione come la tecnica più indicata ad affiancare l'adsorbimento.

Il materiale adsorbente comunemente utilizzato nei rotoconcentratori (ed il primo ad essere utilizzato in questa applicazione) è la zeolite.

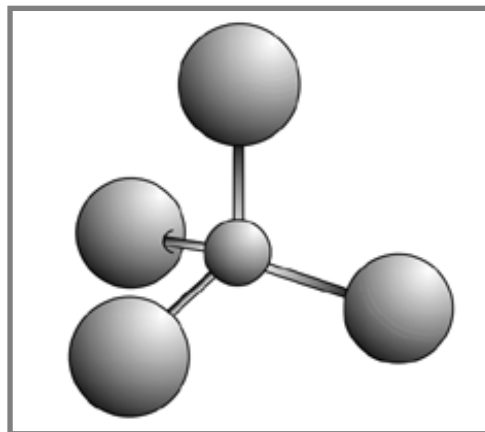
Le zeoliti sono minerali naturali, di forma cristallina, presenti nelle rocce vulcaniche e nelle formazioni sedimentarie di antichi mari. Le zeoliti naturali sono costituite da idrati allumino-silicati di sodio, calcio, potassio o bario. In natura sono presenti una quarantina di zeoliti, ciascuna caratterizzata da una particolare composizione chimica e struttura cristallina.

Le zeoliti naturali sono altamente idrofile e possiedono un'elevata capacità di adsorbire e desorbire l'acqua; caratteristica questa che permette di utilizzarle come efficienti materiali per la deumidificazione. Esse possiedono inoltre buone proprietà di scambio ionico e per questo motivo vengono impiegate sia per l'addolcimento dell'acqua, sia nella formulazione di detersivi e detergenti, sia nei prodotti per la depurazione delle acque di scarico.

Dagli anni settanta, la ricerca applicata ha fornito la possibilità di produrre zeoliti sintetiche per le applicazioni più disparate e, in particolare, per l'abbattimento di VOC presenti in emissioni aeriformi di varia natura; attualmente le zeoliti sinteti-

che sono circa una settantina.

Dal punto di vista strutturale, il cristallo di cui è composta una zeolite può essere suddiviso in due parti, ciascuna con differenti proprietà. La prima parte è l'elemento base (scheletro), costituito da un tetraedro con al centro un atomo di alluminio o di silicio e un atomo di ossigeno per ognuno dei quattro angoli (figura 15.13). Ogni tetraedro è collegato agli altri elementi base, condividendo l'atomo di ossigeno presente negli angoli, formando una struttura tridimensionale in cui tutti i legami chimici sono covalenti e forti. Tale struttura è estremamente stabile, ma anche molto aperta, con spazi di diametro uniforme (pori) la cui forma e dimensione dipende dai tipi di atomi presenti e dal numero di elementi base legati tra loro.



**Figura 15.13 – Elemento base delle zeoliti (tetraedro)**

La seconda parte è costituita da ioni alcalini e molecole d'acqua che occupano i pori ed i canali presenti all'interno della struttura cristallina; ioni e molecole sono debolmente legate allo scheletro e possono essere facilmente rimossi senza compromettere la stabilità del cristallo.

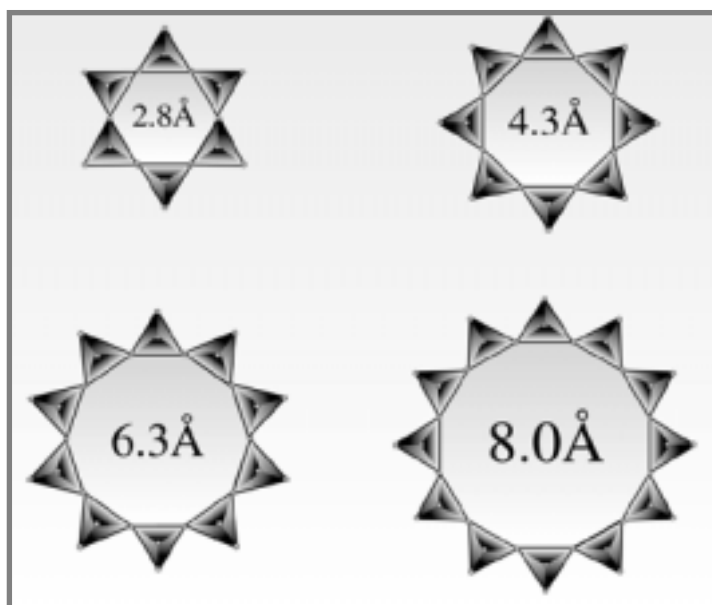
Per quanto riguarda l'abbattimento di VOC, sono state studiate e prodotte particolari zeoliti aventi pronunciate caratteristiche idrofobiche, in grado di fornire capacità di adsorbimento a basse concentrazioni, maggiori rispetto a quelle fornite dai più classici carboni attivi.

Inoltre tali zeoliti, essendo chimicamente inerti, ignifughe e resistenti alla maggior parte degli acidi, possono essere più facilmente impiegate nel trattamento di sostanze infiammabili, così come nel trattamento di sostanze estremamente reattive quali lo stirene, il MEK ed il cicloesano.

Le proprietà idrofobiche di queste zeoliti vengono ottenute rimuovendo dalla struttura cristallina gli atomi di alluminio presenti e sostituendoli con altrettanti atomi di silicio; in questo modo viene impedita la formazione di ioni carichi elettricamente, che tendono a legarsi con le molecole d'acqua presenti nell'aria da trat-

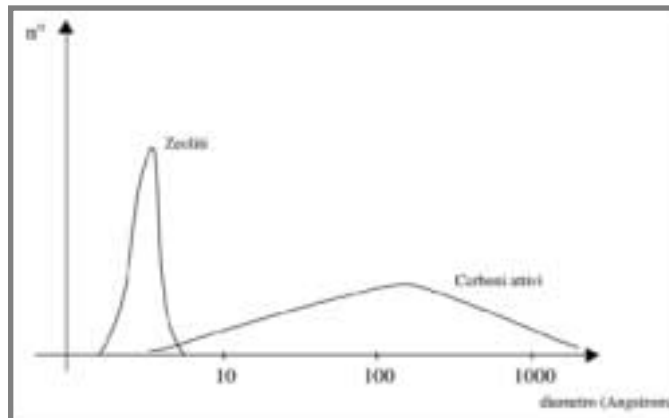
tare. Impedendo all'acqua di fermarsi nei pori, le zeoliti sono così in grado di adsorbire un certo numero di composti organici in via preferenziale. Quali di questi composti possono essere più o meno facilmente trattenuti dalle zeoliti, dipende dalla dimensione dei pori in esse presenti la quale, come si è visto, è legata al numero di tetraedri tra loro connessi; tipicamente ogni poro è formato dall'insieme di 6,8,10 o 12 tetraedri, che formano diametri variabili tra 3 e 8 Angstrom (figura 15.14). Nella tabella II sono riportati i diametri tipici delle molecole di alcune sostanze chimiche.

Le molecole aventi diametro maggiore di 8 Angstrom non vengono adsorbite e "bypassano" il letto filtrante. Anche la polarità delle sostanze è uno dei parametri che influenza il processo di adsorbimento: minore è il momento di dipolo della molecola e maggiore è l'adsorbimento da parte della zeolite. Inoltre, sostanze che hanno bassa solubilità in acqua (quali toluene, benzene, xylene, eccetera) vengono meglio



**Figura 15.14 - Dimensioni dei pori nelle zeoliti**

adsorbite di quelle a maggiore solubilità, come gli alcoli ed i chetoni. Poiché la struttura cristallina delle zeoliti sintetiche definisce con estrema precisione le dimensioni dei pori, che risultano essere essenzialmente uguali, la selettività nei confronti delle sostanze adsorbibili è maggiore rispetto a quella dei carboni attivi; questi ultimi infatti, avendo una differente distribuzione dei pori (cioè nei carboni attivi si ha una co-presenza di pori di differenti dimensioni, da qualche Angstrom a qualche decimo di micron), permettono di adsorbire una maggior varietà di sostanze (figura 15.15). Per contro, le zeoliti risultano meno soggette, rispetto ai carboni, a quei fenomeni di riduzione della capacità adsorbente causata dalle molecole alto-bollenti (di più grosse dimensioni) eventualmente presenti negli



**Figura 15.15 – Differenze nella distribuzione dei pori tra zeoliti e carboni attivi**

effluenti di taluni processi industriali.

In ogni caso, per ridurre la citata selettività e permettere ad un unico prodotto di trattare una più vasta gamma di sostanze contemporaneamente, i produttori utilizzano a volte miscele di zeoliti con differenti dimensioni dei pori.

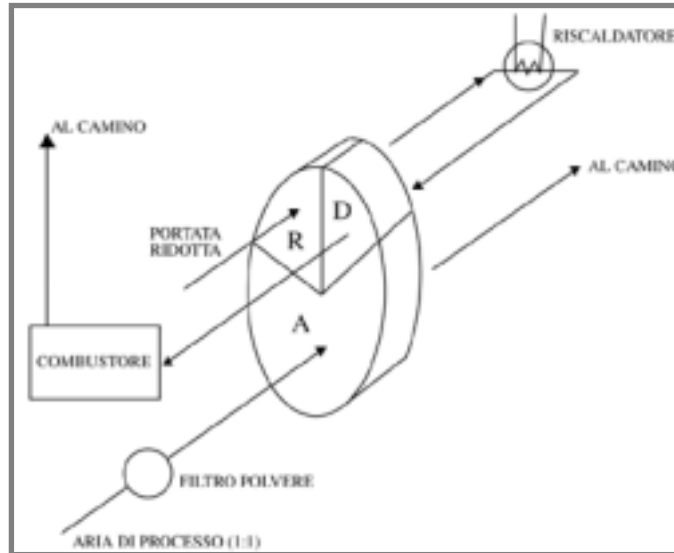
Il processo di adsorbimento delle zeoliti si basa su forze fisiche di debole intensità (forze di Van der Waals) che attraggono le molecole organiche all'interno dei pori; la debole intensità di tali legami permette quindi un facile rilascio dell'adsorbato se un sufficiente apporto di energia viene fornito al letto filtrante; tipicamente questo apporto viene fornito mediante un flusso di aria calda o gas inerte.

Dal punto di vista impiantistico, il cuore di un rotoconcentratore è la cosiddetta "ruota", ovvero quella particolare struttura in fibra ceramica a nido d'ape ("honeycomb") sulla cui superficie viene depositata, per impregnazione, la zeolite; a seconda del tipo di impregnante utilizzato per il fissaggio della zeolite sull'"honeycomb", il potere adsorbente di quest'ultima può essere incrementato, migliorando le prestazioni del sistema.

La ruota è suddivisa in tre settori (chiamati per comodità A = adsorbente, R = in raffreddamento, D = in desorbimento), ciascuno mantenuto ermeticamente separato dagli altri, per evitare possibili interferenze che ne pregiudicherebbero il corretto funzionamento. I migliori collanti utilizzati per le tenute sono anch'essi a base di silicati e/o alluminati (come le zeoliti), ignifughi e chimicamente inerti.

Il tipo di zeolite utilizzato, le dimensioni e le caratteristiche della ruota (in particolare la struttura dell'alveo della struttura di supporto) variano in funzione delle sostanze da abbattere e della portata d'aria da trattare.

In linea generale, il principio di funzionamento di un rotoconcentratore è il seguente (Figura 15.16). L'aria da depurare, prima di raggiungere la ruota, viene preliminarmente filtrata per eliminare il più possibile il particolato in essa presente, che potrebbe ostruire i canali del supporto ceramico; successivamente attraversa il settore A in adsorbimento e viene espulsa, depurata, direttamente in atmosfera, attraverso apposito camino. La ruota è sempre mantenuta in rotazione attorno al pro-



**Figura 15.16 – Schema semplificato del funzionamento di un rotoconcentratore/combustore**

prio asse e la velocità di tale movimento è il parametro che concorre a determinare, assieme alla temperatura dell'effluente ed al tempo di contatto, la capacità operativa e l'efficienza di abbattimento del sistema. A causa del moto rotatorio, il filtro si carica di solvente con un gradiente di concentrazione crescente nella direzione del moto, meno carico in prossimità del settore R e più carico in avvicinamento al settore D; poiché l'aria attraversa il filtro in direzione perpendicolare allo stesso, sarà presente anche un gradiente di concentrazione all'interno dello spessore della ruota, decrescente in direzione del camino. Il primo gradiente descritto è quello che produce il grado di concentrazione dei VOC funzionali al desorbimento; il secondo gradiente è quello che rende conto dell'efficienza di abbattimento del sistema.

La messa a punto del parametro "velocità di rotazione" della ruota è di fondamentale importanza per il raggiungimento delle prestazioni ambientali richieste; maggiore è la velocità di rotazione e minore è il "grado di riempimento" del materiale adsorbente, sia lungo lo spessore della ruota che in direzione del moto rotatorio. L'incremento della velocità di rotazione permette di migliorare l'efficienza di adsorbimento fino ai valori richiesti ma, per contro, produce un minor grado di concentrazione dei VOC all'interno del settore A, che si traduce in un minor carico di sostanze al combustore (nell'unità di tempo) durante il processo di desorbimento, con conseguente proporzionale incremento dei consumi di combustibile ausiliario: ci si allontana, cioè, dalle condizioni di autosostentamento. L'ottimizzazione del processo complessivo, stando il rispetto dei limiti imposti, risulta dunque nel raggiungimento del miglior compromesso tra questi due aspetti tra loro concorrenti.

Contemporaneamente alla fase di adsorbimento in A, il settore R viene raffreddato con aria (in taluni casi può anche essere utilizzato un gas inerte, se le condizioni di progetto lo rendessero necessario) che può essere sia prelevata direttamen-

te dall'ambiente che essere una frazione della stessa aria di processo. In uscita dal settore R l'aria, che ha subito un parziale preriscaldamento asportando il calore del materiale in raffreddamento, attraversa un riscaldatore, dove incrementa la sua temperatura fino al valore di progetto stabilito, al fine di operare il desorbimento dei VOC contenuti nel settore D, sul quale viene successivamente inviata, generalmente in controcorrente rispetto all'adsorbimento.

Poiché la portata d'aria di desorbimento è di gran lunga inferiore a quella di processo (con rapporti che possono variare da 1:5 a 1:15), la concentrazione di VOC in uscita dal settore D è di gran lunga più elevata rispetto a quella in ingresso al settore A; in tali condizioni è quindi possibile effettuare la loro termodistruzione. Il vantaggio deriva dal fatto che si rende possibile dimensionare un impianto di combustione ridotto rispetto a quello necessario per trattare tutta l'aria di processo tal quale (senza concentratore) e che i relativi consumi di combustibile vengono drasticamente ridotti, potendosi operare in condizioni prossime o di completo autosostentamento. Il tipo e le caratteristiche dell'impianto di combustione utilizzabile sull'aria di desorbimento, dipendono dalle condizioni operative e dalle scelte impiantistiche del costruttore. Tutte le problematiche relative a questa parte del sistema sono simili ad un qualunque impianto di termodistruzione.

La scelta di operare il raffreddamento del settore R con aria prelevata dall'ambiente o con una parte della stessa aria di processo, dipende dalle condizioni operative dell'impianto. Utilizzando parte dell'aria di processo prelevata a monte dell'adsorbitore, si presenta il rischio di ridurre la prestazione ambientale del filtro, in quanto l'efficienza di abbattimento operata da parte di un materiale caldo è minore rispetto a quella di un materiale correttamente raffreddato. In questo caso, il dimensionamento del filtro deve necessariamente essere maggiorato per compensare le conseguenze di tale scelta. E' preferibile, al contrario, inviare al settore R parte dell'aria di processo prelevata a valle del settore in adsorbimento, poiché risulta già depurata. L'uso di aria esterna non presenta invece particolari controindicazioni, se non la necessità di un suo pretrattamento per eliminare la presenza di eventuali polveri.

Particolare importanza riveste la prefiltrazione dell'aria di processo, al fine di eliminare le polveri ed il particolato di verniciatura. La prefiltrazione si rende necessaria per evitare ostruzioni ed impaccamenti della ruota, che ne comprometterebbero le prestazioni; in caso di intasamento è sempre possibile, comunque, effettuare il lavaggio della ruota stessa, mediante spruzzo in pressione di soluzioni detergenti apposite.

Un'ultima menzione, che apre una questione ancora in corso di dibattito, va fatta relativamente al controllo delle emissioni in atmosfera.

Un rotoconcentratore è caratterizzato dall'aver due distinte emissioni in atmosfera, con differenti caratteristiche: l'emissione proveniente dal settore della ruota in adsorbimento, contenente la percentuale di VOC non trattenuta dalle zeoliti; l'emissione proveniente dal combustore, contenente i fumi ed i residui dell'ossidazione termica.

Le due emissioni sono caratterizzate, generalmente, dalla presenza di sostanze differenti e da temperature diverse. Ciò implica difficoltà oggettive, da parte dell'ente autorizzatore, a definire quali sostanze debbano essere considerate oggetto di limitazione alle emissioni, volendo definire un unico valore per il sistema nel suo complesso. Ciò a fronte anche del fatto che il campionamento, l'analisi e la verifica del rispetto dei limiti verrebbero effettuati, per le due emissioni, con strumentazione analitica diversa, i cui risultati potrebbero anche non essere confrontabili e correlabili tra loro. La questione è ancora aperta e, dal punto di vista impiantistico, si riflette sulla scelta da parte del costruttore di mantenere differenziati i due camini o di unificarli in un unico scarico atmosferico.

**TABELLA II**  
**Diametri tipici delle molecole di alcune sostanze chimiche**

<b>Sostanza</b>	<b>Diametro (Angstrom)</b>
Ammoniaca	2,6
Acqua	2,7
Formaldeide	3,3
Metano	3,8
Butanolo	4,3
Acetone	4,3
MEK	4,3
Etanolo	4,3
Propano	4,3
Tricloroetilene	5,3
Benzene	5,9
Xylene	5,9
Toluene	5,9
Cicloesano	6,0
Stirene	6,0