

La flottazione

Luigi Fanizzi,
ECOACQUE® - Giovinazzo

Premesse

Il processo di flottazione è utilizzato per la rimozione di solidi sospesi totali (SST) flottabili e non sedimentabili (i.e. industria alimentare), grassi ed oli (emulsioni oleose minerali) dai liquami, oltre che per la separazione e la concentrazione dei fanghi di supero da processi biologici (ispessimento). Nella summenzionata operazione tali sostanze sono separate dal liquido, sia sfruttando la loro bassa densità, sia provocandone il galleggiamento (flottazione), mediante preventiva iniezione di una corrente gassosa (pressurizzazione dell'intera portata in trattamento o, meglio, di una frazione dell'effluente, già trattato, a circa 1,36 ÷ 3,40 atm, alla presenza di una quantità d'aria, sufficiente ad ottenerne la completa saturazione). In entrambi i casi si trae vantaggio dal principio d'Archimede (250 a.C.) per i corpi immersi in un fluido. Quando la miscela pressurizzata "aria/liquido" è introdotta nell'unità di flottazione, a pressione atmosferica, sono rilasciate in soluzione di piccolissime bolle d'aria. I fiocchi di fango, i SST o i globuli d'olio presenti in soluzione sono quindi fatti flottare dalla spinta idrostatica di queste bollicine, che aderiscono dapprima e sono successivamente inglobate negli agglomerati delle particelle. La miscela "aria/solidi" risale poi alla superficie, da dove è rimossa per mezzo di scolmatori superficiali. Il liquido così chiarificato è rimosso dal fondo dell'unità di flottazione (processo inverso a quello della sedimentazione). La flottazione può essere impiegata vantaggiosamente per la separazione d'oli, grassi, fibre e sostanze sospese in genere, preferibilmente a bassa densità; essa quindi si rileva spesso utile nei pretrattamenti dei reflui industriali mentre è adottata assai di rado nella fase primaria dei processi di trattamento depurativi di acque reflue domestiche.

Solubilità e rilascio d'aria

La concentrazione di saturazione dell'aria in un liquido è direttamente proporzionale alla pressione esterna ed inversamente proporzionale alla temperatura; secondo R. Frohlich (1931) e H. A. Pray ed Al. (1952), la solubilità in acqua d'ossigeno ed azoto segue la legge di Henry su un ampio intervallo di valori di pressione:

$$s = k \cdot P \quad (1)$$

ove s rappresenta la solubilità di un gas nel liquido (espressa in moli gas/Kg di liquido), P la pressione della fase gassosa sovrastante (espressa in atmosfere $\Rightarrow 1 \text{ atm} = 760 \text{ mm Hg}$ ossia 101,3 KPa), e k è appunto la costante di Henry alla temperatura data. Secondo Pray ed Al., alla temperatura di 25 °C, il valore di k per l'ossigeno e l'azoto disciolti in acqua è rispettivamente di $1,25 \cdot 10^{-3}$ e $0,62 \cdot 10^{-3}$. È stato inoltre dimostrato che, esiste una relazione lineare tra pressione esterna e solubilità dell'aria per gran parte dei liquami industriali, il coefficiente di proporzionalità varia in funzione della natura dei costituenti del liquame considerato (E. R. Vrablik, 1959). La solubilità dell'aria, in acqua pura, a pressione atmosferica, da 0 °C a 50 °C, è riportata in **Tabella 1**.

E. R. Vrablik pone in rilievo come l'espressione trovata da G. G. Stokes (1845), nella formulazione teorica

della sedimentazione di particelle sferiche entro un fluido in stato di quiete ($N_{Re} < 1$), possa altresì servire a calcolare la velocità ascensionale delle bolle d'aria di diametro non superiore a 100 μm ; i risultati di tali calcolazioni sono diagrammati nella **Figura 1** e sono utili per stabilire il tempo di ritenzione idraulica nel bacino di flottazione.

Lo stesso autore distingue tra il processo ad introduzione d'aria, mediante aerazione meccanica od iniezione d'aria compressa (metodo più grossolano ove il diametro delle bolle si aggira sul millimetro), e quel detto "a svolgimento d'aria disciolta" (DAF *Dissolved Air Flotation*), consistente in una saturazione del liquame con aria a pressione superiore a quell'esistente nella camera di flottazione (metodo più avanzato che consente di ottenere bollicine con diametro inferiore a 100 μm).

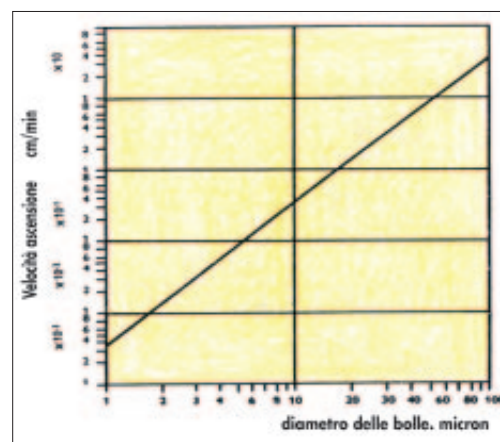


Tabella 1 – Velocità ascensionale in acqua a 20 °C di bolle d'aria, in funzione del loro diametro (da Vrablik, 1960).

TEMPERATURA (°C)	SOLUBILITÀ' IN		DENSITÀ' (g/L)
	Volume (mL/L) (mg/L)	Peso	
0	28,80	37,20	1,293
10	23,50	29,30	1,249
20	20,10	24,30	1,206
30	17,90	20,90	1,166
40	16,40	18,50	1,130
50	15,60	17,00	1,093

Tabella 1 – Solubilità dell'aria in acqua pura ad 1 atmosfera (101,3 KPa), in assenza di vapore acqueo (da W. W. Eckenfelder Jr., 1993)

Il sollevamento delle particelle può avvenire in due modi differenti:

a) per cattura delle bollicine d'aria da parte dei fiocchi in sospensione; in conseguenza di ciò decresce la densità della particella fioccosa d_p (di diametro D , espresso in metri) nel fluido (di densità d espressa in $\text{Kg} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}^4$ e viscosità dinamica μ in $\text{Kg} \cdot \text{s}/\text{m}^2$) e quindi, nell'espressione di Stokes:

$$v_0 = g \cdot (d_p - d) \cdot D^2 / (18 \cdot \mu) \quad (2)$$

con $\mu = \mu_0 / (1 + 0,0337 \cdot T + 0,000221 \cdot T^2) \Rightarrow (\mu_0 = 1,817 \cdot 10^{-4}$ per l'acqua a $T = 0$ °C; Poiseuille, 1830)

il valore della velocità di sedimentazione v_0 (espressa in m/s) diminuisce fino a cambiare di segno (v. ascensionale), quando sono state intrappolate un numero sufficiente di bollicine. A questo punto il fiocco incomincia a risalire.

b) per adesione delle bollicine d'aria alle particelle sospese.

Come mostra la **Figura 2**, quando una bollicina gassosa risalendo incontra una particella solida, aderisce ad essa per effetto delle tensioni interfaciali, secondo un determinato angolo di contatto Θ , formato dalle tangenti alla superficie del solido ed a quella del gas, nel punto di contatto delle due fasi (solido-liquido/gas-liquido).

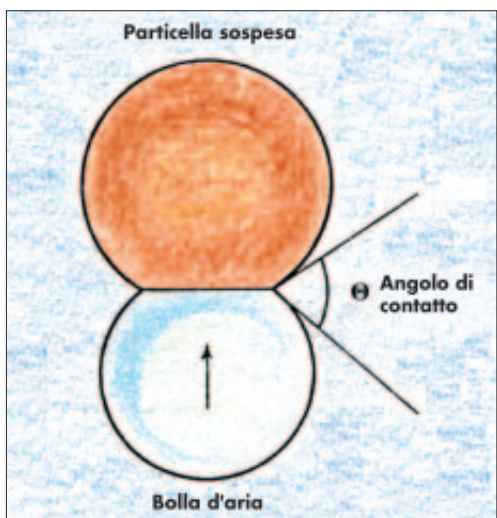


Figura 2 – Adesione d'una bolla d'aria che sale in un liquido, con una particella solida sospesa. Θ è l'angolo di contatto (da G. ed E. Bianucci, 2001).

Risulta evidente che, quanto maggiore è l'angolo Θ , tanto più stabile è la superficie di contatto tra bollicina e particella e, quindi, tanto più efficace il processo di flottazione. Il valore di Θ è legato alle tensioni

interfacciali dall'equazione d'equilibrio di Lippmann-Reinders (1890):

$$T_{GS} = T_{SL} + T_{GL} \cos \Theta \quad (3)$$

da cui:

$$\cos \Theta = (T_{GS} - T_{SL}) / T_{GL} \quad (4)$$

nella quale T indica, appunto, la generica tensione e gli specifici pedici "GS,SL" e "GL" vogliono indicare, rispettivamente: tensione superficiale gas- solido, solido-liquido e gas liquido. Dato che lo scopo della flottazione è di favorire il galleggiamento, occorre ridurre al minimo la superficie di contatto con il liquido; si deve in conseguenza aumentare la superficie d'appoggio dell'aria al granello solido e ciò sarà tanto più realizzato quanto, come detto, maggiore è l'angolo Θ ($\Theta = 13^\circ$ per particelle colloidali in acqua pura). La condizione che si deve realizzare è la seguente:

$$T_{GS} < T_{SL} \cos \Theta < 0; \quad \Theta > \pi/2$$

(condizioni di galleggiamento o flottazione) (5)

La suindicata equazione mostra chiaramente l'importanza che può avere l'aggiunta di reattivi, strutturalmente ed elettrostaticamente, atti a modificare le tensioni interfaciali (\Rightarrow r. apolari a struttura simmetrica, campo di forze uniforme e comportamento idrofilo), ai fini di rendere più efficace il processo.

Va detto che, inizialmente, la bollicina non ha la forza di sollevare la particella; quando però il liquame, saturato con aria, entra nel bacino di flottazione, la pressione diminuisce e la bollicina diviene più grande. Di conseguenza decresce la densità apparente del sistema "particella/bollicina", ed ha inizio il moto ascensionale. La quantità d'aria teoricamente rilasciata in soluzione quando la pressione è ridotta dal valore della camera di pressurizzazione a quello atmosferico, può essere calcolata mediante l'espressione:

$$s = s_a \cdot [(P/P_a) - 1] \quad (6)$$

dove:

s = aria rilasciata a pressione atmosferica per unità di volume a saturazione totale (100 %), in cm^3/L ;
 s_a = saturazione dell'aria a pressio-

ne atmosferica, in cm^3/L ;
 P = pressione assoluta, in atm;
 P_a = pressione atmosferica, in atm.

Dati operazionali

In pratica la quantità d'aria rilasciata dipende dalle condizioni di miscelazione turbolenta nel punto di riduzione della pressione e dal grado di saturazione effettiva ottenuto nel sistema di pressurizzazione. Poiché, a parità d'altri fattori, la solubilità dell'aria nei liquami industriali può essere inferiore a quell'osservabile in acqua pura, è di solito necessario applicare un fattore di correzione all'espressione (3). Se la pressurizzazione è fatta avvenire in un serbatoio con un volume di ritenzione sufficiente, la saturazione effettiva raggiunta sarà, in genere, dell'85 % ca. L'espressione precedente può quindi essere corretta nel modo seguente:

$$s = s_a \cdot [(f \cdot P/P_a) - 1] \quad (7)$$

dove il fattore "f" è la frazione di saturazione (che, in genere, varia da 0,50 a 0,85) raggiunta nel serbatoio di pressurizzazione. Il rendimento di un sistema di pressurizzazione dipende anche dalla disponibilità d'aria sufficiente a far flottare la maggior parte dei SST presenti nel liquame. Una quantità d'aria insufficiente risulterà in una flottazione parziale dei solidi, mentre un dosaggio eccessivo non dà alcun vantaggio rispetto a quello strettamente necessario e potrebbe anzi risultare in una riduzione dell'efficienza del processo stesso. Il rendimento di una unità di flottazione a flusso totale pressurizzato, in termini di qualità dell'effluente e concentrazione di solidi nel surnatante (costituita dal materiale flottato), può essere correlato al rapporto "aria/solidi" utilizzato, che è di solito definito come la massa d'aria rilasciata per unità di massa di solidi nel liquame influente, ovvero (P. Battistoni, 2002):

$$A/S = 1,30 \cdot (s_a/S_a) \cdot [(f \cdot P) - 1] \quad (8)$$

dove:

A/S = rapporto "aria/solidi" in mL/mg ossia in m^3 aria rilasciata/ Kg solidi;
 S_a = concentrazione d'oli e/o solidi sospesi totali nell'influente da trattare [mg/L];
 s_a = solubilità dell'aria in acqua, in volume, alla temperatura di processo [mL/L];
 f = frazione di aria disciolta al-

Tecnologie applicate

P = la saturazione [%];
 pressione relativa d'esercizio [atm];
 $1,30$ = densità dell'aria, per esprimere il rapporto peso su peso;
 $[(f \cdot P) - 1]$ = nella parentesi quadra 1 è la pressione di rilascio, cioè quella atmosferica (1 atm).

N.B.: Per la corrispondente equazione della (8), nel caso di sistemi con ricircolo, basta moltiplicare il parametro "Sa" per il rapporto "(Q/R)". Con Q ed R, rispettivamente, portata da trattare e ricircolo pressurizzato (espressi, entrambe, in m³/d).

Vantaggi

Il rapporto "aria/solidi sospesi" (A/S), è molto importante, infatti, l'aumento di A/S fa crescere la velocità ascensionale e, pertanto migliora l'efficacia del processo (\Rightarrow valori tipici di A/S sono: 0,005 ÷ 0,06 m³/KgSST). Le variabili principali da considerare per il dimensionamento di un processo di flottazione sono la pressione di saturazione (le bollicine d'aria rilasciate a seguito di pressurizzazione effettuata nel range 1,36 atm ÷ 3,40 atm, variano in dimensioni, rispettivamente, da 30 a 120 μ m), la concentrazione di solidi nell'influente ed il tempo di ritenzione nella vasca (le concentrazioni di solidi nell'effluente e nel surnatante, rispettivamente diminuiscono ed aumentano all'aumentare del tempo di ritenzione idraulica dell'unità). Quando il processo di flottazione è utilizzato essenzialmente per la chiarificazione di un liquame, è generalmente considerato adeguato un periodo di ritenzione, mediamente, di circa 25 minuti per ottenere separazione e concentrazione accettabili dei solidi presenti.

La velocità di risalita comunemente ottenute in pratica (a pressione media di ca. 2,50 Kg/cm²) e, quindi, utilizzate per il dimensionamento del processo variano, in genere, tra 0,5 m³/(m²·h) e 9,50 m³/(m²·h) (con i tempi di ritenzione più lunghi per l'ispessimento di fanghi di supero biologici \Rightarrow l'aera quivi richiesta, dipende dalla concentrazione dei solidi, dal grado d'ispessimento e dal carico solido). Con l'intento di ridurre i costi di gestione della flottazione applicata alle acque reflue, si può sostituire al compressore una pom-

TIPO DI PROCESSO	DIAMETRO PARTICELLE RIMOSSE (μ m)	LIMITI OPERATIVI PROCESSUALI
Separatore API	150	Necessità di un'ampia superficie e lavori edili (opere d'asservimento).
Centrifugazione	100	Efficienza di separazione limitata, necessità di un motore, elevata manutenzione.
Separatore a pacchi lamellari (TPS)	60	Necessità di un'ampia superficie e lavori edili (opere d'asservimento).
Separatore a piastre corrugate	45 + 50	Rischio d'intasamento delle piastre da parte dei solidi sospesi e possibile danneggiamento delle piastre plastiche da parte dei solventi.
Flottazione ad aria dispersa	50	Solo trattamento secondario, consumo energetico medio alto; può essere necessario l'uso d'additivi chimici.
Flottazione ad aria disciolta (DAF)	35	Solo trattamento secondario, meccanica più complessa, consumo energetico alto; può essere necessario l'uso d'additivi chimici.
Filtri granulari	25 + 30	Solo trattamento secondario; può essere necessario l'uso d'additivi chimici. E' richiesto il controlavaggio e quindi l'ulteriore trattamento del concentrato.
Filtri a coalescenza	15	Solo trattamento secondario, è richiesta una preventiva perfetta rimozione di tutti i SST. Consumo energetico medio.
Membrane (UF)	< 5	Solo trattamento secondario, elevati costi d'investimento e gestione, perfetta rimozione di tutti i SST, pulizia delle membrane. Consumo energetico elevato.

Tabella 2 – Tecnologie convenzionali di separazione d'oli dall'acqua (mod. S. Sibilla, 1998).

pa di pressurizzazione dotata di dispositivo d'ossigenazione del tipo Venturi (G. B. Odobez, 1990). I fenomeni di cavitazione così indotti determinano una forte aspirazione d'aria attraverso il tubo Venturi collegato con l'atmosfera, con la conseguente saturazione del liquido con l'aria (Figura 3). La Tabella 2, mostra i rendimenti delle tecnologie di flottazione (ad aria dispersa ed ad aria disciolta) con altre tecnologie convenzionali per la separazione d'oli dall'acqua. H. Laudy (1990), ritiene che la flottazione presenti sensibili vantaggi rispetto alla sedimentazione. Infatti, in quest'ultima si può fare poco o nulla per aumentare il valore di v_0 nella formula di Stokes (2). Nella flottazione è, invece, possibile quadruplicare o quintuplicare tale parametro (beninteso con segno negativo, perché qui indica la velocità ascensionale, e non discensionale come nella sedimentazione),

riducendo fortemente la densità apparente d_p grazie all'azione, come già visto, delle bollicine d'aria, e conseguendo i seguenti vantaggi:

- più rapida separazione tra solido e liquido;
- capacità di separare anche piccole particelle difficilmente sedimentabili.

Sostituendo il sedimentatore con un ergonomico flottatore, la diminuzione dei costi d'investimento, può compensare i costi di gestione rendendo l'impianto di flottazione, competitivo rispetto alla sedimentazione convenzionale.

Note Bibliografiche

[1] V. Sarno e L. Federiconi (1983): "Il trattamento delle acque per usi vari", Ed. U. Hoepli, Milano;

[2] Mauro Sanna (1982): "Antinquinamento nelle industrie alimentari", Ed. AEB, Brescia;

[3] Giovanni ed Esther Ribaldone Bianucci (1992): "Il trattamento delle acque residue industriali ed agricole", Ed. U. Hoepli, Milano;

[4] Aurelio Misiti (1994): "Fondamenti di ingegneria ambientale", Ed. NIS, Roma;

[5] W. Wesley Eckenfelder, Jr. (2000): "Industrial water pollution control", Third Edition, McGraw-Hill International Edition, Singapore;

[6] Giovanni ed Esther Ribaldone Bianucci (2001): "Impianti di depurazione delle acque residue", Ed. U. Hoepli, Milano;

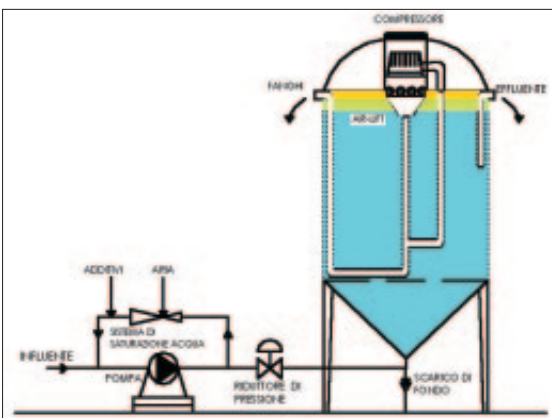
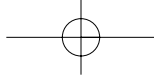


Figura 3 - Schema di impianto di flottazione (ECOACQUE®, 2002)



Fanghi



TECNOLOGIE APPLICATE

L'AMBIENTE 5/02

